

斜面流動解析におけるマイクロメカニクス

名古屋工業大学 正会員 ○前田健一
 名古屋工業大学 内藤直人
 名古屋工業大学 学生会員 奥村勇太

1. はじめに

最近の気象変動に伴う集中豪雨の増加によって、斜面崩壊が多発し各地で被害が報告されている。崩壊後の流動において、砂礫が多く混じると流れ全体の挙動と内部の挙動の関連（マイクロメカニクス）が重要^{例えば1)}となる。一方、地下水や降雨の浸透によって崩壊に至る過程においても、雨量強度の違いによる浸潤モードの変化²⁾、斜面内でのパイピング⁴⁾、細かな粒子の移動による内部侵食³⁾の影響が報告されている。また、パイピングにおいては、均質な単一層では発生し難く、透水性が異なる互層の場合に発生しやすいことが明らかになっている⁷⁾。これらの現象において、粒子レベルと土塊レベル、層レベルの異なるスケール間の現象の相互作用が影響する（特に進行性の破壊において重要）とが考えられる。

そこで、本報告では、まず、浸透によって粒子が移動する内部侵食について整理した。さらに、内部侵食を考慮した解析手法を用いて、高水的作用を受ける天然ダムの変状に及ぼすが土堤の粘着力と基盤層の層構造の影響について検討した。

2. 内部侵食：粒子レベル

内部侵食特性の検討を図-1 に示す定水位透水実験機と様々な粒度分布形状を持つ試料を用いて行った。実験機の詳細は既報に詳しい⁹⁾。粒度分布形状は、直線分布(st)、粗粒分が多い不安定とされる分布(sp)、細かい粒子が多い分布(cv)、フラクタル分布(次元FD=1.40)となっている。図-2 には、図-1 に示す粒度分布形状について動水勾配を0.3から10.0まで段階載荷した際の累積流出率の経時変化を示す。図より、動水勾配の上昇に伴って流出率が増加している。また、粒度分布形状の影響についてみると、直線粒度st、cv1を下限值として、分布形状が下に凸な粒度spシリーズほど流出量が多く、その差は最大で100倍以上となっている。また、下に凸な粒度形状の試料は、細粒分の流出によってさらに下に凸になることで流出が加速すると考えられる。

また、個別要素法(DEMと略す)を用いて図-1と同じ粒度分布形状の供試体を再現し、粒度分布形状によって内部侵食量が異なる機構をミクロな間隙構造特性に着目して調べた(図-3)。流出の多い粒度分布形状ほど間隙径が大きく、その間隙径の連続性が高いことが定量的に示された⁹⁾。さらに、本報告では、粒子間接触構造としての配位数に着目した。配位数は1粒子あたりの接触粒子数で表現され、その値が大きいほど粒子骨格構造の安定性や粒子の拘束度合いが高いことを意味する。

図-4 には、内部侵食に対して不安定とされ流出率の高いsp2の粒度分布形状について、粒径毎の平均配位数 N_{cave} と配位数の頻度分布からその傾向を検討した。配位数の頻度分布を併せて示す。加えて、図中には任意の粒子における釣り合い条件から導かれる接触構造が不安定と判定される配位数のしき

い値($N_{cave} < 4.0$: 三次元の場合)を示している。図より、細かい粒径ほど平均配位数が少なく、配位数の頻度分布からも0.150mm以下のほとんどの粒子が不安定な(浸透によって流出しやすい)状態にあるといえる。

図-5 に不安定化な粒径(流出する粒子径)を評価する従来から方法であるKennyの基準と平均配位数から判断した粒径範囲、実際に実験で得られた流出率を各試料について整理した結果を示す。粒径がそろった試料cv4とcv5では、内部侵食が発生しない粒度分布形状のため除いている。図より、Kennyの基準では内部侵食による細粒子の流出を見逃す場合が多いが、ミクロな状態量に基づく指標である平均配位数の場合では、広い範囲で流出粒径を評価できているといえる。さらに、内部侵食時の粒子濃度(粒子質量/粒子一水の混合体質量)と粒度分布形状の関係を調べた。粒度分布形状は、全体の形状を評価するとともに、曲線の上下への凹凸形状を表現できるように以下のようにした。

$$U_{c50}' = \frac{D_{50}^2}{D_{15}D_{85}} \quad (1)$$

図-7 に粒度分布形状ごとの修正曲率係数と粒子濃度の関係を示す。図より、 $U_{c50}' = 3.0$ を境界に安定・不安定な粒度分布形状の濃度が算出される。粒度分布形状と流量を計測することで、その流出濃度から内部侵食の進行を推定することが可能となる。

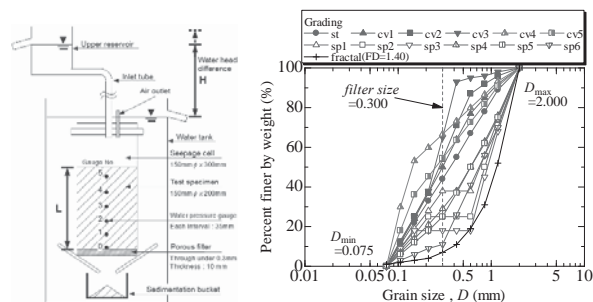


図-1 内部侵食実験概略と用いた試料の粒度分布形状

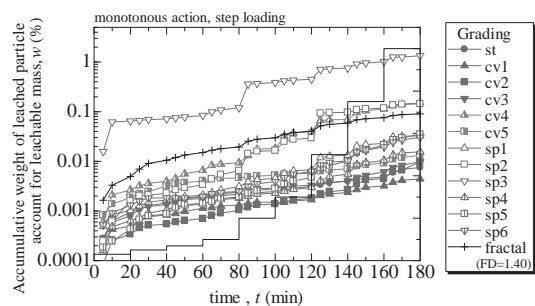
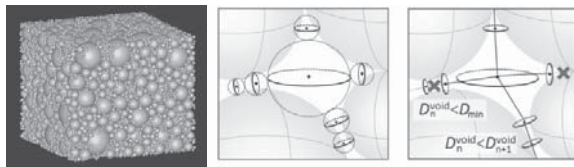


図-2 内部侵食に及ぼす粒度分布形状の影響



(a)供試体の様子 (b)間隙径の算出 (c)間隙の連続性

図-3 DEMを用いた間隙構造と粒子の接触構造

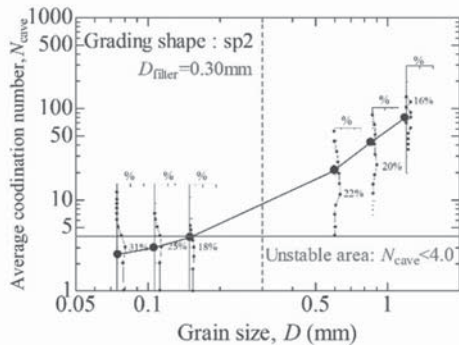


図-4 粒径毎の平均配位数と粒子の安定性

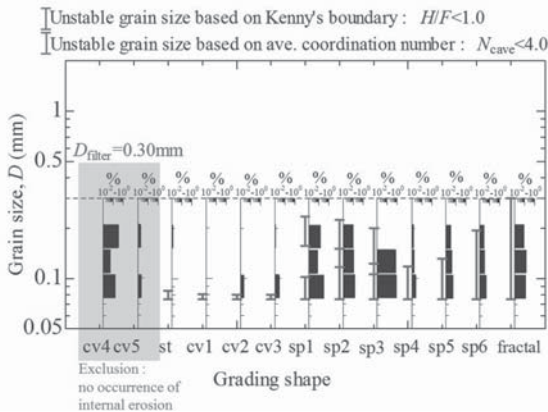


図-5 Kennyの基準と平均配位数から不安定とされる粒径と粒径毎の流出量の比較

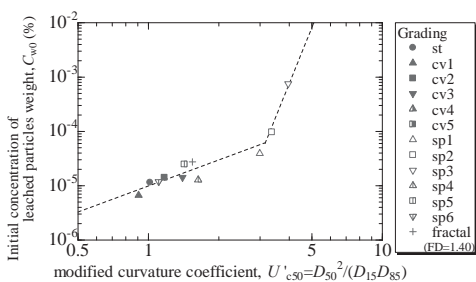


図-6 内部侵食時の粒子濃度と試料の修正曲率係数

3. 侵食に起因する変状：層構造レベル

土-水-空気三相連成および内部侵食による土の変状（土塊レベル）を表現可能な粒子法（SPH法）⁸⁾を用いた計算結果を図-7に示す。単に破壊パターンの分類をするのではなく、透水性基盤～堤体～外力を一体で整理し、どのような条件でどのような破壊形態を示しやすいのかを示すことが重要となる。図は、堤体の粘着力を支配する堤体の強度定数（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）とパイピングの進行性を大きく支配する

基礎地盤の層構造についてマトリックス状に解析した結果を示している。

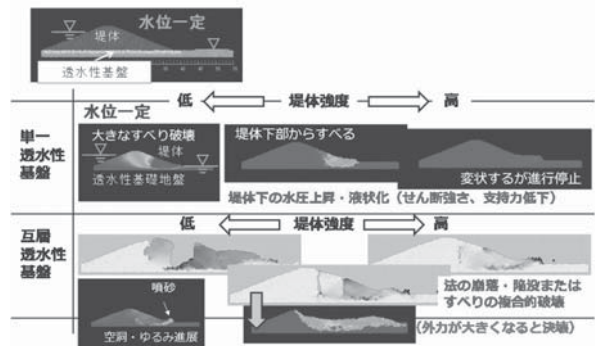


図-7 内部侵食を伴う土構造の要素の局所変形・破壊の伝播と構造部分レベルの相互作用による堤体の進行性破壊

基盤層が単一層と互層になっている場合で破壊形態と変状程度が異なることが分かる。単一層では層内でのパイピングが発生するというより、層内の間隙水圧が上昇することで堤体の変状が生じることを確認している。したがって、この場合には、法尻付近の支持力低下に起因するすべり破壊が生じやすい。一方で、互層（上層：細砂層、下層：砂礫層）になっている場合、パイピングが生じやすく、基盤層の侵食が生じ、それによって堤体が崩落・陥没のような変状が生じている。これは実験結果の傾向と一致している。

また、基盤層が同条件であっても、堤体の強度（粘着力）が異なるとすべりや亀裂の発生箇所や範囲が異なり被災程度が異なることが分かる。つまり、堤防の弱部が堤体と基盤層の特性の組み合わせによって、被災形態・低度が変わり、弱部が変化することになる。また、変状が始まる箇所と最終的に大きく変状が生じる箇所も異なる可能性がある。

このような解析による数値実験によって均質でない斜面構造や外力が異なる際の破壊モードや破壊の発生のキーとなる弱点箇所を抽出可能にすることが重要と考える。

参考文献：

1)前田ら：個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス、砂防学会誌、Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011., 2) 齊藤ら：豪雨と急激な水位上昇が作用する堤防の透気遮水シートおよびドレーンによる補強効果、ジオシンセティクス論文集第29巻、pp.115-120, 2014., 3)Zhang W. and Maeda, K.: Numerical simulations of slope and levee failure under heavy rainfall using the three-phase SPH model, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2, I_483-I_494, 2014., 4)土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会：平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害調査報告書, 2014., 5)近藤ら：粒度分布形状に着目した粒状体の内部侵食のマイクロメカニクス、第50回地盤工学研究発表会, pp.977-978, 2015., 6)前田, 近藤：粒度分布形状に起因する内部侵食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響, 土木学会論文集 A2, Vol.70, No.2, pp.507-517, 2014., 7)齊藤ら：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, pp.349-354, 2015., 8)前田ら：内部侵食による土の不安定化を考慮した河川堤防の浸透破壊解析法の提案, 河川技術論文集, Vol.19, pp.39-44, 2013.