

名古屋工業大学 学生会員 ○奥村勇太
 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 齊藤 啓
 名古屋工業大学 Zhang Weijie

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。破壊が大規模な深層崩壊や崩壊事象の大部分を占めるといわれている表層崩壊、その堆積、さらに堆積土砂の崩壊・流動変形といった一連のプロセスの中には、その機構は未解明な部分も多い。一方、複次的に形成される天然ダムが高水的作用を受ける際の安定性評価も重要な課題である。本報告では、崩壊後の土砂堆積が、豪雨や高い水位の継続作用の下での進行性破壊に着目し、実験や数値解析を試み、提案する数値解析が対象とする現象を表現可能であることを報告する。

2. 解析方法

解析はSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) を用いた。図1に示すような、運動する計算粒子素片 (半径 h) を用いた Lagrange 的手法である。連続体を計算粒子素片とし、物理量は素片中心と共に移動する。連続体解析であるので、計算素片には状態方程式 (流体相) や構成式 (固相) が必要となる。言い換えれば、より良い構成則が開発されればそれが利用可能である。ここで、細粒分除去による内部浸食による変形は構成則で表現し、土塊の動きはSPHで計算することになる。また、ダルシー則を仮定し三相の連成 (図2) を表現した^{1)~3)}。

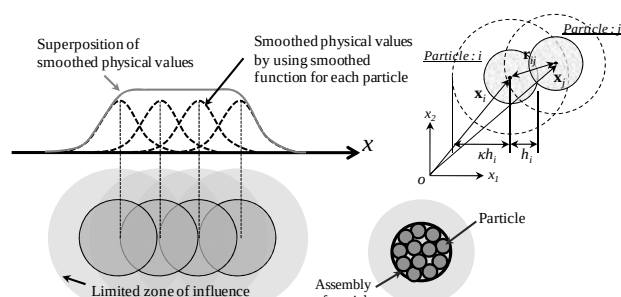


図1 SPH法の計算粒子素片と物理量の表現方法

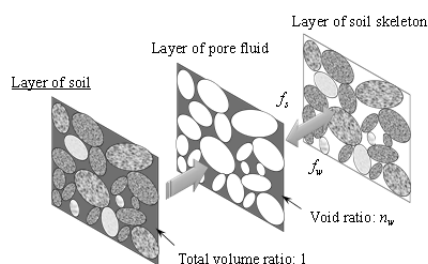
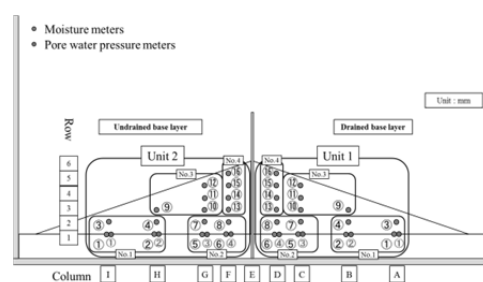


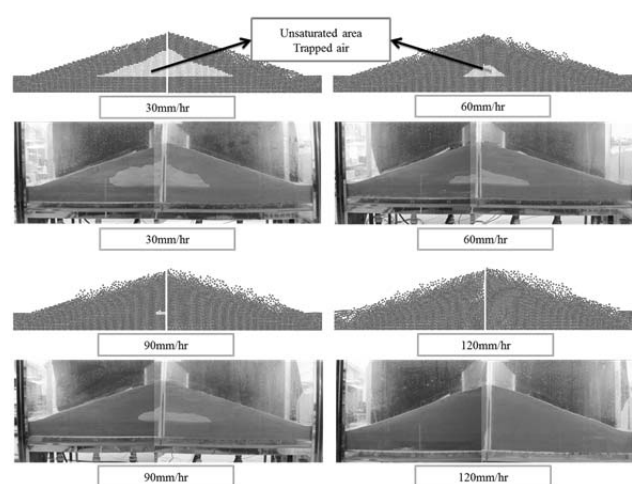
図2 連成解析のための固相と流体相の重ね合わせ

3. 解析結果：豪雨浸透における三相相互作用の重要性

図3は、左右で基盤層の排水・排気条件が異なる場合の法面の模型実験装置 (豊浦砂) の概要である。図のセンサー位置点 C5, G5 に着目する。図4は実験結果と解析結果を比較したものである。上図は浸潤挙動を比較したものであり、解析が妥当な結果が得られていることがわかる。また、図中の表は、実験と解析において、体積含水率が一定となる時刻 (点 C5) の比較であり、定量的にも妥当な結果が得られているといえる。さらに、図5は体積含水率の時刻歴における土-水の二相解析と土-水-空気の三相解析の違いを示しており、三相で圧縮空気塊を形成する方が、浸潤が遅れていることが分かる。



(un-drain base) (drain base)
 図3 検証用降雨浸透模型実験



Unit:min				
	30 m/hr	60 mm/hr	90 mm/hr	120 mm/hr
模型実験	72	65	45	18
SPH解析	70	67	48	22

図4 基盤の排水・排気条件が異なる降雨浸潤解析: (上図) 挙動解析; (下表)

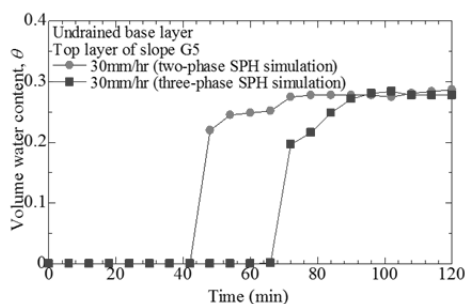


図5 土-水の二相解析と土-水-空気の三相解析の違い

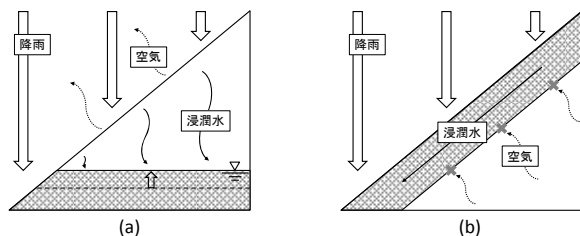


図6 降雨浸潤及び間隙空気挙動: (a)透水性の大きい・降雨強度が小さい, (b)透水性が小さい・降雨強度が大きい

以上の解析結果および既報の成果から、豪雨による急速な浸透作用で、間隙空気圧の上昇で表層のみに流れが集中し、表層崩壊が誘発されやすくなると考えられる⁴⁾ (図6)。

4. 解析結果：豪雨浸透における三相相互作用の重要性

土堤や天然ダムに高水が作用し浸透破壊が発生する条件として、土堤内の浸透によるすべり破壊と透水性基盤層を有する場合(図7)に生じる進行的なパイピング破壊がある。さらに、高水位が高く、継続時間が長い場合には、これらの複合破壊が生じる。ここでは、破壊規模が大きく、崩壊後に流動に繋がりやすいパイピング破壊について解析した。

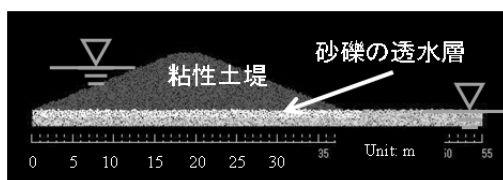


図7 水位一定下の透水性基盤を有する解析断面

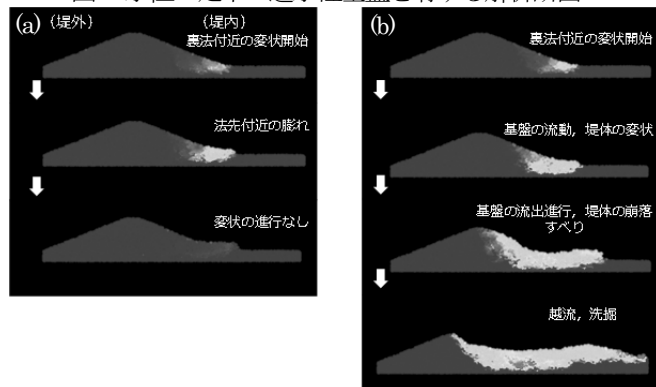


図8 水位一定下の透水性基盤を有する堤防の変状解析; (a) 透水層が均質の場合(漏水がきれいな場合), (b) 透水層が互層の場合(漏水が濁る場合)のパイピング破壊

図8(a),(b)は、それぞれ、透水層が均質の場合と透水層が互層の場合の結果を示している。図(a)では堤内側の法先付近で基盤に膨れ、ゆるみがみられるが変形は進行せず、崩壊には至っていない。一方、図(b)では、堤内側の法先付近で基盤に膨れ、ゆるみにとどまらず、基盤層の流出が進行し、堤体が崩落するような変形、大きなすべりのような流動、最後には越流によって破堤という、進行的なパイピング破壊が生じている。この場合は、漏水とともに基盤層の土も流され濁った漏水となる。

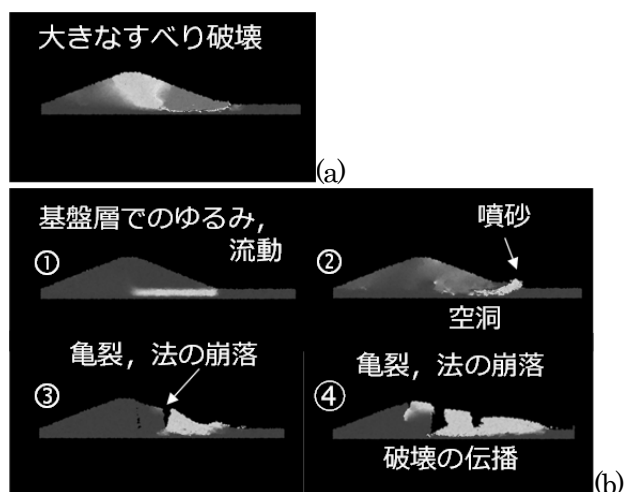


図9 基盤漏水事例において堤体強度特性が異なる場合の堤防の破壊挙動; (a) 堤体の粘着力が小さい場合(流動化), (b) 堤体の粘着力が大きい場合(非流動化)

図9(a),(b)は、それぞれ、図8(b)の場合において、堤体土の粘着力が小さい場合と大きい場合の破壊プロセスの違いを示している。堤体土の粘着力が高い方が、堤体土のパイピングの進行が明瞭であるとともに、空洞化によって法が崩落するように破壊している。透水性基盤の層構造、透水係数、堤体土の強度特性によって破壊形態が異なることが明らかになったとともに、提案する解析手法ではこのような一連の進行的破壊を表現することが可能と言える。

謝辞：

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金挑戦的萌芽研究 25630201 の助成を受けており、深謝を表します。

参考文献

- 1) Maeda, K., Sakai, H. and Sakai, M. : Development of seepage failure analysis method of ground with Smoothed Particle Hydrodynamics, Journal of Structural and Earthquake Engineering, JSCE, Division A, Vol.23, No.2, pp.307-319, 2006.
- 2) 前田健一, 今瀬達也, 伊藤嘉彦, 齊藤啓: 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.
- 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) 齊藤啓, 前田健一, 梶尾孝之, 松田達也: 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.