

集中豪雨浸透時の間隙空気と内部侵食が天然ダムの安定性におよぼす影響

名古屋工業大学 正会員 ○前田 健一
 名古屋工業大学 学生会員 齊藤 啓, 奥村勇太

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加に伴い斜面崩壊が多発し各地で被害が報告されている。斜面崩壊の大部分を表層崩壊が占めるといわれているが、その機構は未解明な部分も多い。一方、複次的に生じる天然ダムの形成も深刻な問題であり、その安定性も重要な課題である。ダム形成後に、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た結果から、安定性の検討課題を整理する。

2. 豪雨浸透における三相相互作用の重要性について

土構造物や斜面の安定性において、水位上昇による有効応力低下に伴うすべり破壊については従来から検討されてきた。しかし、最近では、降雨浸透において降雨強度・波形や土質、初期含水比の影響が再考され、間隙空気の噴出、それに伴う土の劣化や構造体としての弱部の形成など間隙空気のダイナミクスが着目されている¹⁾²⁾。図-1は透水係数、粒度が異なる砂質土で形成された堤体に降雨を作用させた結果である。浸潤線が下部の不透水境界から上昇する場合もあれば (a)、堤体の上部、側面からの浸潤面に堤体内部の間隙空気が補足され、浸潤を妨げる場合があることがわかる (b)~(c)。この捉われた間隙空気圧の上昇と浮力の作用により、堤体内部から急速に噴出する場合、堤体に損傷を与えることから、土-水-空気の三相連成を考慮した破壊制御が重要であるといえる。

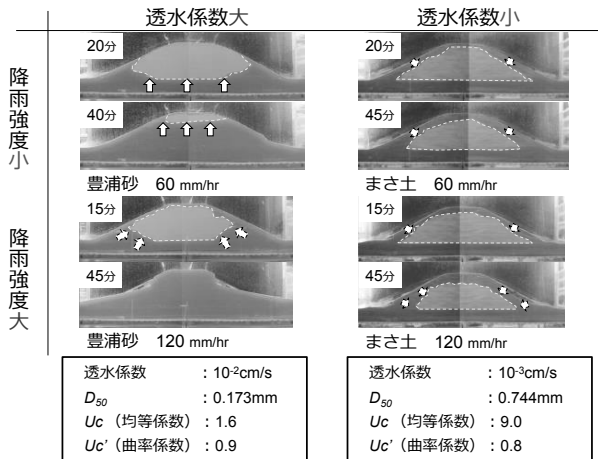


図-1 間隙空気の封入現象：土質と降雨強度の影響

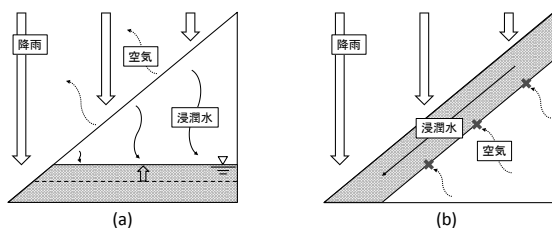


図-2 降雨浸透及び間隙空気挙動：(a)透水性の大きい・降雨強度が小さい、(b)透水性が小さい・降雨強度が大きい

また、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 (図-1 の 102mm/hr ; 図-2 の概説図)。

3. 堤体底部の透水層における浸透時間の重要性について

2012年7月、九州北部豪雨により矢部川の河川堤防が破堤した。その際、5時間にも及ぶ高水位が維持された後、堤体下に広がる砂層を通じパイピングを引き起こしたとされている。このように、堤体底部や基盤面に透水性の高い層を有するような河川堤防は少なくない。近年の豪雨の連続発生を鑑みると、天然ダムにおいても同様の機構で崩壊が発生するかどうか、について検討が必要と考えられる。

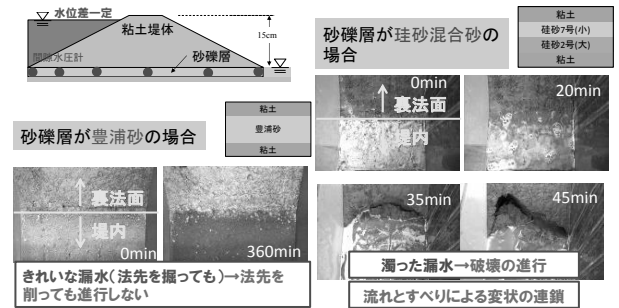


図-3 内部侵食による進行性破壊：(a)漏水がきれいな場合、(b)漏水が濁った場合

図-3は、堤体に比べ堤体底部に透水性の高い層を有する場合に、高水位作用時の堤体の応答を観察した様子を示している。透水層を粒度のそろった豊浦砂とした場合 (a) は、法先から漏水するものの、漏水に濁りはなく、破堤には至っていない。一方、比較的粒径の粗い珪砂2号と細かな7号で透水層を作成した場合、法先からは濁った漏水がみられ、すべりが法先から天端に伝播して決壊に至った。

上記の変状には、パイピングを伴った進行性の浸透破壊が生じるとされ、透水力によって細粒が流出する内部侵食がその一因である。実際に、洪水時に堤防からの漏水が濁っていない箇所では破堤には至らなかったものの、濁水となった箇所では破堤したとの報告もある。また、下流側で発生した侵食が上流方向に伝播したり、侵食を受けた上部の堤体部分にすべり破壊が生じたりすることで、堤体の変状が進行することが考えられる。

以上のような、侵食の進行とすべり破壊の両方を含むような進行性破壊の条件を検討し、その変状の予測、条件の特定ができるようにすることが重要である。

4. 内部侵食を考慮した浸透破壊解析結果および考察

本論文では、粒子レベルのミクロスケールからの内部侵食と土要素の損傷³⁾⁴⁾、境界値問題としての土構造物の変状と破壊が連鎖することで、パイピングなどの進行性破壊を

もたらず、という観点でこれらの一連のプロセスを数値計算で表現する試みを行った。上記のような現象を計算するには、連続したメッシュを有する有限要素法 (FEM) や計算要素が小さな DEM を用いた方法では、要求に応えることは難しい。そこで、ミクロとマクロのスケールでの現象に関する考察とモデル化、スケール間の連結³⁾などを考慮しながら、上記の要求に応えるための新しい計算フレームを提案した。概略図を図4に示す(紙面上の都合から詳細は既報^{6) 8)}にゆずる)。

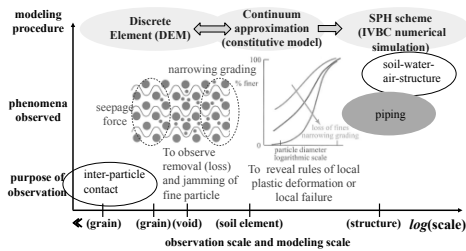


図4 内部侵食を伴う堤体の進行性破壊を表現するために提案する数値計算フレーム

内部侵食時の細粒分の流出による粒度変化がもたらす粒状体の変形・破壊挙動は、DEMで単純にモデル化し数値実験した結果に基づいて、内部侵食時の土の応力ひずみ関係を記述する構成則^{3,4)}を開発している。これを粒子法の一つである SPH 法解析に導入^{6,8)}することで、内部侵食を伴う大変形・破壊シミュレーションを行った。

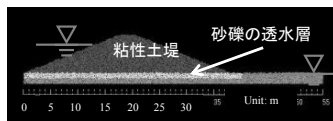


図5 水位一定下における堤体の下層の浸透解析断面

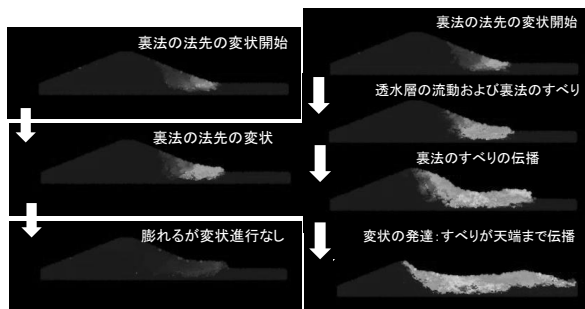


図6 水位一定下における堤体の下層の浸透による堤体の変状・決壊解析例: (左) 内部侵食無し: 漏水がきれいなるままの場合: 決壊なし; (右) 内部侵食有り (漏水が濁る場合): 決壊後、越流・洗掘破壊に至る。

図5,6は、図3の実験を模擬した解析を行った結果である。図6は、底部に透水層を有する粘性土の堤体が、高水位に保たれた条件下でどのように変状するかを解析した結果を示しており、それぞれ、内部侵食有りとなしの場合について比較している。上流水の流れは下部の透水性層に集中する。内部侵食無しの場合(左図)では、堤内側の法先が膨

れゆるむが崩壊には至っていない。内部侵食有りの場合(右図)には、法先の局所的な変形が進み、ゆるみ領域も見られる。さらに、すべりが法先から天端に伝播し、最終的には透水性の基盤が削られ堤体全体が決壊に至っている。進行性破壊が再現されている。本結果における進行性破壊の解釈を図7にまとめる。

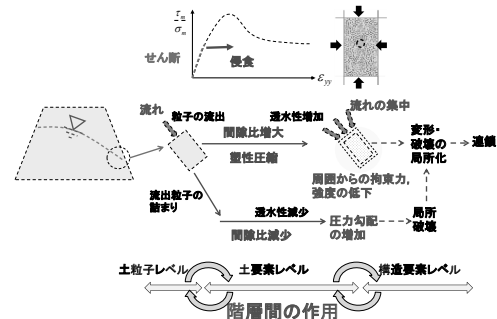


図7 内部侵食を伴う土構造の要素の局所変形・破壊の伝播と各スケールレベルの相互作用による堤体の進行性破壊のイメージ

5. おわりに

浸透による進行性破壊については、マクロな浸透作用(水位差)が一定条件であっても、ミクロレベルでの細粒分の移動・目詰まり、土要素レベルでの粒度変化に伴う土の変化、塑性変形の進行による土塊の不安定化、ゆるみ領域や内部侵食領域の透水性の変化、マクロな土構造物の変状とすべりといった、異なるスケール間での変化と不安定化が連鎖していると考えられる。破壊を予測し、制御するには、各スケールの階層間でのメカニクスの理解と簡潔化、それらを反映したモニタリングの実施、データの集積の提案などが必要とおもわれる。

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) 前田健一・柴田賢・馬場干児・榎尾孝之・今瀬達也: 豪雨と気泡の影響を考慮した河川堤防における透気遮水シートの設置効果, *ジオシンセティック論文集*, Vol. 25, pp.107-111, 2010., 2) 前田健一・柴田賢・馬場干児・小林剛・榎尾孝之・尾畑功: 模擬堤防土槽実験によるアプローチの確認と数値解析, *河川技術論文集*, Vol.18, pp.305-310, 2012., 3) Wood, D. M. and Maeda, K.: *Acta Geotechnica*, 3 (1), pp.3-14, 2008., 4) Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E.: *Geotechnique*, 60(6), pp.447-457, 2010., 5) Maeda, K. et al.: *Granular Matter*, Vol.12, No.5, pp.499-505., 6) K. Maeda, H. Sakai and M.Sakai: 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., 7) Maeda, K. and Sakai, H.: *ASCE, Geoenvironmental Engineering and Geotechnics (GSP 204)*, pp.261-266, 2010., 8) 前田健一, 今瀬達也, 伊藤嘉, 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.