

透水性基盤層を有する堤体内の細粒分移動によるパイピング危険度の上昇

島根大学学術研究院 正会員 ○佐藤 真理

1. はじめに

河川堤体では、透水性基盤層の上に透水性の低い層がある時に、パイピング事例が数多く報告されている。既往の研究により、パイピングが発生しないような日常的浸透により、二層の境界で細粒分移動が発生することが模型実験により示され²⁾、さらに細粒分移動による粒度変化とそれに伴う透水性の変化を考慮した浸透流解析³⁾が行われた。その結果境界層付近で水が難透水層から透水層側に抜けていくような条件で目詰まりが発生し、局所動水勾配の上昇が起きることが示された。本研究では、上述の現象を実スケールの河川堤体に適用した定常浸透流解析を行い、細粒分移動によるパイピング危険性の増加可能性を示した。

2. 境界層の細粒分移動による透水性減少範囲の推定

実スケール河川堤体を模擬して、図1（図3も同じモデル）に示すように堤高8m、のり勾配1:2、天端幅4mとして上流側下流側に各30mの長さを取り二次元堤体モデルを作成した。透水層は深さ1.5mから地表方向に幅0.5mの層を設置したが、途中で拡大している箇所として、図2に示すように長さ4mの範囲で市最大1m幅に拡大している箇所を設定した。透水層以外は比較的透水性が低い難透水層とした。また模型実験と同様に透水層に水が流れ込む状態を模擬するために、堤体上流側に3m長さの露出部を設置した。与えた浸透特性は表1に示す。解析領域は図1・2に示すように領域I～IIIと三種類に分類される。詳細は次章で述べる。

不飽和浸透特性はVan Genuchtenモデルを用いた。定常的な状態での浸透状況を模擬するため、水位2mの堤内水位を与え、右端下流側に透水層高さ1.5mまでの浸出面を境界条件として設定して定常飽和不飽和浸透解析を行った（図1、ケースNE_2）。VGFlow2Dを用いて、スカイライン法により繰り返し回数200回、収束判定誤差1.0E-3で計算をした。支配方程式はRichards式である。節点数は6200点、要素数は6112個であり、メッシュ幅は0.050m～0.400mであるが、透水層と法尻パイピング危険箇所を中心として細かく分割した。

浸透流解析の結果、透水層拡大領域での流速ベクトルは図3に示すようになり、透水層拡大部左側において難透水層から透水層側に入り込む流れが算出された。該当箇所に既往の研究を参考に厚さ0.1mで、難透水層に細粒分移動による目詰まりと透水性低下が発生した層（以下細粒分移動層とする）があると想定した。

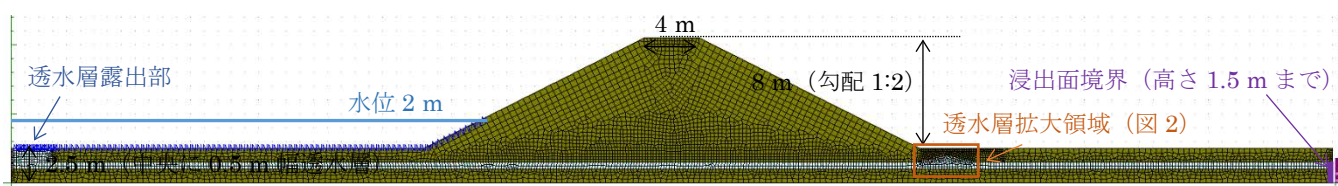
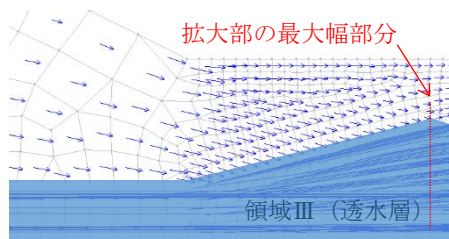
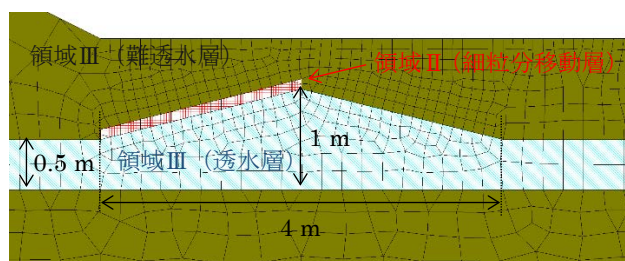


図1 NE_2 河川堤体モデルと境界条件

表1 浸透特性一覧

領域区分		飽和透水係数 (m/s, 等方的)			不飽和浸透特性 (VGモデル, 全ケース同じ条件)			
領域	色	NE_2	NE_6	E_6	α	n	残留体積含水率 θ_r	飽和体積含水率 θ_s
I		1.81E-06	1.81E-06	1.81E-06	1.65	3.22	0.426	0.697
II		1.81E-06	1.81E-06	9.05E-07	1.65	3.22	0.426	0.697
III		3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	1.02	2.13	0.199	0.517



左：図2 透水層拡大領域と細粒分移動層

右：図3 NE_2 透水層拡大領域流速ベクトル

3. パイピングを想定した浸透流解析結果

Sakamoto・Sato³⁾は、佐藤²⁾の実験結果により測定された地盤内の細粒分移動による粒度分布の変化から、Creager式により局所的な透水係数の変化を算出

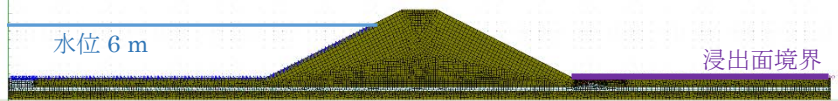


図4 NE_6・E_6 河川堤体モデルと境界条件

した。本研究はその結果を参考として、前章により設定した細粒分移動層（領域II）において、飽和透水係数が細粒分移動を考慮していない状態から1/2にxy方向とも等方的に減少したとして、浸透特性を与えた。不飽和浸透特性は既往の研究と同様に変化をさせなかった。それ以外の層（透水層は領域III、その他の堤体部分は領域I）は前章と同じ条件の浸透特性を与えた（表1）。パイピング発生時の状態を模擬するため、前章と異なり水位の高い状態として図4のように6mの水位を与え、下流側の地盤表層を浸出面境界とした。細粒分移動層を設定せず、周囲の難透水層と同様としたケース（NE_6）と設定したケース（E_6）での違いを検証した。

解析結果として、法尻と透水層拡大領域付近の鉛直動水勾配の分布を示した結果を図5に示す。上向きを正としている。図5より、NE_6は、法尻付近から透水層拡大領域までの幅広いパイピングの危険箇所があり、透水層の拡大領域の影響は少ないことが示された。その一方で、E_6では、拡大部の最大幅部分真上の難透水層において、高い動水勾配が計算された。動水勾配のそれぞれのケースでの最大値とその地点を比較すると図のようになる。最大値をとる箇所は透水層最大幅部分の真上となりどちらのケースも同じであるが、細粒分移動を考慮すると、動水勾配の最大値は考慮しない場合に比べて1.4倍程度となることがわかり、平時の細粒分移動がパイピングに危険側に作用する可能性が示唆された。

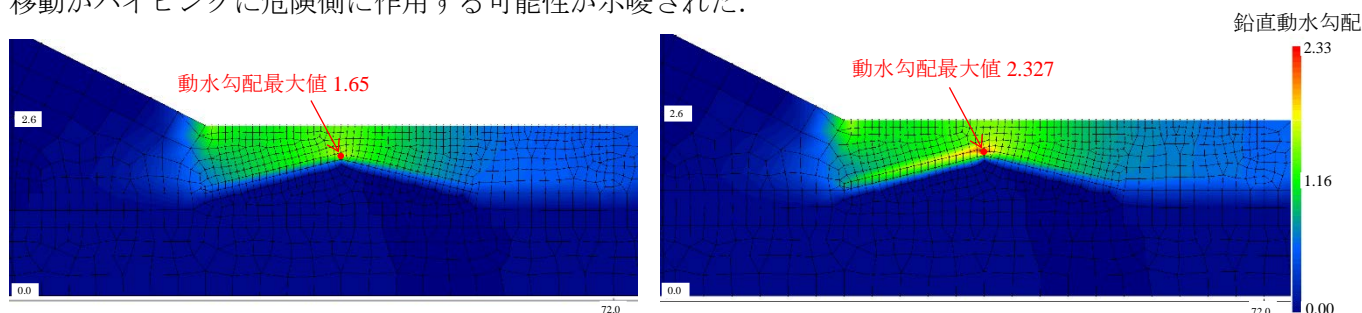


図5 堤体法尻付近鉛直動水勾配分布と最大値 左：NE_6 右：E_6

4. 結論と今後の課題

本研究では、既往の研究で得られた結果をもとに堤体内の観測が困難な細粒分移動を考慮して、浸透流解析を行った。その結果細粒分移動による境界付近での目詰まりとそれに伴う透水性の低下がある場合、局所的に透水層拡大部付近で動水勾配が上昇し、パイピングの発生危険度が増すことが示された。ただし、今後は細粒分移動層厚さや形成条件など、より詳細な検討が必要であると考えられる。また細粒分移動は本研究で扱ったような目詰まりだけでなく、単純に細粒分が減少して透水性が増加するようなケースも考えられる。本研究ではわかりやすい例として透水層の拡大領域を扱ったが、他の条件でも浸透条件が同様の形になれば、似たような現象が引き起こされる可能性が高い。いずれにせよ、本研究で扱ったような小規模な細粒分移動は実地盤では計測が困難な現象でもあるため、実スケールでどのように条件を設定するかということには課題が残る。

参考文献 1) (公社)地盤工学会, 河川堤防の調査・検討から維持管理まで, 丸善出版, 2020. 2) 佐藤真理, 表層細粒土層を有する地盤への長期浸透による内部侵食の影響, 第56回地盤工学研究発表会講演集, 716-717, 2021. 3) Sakamoto, N. and Sato, M., Seepage flow analysis considering the effects of internal erosion due to long-term seepage into ground comprising surface impermeable ground, SEE PATTAYA, 98-103, Thailand, 2021.

キーワード 浸透, 堤体, パイピング, 内部侵食, 目詰まり

連絡先 〒690-8504 島根県松江市西川津町1060 島根大学生物資源科学部 佐藤真理 TEL085-232-6555