

河川堤防における透水性の空間的不均一化が浸透挙動におよぼす影響

Effects of the Spatial heterogeneity of Permeability on Seepage Behavior within Levees

吉田 英昭 河井 克之 中島 晃司
Hideaki Yoshida Katsuyuki Kawai Koji Nakashima

1. はじめに

近年、短時間強雨や総雨量数百 mm を超えるような大雨が頻発している。平成 30 年 7 月豪雨では、高梁川や小田川など、中国地方の複数の河川で堤防が決壊した。氾濫により多くの家屋浸水被害等が発生し、甚大な被害をおよぼした¹⁾。水害による被害を最小限にするために、堤防の決壊を防ぐあるいは決壊に要する時間を長くすることで避難する時間を確保し、人的被害を最小限にすることが必要不可欠である。堤防決壊にはいくつかの要因が考えられるが、多くは越水だとされている。しかし、現地調査では、決壊箇所の堤体や基礎地盤周辺含め流出してしまうことから、浸透が主要因であっても越水と判断されるケースもあるため、浸透破壊に対して考慮する必要性がある²⁾。浸透破壊が発生する一つの要因として、降雨や地下水等の浸透を長年受け続け、堤体内の細粒分が流出する内部浸食と呼ばれる現象が発生することで、堤体が劣化し盛土構造物の安定性が失われることが挙げられる³⁾。内部浸食に関する既往の研究では、細粒分の流失に伴う間隙の増加によって堤体土の強度変形特性が大きく変わること⁴⁾や粒子骨格が耐力を失うことによる土自体の不安定化⁵⁾が明らかになっている。しかし、浸透による堤体構成土の粒度変化にともなう力学挙動と構造物の安定性の関係は十分に明らかにされていない。また、降雨や河川といった浸透条件を考慮して体系的に整理した研究事例も少なく、特にこれら浸透条件が同時に作用した際の力学的安定性については不明である。本研究では、河川堤防を模擬した盛土模型に対して透水試験を行い、異なる浸透や繰返しの透水履歴が、盛土構成土の透水係数や粒度分布の変化におよぼす影響を評価する。さらに、内部浸食による透水係数の空間的ばらつきを想定した浸透解析を行い、浸透挙動に及ぼす影響を評価することを目的とする。

2. 模型実験の概要

2.1 実験装置

模型実験における模型盛土および計測装置の概要を図-1 に示す。内寸 900mm×500mm×300mm のアクリル製土槽内に、基礎地盤 100mm、勾配 1:2 の法面を有する高さ 110mm の模型盛土を作製し、これに対して、堤体内に流水する形で浸透実験を行った。また、実験後に図中の 1~8 の箇所からサンプリングし、サンプリング試料に対して透水試験と粒度試験を行った。盛土模型内には、浸透による水位変動を確認するために、基礎地盤と堤体の間に合計 4 つの水圧計を設置し、盛土模型の上部には堤体の変形を測定するために変位計レーザーを設置した。さらに、堤体の経時変化を観察するためにカメラを設置して堤体の側面を俯瞰した。実験装置全景を写真-1 に示す。

2.2 実験条件

実験試料は、まさ土($e_{\min}=0.51$ 、 $e_{\max}=0.95$ 、 $\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$ 、 $k=1.54\times 10^{-3}\text{cm/s}$)であり、粒度分布を図-2 に示す。実験試料は、内部侵食の影響を確認するため、Kenney and Lau の内部安定指標⁶⁾を基に、内部不安定が生じやすい材料を選定した。

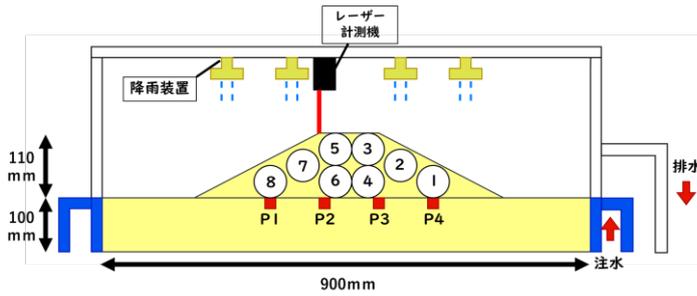


図-1 実験装置概要



写真-1 実験装置全景

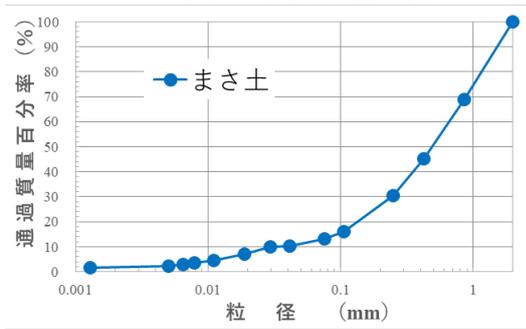


図-2 まさ土の粒度分布

表-1 浸透条件

	想定	水位条件	透水時間
Case1	河川増水	外水位90%	6時間
Case2	豪雨	降雨強度65mm/hr	
Case3	河川増水 & 豪雨	外水位90% & 降雨強度65mm/hr	
Case4	繰り返し履歴	①外水位90%②基礎地盤を交互に	

盛土模型の作製方法は、以下のとおりである。はじめに、物性試験の結果に基づいて、まさ土を4層分相対密度60%となる量を準備した。次に、含水比10%となるように蒸留水を加え、均等になるよう混ぜ合わせた。そのあと、準備した1層あたりの混合土を土槽に入れ、5cm(最上層は6cm)となるように突き固め、4層分繰り返した。最後に天端幅100mmを残し、法勾配1:2となるように法面を削り完成した。次に、模型実験の浸透条件(Case)を表-1に示す。Case1では、河川増水を想定して外水位90%の水位を、Case2では、豪雨を想定して65mm/hrの散水を与えた。Case3では、河川の増水と豪雨の同時作用を想定し、Case1と2の透水条件を同時に行った。Case4では、繰り返し履歴による経年劣化を想定し、外水位90%の水位を1時間与えたのち、基礎地盤まで水位を低下させて1時間放置する行程を計3回行った。いずれのケースも、実験開始前に基礎地盤を飽和させるため、水位を10cmに保ち、12時間以上放置した。なお、Case2・3では透水係数が降雨強度を下回っていたため、表層流が発生した。しかし、観察の結果、表層流による堤体の形状変化や浸食は確認されなかった。したがって、表層流発生は堤体の安定性に対して問題ないと考えられる。

3. 河川盛土模型に対する浸透試験の実験結果と考察

3.1 透水試験

透水試験結果を図-3に示す。図中には堤体を台形で、サンプリング位置の上段(橙点)・下段(青点)で示し、さらに、透水開始から1時間後の浸潤面(青線)、実験前の透水係数(赤線)も併せて示している。浸潤面は、一部堤体よりも大きい値が示されたが、これは、水位と降雨の同時に計測することが困難だったこと、水圧計の不備が考えられる。これにより、実際的水位よりも高い水圧が計測された可能性がある。

実験結果を見ると、Case1では、実験前の透水係数よりも全体的に増加している。Case2では、実験前の透水係数と比べ、下段と上段の一部が著しく減少し、その他の箇所では、実験前の値とほぼ同じ値となっている。Case3では、実験前の透水係数と比べ、表法面側は増加して、裏法面側は減少している。Case4では、実験前の透水係数と比べ、表法面側の一部が増加、それ以外の箇所においては減少している。Case1~4を比較して、異なる浸透条件や繰り返し履歴が透水係数に及ぼす影響を考察する。はじめに、Case1とCase2の比較から、河川増水では表法面と裏法面で、降雨では上段と下段で透水係数の変化に大きな違いがみられた。これは、浸透の大きさと浸透方向に応じた細粒分の移動によるものであると考えられる。次に、Case1とCase2およびCase3を比較すると、Case3では、表法面側では、増水の浸透により細粒分が堤体中央に移動したことで透水係数が上昇し、裏法面側では、降雨の浸透により細粒分が法面下部側に移動したことで透水係数が減少していると考えられる。つまり、増水と降雨が同時に作用すると、両方の特徴も持った透水係数

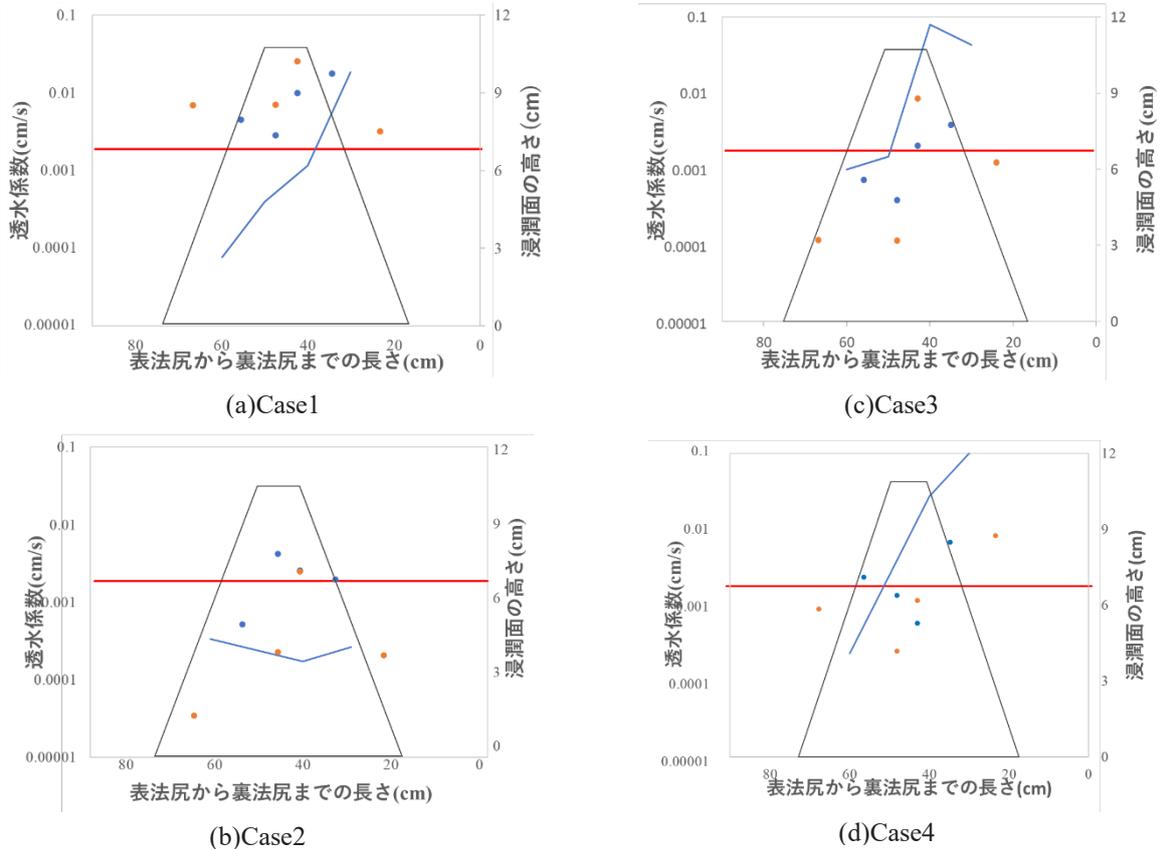


図-3 透水試験結果

の変化が生じる可能性があることが示唆される。最後に、Case1 と Case4 の比較から、Case4 の方が実験前よりも全体的に透水係数が減少しており、空間的なばらつきも大きい。これは、繰り返しの透水によって、次第に透水係数が減少していったと考えられる。つまり、1 回よりも複数回の浸透履歴を受けることで、透水係数が大きく変化することが示唆される。

3.2 粒度試験

粒度試験結果を図-4 に示す。Case1 では、全体的に粗粒分が減少して、細粒分は増加している。Case2 の粗粒分については、サンプリング試料 1 を除けば、いずれも実験前と同じような分布になり、細粒分はすべての箇所において増加している。Case3 では、全体的に粗粒分が減少し、細粒分は増加している。Case4 では、粗粒分は裏法面側が減少し、細粒分は増加している。Case1～4 を比較して、異なる浸透条件や繰り返し履歴が粒度分布に及ぼす影響を考察していく。はじめに、Case1 と Case2 の比較から、サンプリング場所で考えると、Case1 は、表法面側(1～4)の方が粗粒分の減少量が大きく、細粒分の増加も多い。一方、裏法面側(5～8)では、粗粒分の減少量は少なく、細粒分の増加も少ない。Case2 では、全体的に粗粒分の変化はわずかで、細粒分は、Case1 よりも増加量が小さい。以上より、河川増水は、粗粒分を移動させるほどの浸透力があり、降雨は粗粒分を動かすほどの浸透力はないが、細粒分を動かす力はあると考えられる。しかし、実際の河川堤防では、降雨が堤体に浸透する量は少ないため、土粒子を動かす力も弱く、細粒分が堤体下部まで流れていくとは考えづらい。そのため、本実験結果は、模型の寸法が関係している可能性が高いと考えられる。次に、Case1 と Case2 および Case3 の比較から、Case3 では、表法面側は河川増水の浸透によって細粒分が堤体中央に移動するが、増水により浸潤面が形成しきっているため、降雨の影響を受けることは少ない。一方、裏法面側は河川増水の浸透による影響が少なく、降雨の浸透により堤体上部から堤体下部に細粒分が移動したと考えられる。最後に、Case1 と Case4 の比較から、Case1 では堤体中央に細粒分が移動したが、Case4 においては、細粒分が繰り返しの浸透によりさらに裏法面側に移動している。そのため、複数回の浸透によって、1 回では堤体中央部分までしか動かなかった細粒分が裏法面

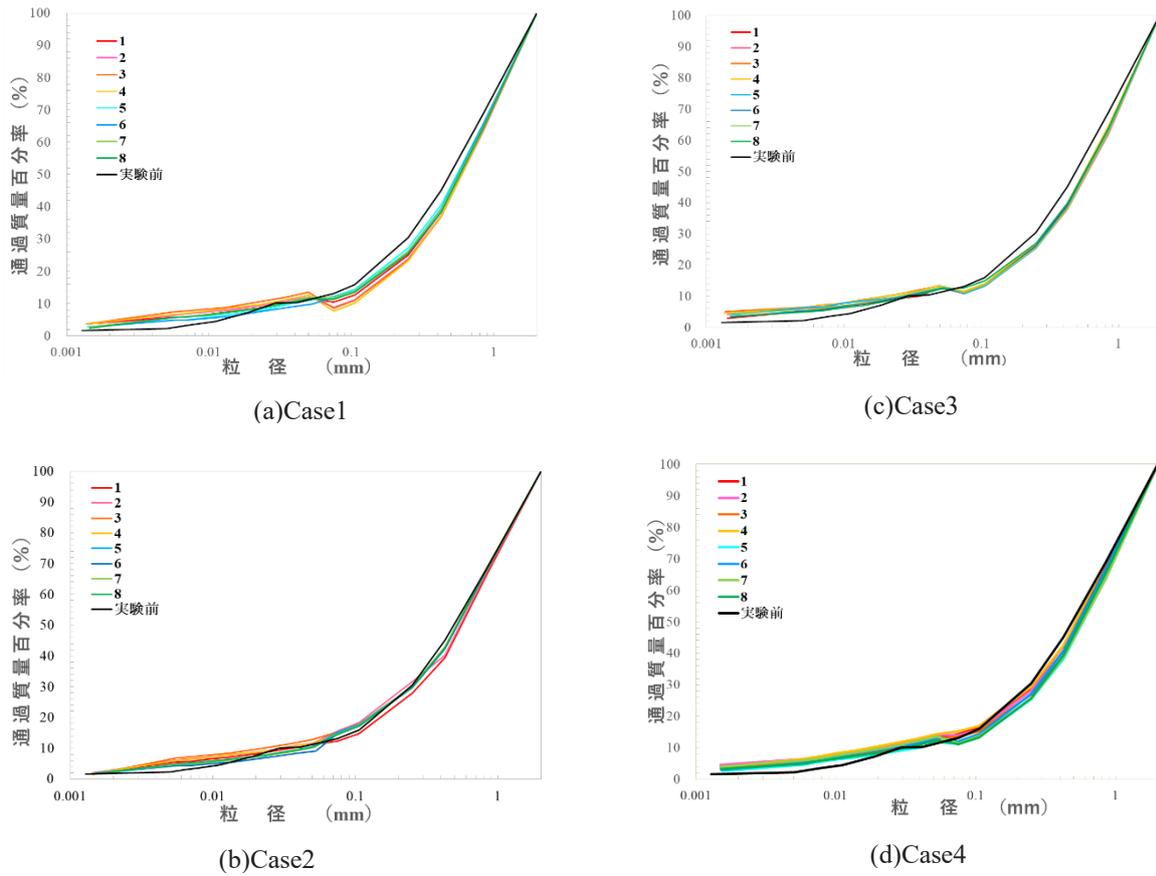


図-4 粒度試験結果

まで移動したと考えられる。

3.3 考察

透水係数および粒度分布の結果をみると、浸透にともなう細粒分の増加により、透水係数が減少することが明らかとなった。また、1回よりも複数回にわたって繰返しの浸透履歴を受けることで透水係数が減少し、細粒分の移動距離が増加することが確認された。以上より、繰返しによる浸透条件の方が、内部浸食を引き起こしやすいことが示唆された。

4. 透水係数の空間的ばらつきを考慮した浸透解析

4.1 解析条件

本研究では、土/水/空気連成有限要素解析コード DACSAR-MP⁷⁾ を用いて浸透解析を行った。本研究で使用した数理モデルの概要は以下の通りである。

不飽和土の構成モデルは、大野ら⁸⁾が提案したモデルを用いた。有効応力は以下の式で表される。

$$\sigma' = \sigma_{net} + p_s \mathbf{1} = \sigma_{net} + S_e s \mathbf{1} \tag{4-1}$$

$$\sigma_{net} = \sigma^T - p_a \mathbf{1} \tag{4-2}$$

$$s = p_a - p_w \tag{4-3}$$

σ' は有効応力テンソル、 σ_{net} は正味応力テンソル、 p_s は吸引応力、 $\mathbf{1}$ は2次単位テンソル、 s は吸引、 σ^T は全応力テンソル、 p_w は間隙水圧である。式(1-1)で表される有効応力は、飽和条件下では Terzaghi の有効応力に還元される。降伏関数は以下の式で定義される：

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \frac{\ln p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (4-4)$$

$$\zeta = \exp[(1 - S_e)^{n_s} \ln a] \quad (4-5)$$

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (4-6)$$

$$p' = \frac{1}{3} \sigma' : \mathbf{1} \quad (4-7)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_D : \sigma_D} \quad (4-8)$$

$$\sigma_D = \sigma' - p' \mathbf{1} \quad (4-9)$$

ここで、 ε_v^p は塑性体積ひずみ、 M は q/p' で表される臨界応力比、 D はダイレイタンシー係数、 a および n_s は不飽和状態から生じる降伏応力の増加パラメーター、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、 σ_D は偏差応力テンソル、 e_0 は降伏点における空隙比、 p'_{sat} は完全飽和状態における降伏応力である。

このモデルは、相差曲線間の幾何学的類似性を利用してヒステリシスを表現することが可能であり、Sugii and Uno⁹⁾によって提案された以下のロジスティック曲線式を適用している。

$$\frac{S_r - S_{ra}}{S_{rf} - S_{ra}} = \frac{1}{1 + \exp\left(A^a + B^a \log_e \frac{S}{S_0}\right)} \quad (4-10)$$

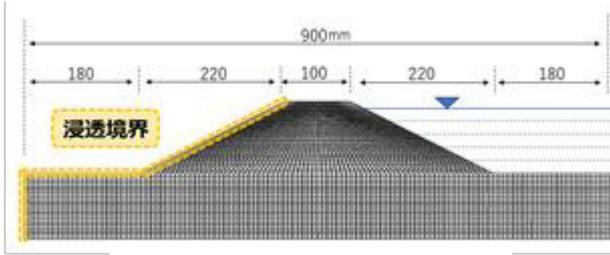
ここで、 S_{ra} は $s \rightarrow 0$ における飽和の収束度、 S_{rf} は $s \rightarrow 0$ における飽和度、 A^a, B^a は形状パラメーター、 S_0 は単位吸引量である。

次に、解析条件について説明する。解析では、透水係数 k_x は、水平方向の透水性を、透水係数 k_y は水平方向の透水性を表し、それぞれの方向に応じた透水係数を設定した。本実験の解析に使用したパラメーターを表-2、解析条件を表-3、また、模型実験を再現した解析モデルを図-5に示す。Case1では、増水を想定し、右側が川表側を示し、法面に設定水位に応じた水頭境界を与える。裏法面側は、浸出面境界とした。Case2では、降雨を想定し、模型実験と同様の降雨を与えたところ、水圧が大幅に上昇して計算処理に支障が生じたため、降雨強度を6.5mm/hrに調整した。そして、上面全体に降雨境界を与え、基礎地盤の両側を浸出面境界とした。

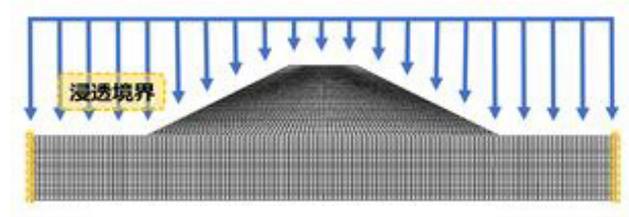
ここで、浸出面境界とは圧力水頭が負の状態では非排水境界であり、圧力水頭が正の値を示そうとするとゼロ圧力水頭境界となる。つまり、河川側から流入した浸透水が浸潤線を成し、浸潤線が左側法面に到達すると、浸潤線以下でゼロ圧力水頭境界となり、法面からの滲出を表現する。

4.2 解析結果

Case1およびCase2の透水6時間後の解析結果を図-6に示す。図中、カラー面コンターは水圧分布、線コンターは等ポテンシャル線(縦線)と浸潤面を把握するための水圧ゼロ線(横線)を記載している。Case1-1は、模型実験と同様の浸潤面となるように透水係数を設定し、解析を行った。図-3(a)の模型実験の浸潤面と同じような形を示していることが確認できる。Case1-2およびCase1-3は、図-7(g)のように裏法尻付近の透水係数を変更して、解析を行った。Case1-2については、裏法尻の透水係数が低くなったことで、水圧の大きい領域が現れ、浸潤線が高くなっている。等ポテンシャル線は、裏法尻付近の間隔が狭くなっているため、局所的に動水勾配が高くなり安定性が失われることが予想される。一方で、Case1-3については、裏法尻の透水係数が高くなったことで、浸潤面が低くなった。等ポテンシャル線は、裏法尻付近と基礎地盤で浸潤面が形成されている。等ポテンシャル線は、堤体法面で狭くなっている。Case2-2とCase2-3は、図-7(h)



Case1 河川増水



Case2 降雨

図-5 解析モデル

表-2 解析に使用したパラメーター

λ	κ	M	m	Sr0	p'sat(kPa)
0.087	0.009	1.375	0.6	0.43	20
b	ne	a	v	γ_w	γ_s
1	1	10	0.33	1	2.7

表-3 透水係数設定値

	$k_x(\times 10^{-3} \text{ cm/s})$	$k_y(\times 10^{-3} \text{ cm/s})$
Case1-1・2-1	1.8	0.9
Case1-2・2-2	0.018	0.009
Case1-3・2-3	180	90

のように、両法尻付近要素の透水係数を変更した結果である。Case2-2の水圧は、透水係数を変更した変更要素の中央部分から周辺まで低くなっている。等ポテンシャル線は、両法尻部の間隔が急激に狭くなっているため、局所的に動水勾配が高くなり、安定性が失われていることがわかる。Case2-3の水圧は、透水係数変更した下部でマイナスの領域がわずかに増加し、浸潤面が低下した。等ポテンシャル線は、両法尻部上下の間隔が広がっているため、動水勾配が小さくなったことで安定していることがわかる。透水係数の空間的ばらつきを、実験結果に基づいて、透水係数を変更させることで再現した。その結果、Case1とCase2いずれにおいても、法尻の細粒分が流出した場合は、ドレーンの役割を果たし、浸潤線・動水勾配の低下が期待される。一方で、法尻に細粒分が目詰まりした場合は、浸潤線が高くなり、局所的に動水勾配が大きくなることから、堤体の力学的安定性が低下する可能性がある。

4.3 考察

Case1では、透水係数を水平方向に大きく、垂直方向を半分を設定することで、模型実験と同様の結果を再現できると示された。Case2では、模型実験と同様の条件で行うには、解析モデルのサイズや時間を考慮する必要がある。また、透水係数の空間的ばらつきを、実験結果に基づいて、透水係数を変更させることで再現した。その結果、Case1とCase2いずれにおいても、法尻の細粒分が流出した場合は、ドレーンの役割を果たし、浸潤線・動水勾配の低下が期待される。一方で、法尻に細粒分が目詰まりした場合は、浸潤線が高くなり、局所的に動水勾配が大きくなることから、堤体の力学的安定性が低下する可能性がある。

5. 結論

本研究では、河川堤防を模擬した盛土模型に対して透水試験を行い、異なる浸透や繰り返し透水履歴が盛土構成土の粒度変化におよぼす影響を評価した。さらに、内部浸食によって透水係数の空間的ばらつきを考慮した浸透解析を行い、力学的安定性に及ぼす影響を評価した。本研究で得られた結論と今後の課題を以下に示す。

- (1) 透水係数は、河川増水により表法側から裏法側にかけて減少していく傾向がある。降雨は、外形により影響が変化する可能性がある。
- (2) 粒度分布は、河川増水・降雨ともに浸透による細粒分の移動がみられ、浸透の強さで移動量に差異が現れた。

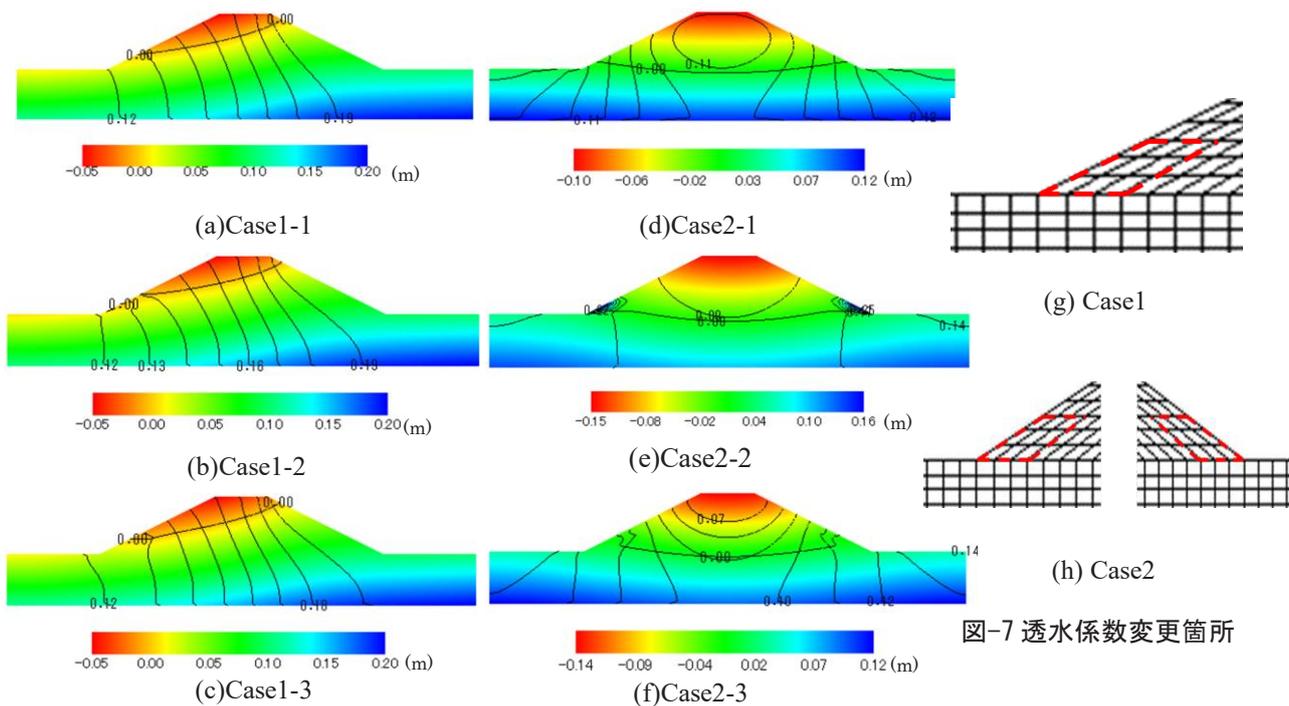


図-6 解析結果(6時間経過後)

図-7 透水係数変更箇所

- (3) 透水係数・粒度分布はともに、異なる浸透を同時に作用させる、または浸透の回数が増えることで変化が大きくなることが分かった。
- (4) 解析的検討において、透水係数を部分的に変更させることで、河川堤防の経年変化にともなう浸潤面の挙動の変化、動水勾配の変化を表現できることを確認した。法尻の細粒分が流出した場合は、浸潤線・動水勾配の低下が期待される一方で、法尻が目詰まりした場合は、浸潤線・局所動水勾配が高くなることから、堤体の力学的安定性が低下する可能性がある。

今後の課題として、模型実験では、水位の経時変化による浸透挙動の把握をどのようにおこなうか検討が必要である。また、降雨の浸透による細粒分の移動がどのようなスケールまで適応するべきか考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 高梁川水系小田川堤防調査委員会: 高梁川水系小田川堤防調査委員会報告書, p.237,2020.
- 2) 濱田 貴弘: 堤防決壊後の調査について提案～河川堤防調査員会～,関東地方整備局資料,p.3,2022.
- 3) 公益社団法人地盤工学会平成 30 年度会長特別委員会: 公益社団法人地盤工学会平成 30 年度会長特別委員会報告書,p.125, 2019.
- 4) 小高猛司,崔瑛,李圭太,御手洗翔太,高木竜二: 細粒分流出に伴う砂質堤体土の劣化に関する考察,第 28 回中部地盤工学シンポジウム, pp.101-106, 2016.
- 5) 前田健一,今瀬達也,伊藤嘉,斎藤啓: 内部浸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手法の提案,河川技術論文集,第 19 巻,pp.39-44,2013.
- 6) Kenney, T. C. and, Lau, D: Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, Vol.22, No2, pp.215-225,1985.
- 7) Yuri Sugiyama, Katsuyuki Kawai, Atsushi Iizuka: Effects of stress condition on B-value measurement., Soils and Foundation.Vol.56, No.5, pp.848-860,2016.
- 8) Skempton, A. W. : The pore-pressure coefficients A and B. Geotechnique, Vol.4, No.4, pp.143-147, 1954.
- 9) Sugii, T., Uno, T. : Modeling of hydraulic properties for unsaturated soils. In: Proceedings of the Symposium on Permeability of Unsaturated Ground, Japan, pp.179-184, 1996.

著 者

吉田 英昭	近畿大学大学院, 修士(工学), 地盤工学
河井 克之	所員, 博士(工学), 地盤工学
中島 晃司	近畿大学, 博士(工学), 地盤工学