

地下水流の支配パラメータと堤防浸透破壊の力学的相似条件—堤防脆弱性指標

中央大学研究開発機構 フェロー ○福岡 捷二, 中央大学研究開発機構 正会員 田端幸輔

1. まえがき 洪水時、堤体内に形成される水面勾配によって浸透流が土の間隙を通り裏のり面に向かって移動する。浸透水の集中が異常に大きくなったときに堤防の安定性が低下することから、浸透流の集中を評価できれば、いつ、どこで、どのような破壊が起こるかを推定できる可能性がある。本文では、地下水流の支配パラメータと堤防浸透破壊の力学的相似条件を導く。まず、浸透流の支配方程式の無次元化を行い、浸透流を支配する力学パラメータである浸透流ナンバを導く。次に、堤防浸透流では、浸透流ナンバが堤防脆弱性指標 t^* であり、 t^* が現地と模型堤防の浸透現象の力学的相似条件を与える唯一の量であることを現地と堤防模型での決壊、崩壊、漏水の事象によって示し、それぞれの事象の脆弱性指標値を明らかにする。

2. 浸透流の基礎式 (Richards の式) の無次元化による支配パラメータの導出

浸透流の基礎式 (土中を運動する水に対する連続式, Richards の式) は以下の通りである。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 θ : 体積含水率, k : 透水係数, h : 全水頭 ($=\Psi+z$), Ψ : 圧力水頭, z : 位置水頭である。体積含水率の定義から、上式は以下のように表される。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \lambda S_r}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

ここに、 α : 飽和:1, 不飽和:0, S_s : 比貯留係数(1/m), C : 比水分容量(1/m)である。

式(2)の各変数の無次元量を、代表値を用いて以下のように表し、基礎式を無次元化する。

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, S_r' = \frac{S_r}{S_{r0}}, \lambda' = \frac{\lambda}{\lambda_0}, h' = \frac{h}{H_0}, t' = \frac{t}{T_0}, k' = \frac{k}{k_0}, x' = \frac{x}{L_0}, y' = \frac{y}{L_0}, z' = \frac{z}{L_0} \quad (3)$$

式(6)の関係を考慮して式(2)を整理すると、最終的に以下の無次元方程式が得られる。

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho' \lambda' S_r'}{\partial t'} + \frac{1}{S_{r0}} \frac{k_0 H_0 T_0}{\lambda_0 L_0^2} \left\{ - \frac{\partial}{\partial x'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial x'} \right) - \frac{\partial}{\partial y'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial y'} \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial z'} \right) \right\} = 0 \quad (4)$$

式 (4) の赤枠で示された無次元数は、浸透流ナンバ (Seepage flow number) と呼び、飽和浸透流領域では $S_{r0}=1$ となる。浸透流ナンバは対象とする浸透流場 (原型) とそれを模した模型で同じ値を持つとき、両者の支配方程式は同一となる。このとき浸透流は力学的に相似になることを示している。浸透流ナンバは $k_0 H_0 / \lambda_0 L_0^2$ と $1/T_0$ の 2 つの時間の比で表されている。前者は、浸透流の実質流速 $k_0 H_0 / \lambda_0 L_0$ によって代表水平長さ L_0 を移動するに要する時間を表し、一方、 T_0 は、浸透流の代表時間を示す。

3. 浸透流ナンバから堤防脆弱性指標の導出

今、対象とする浸透流が堤防を浸透する流れを考える。このとき浸透流ナンバを構成する物理量の代表値として以下の諸量を選ぶ。水平代表長さ L_0 として堤防の敷幅 b を、鉛直代表長さ H_0 として洪水の外水位 H 、洪水の代表時間 T_0 として高水敷に洪水流が乗っている時間を t 、 k_0 、 λ_0 として堤体を構成する土の平均的

キーワード 浸透流ナンバ, 堤防脆弱性指標, 力学的相似条件, 原型と模型

連絡先 〒 112-8551 東京都文京区春日 1-12-27

透水係数 k と空隙率 λ ($=0.4$) である。このとき、浸透流ナンバーは堤防脆弱性指標 t^* と呼ばれ、式 (5) で表される。

$$t^* = \frac{8 H k t}{3 \lambda b^2} \quad (5)$$

3.1 堤防脆弱性指標 t^* の現地堤防への適用

浸透に起因した顕著な堤防被災が生じた鬼怒川平成 27 年 9 月洪水、矢部川平成 24 年 7 月洪水、長良川昭和 51 年 9 月洪水、梯川平成 24 年 9 月洪水、子吉川平成 25 年 9 月洪水を対象に堤防脆弱性指標を算出した。図-1 (a)に各地点における堤防脆弱性指標の値をそれぞれ示す。図-1 の赤枠、黄色枠で囲ったデータはそれぞれ堤防決壊、裏法滑りが生じたもので、囲い枠の無いデータは堤体漏水被害が生じたものを示している。算定された t^* を見ると、堤防決壊 (赤色枠) は、 t^* が 0.1~1 の範囲で発生している。また、裏法滑り (黄色枠) は、 t^* が概ね 0.01~0.1 の範囲付近に多く分布する。堤体漏水 (枠無し) は、データのばらつきが大きい、概ね t^* が 0.001 より大きい範囲に分布している。以上より、全体的には t^* が 0.1~1 の範囲で堤防決壊が、0.01~0.1 の範囲で裏法滑りが、0.001~0.01 の範囲で堤体漏水がそれぞれ生じると見ることができ、 t^* によって堤体浸透に起因する堤防被災の程度、危険度を概ね説明できることが分かる。

3.2 堤防脆弱性指標 t^* の堤防模型実験への適用

小高らは²⁾ 二次元半断面、二次元全断面、三次元全断面の 3 種類の堤防模型を用いて、透水係数や基盤層の厚さを変化させて実施された計 22 ケースの実験を行っている。これらのデータを用いて、堤防脆弱性指標の値と被災形態の関係について検討した。堤防模型のスケールは高さ 0.2~0.3m、底幅 0.7~0.9m である。また、模型実験は、基盤層内を上下 2 層の異なる透水性材料で充填させており、初期水位条件として下層部分のみ飽和させた状態から急速に外水位を高め、所定の実験水位を維持し、時間経過と共に生じた堤体変状とその発生時刻が詳細に測定されている。決壊、変状が生じた堤防模型のデータを用いて堤防脆弱性指標の値算出した。図-1 には、基盤が不透水層の場合の脆弱性指標 t^* と透水層の場合の脆弱性指標 t_m^* がプロットされている。堤防決壊 (図-1 (b) 赤色枠) となった実験の t^* は全て 0.1 以上の範囲にプロットされる。また、裏法滑り (図-1 (b) 黄色枠) は、 t^* が 0.01~0.1 の範囲に集中し 16 個のデータがプロットされる結果となった。また、模型実験で裏法先付近からの噴砂が確認されているケースを対象に算出した t^* のほとんどが 0.001~0.1 の範囲にプロットされた。以上より、上記結果は、実河川堤防で見られた被災形態毎にとる t^* の範囲とほぼ一致することが分る。このことは、 t^* が現地堤防と堤防模型に共通して成り立つ堤防破壊の力学的相似条件を与えることを示している。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 小高猛司, 田端幸輔: 現地堤防と模型堤防の浸透破壊を規定する力学的相似条件—堤防脆弱性指標, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム, pp. 79~82. 2017.
- 2) 崔 瑛, 小高猛司, 李 圭太, 森 三史郎, 林 愛実: 高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊メカニズムの検討, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム, 2016.

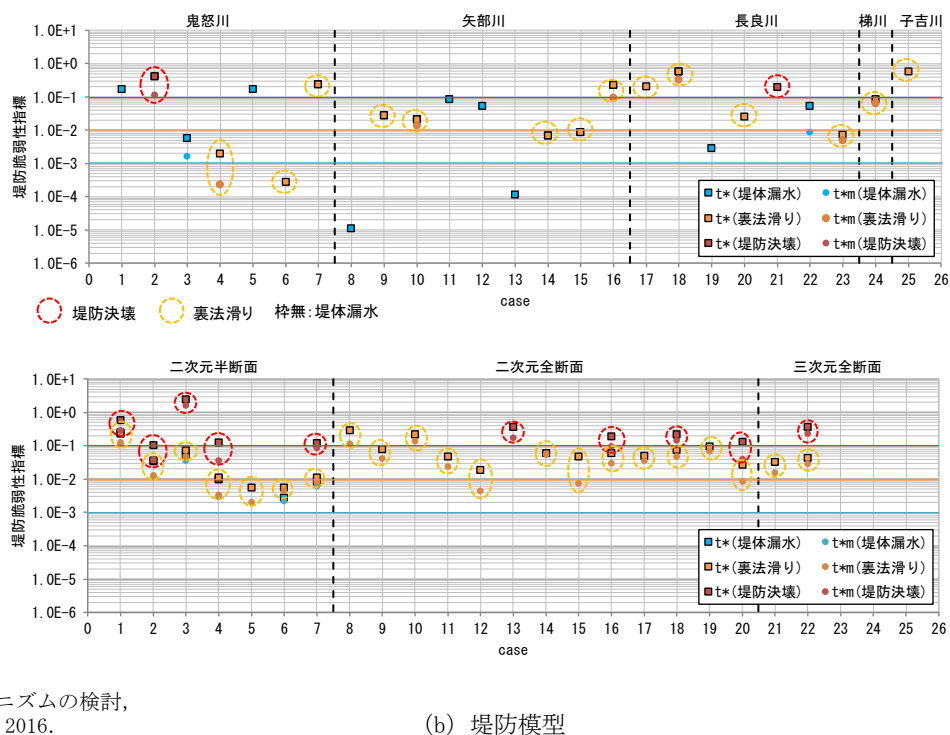


図-1 現地堤防及び堤防模型の堤防脆弱性指標