

浸透流を支配する力学指標と 堤防浸透破壊の力学的相似条件 —浸透流ナンバー SF_n と堤防脆弱性指標 t^*

福岡 捷二¹・田端 幸輔²

¹フェロー 中央大学研究開発機構 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail:sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

²正会員 中央大学研究開発機構 機構准教授 (同上)

E-mail:k-tabata@tamacc.chuo-u.ac.jp

本研究は、最初に浸透流の基礎式を無次元化し、浸透流の力学的相似条件を表す一般的な指標、浸透流ナンバー SF_n を導き、指標の物理的意味を説明している。次に、堤防という特別な形状の場での浸透流では、浸透流ナンバーは堤防裏法先への浸透流の集中を表現する堤防脆弱性指標 t^* となることを示している。この堤防脆弱性指標はまた、堤防基礎地盤が透水性である場合と不透水性である場合について、堤防浸透流の浸潤線を相似形で与えて記述される非定常準二次方程式を解くことによって導かれることを示している。これら異なる方法で導かれた共通の堤防脆弱性指標 t^* が、幾何学的にはほぼ相似な実堤防と模型堤防の破壊の相似条件であることを実証し、さらに、 t^* がどのような値の範囲をとるとき、堤防は破壊、崩壊、漏水のどの形態を取るのかを示している。最後に、洪水時の堤体内の水面形時間変化から透水係数を求める方法を提示し、その必要性を述べている。

Key Words: seepage flow number, seepage line, levee vulnerability index, dynamic similarity law, unsteady quasi-two dimensional equation, prototype and model, levee failure

1. 序論

河川堤防の浸透破壊については、主として土質力学、地盤工学分野の技術者、研究者が中心となり調査・研究が進められて来た。堤防に関する地盤工学的研究方法は、土構造物の安定、変形問題として正面から捉えることが一般的である。しかし、現在の地盤工学的見方だけでは、河川管理上緊急に必要とされる堤防の破壊危険箇所を推定するには限界があり、土中の間隙を流れる浸透流の堤防裏法先への集中に着目し、浸透破壊現象を捉えることも必要である。縦断的に長く、大きな構造体である堤防は、洪水外力に対しかなりの抵抗力があり、局所的な土質の欠陥の検討も必要であるが、堤体内の水面勾配による間隙中の水の浸透集中といった、大局的な視点から浸透破壊のきっかけとなる現象を把握することが重要である。

河川の洪水流の川表と川裏の水位差に起因する浸透流は、堤体内に水面勾配を形成し土中の間隙を通して裏のり面に向かって流れを形成する。流れが集中するところで堤防の安定性が低下し、集中が異常に大きくなったときに破壊の危険性が高まると考えられる。したがって、堤体中の水の集中の程度と場所を適切に評価できれば、いつ、どこで、どのような堤防破壊が起こるかを推定で

きると考えられる。

堤体内の浸透現象は、水流に関する運動方程式（ダルシー流れ）と連続式で表現し土質パラメータは、粒径と透水係数 k で代表して考える。最初に、浸透流の支配方程式である Richards の式を無次元化し、浸透流を支配する力学指標、浸透流ナンバー SF_n を導く。次に、堤防浸透流では、 SF_n が堤体内の水の集中、堤防破壊に関係する指標、すなわち堤防脆弱性指標 t^* であること、 t^* が現地と模型堤防の力学的相似条件を与えること、さらに決壊、崩壊、漏水レベルごとに t^* がとる範囲を示す。最後に、精度の高い透水係数の算定法の必要性を述べる。なお、本論では、基盤透水層内の水と土の移動によって生じるパイピング破壊は対象としていない。

2. 浸透流の基礎方程式 (Richards の式) の無次元化による浸透流の支配指標の導出

浸透流の相似則に関する研究は、1950～60年代を中心に国内外で行われてきた。国内では、NS 方程式の抵抗項を Darcy 則で表現した式の無次元化により、代表長さ、時間、透水係数、空隙率の組み合わせで表される無次元量が提案されているが¹⁾、不十分な検討段階にとどま

っている。また、Corey et al.³⁾は、Richards の式の無次元化により相似条件を求めているが、飽和した土壌の重力排水過程での浸透流に着目した研究であり、圧力水頭と浸透長を共通の一つの代表長さで考えられていることから、最終的に得られる無次元量は一般的な浸透流を規定するものになり得ていない。したがって、一般性の高い浸透流相似条件は、著者らの知る限り存在しない。

ここでは、浸透流を支配する一般的な力学指標を導く。土中を運動する水に対する浸透流の基礎式を、Richards の式(1)で表現する。

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

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 θ 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 S_r は飽和度、 λ は空隙率である。

原型と模型の流れの力学的相似が成立するには、現象を支配する基礎方程式を無次元化したときに、原型と模型で同一の式となるが必要である。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す。' は無次元量であり、下付き 0 の量は各代表量である。

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, S_r' = \frac{S_r}{S_{r0}}, \lambda' = \frac{\lambda}{\lambda_0}, h' = \frac{h}{H_0} \quad (3)$$

$$t' = \frac{t}{T_0}, k' = \frac{k}{k_0}, x' = \frac{x}{L_0}, y' = \frac{y}{L_0}, z' = \frac{z}{L_0}$$

式(3)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。

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

無次元化した基礎式(4)では、左辺第 2, 3, 4 項を纏めた括弧の前に赤枠で囲まれた無次元量が見られる。この値が同じであれば異なるスケールの浸透流の基礎方程式が同一となる。赤枠部分で示された無次元数は、浸透流の力学的相似条件を表す重要な量で、浸透流ナンバー (Seepage Flow number) SF_n と呼ぶ。対象とする浸透流場 (原型) とそれを模した模型で同じ SF_n の値を持つとき、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。

提示した浸透流ナンバー SF_n は、 $S_{r0} \lambda_0 L_0^2 / k_0 H_0$ と 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 $k_0 H_0 / S_{r0} \lambda_0 L_0$ によって代表水平長さ L_0 を移動するのに要する時間を、後者は浸透流の代表時間を示す。

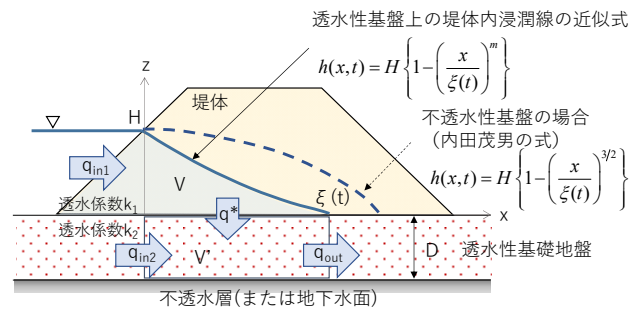


図-1 浸透流の準二次元解析の考え方

表-1 指数 m と k_2/k_1 , D/H の関係

k_2/k_1 D/H	0	0.1	0.5	1	2	5	10	20
0	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
0.1	1.500	1.500	1.500	1.500	1.426	1.060	0.858	0.711
0.5	1.500	1.500	1.472	1.075	0.823	0.660	0.588	0.545
1	1.500	1.500	1.118	0.860	0.700	0.591	0.546	0.524
2	1.500	1.384	0.866	0.710	0.614	0.547	0.524	0.510
5	1.500	1.014	0.671	0.592	0.549	0.519	0.509	0.504
10	1.500	0.821	0.591	0.548	0.524	0.509	0.504	0.501
20	1.500	0.691	0.548	0.524	0.510	0.504	0.501	0.501

3. 浸透流ナンバーから堤防脆弱性指標の導出

さきに示した浸透流ナンバー SF_n を堤防浸透及びその破壊に関する指標に書き換えるため、代表諸量を選ぶ。浸透流場の外力となる代表水位 H_0 、代表長さ L_0 、代表時間 T_0 は、それぞれ対象とする浸透流場を規定する水位、長さ、時間で、これらを適切に選ぶことによって流れの力学的相似が保証される。洪水時における堤体内浸透流を考えると、代表水位 H_0 は洪水流の水位 H 、代表長さ L_0 は堤防の有効幅 b 、代表時間 T_0 は高水敷に洪水流が乗っている時間 t である。また、 k_0 、 λ_0 、 S_{r0} にはそれぞれ堤体の平均透水係数 k 、空隙率 λ 、飽和度 S_r を用いると、 SF_n は堤防脆弱性指標 t^* と呼ばれ、式(5)で表される。

$$t^* = \frac{1}{S_r} \frac{k H t'}{\lambda b^2} \quad (5)$$

福岡・田端⁴⁾は、図-1 に示すように、透水性基礎地盤上にある堤体における浸潤線を相似形で仮定し、以下のように表している。

$$h(x,t) = H \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\xi(t)} \right)^m \right\} \quad (6)$$

さらに、ダルシーの運動方程式と堤体の浸潤部分と基礎透水層の連続条件を用い、浸潤線の先端の移動に関する非定常準二次元の微分方程式を導いている。この式を堤体底面に沿って進む浸透水の先端距離 $\xi(t)$ について解き、表法の水際から堤防裏法先までの距離 b に到達するのに要する時間を T として、 $t^*_m = t/T$ で定義した透水性基礎地盤上の堤防脆弱性指標 (式(7)) を得た。

$$t^*_m = \frac{2(m+1) m k_1 H - m(2m-1) k_2 D}{2m-1} \frac{H t'}{m H + (m+1) D} \frac{H t'}{\lambda b^2} \quad (7)$$

ここに、 k_1 、 k_2 はそれぞれ堤体と基礎地盤の透水係数、

D は透水層厚で、不透水層または地下水面から堤体直下までの厚さである。 m は相似形で与えられる浸潤線(式(6))の指数で、 m と k_2/k_1 、 D/H の関係⁹⁾を表-1に示す。

不透水性基盤上にある堤体浸透流では、式(7)において $D=0$ 、 $k_2=0$ となる。指数 m は内田茂男⁹⁾の浸潤線の式に一致するように $m=3/2$ を与える。このとき、式(7)の $2(m+1)(2m-1)$ は $5/2$ となる。これより不透水性基盤上の堤防脆弱性指標 t^* は式(8)で表される。

$$t^* = \frac{5 H k_1 t'}{2 \lambda b^2} \quad (8)$$

これは、幅 b 、透水係数 k_1 、空隙率 λ の不飽和堤体に、河川水位 H が外力として作用した場合における堤体内浸透水の実質流速が $5/2 \cdot H k_1 / \lambda b$ で表されることを示しており、係数 $5/2$ には、浸潤線の発達に伴って変化する飽和度 S_r の影響が含まれていると解釈できる。このことは、内田⁹⁾の浸透実験からも確認でき、浸透開始直後は適合性がやや低いが、浸潤線が発達し、土の飽和・不飽和による影響が積分されていくと最終的に $\alpha H k_1 / \lambda b$ (内田の式では、 α に図解法により得られた $8/3$ が用いられている)によって浸潤線の移動速度が平均的に説明できている。なお、土の飽和度 S_r は、完全重力排水された状態では 0.3 程度、飽和状態では 1 となるため、 $S F_n$ より導かれた t^* (式(5))の $1/S_r$ は $1 \sim 3$ 程度の値となることから、式(5)と式(8)はほぼ対応することが分かる。なお、一般に飽和度に応じて透水係数が変化するが、本文は非定常浸透時の飽和度変化とそれに伴う透水係数変化をどう取り込むかまでは言及していない。

非定常準二次元解析による堤防脆弱性指標の誘導過程は、堤防脆弱性指標の力学的意味をよく表現している。透水性基盤の場合、堤体から基盤層への水の抜け出しが生じ、不透水性基盤の場合に比べて浸潤線が低下するため(図-1参照)、浸潤線が裏法先に達するまでの時間 T が大きくなる。これより、透水性基盤上の堤防の脆弱性指標 t_m^* は、不透水性基盤上の脆弱性指標 t^* よりも小さく算定される傾向となることから、危険側評価として、脆弱性指標値に t^* が使われることが多い。

また、式(8)で示した不透水性基盤上の堤防脆弱性指標 t^* は、基本式の無次元化から導かれた $S F_n$ を堤体内浸透流に適用することで得られた指標(式(5))と全く同じ形式で表される。このことは、堤防脆弱性指標 t^* が、堤防浸透流の唯一の力学的相似条件であることを表現しており、幾何学的に相似な堤防模型によって、現地堤防の浸透流を評価するときの重要な指標となる。

(1) 堤防脆弱性指標 t^* の現地堤防への適用⁹⁾

堤体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、子吉川平成25年9月洪水、梯川平成24年9月洪水、矢部川平成24年7月洪水、長良川昭和

51年9月洪水を対象に、主な被災箇所において堤防脆弱性指標を算出した。本研究では、洪水時に河川水が堤体内に浸透することで生じたと考えられる被災を①堤体漏水、②裏法滑り、③堤防決壊に分類する。

表-2の上段に現地堤防被災地点と対応する堤防脆弱性指標及びそれらの算出に用いたデータを、図-2(a)に式(7),(8)を用いて算出したこれら25地点の堤防脆弱性指標の値を示す。図-2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。降雨や法面被覆工等の影響は考慮されないため、算定された t^* にばらつきが認められるものの、堤防決壊(赤色枠)は、 t^* が概ね $0.1 \sim 1$ の範囲で発生している。また、裏法滑り(黄色枠)は、 t^* が概ね $0.01 \sim 0.1$ 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最も大きい、 t^* が 0.001 より大きい範囲に多く分布している。以上より、 t^* によって浸透に起因する堤防被災の程度、危険度を説明できることが分かる。

(2) 堤防脆弱性指標 t^* の堤防模型実験への適用⁹⁾

小高ら⁷⁸⁾は、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、基盤層の厚さや土質を変化させた計22ケースの実験を行っている。これらの実験データを用いて、現地堤防と同様に堤防脆弱性指標と被災形態について検討した。

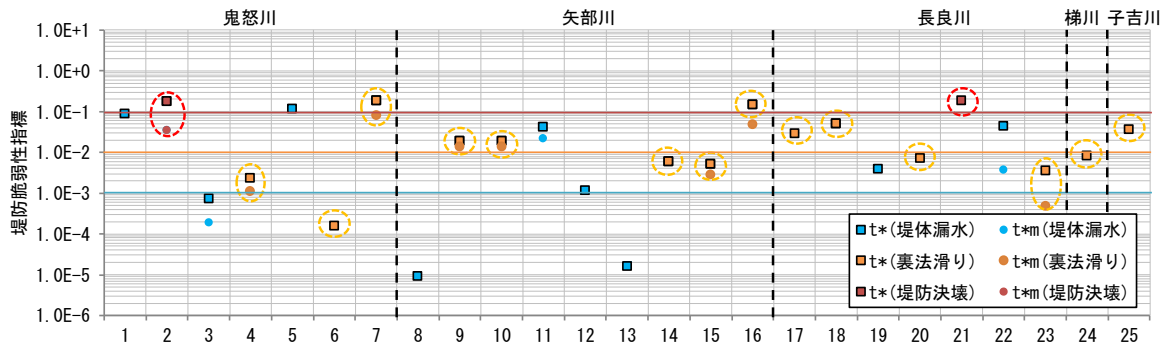
図-3に二次元全断面の模型諸元を代表して示す。堤防模型は高さ $0.2 \sim 0.3\text{m}$ 、底幅 $0.7 \sim 0.9\text{m}$ である。基盤層は上下2層の異なる透水性材料で充填されており、初期水位条件として下層部分のみ予め飽和させた状態から急速に外水位を高め、所定の実験水位を維持し、時間経過と共に生じた堤体変状とその発生時刻が詳細に測定されている。表-2の下段に模型堤防の検討ケース及び堤防脆弱性指標値、算出に用いたデータを示す。式(7),(8)を用いて算出したこれら22ケースの決壊、変状が生じた堤防模型の堤防脆弱性指標の値を図-2(b)に示す。なお、前述した通り基盤層の下層部分全体が飽和した状態を初期条件として実験が行われたことから、基盤層内の上下層の境界面が地下水面に相当するものと見なし、式(7)の基盤層厚さ D には基盤上層部の厚さを、 k_2 にはこの部分の材料の透水係数値を用いた。

表-3は、図-2(b)における堤防被災形態ごとの t^* のデータを $t^*=0.1 \sim 1$ 、 $0.01 \sim 0.1$ 、 $0.001 \sim 0.01$ の範囲毎に集計した結果を示している。堤防決壊(図-2(b)赤色枠)となった実験の t^* はほぼ全て 0.1 以上の範囲にプロットされた。裏法滑り(図-2(b)黄色枠)は、 t^* が $0.01 \sim 0.1$ の範囲に集中し16個のデータがプロットされた。また、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^* の多くが $0.001 \sim 0.01$ の範囲にプロットされた。

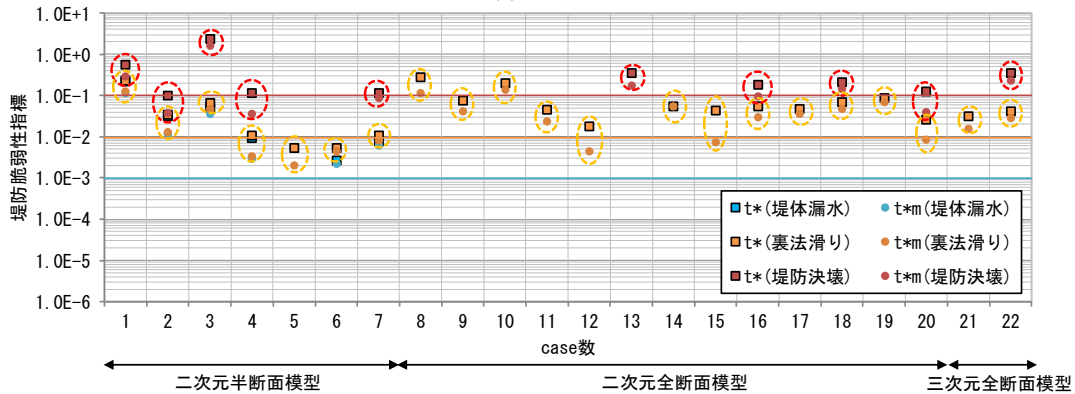
表-2 異なる被災形態に対する堤防脆弱性指標算定に用いた現地被災堤防と模型実験堤防データ

case	河川	被災箇所	H (m)	b (m)	λ (-)	k_1 (m/s)	k_2 (m/s)	D (m)	m	t^*			堤防被災の種類		
										t^* (s)	t^*	t^*_{m}	堤体漏水	裏法滑り	堤防決壊
1	鬼怒川 H27.9洪水	18.5k左岸	2.8	17.1	0.4	3.3E-5	-	-	-	46,800	9.0E-2	-	○噴砂あり	○裏法滑り	○
2		21k左岸	2.1	13.2	0.4	6.0E-5	1.9E-4	2.0	0.64	39,600	1.8E-1	3.5E-2	○	-	○
3		22.25k左岸	3.8	21.2	0.4	2.6E-7	1.4E-5	3.0	0.51	54,000	7.4E-4	2.0E-4	○噴砂あり	-	-
4		26.5k左岸	3.4	51.5	0.4	6.3E-6	2.7E-7	2.0	1.50	46,800	2.4E-3	1.1E-3	-	○裏法崩れ	-
5		35k左岸	3.0	16.9	0.4	4.6E-5	-	-	-	39,600	1.2E-1	-	○	-	-
6		28.5k右岸	2.8	20.4	0.4	9.9E-8	-	-	-	39,600	1.6E-4	-	-	○裏法崩れ	-
7		41.75k右岸	4.4	24.8	0.4	1.1E-4	-	-	-	39,600	1.9E-1	8.2E-2	○	○裏法崩れ	-
8	矢部川 H24.7洪水	5k左岸	3.1	21.7	0.4	1.0E-8	-	-	-	22,800	9.5E-6	-	○	-	-
9		11.4k左岸	4.6	27.0	0.4	1.5E-5	-	-	-	31,800	1.9E-2	1.4E-2	○	○亀裂	-
10		11.6k左岸	4.5	26.5	0.4	1.5E-5	7.1E-7	1.0	1.50	31,800	1.9E-2	1.4E-2	○	○亀裂	-
11		16.0k左岸	3.8	23.0	0.4	3.0E-5	-	-	-	31,800	4.2E-2	2.2E-2	○	-	-
12		17.2k左岸	4.5	25.2	0.4	8.3E-7	-	-	-	31,800	1.2E-3	-	○	-	-
13		6k右岸	2.3	22.3	0.4	2.5E-8	-	-	-	22,800	1.6E-5	-	○	-	-
14		9k右岸	4.5	22.4	0.4	3.3E-6	-	-	-	32,400	5.9E-3	-	○	○亀裂	-
15	11k右岸	4.6	29.0	0.4	4.8E-6	1.7E-4	2.0	0.53	31,800	5.3E-3	2.8E-3	○	○亀裂	-	
16	11.8k右岸	3.9	22.9	0.4	1.1E-4	4.4E-5	2.0	1.48	30,600	1.5E-1	4.8E-2	○	○亀裂・陥没	-	
17	28.0k左岸	4.4	38.9	0.4	1.6E-5	-	-	-	100,800	2.9E-2	-	-	○裏法崩れ	-	
18	長良川 S51.9洪水	34.0k左岸	1.3	35.4	0.4	8.4E-5	0.0E+0	0.0	1.50	93,800	5.1E-2	-	○	○裏法崩れ	-
19		31.6k右岸	5.1	37.0	0.4	8.0E-7	0.0E+0	0.0	1.50	216,000	4.0E-3	-	○	-	-
20		32.4k右岸	5.5	31.7	0.4	8.0E-7	-	-	-	266,400	7.3E-3	-	-	○裏法崩れ	-
21		33.8k右岸	7.2	35.7	0.4	2.0E-5	-	-	-	266,400	1.9E-1	-	-	-	○
22		35.6k右岸	4.0	33.0	0.4	7.4E-6	1.8E-5	1.8	0.91	262,800	4.5E-2	3.8E-3	○	-	-
23		37.4k右岸	6.7	35.1	0.4	4.0E-7	5.1E-7	3.0	1.20	270,000	3.7E-3	5.0E-4	-	○裏法崩れ	-
24		梯川 H24.9洪水	8.4k右岸	3.1	15.6	0.4	3.7E-6	0.0E+0	0.0	1.50	28,800	8.2E-3	-	-	○裏法崩れ
25	子吉川 H25.9洪水	10.8k右岸	3.9	14.2	0.4	5.7E-6	-	-	-	54,000	3.7E-2	-	-	○裏法滑り	-

case	模型	H (m)	b (m)	λ (-)	k_1 (m/s)	k_2 (m/s)	D (m)	m	t^* (s)			t^*			t^*_{m}			変形、崩壊の状況		
									堤体漏水	裏法滑り	堤防決壊	堤体漏水	裏法滑り	堤防決壊	堤体漏水	裏法滑り	堤防決壊	堤体漏水	裏法滑り	堤防決壊
1	二次元半断面模型	0.27	0.70	0.51	6.3E-4	6.3E-4	0.05	1.40	130	140	330	2.2E-1	2.4E-1	5.6E-1	1.2E-1	1.3E-1	3.0E-1	○噴砂	○沈下	○
2		0.27	0.70	0.51	1.0E-4	6.3E-4	0.05	0.83	120	130	370	3.2E-2	3.5E-2	1.0E-1	1.2E-2	1.3E-2	3.8E-2	○噴砂	○沈下	○
3		0.27	0.70	0.51	6.3E-4	6.3E-4	0.03	1.50	30	40	1,380	5.1E-2	6.8E-2	2.3E+0	3.6E-2	4.8E-2	1.7E+0	○噴砂	○沈下	○
4		0.27	0.70	0.51	1.0E-4	6.3E-4	0.02	1.25	35	40	440	9.4E-3	1.1E-2	1.2E-1	2.9E-3	3.3E-3	3.7E-2	○噴砂	○滑り	○
5		0.27	0.70	0.51	1.0E-4	6.3E-4	0.05	0.83	-	20	-	5.4E-3	-	-	2.0E-3	-	-	○滑り	-	-
6		0.27	0.70	0.51	1.0E-4	4.0E-5	0.02	1.50	10	20	-	2.7E-3	5.4E-3	-	2.3E-3	4.5E-3	-	○噴砂	○沈下	-
7		0.27	0.70	0.51	1.0E-4	1.0E-4	0.02	1.50	30	40	430	8.1E-3	1.1E-2	1.2E-1	6.1E-3	8.2E-3	8.8E-2	○噴砂	○滑り	○
8	二次元全断面模型	0.18	0.54	0.51	6.3E-4	6.3E-4	0.05	1.31	-	150	-	2.8E-1	-	-	1.2E-1	-	-	○滑り	-	-
9		0.18	0.54	0.51	6.3E-4	6.3E-4	0.03	1.43	-	40	-	7.6E-2	-	-	4.3E-2	-	-	○滑り	-	-
10		0.18	0.54	0.51	6.3E-4	6.3E-4	0.02	1.49	-	110	-	2.1E-1	-	-	1.4E-1	-	-	○滑り	-	-
11		0.18	0.54	0.51	2.6E-4	6.3E-4	0.03	1.11	-	60	-	4.6E-2	-	-	2.5E-2	-	-	○滑り	-	-
12		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	6.3E-4	0.05	0.74	-	60	-	1.8E-2	-	-	4.5E-3	-	-	○滑り	-	-
13		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	6.3E-4	0.03	0.83	-	-	1,180	-	-	3.5E-1	-	-	1.8E-1	-	-	○
14		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	6.3E-4	0.02	0.83	-	190	-	5.7E-2	-	-	5.5E-2	-	-	○滑り	-	-
15		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	2.6E-4	0.05	1.07	-	150	-	4.5E-2	-	-	7.5E-3	-	-	○滑り	-	-
16		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	2.6E-4	0.03	1.09	-	190	620	5.7E-2	1.9E-1	-	3.0E-2	9.9E-2	-	-	○滑り	○
17		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	2.6E-4	0.02	1.09	-	160	-	4.8E-2	-	-	3.7E-2	-	-	○滑り	-	-
18		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	4.0E-5	0.03	1.50	-	240	710	7.2E-2	2.1E-1	-	4.9E-2	1.4E-1	-	-	○滑り	○
19		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	4.0E-5	0.02	1.50	-	300	-	9.0E-2	-	-	6.9E-2	-	-	○滑り	-	-
20	0.18	0.54	0.51	4.0E-5	6.3E-4	0.03	0.67	-	220	1,055	2.6E-2	1.3E-1	-	8.5E-3	4.1E-2	-	-	○滑り	○	
21	三次元全断面模型	0.18	0.54	0.51	1.0E-4	6.3E-4	0.03	0.83	-	105	-	3.1E-2	-	-	1.6E-2	-	-	○滑り	-	-
22		0.18	0.54	0.51	1.0E-4	4.0E-5	0.03	1.50	-	140	1,170	4.2E-2	3.5E-1	-	2.8E-2	2.4E-1	-	-	○滑り	○



(a) 現地堤防



(b) 堤防模型

図-2 現地堤防及び堤防模型の堤防脆弱性指標

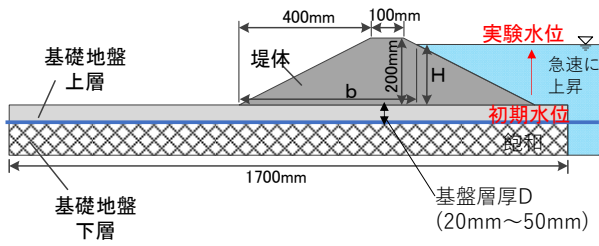


図-3 堤防模型の諸元⁷⁾ (二次元全断面堤防の例)

表-3 模型実験における被災形態ごとの t^* の集計結果

t^*	データ数			
	堤体漏水	裏法滑り	堤防決壊	
0.1	~ 1	1	3	8
0.01	~ 0.1	2	16	1
0.001	~ 0.01	3	2	0

以上より、模型実験結果は、先に示した実河川堤防で見られた被災形態毎にとる t^* の範囲とほぼ一致しており、 t^* が現地堤防と模型堤防に共通して成り立つ力学的相似条件であることを示している。

4. 力学的相似則としての堤防脆弱性指標 t^* の解釈

堤防脆弱性指標 t^* が、ダルシー則が成り立つ浸透流場における原型と模型の力学的相似条件であることから、模型堤防と現地堤防の t^* の値は一致するとき、共通の破壊形態をとると考えることが出来る。このとき、原型と模型堤防破壊の相似条件は以下のとおりとなる。

$$\frac{t_e^*}{t_p^*} = \frac{H_e k_e t_e}{H_p k_p t_p} \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_p} \right)^{-1} \left(\frac{S_{re}}{S_{rp}} \right)^{-1} \left(\frac{b_e}{b_p} \right)^{-2} = 1 \quad (9)$$

ここに、添え字 e は実験模型、 p は原型を示している。模型と原型の水平スケール比と鉛直スケール比は同一、すなわち無ひずみ模型であるとする。さらに、空隙率 λ と飽和度 S は模型と現地で差はないとすると、式(9)の関係は式(10)で示される。

$$\frac{t_e^*}{t_p^*} \approx \frac{k_e t_e}{k_p t_p} \left(\frac{L_e}{L_p} \right)^{-1} \quad (10)$$

よって、式(10)を満足するように、原型に対する模型堤防におけるスケール、透水係数、洪水継続時間を設定することが、対象とする堤防に対する力学的な相似実験を行うための基本的な要件となる。厳密に実堤防と模型の現象の相似性を満足するには、両者が幾何学的に相似であることが必要である。3で示した堤防模型実験は、特定の現地堤防で起きた現象を再現したものではないが、一般的な現地堤防を意識して法面勾配が 1:2 で作成されている。よって、ここでは模型堤防が現地堤防をスケールダウンして行った実験であると考え、同一の被災形態をとったケースでは、現地と模型で式(10)の関係を満た

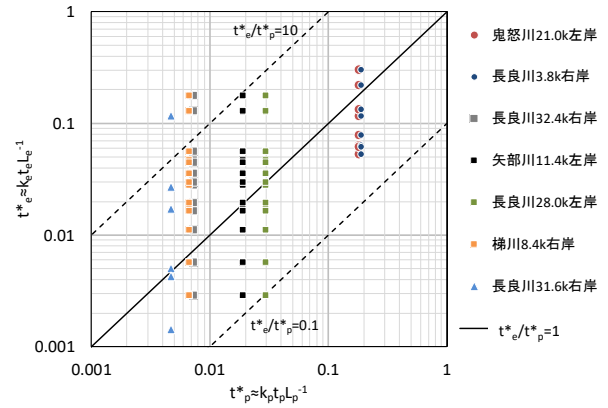


図-4 現地堤防と模型実験における t^* の関係

しているものとした。ここでは、共通の被災形態と見なせる現地河川堤防データと模型実験データに対して、 t_e^* と t_p^* の値がどのような関係となるのかについて見ることにする。結果を図-4 に示す。堤防決壊が生じた鬼怒川 21.0k 左岸、長良川 33.8k 右岸の t^* の値を t_p^* とし、模型実験によって堤防決壊に至った 10 ケースの t^* を t_e^* とすると、 t_e^*/t_p^* は概ね式(10)のように 1 に近い範囲に分布する。また、裏法滑り、堤体漏水が生じたケースについては特に堤体漏水でばらつきが大きくなる。これは、漏水や堤防変状の程度は様々で時間的にも変化することから、現地と模型において同じ変状状態を規定することが困難であるためと考えられる。ただし、全体的に見ると現地と模型の t_e^*/t_p^* の値は概ね 0.1~10 程度となる。堤防決壊のように明瞭な破壊現象に対しては t_e^*/t_p^* の値は 1 に近くなり、相似関係が明瞭である。

5. 堤体内浸潤線の時間変化を測定し、高い精度の透水係数を求める

堤防脆弱性指標 t^* は、無次元の式形が重要な意味を持つもので、 t^* と無次元形を構成する個々の要素との関係を議論するものではない。しかし、堤体を構成する土質は多岐にわたり、透水係数の値は粒径ごとに大きく変化することは知られている。したがって、堤防脆弱性指標の精度は透水係数の値の信頼度に大きく依存しており、透水係数を如何に高い精度で見積もるかが課題である。

洪水時の河川管理のために、また治水事業の信頼性向上のために、洪水時に時間的に変化する水位を多点で観測し、観測水面形と解析水面形をほぼ一致させることによって、河道での洪水流量ハイドログラフ、河床変動、流砂量ハイドログラフ、粗度係数の変化等洪水時の諸現象を一体的に説明できている⁹⁾。今では、多くの河川の河道沿いの多地点に水位計を設置し、観測が行われ、それらを河川計画・管理に生かされるようになってきた。河川における洪水時の縦断面水面形観測結果が果たしてい

る意味は、河川堤防の浸透に対する堤体内の横断水面形が果たす意味と同じである。すなわち、堤体内で時間的に変化する水面形を測り、これを説明する透水係数の値を求め、これと堤防の土質構成との関係を明らかにすることにより、堤防脆弱性指標の精度を高めることになる。

具体的には、外水位上昇時の非定常浸潤線の高さ h を表す式(6)は、透水係数を適切に選べば時間的に変化する浸潤線を説明できることが示されている⁴⁾。したがって、堤防の透水係数の精度の高い評価法を確立するために、今後以下の検討が期待される。

- (1) 河川堤防内における浸潤線の観測事例を用い、各時間の浸潤線を式(6)で同定し、透水係数 k を求める。
- (2) その地点のボーリングデータ等と対比し、浸潤線の時間変化を説明する透水係数と堤体土質構造の関係を検討する。

6. 結論

本研究では、洪水中に発生する堤体内の水面勾配に起因する浸透流の裏法面への集中が、堤体の浸透破壊のきっかけとなり、堤防安定性を支配するとの考えのもとに、従来と異なる方法で堤防破壊危険箇所推定法を提示している。最初に、土中の浸透流の運動を支配する唯一の力学指標として浸透流ナンバー SF_n を理論的に導いた。また、堤防破壊危険性に関係する力学的無次元量として堤防脆弱性指標 t^* を、 SF_n と非定常準二次元浸透流解析の二つの方法で導出した。堤体漏水、裏法滑り、堤防決壊それぞれの被災形態が生じた現地堤防及び堤防模型について脆弱性指標 t^* を算出した結果、同一の堤防破壊形態をとる現地堤防と堤防模型実験では、 t^* が概ね共通の値をとること、堤防浸透流に関して t^* が原型と模型の力学的相似条件を与えること、堤防の破壊の程度を t^* の値で判断可能であることが実証された。最後に、堤防破壊危険箇所の推定精度を高めるためには、浸潤線の時間変化を測定し、透水係数を決める方法の必要性を強調した。

謝辞：本研究では、名城大学 小高猛司教授の研究グループによって行われた堤防浸透流模型実験の貴重なデータを使用させていただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 河原田礼次郎：非定常浸透流動の水利的相似律について、鹿児島大学農学部学術報告、第5巻、pp.115-117、1956。
- 2) 中村 充：浸透水運動の基礎理論(IV)模型実験理論、農業土木研究第25巻、第6号、pp.365-369、1957。
- 3) G. L. Corey, A. T. Corey and R. H. Brooks; Similitude for non-steady drainage of partially saturated soils, *Hydrology Papers 9, Colorado State University*, 1965。
- 4) 福岡捷二、田端幸輔：堤体基礎地盤の透水性・堤防強化対策を考慮した堤体内非定常浸潤線解析法の開発と堤防破壊危険確率の低減効果の見積りに関する研究、河川技術論文集、第22巻、pp.261-266、2016。
- 5) 内田茂男：自由境界を有する非定常浸透流について、土木学会誌、pp.58-62、1952。
- 6) 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論文集、pp.79-82、2017。
- 7) 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、pp.81-88、2016。
- 8) 林 愛実、森 三史郎、森 智彦、小高猛司、崔 瑛、李 圭太：複層構造基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊実験における三次元効果の検討、第72回土木学会年次学術講演会、III-095、2017。
- 9) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73, No.4, pp.1_667-642、2017。
- 10) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集、第23巻、pp.251-256、2017。

(2018.5.31 受付)

INDEX GOVERNING THE SEEPAGE FLOW AND DYNAMIC SIMILARITY CONDITION OF LEVEE FAILURE DUE TO SEEPAGE FLOW: SEEPAGE FLOW NUMBER AND LEVEE VULNERABILITY INDEX

Shoji FUKUOKA and Kosuke TABATA

The general dynamic index governing the seepage flow: SF_n (Seepage Flow number) which provides the dynamic similarity condition of the seepage flow is derived by making the governing equation dimensionless, and the physical meaning of SF_n is discussed. In the case of levee, SF_n corresponding to levee vulnerability index t^* indicates the degree of concentration of seepage flow at the foot of back slope. t^* is also derived by solving the quasi-two dimensional equations of unsteady seepage flow described by assuming the similar seepage line in levee on permeable or impermeable foundation. It is proved that t^* is useful to categorize the degree of levee failure and failure pattern. Furthermore, t^* is the only dynamic similarity condition of levee failure due to the seepage flow in the model geometrically similar to the prototype.