

平成28年度河川技術シンポジウム
2018年6月13日

特定課題2

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
ー浸透流ナンバー SF_n と堤防脆弱性指標 t^*

中央大学研究開発機構 福岡 捷二

- 目的:**
- 1. 洪水時の堤防が、いつ、どこで、どのように浸透破壊が起こるかを、そのきっかけとなる水理現象を把え、堤防の浸透破壊の指標を見出す。**
 - 2. 浸透破壊に対する模型実験と現地堤防の浸透破壊の力学的相似条件を見出す。**

方法: 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る。流れの集中が異常に大きくなったときに、浸透破壊の危険性が高まると考える。

堤体中の流れが集中する場所と程度を適切に評価できる指標を導き、いつ、どこで、どのような堤防破壊が起こるか推定する方法を示す。

講演内容

1. 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する。
2. 堤防という特別な形状を有する浸透流では、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^* となることを示す。
3. 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元式を解くことによって、導かれることを示す。
4. 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、堤防浸透流の破壊危険性や破壊形態を区分するのに有効であり、幾何学的に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する。
5. 堤防脆弱性指標 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す。

1. 浸透流の支配方程式の無次元化による力学的相似指標, 浸透流ナンバーの導出

浸透流の基礎式 (Richards の式)

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

θ : 体積含水率 k : 透水係数 h : 全水頭 ($=\psi+z$)

体積含水率の定義から, 上式は以下のように表される.

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

一般に左辺第一項は, 飽和, 不飽和状態において以下のように表現される.

・飽和 ($S_r = 1$):
$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \lambda S_r}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\rho \frac{\partial \lambda}{\partial h} + \lambda \frac{\partial \rho}{\partial h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

・不飽和 ($0 < S_r < 1$):
$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \lambda S_r}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} = C \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \lambda S_r}{\partial t} = (C + \alpha S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \\ & \alpha: \text{飽和:1, 不飽和:0} \\ & S_s: \text{比貯留率(1/m), } C: \text{比水分容量(1/m)} \end{aligned} \right\}$$

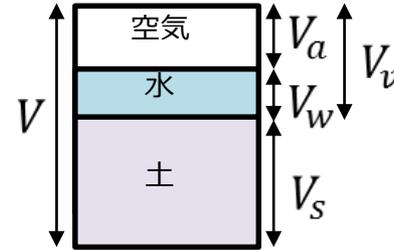
式(2)の各変数の無次元量を, 代表値を用いて以下のように表す.

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0} \quad S_r' = \frac{S_r}{S_{r0}} \quad \lambda' = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad h' = \frac{h}{H_0} \quad t' = \frac{t}{t_0} \quad k' = \frac{k}{k_0} \quad x' = \frac{x}{L_0} \quad y' = \frac{y}{L_0} \quad z' = \frac{z}{L_0} \quad (5)$$

(5)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.

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho' \lambda' S_r'}{\partial t'} + \frac{1}{S_{r0}} \frac{k_0 H_0 t_0}{\lambda_0 L_0^2} \left\{ - \frac{\partial}{\partial x'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial x'} \right) - \frac{\partial}{\partial y'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial y'} \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial z'} \right) \right\} = 0 \quad (6)$$

式 (6) より, 原型と模型で赤枠部分が同一の値を持てば, 両者の浸透現象は力学的に相似である.



体積含水率 $\theta = V_w/V$
 空隙率 $\lambda = V_w/V$
 飽和度 $S_r = V_w/V_w$

このとき、浸透流の飽和領域では、赤枠内は $S_{r0}=1$ であり単純であるが、不飽和領域では、飽和度 S_{r0} も考慮する必要があり複雑化する。ここで、 $k_0 h_0 t_0 / \lambda_0 L^2$ は浸透流ナンバー (Seepage flow number) と呼ぶ。この浸透流ナンバーは、堤防の浸透破壊を考えるときに重要な力学的相似のための相似則を与える。

2. 浸透流ナンバー SF_n から堤防脆弱性指標 t^* の導出

浸透流ナンバー SF_n を堤防浸透及びその破壊に関係する指標に書き換えるために、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 は堤防の有効敷幅 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(7)で表される。

$$t^* = \frac{1}{S_r} \frac{kHt}{\lambda b^2} \quad (7)$$

福岡・田端は、図-1に示すように外水位上昇時の厚さ D の透水性基礎地盤上にある堤体における浸潤線形状を以下のように相似形で表している。

$$h(x, t) = H \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\xi(t)} \right)^m \right\} \quad (8)$$

さらに、ダルシーの運動方程式と堤体の浸潤部分と基盤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 $x(t)$ 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、洪水継続時間を 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(9))を得た。

$$t_m^* = \frac{2(m+1)}{2m-1} \frac{mk_1H - m(2m-1)k_2D}{mH + (m+1)D} \frac{Ht'}{\lambda b^2} \quad (9)$$

ここに、 k_1 、 k_2 はそれぞれ堤体と基礎地盤の透水係数である。 m は相似形で与えられる浸潤線(式(8))の指数で、指数 m と k_2/k_1 、 D/H の関係を表-1に示す。

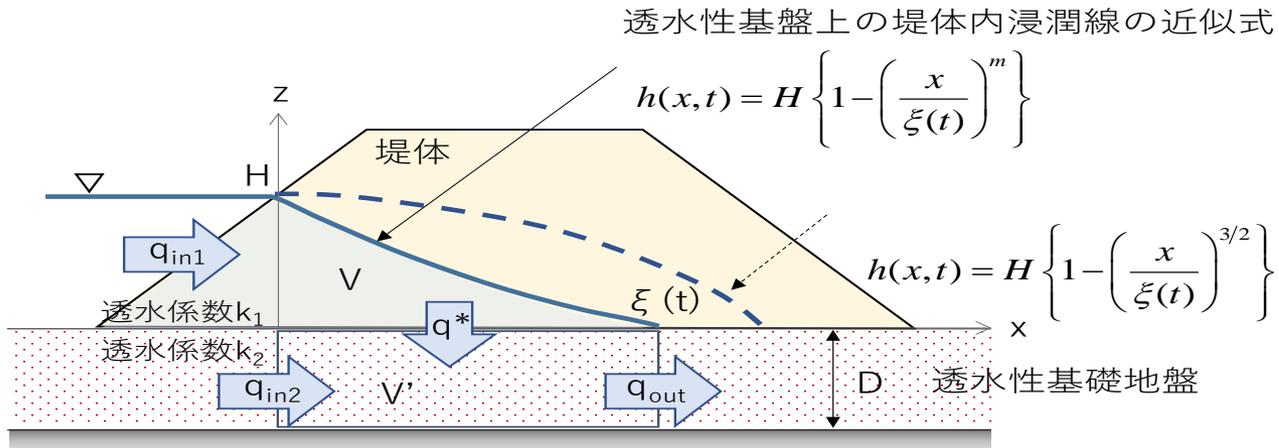


図-1 浸透流の準二次元解析の考え方

表-1 指数 m と k_2/k_1 , D/H の関係

k_2/k_1	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

不透水性基盤上にある堤体浸透流では，式(9)において $D=0$ ， $k_2=0$ となる．指数 m は内田茂男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(9)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(10)で表される．

$$t^* = \frac{5 H k_1 t'}{2 \lambda b^2} \quad (10)$$

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^* よりもやや小さく算定される．このことから，脆弱性指標値として t^* が使われることが多い．

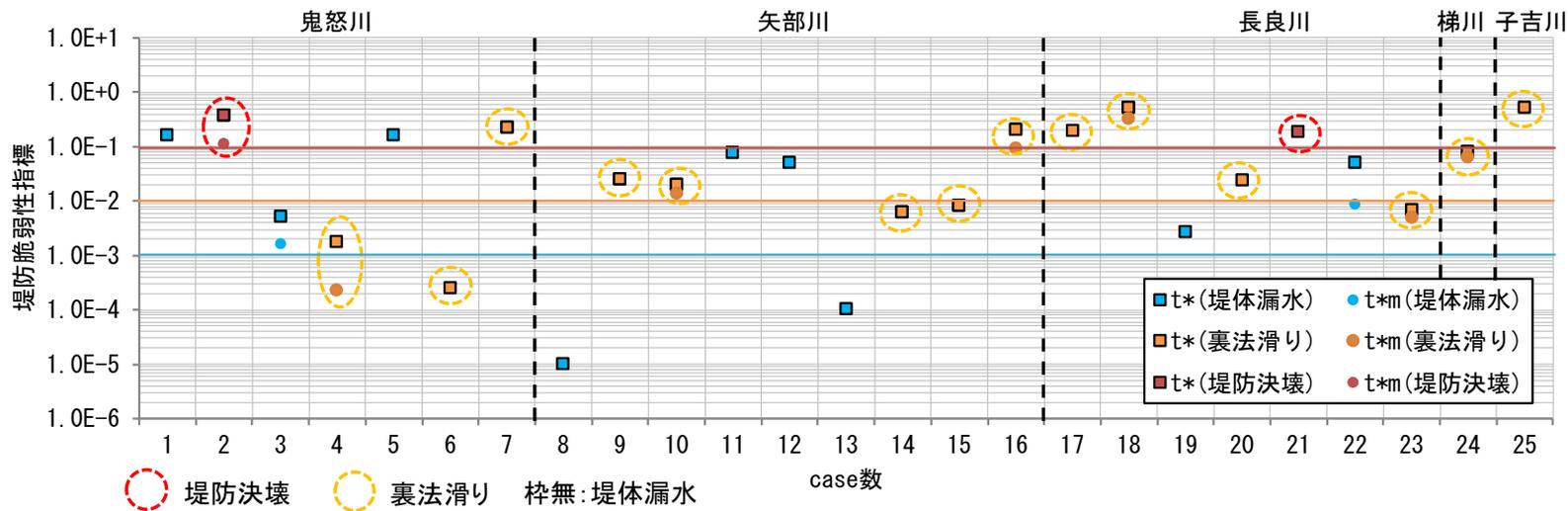
また，式(10)で示した不透水性基盤上の堤防脆弱性指標 t^* は，基本式の無次元化から導かれた浸透流ナンバーを堤体内浸透流に適用することで得られた指標(式(7))と同じ式形で表され，堤防脆弱性指標 t^* が，堤防浸透流の唯一の力学的相似条件であることを表現している．

堤防脆弱性指標は，堤防幅 b が大きいと浸透破壊に対する安定性が高いことや，水位 H ，洪水継続時間 t' ，堤体透水係数 k が大きいと浸透時間が短くなり，堤体の安定性が低くなるといった洪水時の堤体内浸透流の特徴と，安定性に与える影響の程度を的確に捉えている．

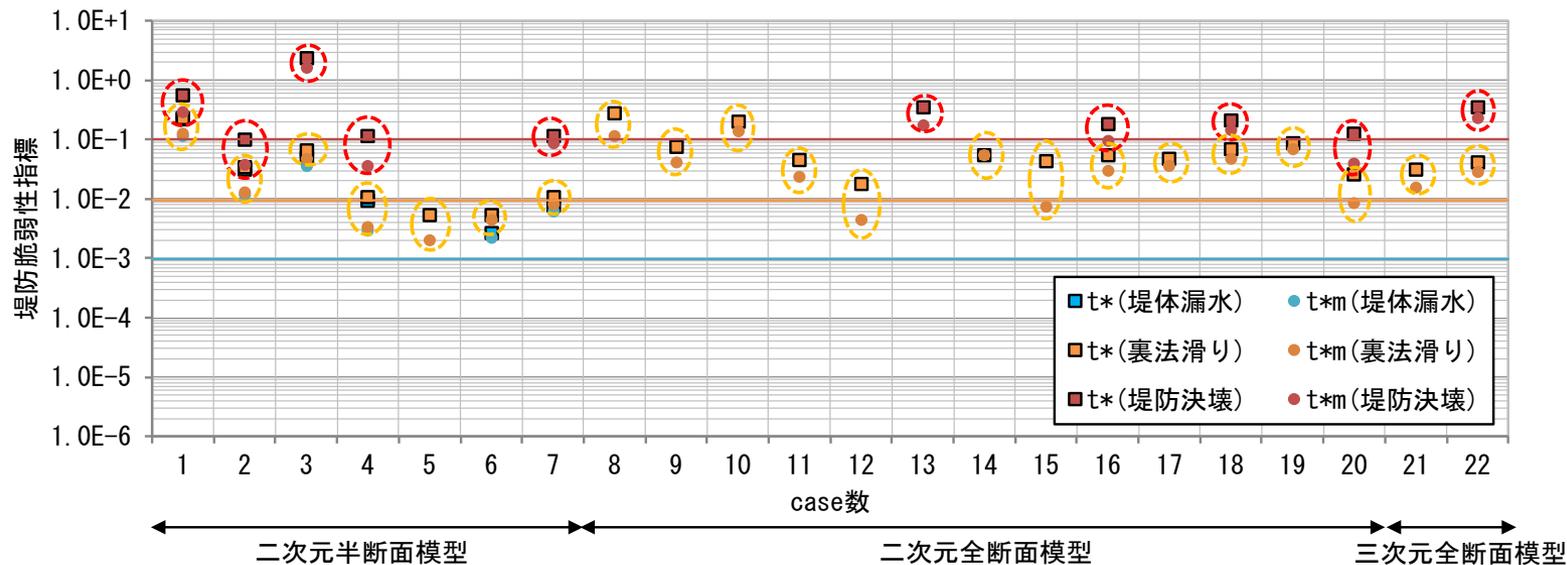
3. 堤防脆弱性指標 t^* の現地堤防と堤防模型実験への適用

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. 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.

図-2(a)に式(9),(10)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. 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, 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.



(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, t^*

堤防模型に関しては、小高らは、二次元半断面、二次元全断面、三次元全断面の3種類を用いて、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。

堤防模型は高さ0.2～0.3m、底幅0.7～0.9m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(9),(10)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。

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。

これより、現地堤防と相似な形状でかつ共通の t^* を用いた堤防浸透流の模型実験結果は、現地堤防の浸透破壊に対し力学的に相似な現象を与える根拠を提示出来た。

4. 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が知られている。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、高い精度で透水係数を求めることが課題である。

河川管理のために、また治水事業の信頼性向上のために、洪水時の水位を多点で観測し、観測水面形を解析水面形が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るようになってきた。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。

このように、河川における洪水時の縦断水面形観測結果が果たしている意義は、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が考えられる。

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(8)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。したがって、式(8)の透水係数を洪水上昇時に測定された堤体内浸潤線の時間変化を説明するように決める。この方法の有効性は、北海道開発局による十勝川千代田堤防実験で確認されている。

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、現地堤防において以下の検討を行うことが期待される。

- (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とともに、従来の透水係数算定法との関係についても比較検討し、透水係数算定法に対する考え方を整理する。

5. 結論

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の推定法を提示し、現地堤防と模型実験堤防の浸透破壊について考察した。主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 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その意味を議論した。
- (2) 堤体漏水、裏法滑り、堤防決壊の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。
- (3) 堤防破壊危険箇所の推定精度を高めることためには浸潤線の時間変化の測定に基づく透水係数算定方法の必要性を強調した。