

河川堤防の浸透破壊に関わる堤防脆弱性指標について今一度考える

浸透破壊 堤防脆弱性指標

中央大学研究開発機構 機構教授 福岡捷二

1. 序論

土中の地下水流は非常に遅い流れであり流れの力学的相似性は Reynold 数で決まる。河川堤防中の浸透流でもこの条件は重要である。しかし、河川堤防の高さや、幅、等が有限で、かつ多様な境界形状を取ることから、これらが河川堤防内の浸透流の運動に影響を与えると考えられる。したがって、堤防内の流れの力学的相似条件は、これら変化する諸量を含む形で表した Reynold 数で検討されることが重要である。

地下水流の基本式である Richard の式を用いて導かれる唯一の無次元基本物理量は、堤防脆弱性指標 t^* であることが福岡・田端によって示された。堤防脆弱性指標は Reynold 数を堤防の大きさ、幅、洪水流の水深、堤体の透水係数を用いて表現したものである。

福岡・田端は堤防脆弱性指標が模型と原型で同じ値を持つことが力学的相似の条件であり、原型と模型堤防の流れの比較を議論するうえで必須の要件となることを示した。すなわち、模型堤防が現地堤防と幾何学的に相似な形をしていれば、脆弱性指標が両者の間で同じ値を持つときに、両者の流れは力学的に相似となり、模型実験堤防の流れが現地堤防の水理現象を説明できること、また、現地において浸透破壊した堤防の脆弱性指標の値を集めることによって、堤防が浸透破壊に近づいているときの危険性について脆弱性指標の閾値を用いての判断することも可能になることを明らかにした。

本文では、堤防の浸透破壊と堤防脆弱性指標、模型実験と現地堤防の力学的相似関係について考える際の無次元形で示された堤防脆弱性指標の物理的解釈を論じ、さらに、堤防中の浸透流における透水係数について議論を深めることが本論文の目的である

2. 堤防脆弱性指標の持つ意味

流体力学、水理学では、異なるスケールで起こっている水理現象であるが、相似な形を有する場の流れが力学的に相似である条件は、流れの基礎式を関係する代表諸量で無次元化し支配的な流れの無次元量を得、これを用いて議論することが重要であることを最初に学んでいる。それらは、慣性力が卓越する場では、Froude 数 ($F=U/(gh)^{1/2}$) であり、粘性力が卓越する場では Reynold 数 (Ud/ν) である。ここに U は平均流速、 h は水深、 d は土砂の粒径、 ν は動粘性係数である。土中を流れる地下水流は粘性力が卓越する場であることから Reynold 数が支配的な無次元量である。

河川堤防内の破堤時の浸透流現象は多様で複雑であり、堤防の大きさや洪水規模が異なる

Reexamining the levee vulnerability index related to seepage failure in river levee

Shoji Fukuoka Research and Development Initiative, Chuo University

の中で、破壊時の Reynold 数がどのような値かわかることは容易でなく、仮にわかったとしても破堤を予測できるわけではない。しかし、堤防と洪水流の諸元を用いて Reynold 数、すなわち堤防脆弱性指標の持つ値の意味を知ることが出来れば、実堤防の破壊の危険性や模型実験から現地の堤防の挙動予測が可能になることから、力学的相似条件を理解することは堤防工学の上からも大きな意味を持ってくると考える。すでに著者らによって発表してきた堤防脆弱性指標の考え方について論じ、またその意味について考えてみる

土中の地下水流を表す基本式は Richard の式である。これは、運動方程式として Darcy 式と連続式から式 (1) で導かれる。

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

原型と模型の堤防内の流れにおいて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、原型と模型で同じ式となる必要がある。式(1)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。

$$\rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, S_r' = \frac{S_r}{S_{r0}}, \lambda' = \frac{\lambda}{\lambda_0}, h' = \frac{h}{H_0}, t' = \frac{t}{T_0}, k' = \frac{k}{k_0}, x' = \frac{x}{L_0}, y' = \frac{y}{L_0}, z' = \frac{z}{L_0} \quad (2)$$

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。

$$\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \rho' \lambda' S_r'}{\partial t'} + \frac{1}{S_{r0}} \frac{k_0 H_0 T_0}{\lambda_0 L_0^2} \left\{ - \frac{\partial}{\partial x'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial x'} \right) - \frac{\partial}{\partial y'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial y'} \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(k' \frac{\partial h'}{\partial z'} \right) \right\} = 0 \quad (3)$$

無次元化した基礎式 (3) では、左辺第 2, 3, 4 項を纏めた括弧の前に $\frac{1}{S_{r0}} \frac{k_0 H_0 T_0}{\lambda_0 L_0^2}$ 項がある。この値は、基礎式の無次元化によって現れた無次元数である。基礎式が無次元形で書き表されたことにより、この値が原型と模型で同じであれば浸透流の基礎方程式が同一となり、式 (3) を説くことにより得られる両者の浸透流は力学的に相似となる。式(3)の赤枠部分で示された値は、浸透流ナンバー (Seepage flow number) と呼ばれる。対象とする浸透流場 (原型) とそれを模した模型の流れは式 (3) で表現されるので、両者が同じ浸透流ナンバーを持つときのみ、両者の支配方程式は同一となる。このとき両者の浸透流は力学的に相似になる。

浸透流ナンバーは $k_0 H_0 / \lambda_0 L_0^2$ と $1/T_0$ の 2 つの時間の比で表されている。前者の時間は、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 は非常浸透流の代表時間を示す。代表水平長さ L_0 、代表時間 T_0 は、それぞれ、対象浸透場を規定する水平長さとして時間であり、 L_0 と T_0 適切に選ぶことが重要である。

ここで、浸透流ナンバーを堤防浸透流や破壊を支配する代表量、すなわち式(2)の下付き 0 の諸量を書き換える。 $L_0 = b$ (堤防の敷幅)、 T_0 は高水敷に洪水流が乗っている時間 t 、 H_0 を外水位 H 、 k_0 を透水係数 k とする。

この変換によって浸透流ナンバーは、堤防内の浸透流による堤防破壊指標である堤防脆弱性指標 t^* と呼ばれ式 (4) で表される。

$$t^* = \frac{5 k H t'}{2 \lambda b^2} \quad (4)$$

式(4)は浸透流の力学的相似則を示すものでフルード数やレーノルズ数と同様に無次元表示のままで使われるべきもので、式(4)の個々の諸量の数値の大小で議論するのではないことに注意が必要である。福岡・田端は、式(4)を用いて、 t^* の大きさによって、堤体の漏水、滑り、浸透破壊が決まり、堤防脆弱性指標が現地堤防と模型堤防の間で同じ力学的相似条件となることを示した。

堤防の浸透破壊について数多くの調査研究が行われて来ている。洪水時の堤防の浸透破壊につながる事象の解析で常に問題とされるのは、堤防を構成する土の透水係数 k をどのように与えるかである。土の透水係数は、土中の流速と関係するの諸元持っており、浸透水の挙動に大きく影響する。堤防の土質構成が複雑であればあるほど、どのような透水係数を解析に用いるかは大きな課題となるのは当然のことである。実際に、そのために、透水係数の算定法が数多く提案され、目的に応じた使われかたをしている。

「浸透に係る重要水防顔設定手順 (案)」等、堤防の浸透問題においては、 k は材料やその状態によって 100 倍、100 倍と容易に変わるため k の値で浸透現象が大きく変わることに注意を促している。

しかし、式(4)およびそれを適用した現地と模型堤防の破壊基準で見たように、堤防での浸透破壊を規定する堤防税持薬性指標はある範囲の値をとる。この値は k のみでなく堤防の大きさ (敷幅の 2 乗) や洪水流の特性値も関係しており、浸透破壊は k の大きさでではなく、これらの諸量を組み合わせた無次元形の値に注目すべきである。確かに k の変化が大きいと t^* の値に対する影響が大きい、堤防の敷幅 b が大きいと t^* には 2 乗で効く。その影響も大きいこと、その結果、透水係数は長い時間大きな空間を通ることにより透水係数は、空間的に調整された値をとるものと解釈できる。

次章では、堤防は複雑な土質材料で構成されており、堤防破壊が起こる時には、堤防脆弱指標がある範囲になるように透水係数が落ち着くと考えるのがよいことの事例を示す。

3. 堤防破壊時の堤防脆弱性指標と透水係数について

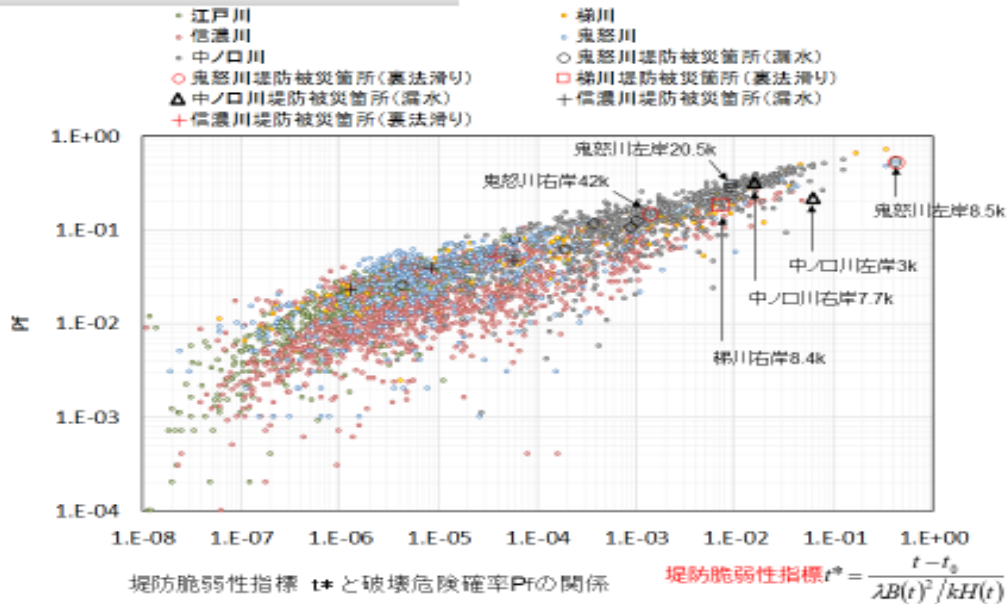
小高ら堤防模型を用いて、透水係数や基盤層の厚さを変化させ、計 22 ケースの実験を行っている。小高らは堤防脆弱性指標についての情報は実験当時有していなかったが、小さい模型で堤防の浸透破壊実験を行うためには、目的に応じた物理的解釈のもとに堤体材料を選ぶ必要があるとの立場で、実験条件の設定を行った。小高らは、暗黙知に堤防脆弱性

指標の重要性を認識していたと思われる。著者らは小高らの実験データを用いて、小高らの堤防被災形態と堤防脆弱性指標の値との関係について検討した、その結果堤防脆弱性指標を用いて堤防決壊、変状が生じていた現象の説明が出来た。

図-1 に代表的な一級河川の堤防脆弱性指標に対する浸透破壊危険確率の計算結果を示す。図中の横軸には、実際に河川堤防で浸透破壊が生じたときの脆弱性指標値をプロットしており、この時に t^* に用いた透水係数は堤体の平均値である。破壊危険確率の解析は、洪水流・河床変動解析で得られる堤防前面に沿った水位ハイドログラフを用いて、堤体内浸潤線の挙動を時・空間的に算出する。浸潤線堤防裏乗り先に達したときに浸透破壊を生ずるとしている。このとき、透水係数 k を確率変数として縦断的に堤防の信頼性解析を行い、浸透破壊危険確率を算出する。具体的には堤体内のボーリングデータより透水係数の平均値とばらつきを与え、モンテカルロ法により信頼性解析を行った。図-1 で注目すべきことは、堤体の k の平均値を与えた横軸の t^* に対して、信頼性解析では透水係数の大きな散らばりを与え堤防破壊危険確率を計算している。それにもかかわらず、堤防浸透破壊時の破壊危険確率は極めて狭い範囲にあり、実際に現地堤防で起こった浸透破壊時のデータ ($t^*=0.1\sim 1.0$) が破壊危険確率の狭い範囲内にプロットされていることである。これは先に述べたように、洪水時、堤防において長い時間、大きな空間を浸透流が通ることにより透水係数は、空間的に平均化された値をとっているものと解釈できる。

3. 堤防基礎データ、破壊危険確率から見た危険箇所の推定-堤防脆弱性指標

堤防脆弱性指標と破壊危険確率の関係



- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 浸透に係る重要水防箇所設定手順(案)、一般財団法人 国土技術研究センター、2019.