

ため池堤防の不飽和浸透過程を考慮した越流侵食過程の予測手法に関する提案

Predictive method of the Overtopping erosion process that takes into account the Unsaturated infiltration within the Reservoir Embankment

原田 紹臣*, 里深 好文**
Norio HARADA* and Yoshifumi SATOFUKA**

1. はじめに

近年、国土強靱化を目的とした流域治水対策において、既存ため池の有効活用が期待されている。一方、地震や集中豪雨の影響によるため池決壊に伴う洪水流出及びその下流域で発生する甚大な洪水被害が報告¹⁾されており、それらのリスクの把握は重要である。

そこで、本研究ではため池堤防における不飽和堆積物の決壊過程に関して、不飽和浸透過程を考慮した越流侵食過程の予測モデルを提案するとともに、筆者らが実施したため池堤防の越流決壊実験結果を対象に再現計算を行い、本モデルの妥当性について検証する。

2. 不飽和浸透過程を考慮した越流侵食予測モデル

提案する堆積部における不飽和浸透過程を考慮した侵食の予測モデルは、ため池堤防の不飽和堆積物中における浸透過程とその堆積物上部を流下する洪水や越流による侵食過程について同時に計算が可能である。また、堆積物の表面を介した流動層と堆積層との水移動についても考慮しており、河床表面内外の圧力差と堆積層の透水係数を用いて、水移動量を計算している。堆積物中の不飽和浸透流れおよび流動層の本解析は、鉛直二次元場を対象に、陽解法により計算している。

堆積層中の非定常浸透流れに関するモデルについては、浸透が卓越する場における掃流砂の堆積過程に関する小笠原・関根の既往研究²⁾を参考に構築している。また、河床勾配 α の鉛直二次元場を対象として、 x 軸を河床基岩面と並行にとり、それと垂直な z 軸をとって、スタガードスキームにより離散化している(図-1)。圧力水頭 ψ と体積含水率 θ および透水係数 k との関係については、式(1)に示すRichard式が成立するものとしている。

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \psi} + \beta S_s \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 S_s は比貯留係数、 β は飽和時に1、不飽和時に0となる係数である。また、谷³⁾によると、

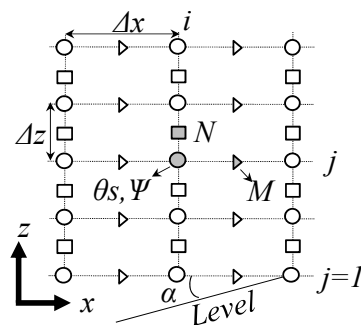


図-1 浸透流解析の変数配置

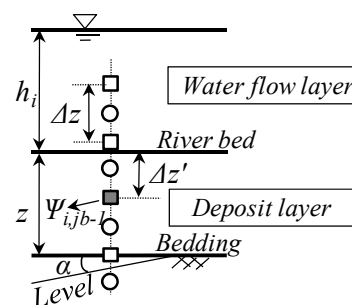


図-2 水浸透フラックスを求める際の変数配置図

圧力水頭と体積含水率の関係および透水係数は、それぞれ次のように表される。

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (2)$$

$$K = K_s \left\{ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right\}^m \quad (3)$$

ここに、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 ψ_0 は水分特性曲線の変曲点における圧力水頭、 K_s は飽和透水係数ならびに m は係数である。

流動層および堆積層との境界(河床面)における水交換フラックスを求める際に用いる変数の配置を図-2に示す。なお、水交換フラックスは、一定の値を持つ層厚 Δz と河床面位置までの層厚 $\Delta z'$ との関係により、次のように表される。

$$w_i = -K \left\{ \frac{h_i \cos \alpha - \psi_{i,jb-1}}{\Delta z' - \Delta z / 2} + \cos \alpha \right\} \quad (4)$$

*三井共同建設コンサルタント株式会社, **立命館大学, キーワード: ため池, 越流侵食, 数値解析, 不飽和浸透

ここに、 h_i は流動深、 $\Psi_{i,j-1}$ は河床面に一番近い堆積層内部の地点における圧力水頭である。なお、流動層における流れの基礎方程式は、一様砂礫を対象とした一次元非定常流れ⁴⁾のものをを用いる。

3. ため池堤防の越流決壊実験を対象にした解析事例

ため池堤防の越流決壊に関して、提案する予測モデルを用いて不飽和浸透過程および越流侵食過程について再現計算し、筆者らが実施した実験結果（図-3）⁵⁾との比較を通じてモデルを検証する。解析条件については、実験条件より $\theta_s=0.4$ 、 $\theta_r=0.1$ 、 $\Psi_0=-0.05$ cm/s、 $K_s=1.4$ cm、 $S_s=1.0$ 、 $m=3$ とし、 $\Delta x=20$ cm、 $\Delta z=10$ cm、 $\Delta t=0.001$ s として計算した。また、溪床勾配を6度、河床の粒径を0.5cm、内部摩擦角を37度、堆積層表面における容積濃度を0.6としマニングの粗度係数を $0.05 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ としている。堆積層と流動層の水交換については、河床面を挟んだ鉛直交換と堤防上流側の湛水層からの水平交換について考慮している。

不飽和浸透過程および越流による堆積物の侵食過程に関する代表時間毎における解析結果を、図-4に示す。図中の着色部分は、不飽和浸透過程に影響される堆積物中における圧力水頭を示している。越流開始直前である時刻220秒までの上流湛水部からの水平浸透およびそれ以降の越流侵食による堆積物の変形過程が示されている。なお、図-4に示すとおり、越流侵食過程が浸透過程に比べて早いことが確認される。また、決壊過程の後半（例えば、開始時刻270秒）の斜面部においては、流動層からの鉛直浸透の影響も受け、堆積物はほぼ飽和状態であることが確認される。

解析結果と実験結果⁵⁾の比較を、図-5に示す。全体の傾向としてはほぼ再現性が確認され、提案したモデルの妥当性が示されている。ただし、越流初期段階（220～260秒）での不飽和堆積上における解析結果の侵食速度が、実験結果に比べて少し遅い傾向を示している。一方、決壊過程の後半（例えば開始時刻270秒以降）での飽和堆積上においては、ほぼ再現されている。この要因としては、初期段階における不飽和堆積層上における流れの抵抗則や侵食速度式に一部において課題があるとも考えられるため、今後更なる検討が望まれる。ただし、図-5に示されるとおり、最終的には実験値と計算値とが収束しており、再現性に関して、概ね妥当であると考えられる。

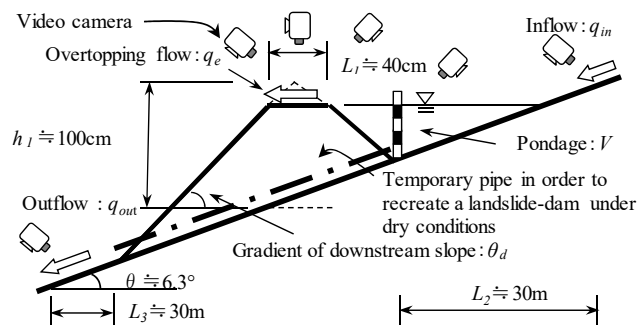


図-3 筆者らの実験におけるため池堤防の形状⁵⁾

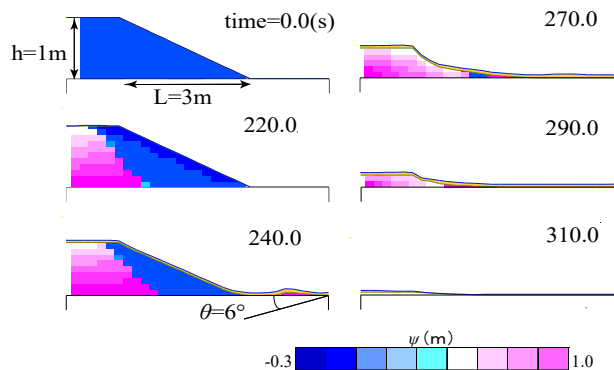


図-4 不飽和浸透および越流侵食過程の解析結果

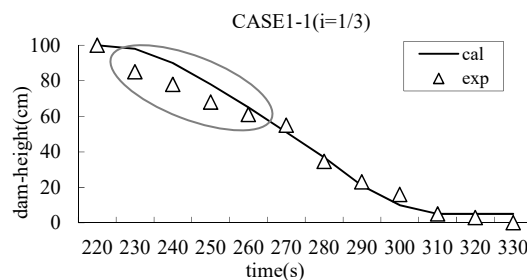


図-5 ため池堤防天端高さの時間的変化に関する実験結果との比較

参考文献

- 1) 小嶋創・吉迫宏・竹村武士・李相潤・正田大輔・三好学・安芸浩資：中山間傾斜地谷部の決壊事例に基づくため池決壊氾濫解析手法の検討，農業農村工学会論文集，Vol. 92, No. 1, pp. 29-40, 2024.
- 2) 小笠原基，関根正人：浸透が卓越する場に形成される体積地形に関する数値解析，水工学論文集，No.51, pp.979-984, 2005.
- 3) 谷誠：一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性，日本林学会誌，Vol.64, pp.409-418, 1982.
- 4) 高橋保・中川一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌，Vol.44, No.3, pp.12-19, 1991.
- 5) 原田紹臣，赤澤史顕，速見智，里深好文：ため池決壊に伴う洪水流出過程に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 69, No. 4, pp. I_1213-I_1218, 2013.