

堆積物中の不飽和浸透過程を考慮した侵食に関する基礎的研究

○原田 紹臣（三井共同建設コンサルタント株式会社）

里深 好文 (立命館大学)

1. 研究の目的

堆積物中の不飽和浸透課程も考慮した越流侵食に関する研究は、河川堤防の集中豪雨による河川水位急上昇時における越流決壊に関する検討や天然ダム決壊に関する検討に際し、重要であると考える。

河川堤防における越流侵食や浸透による決壊に関しては、大型模型を用いた独立行政法人土木研究所（旧建設省土木研究所）¹⁾や奥田ら²⁾の実験的研究報告があり、越流侵食現象と浸透現象の關係に着目した検討が行われている。奥田ら²⁾の報告によると、堤体内の湿潤状態や施工条件等が堤体の侵食過程に影響することが報告されている。

不飽和堆積物の越流侵食過程を再現するため、里深・水山³⁾による溪床堆積物の不飽和浸透過程を考慮した河床変動モデルに改良を加えた。ただし、里深・水山³⁾の解析モデルは、実験等によるモデルの再現性について検証がなされていない。そこで、本研究では一般的に実験結果の再現性において難があると考えられている不飽和浸透過程のみに着目し、理想的な条件下での実験結果と解析結果との比較によりモデルを検証した。

最後に、今後の課題について考察した。

2. 計算に用いたモデルの基礎式

2.1. モデルの概要

本予測モデルは、天然ダム等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土石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解析は、陽解法により計算している。

2.2. 堆積層中の不飽和浸透流れに関する基礎方程式

堆積層中の非定常浸透流れに関するモデルについては、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

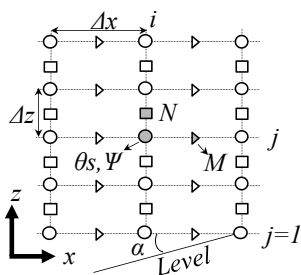


図-1 浸透流解析の変数配置

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⁴⁾によると、圧力水頭と体積含水率の関係及び透水係数は、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。

2.3. 流動層及び堆積層間における水移動

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 w_i を求める際に、用いる変数の配置を、図-2 に示す。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。

図-2 水浸透フラックスを求め

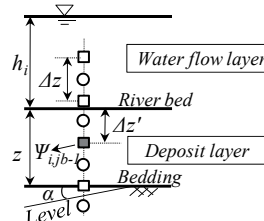


図-2 水浸透フラックスを求め
る際の変数配置図

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

ここに、 h_i は流動深、 $\psi_{i,jb-1}$ 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。

2.4. 洪水及び土石流の一次元基礎方程式

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⁵⁾のものを用いる。

3. 室内実験に基づく不飽和浸透モデルの検証

本解析モデルにおける不飽和浸透過程のみに着眼し、理想的な条件下での実験結果と解析結果を比較した。なお、実験に際しては再現性を良くするため、透水性の高いアンスラサイトを用了。

3.1. 実験概要

実験に用いた装置を、図-3 に示す。使用した実験水路は、

アンスラサイトを長さ 3m, 高さおよび幅 10cm に敷き詰め, 勾配を 6 度に傾斜させ設置した. 上部から $5.3\text{cm}^3/\text{s}$ の流量で水道水を供給し, 下流端においてメスシリンダーにより流出する流出流量を計測した.

実験は, 水路延長中央部付近に延長 20cm, 高さ 3cm および幅 10cm である不透水性障害物の設置有無により, 2 ケース (CASE1-1: 設置無, CASE1-2: 設置有) を実施した. 不飽和浸透過程の観測については, ガラス製の水路側面からの目視観察により, 各時間における浸潤面を計測した.

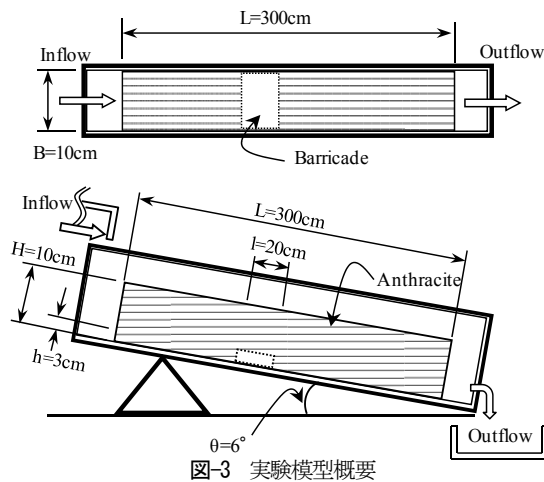


図-3 実験模型概要

使用したアンスラサイトの透水係数は, 室内透水試験の結果より 10cm/s であった. また, pF 試験により得られた土の水分特性曲線を, 図-4 に示す.

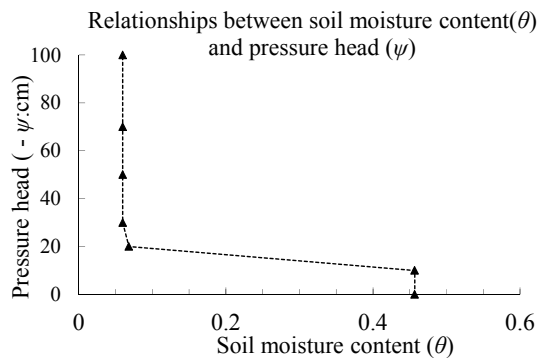


図-4 使用したアンスラサイトの水分特性曲線

3.2. 解析条件

前述のモデルを用いて, 実験とほぼ同じ条件を想定し, 不飽和浸透過程について解析した. 解析条件として, $\theta_s = 0.46$, $\theta_r = 0.06$, $\psi_0 = -0.15\text{cm}$, $K_s = 10\text{cm/s}$ ならびに既往研究 (例えば 3)) を参考に $S_y = 1.0$, $m = 6$ と仮定し, $\Delta x = 10\text{cm}$, $\Delta z = 0.5\text{cm}$, $\Delta t = 0.0002\text{s}$ として計算した.

3.3. 実験結果及び計算結果

浸透過程に関する実験結果と解析結果の各実験ケースにおける計測時間毎との比較を, 図-5 に示す. CASE1-2 にお

ける実験開始時刻 25 分時点の障害物周辺での流速 (ベクトル) に着目した拡大図を, 図-6 に示す. これを見ると, 障害物の影響により流れ場が変化していることが確認できる.

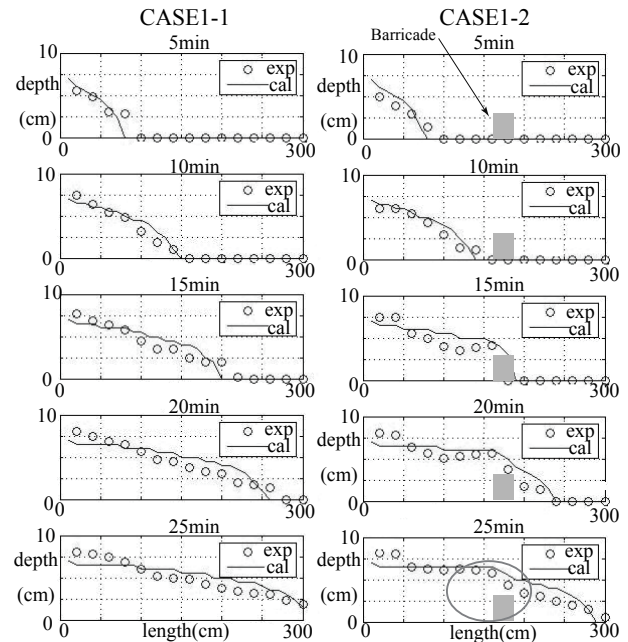


図-5 解析結果 (CASE1-1 及び CASE1-2 浸潤線)

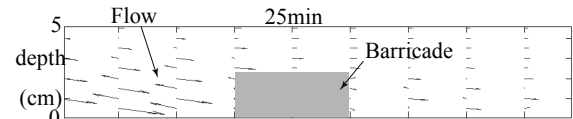


図-6 解析結果 (CASE1-2 における障害物周りの流れ場)

不飽和浸透流の観測と解析値の比較により, 両者はほぼ一致していることが確認され, 提案したモデルの妥当性が示されている. ただし, 今回仮定したパラメータである比貯留係数 S_y および土質毎の透水に関する係数 m は, 今後更なる検討が必要である.

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川研究室: 越水堤防調査最終報告—解説編一, 土研資料2074号, 1984.
- 2) 奥田敏昭, 中川一, 関口秀雄, 岡二三生, 後藤仁志, 小俣篤: 越流侵食・浸透のメカニズムを把握するための小型堤防による越流侵食実験, 河川技術論文集, Vol.16, pp.347-352, 2010.
- 3) 里深好文, 水山高久: 溪床堆積物の不飽和浸透過程を考慮した石礫型土石流の発生・発達過程に関する数値計算, 水工学論文集, No.53, pp.697-702, 2009.
- 4) 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.
- 5) 里深好文, 水山高久: 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58/No.1, 2005.