

天然ダム決壊予測に関する基礎的研究

三井共同建設コンサルタント株式会社 正会員 ○原田 紹臣
立命館大学 正会員 里深 好文

1. 研究の目的

堆積物中の不飽和浸透過程も考慮した越流侵食に関する研究は、天然ダムの決壊に関する検討や河川堤防の越流決壊に関する検討に際し、重要であると考えられる。

天然ダムの決壊過程は図-1に示すとおり、「越流侵食」や「すべり破壊」および「進行性崩壊」に分類されている¹⁾。これまで、各現象は個別のモデルによって解析されており、複合的な決壊過程の予測が課題となっている。

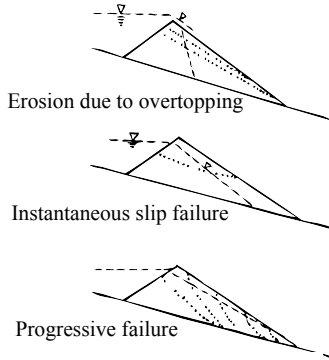


図-1 天然ダムの決壊過程¹⁾

本研究では天然ダムの決壊過程に関して基礎的な情報を収集するために、実地形を利用した小規模な人工天然ダムの決壊実験を実施し、地形変化過程について観測した。また、この天然ダムの越流侵食過程を再現するため、里深・水山²⁾による渓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。この新たな予測モデルを用いて天然ダム決壊実験を対象とした再現計算を行い、モデルの妥当性を検証するとともに、今後の課題について考察した。

2. 現地実験に基づく天然ダム決壊過程の把握

本実験では、河道幅約5m程度の溪流において、比較的均一な粒径の土砂を用いて天然ダムを作製し、自然湛水させた後、決壊させた(図-2)。

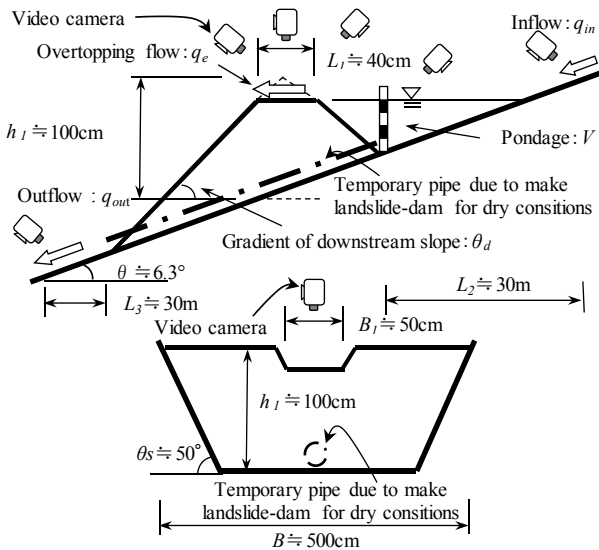


図-2 作製した天然ダムの形状

実験ケースは、天然ダムの下流法勾配の差異に着眼した2ケース(下流法勾配は1/3および1/2)を実施した。なお、実験に使用した土砂の湿潤密度は2.74g/cm³、自然含水比は8.23%、ならびに透水係数は1.40cm/sであった。

本実験(CASE1-1およびCASE1-2)における天然ダムの決壊タイプおよび決壊に要した時間を、表-1に示す。なお、決壊に要した時間とは、越流開始時点から崩壊終了までの時間である。

表-1 天然ダム決壊過程の結果

Type	Dam failure process	Time of failure process
CASE1-1	Erosion due to overtopping	105 (s)
CASE1-2	Erosion due to overtopping	75 (s)

天然ダム上流部の湛水域における水位上昇プロセスと越流による流出プロセスとの関係を、図-3に示す。無次元湛水量 V^* は、その時刻における湛水量 V と最大湛水量 V_{max} の比である。また、無次元越流量 q^* は、越流量 q_e と湛水部への流入流量 q_{in} (約0.016m³/sで一定) との比である。なお、実験開始(湛水開始)時点をtime=0としている。

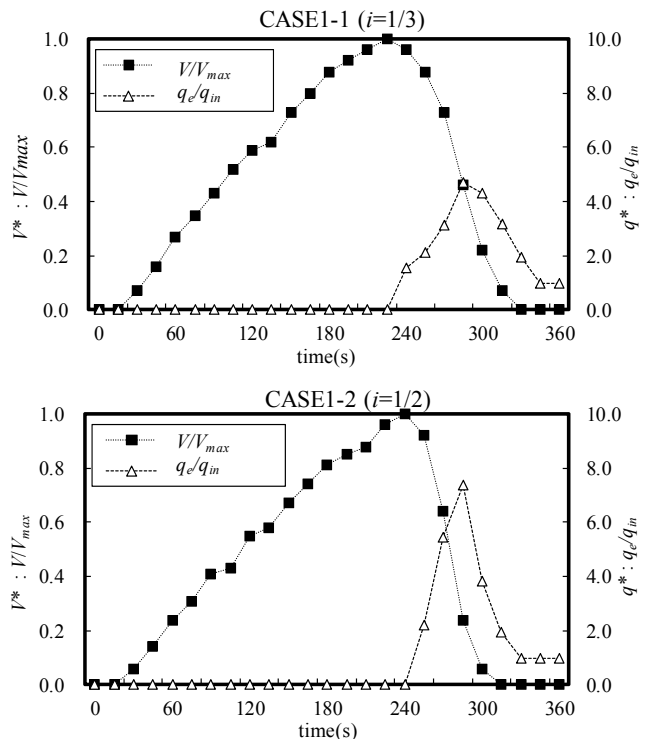


図-3 湛水量と越流量との関係

天然ダム下流法勾配が1/2の場合、1/3の場合に比べて、ピーク時には約1.59倍の流出量になっていたことが確認された。

キーワード 天然ダム, 越流決壊, 不飽和浸透, 土石流計算, 現地実験

連絡先 〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1000号 三井共同建設コンサルタント株式会社 関西支社 TEL06-6599-6019

3. 計算に用いたモデルの基礎式

(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における浸透過程と、その堆積物上を流下する洪水や土石流による侵食過程に関して同時に計算できる。また、堆積物の表面を界した流動層と堆積層との間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、この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) 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 軸を河床基岩面と平行にとり、それと垂直な方向に 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-4)。

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。

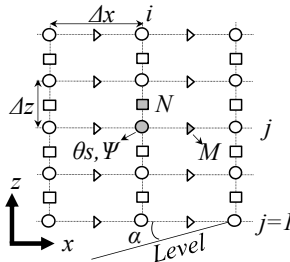


図-4 浸透流解析の変数配置

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

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、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。

(3) 流動層と堆積層との間における水移動

流動層と堆積層との境界(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-5に示す。水交換フラックスは、一定の値を持つ層厚 Δz と河床面までの厚さ $\Delta z'$ との関係により、次のように表される。

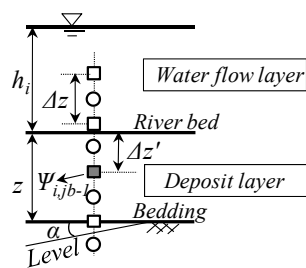


図-5 水交換フラックスを求める際の変数配置図

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

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。

(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としては、一様砂礫を対象とした一次元非定常流れ(例えば⁴⁾)のものを用いている。

4. 天然ダム決壊実験を対象とした解析

(1) 解析条件

前述の実験とほぼ同じ条件を想定し、不飽和浸透過程と越流侵食過程について解析した。解析条件として、 $\theta_s=0.4$ 、 $\theta_r=0.1$ 、 $\psi_0=-0.05\text{cm}$ 、 $K_s=1.4\text{cm/s}$ 、 $S_s=1.0$ 、 $m=3$ とし、 $\Delta x=20\text{cm}$ 、 $\Delta z=10\text{cm}$ 、 $\Delta t=0.001\text{s}$ として計算した。

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天然ダム上流側の湛水層からの水平交換について考慮している。

(2) 解析結果および考察

不飽和浸透過程および越流侵食過程の解析結果(CASE1-1)を、図-6に示す。図中の着色部分は、堆積物中における圧力水頭を示している。越流開始時刻220秒までの上流の貯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。

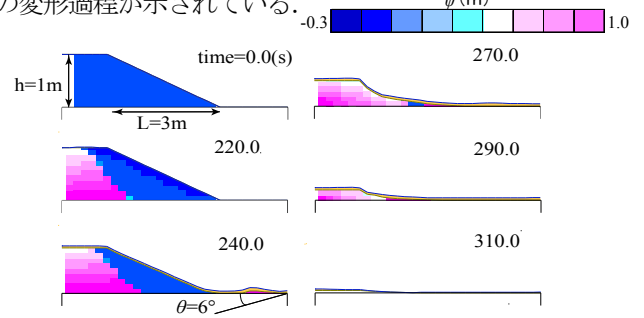


図-6 不飽和浸透および越流侵食過程の解析結果(CASE1-1)

CASE1-1における解析結果と実験結果の比較を、図-7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)における侵食速度の解析結果が、実験結果に比べて少し遅い傾向を示している。この要因としては、初期段階における流れの抵抗則や侵食速度式に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。

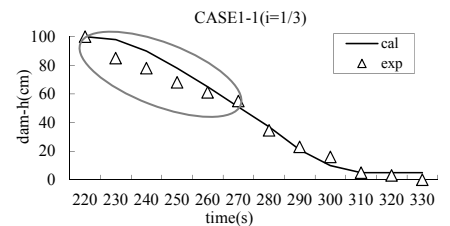


図-7 天然ダム天端高さの時間的変化に関する比較図(CASE1-1)

参考文献

- 1) 高橋保, 匡尚富: 天然ダムの決壊による土石流の規模に関する研究, 京都大学防災研究所年報, No.31/B-2, pp.601-615, 1988.
- 2) 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.
- 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) 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.