

天然ダム進行性崩壊の数値シミュレーション

立命館大学大学院 学生会員 ○高山翔揮
立命館大学大学院 非会員 鬼頭和記
立命館大学 正会員 里深好文

1. はじめに

大規模な天然ダムが形成された際は、天然ダムの決壊過程を数値シミュレーションにより予測し、天然ダム決壊により生じる土石流の氾濫範囲を的確に判定することが求められる。天然ダムの決壊過程は、越流侵食による決壊、すべり崩壊による決壊、進行性崩壊による決壊の3つのタイプに分類される。このうち越流侵食による決壊過程を再現する数値シミュレーション手法はいくつか提案されており、その妥当性は実験結果や災害事例との比較により検証されている。一方で、進行性崩壊による決壊過程に関する数値シミュレーションを行った研究は少なく、粒子法を用いた研究に限られている。本研究では、進行性崩壊による天然ダム決壊過程に関する新たな数値シミュレーション手法を提案する。

2. 数値シミュレーション手法

2.1 モデルの概要

図1に水路実験で観察された進行性崩壊による天然ダム決壊過程を示す。ダム法先において漏水が発生し、漏水が堤体を侵食することで繰り返し崩壊が発生している。そして、崩壊の遡上に伴いダム高が低下し、ダム高が湛水位より低くなったとき、ダム天端から越流が発生し、越流水が天然ダムを急激に侵食する様子が確認される。本研究では、このような天然ダム決壊過程を再現する数値シミュレーションモデルを構築する。

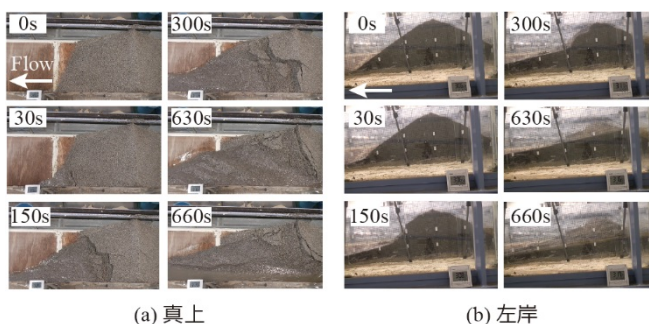


図1 天然ダム決壊過程の実験結果

里深ら¹⁾は、鉛直2次元場を対象に、溪床堆積物内の非定常浸透過程と土石流の発生・発達過程を同時に解析する数値シミュレーション手法を提案した。この手法に天然ダムのすべり崩壊過程を表現するモデル(崩壊モデル)を導入する。

2.2 浸透流と土石流に関する基礎方程式

天然ダム内の浸透過程と土石流の発生・発達過程の基礎方程式は、里深ら¹⁾の研究とほぼ同じである。ただし、天然ダム決壊過程では地形勾配が大きく変化するため、流砂形態毎に異なる土砂濃度式を与えた。流動層と堆積層間の水の移動量は、里深ら¹⁾の研究と同様に、天然ダム表面から堆積層内にわずかに入った地点の圧力と天然ダム表面に作用する流動層の圧力とによって求めた。

2.3 崩壊モデル

天然ダムのすべり崩壊過程は、水際部における斜面安定性を極限平衡法により評価し、崩土は平衡流砂量で流出するものと考えて解析を行う(図2)。

斜面安定解析では、滑落崖脚部を通る直線のすべり面を仮定し、安全率 F_s を以下の式で求める(図2左)。

$$F_s = \frac{F_R}{F_D} = \frac{(W \cos \alpha_s - u_w l) \tan \phi' + (c' + \tau_{suc}) l}{W \sin \alpha_s} \quad (1)$$

ここに、 F_R は抵抗力、 F_D は駆動力、 W はすべり土塊の重量、 α_s はすべり面の勾配、 u_w は間隙水圧、 l はすべり面の長さ、 ϕ' は内部摩擦角、 c' は粘着力、 τ_{suc} はサクシオンによるせん断抵抗力であり、 u_w はすべり面に沿う平均的な圧力水頭に水の単位堆積重量を乗じることで求め、 τ_{suc} はすべり面に沿う平均的な圧力水頭を Nakagawa らの式²⁾に代入することで求めた。

そして、 α_s を変化させることで、考え得る全てのすべり面の F_s を求め、その中で最小の F_s となるすべり面を採用する。その F_s が1を下回る場合、崩壊が発生すると考え、崩壊土砂量(崩土堆積量 V_c)を計算し、土砂収支が合うように河床高を低下させる。

崩土は滑落崖直下(水際部)の平衡流砂量で流出するものと考え、崩土の流出土砂量 q_{cs} および流出量 q_c を以下の式で計算する(図2右)。

$$q_{cs} = q_d C_{\infty d} \quad (2)$$

$$q_c = \frac{q_{cs}}{C_*} \left\{ C_* + (1 - C_*) \frac{\theta_c}{\theta_s} \right\} \quad (3)$$

ここに、 q_d は滑落崖直下の土石流流量、 $C_{\infty d}$ は滑落崖直下の平衡土砂濃度、 C_* は河床の容積土砂濃度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_c は崩土の平均体積含水率であり、 $C_{\infty d}$ は滑落崖直下の河床勾配 α_d から算出される。なお、 $V_c = 0$ のとき、 $q_c = q_{cs} = 0$ である。

キーワード 天然ダム, 進行性崩壊, 漏水, 数値シミュレーション

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1, TEL : 077-561-2625, E-mail : rd0036pr@ed.ritsumei.ac.jp

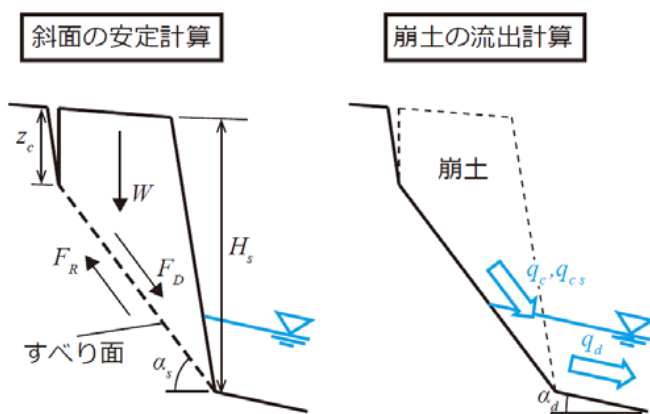


図2 崩壊モデルの概要図

3. 計算条件

本モデルの妥当性を検証する適切なデータが得られていないため、仮想的条件下における計算を行った。一様な勾配、一様な流路幅の河川に天然ダムが形成され、上流から一定流量の水が供給された際の進行性崩壊による天然ダム決壊過程を追跡する。流路幅は 100 m、河床勾配は 1°とし、流路上流からの流入流量は 100 m³/s としている。ダム高は 60 m、ダム上流法面勾配は 30°、ダム下流法面勾配は 20°とし、天然ダム内の初期圧力水頭は一様に -0.1 m としている。内部摩擦角は 35°、粘着力は 1 kN/m²、比貯留係数は 0.2 m⁻¹ とした。テンションクラック深さ z_c は滑落崖高さ H_s と比例関係にあると考え、 $z_c = 0.3H_s$ とした。Δx=5.0 m、Δz=4.0 m、Δt=0.01 s とした。その他のパラメータは里深らりと同じ値を用いた。

また、ダム天端から越流が生じた後の解析では、すべり崩壊過程は考慮せず、土石流の発生・発達過程と天然ダム内の浸透過程のみを考慮した解析を行った。

4. 計算結果と考察

図3に越流前における天然ダム決壊過程の計算結果を示した。図中の時間は、天然ダムに水の流入が開始してから経過時間を示している。7,800 s にダム法先から漏水が生じ、7,800-83,800 s にかけて漏水が堤体を侵食することによりダム法先部が変形している。83,800 s に最初のすべり崩壊が発生し、その後、小規模な崩壊が繰り返し発生している。125,300 s には、ダム高が湛水位より低くなり、ダム天端から越流が発生している。この時点において、ダム天頂部直下の法面は急勾配となっていることが分かる。

図4に越流後における天然ダム決壊過程の計算結果を示した。図中の時間は、越流が生じてからの経過時間を示している。15-35 s にかけて、越流水の侵食によりダム高が急激に低下している。その後、比較的緩やかにダム高は低下しており、流路下流端におけるピーク流量は 231 s に発生している。

これらの計算結果より、本研究で提案する数値シミュレーションモデルは、ダム法先で生じる崩壊の遡上過程と越流侵食過程をある程度再現できると考えられる。

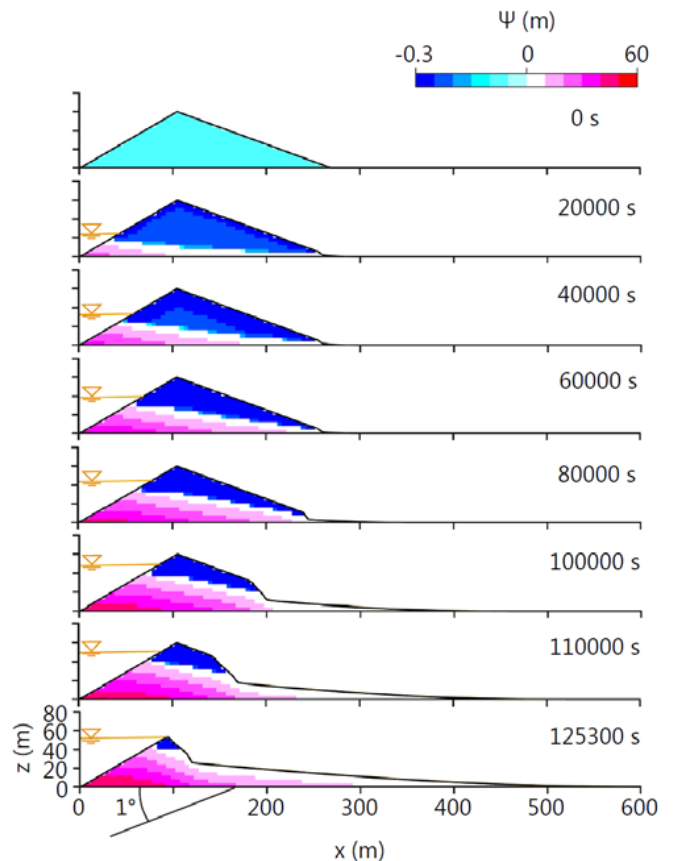


図3 越流前の天然ダム決壊過程の計算結果

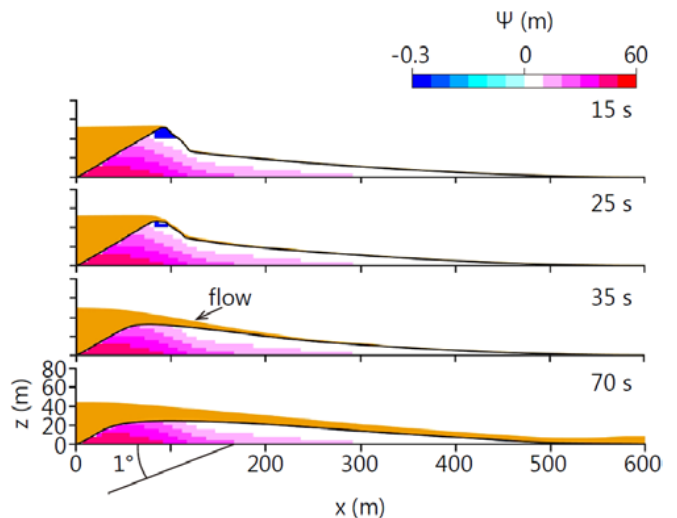


図4 越流後の天然ダム決壊過程の計算結果

4. まとめ

本研究で提案したモデルが進行性崩壊による天然ダム決壊過程をある程度まで再現できることを示した。今後は、天然ダム決壊に関する水路実験を行い、実験結果と計算結果とを比較することで、本モデルの妥当性をさらに検証する予定である。

参考文献

- 1) 里深好文・水山高久, 水工学論文集, 第 53 巻, pp. 697-702, 2009.
- 2) Nakagawa et al., Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 55, K-1-K-4, 2011.