# 堆積物中の不飽和浸透過程を考慮した 侵食に関する研究

## NUMERICAL SIMULATION TO PREDICT DEPOSIT DEFORMATION DUE TO EROSION FOR SATURATED AND UNSATURATED CONDITIONS

## 原田 紹臣<sup>1</sup>・里深 好文<sup>2</sup> Norio HARADA and Yoshifumi SATOFUKA

# <sup>1</sup>正会員 三井共同建設コンサルタント株式会社(〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1000号) <sup>2</sup>正会員 工博 立命館大学教授(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

The prediction of deposit deformation due to erosion for unsaturated conditions is important to analyze the deformation processes of a landslide-dam or the rapidly rising water of a river levee. For landslide-dam deformation, three types of processes have been reported: erosion due to overtopping, instantaneous slip, and progressive failure due to infiltration flow. From the observation of the deformation processes of a landslide-dam through field experiments, a numerical model was developed for deposit deformation due to erosion for saturated and unsaturated conditions based on Satofuka and Mizuyama's model (2009). The model based on their flume experiments, which focused on the seepage of deposits, was composed of an unsteady two-dimensional infiltration model and a one-dimensional flood and debris flow model. The results clarified the difference between each process of infiltration flow and erosion due to overtopping.

## *Key Words :* Field observation, Erosion, Unsaturated deposit, Numerical simulation, Infiltration flow

### 1. はじめに

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、河川堤防の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)<sup>1)</sup>や輿田ら<sup>2)</sup>の実験的研究報告があり、越 流侵食現象と浸透現象の関係に着目した検討が行われて いる. 輿田ら<sup>2)</sup>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.

天然ダムの決壊に関しては、高橋・匡<sup>3</sup>,水山ら<sup>4</sup>なら びに小田ら<sup>5</sup>等の研究がある.高橋・匡<sup>3</sup>の報告によると、 天然ダムの決壊過程は図-1に示すとおり、越流侵食や大 規模崩壊および進行性崩壊に分類されている.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.

水山ら<sup>4</sup>の報告によると、過去における天然ダムの破壊原因については図-2に示すとおり、越流に伴う侵食に



図-1 天然ダムの決壊過程<sup>3)</sup>

よる破壊がほとんどとされている.ただし、判明してい ない事例も多く、更なる整理が必要であると考える.ま た、天然ダムの決壊実験に関する既往研究<sup>例えば、5</sup>は実験 水路を用いた理想的な条件下での実験であり、山地河川 の実地形を利用した実験は殆ど存在しない.

そこで、本研究では不飽和堆積物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、地形変化につい て観測した.また、この天然ダムの決壊越流侵食過程を 再現するために、里深・水山<sup>の</sup>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.

ただし、里深・水山<sup>の</sup>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、 本研究では先ず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眼し、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、この新たな予測モデルを用い て天然ダム決壊実験結果を対象に再現計算を行い、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

堆積物中の不飽和浸透過程を考慮した侵食過程に関し て基礎的な情報を収集し予測モデル開発の足掛かりとす るため、実地形を利用した小規模な天然ダムの決壊実験 を実施し、その侵食過程について観測した.

#### (1) 実験概要

一般的に、河道が堆積物で閉塞し天然ダムが形成され ると、その上流域に流水が堰き止められ湛水する.その 結果、天然ダムの上流部において浸水被害が生じること が懸念される.また、天然ダムの下流域においては、天 然ダムの決壊に伴う土石流やフラッシュフラッドの発生 より浸水被害が懸念される.これらの被害を軽減するた めには、現象を再現できる予測モデルを開発し、予測結 果に基づいた対策を講じることが有効であると考えられ る.

そこで、本実験では上部に砂防堰堤が存在し河床に堆 積物がなく露岩している河道幅約5m程度の渓流におい 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.本実験における形状等 の概要を、図-3に示す.実験ケースは、表-1に示すとお り、既往研究報告<sup>例えば、3)</sup>を参考にした天然ダムの下流法 勾配の差異に着眼した2ケース(下流法勾配を1/3および



図-3 作製した天然ダムの形状

Туре	Gradient of downstream slope: $\theta_d$		
PRE	26.6° (1/2)		
CASE1-1	18.4° (1/3)		
CASE1-2	26.6° (1/2)		

1/2) と予備実験を含めた計3ケースを実施した.

実験に使用した土粒子の密度は2.74g/cm<sup>3</sup>,自然含水比 は8.23%ならびに透水係数は1.40cm/sであった.なお, 土の力学的特性(粘着力ならびにせん断強度等)は、実 験時の特性値を現地において厳密に把握することが困難 であったため砂質土に関する一般的な値を用いることと し、採取試料を用いた測定は行っていない.また、天然 ダムは仮設排水管を併設し、自然乾燥した状態で作製し た.

実験中は、次の方法にて観測した.

- ・ 天然ダムの湛水部への流入量 q<sub>in</sub>の計測については、 天然ダム約30m程度上流部に仮設越流堰を設けて、 連続的に観測した.流量算出に際しては、Boss の 最小比エネルギーの定理(限界水深)により求めた.
- ・ 天然ダム下流部約30m付近において,同様に仮設越 流堰により流出量 q<sub>out</sub> について連続的に観測した.
- ・ 天然ダム上流部の湛水(V) 過程については、湛
   水部内に設置した水位計を用いて連続的に観察した。
- ・ 天然ダムの決壊過程については、数台のビデオカメ
   うにて、侵食幅の変化等も含めて連続的に撮影した。

#### (2) 実験結果

#### a) 天然ダム上流部における湛水過程

天然ダム上流部からの流入量 q<sub>in</sub>は、全実験期間中に おいてほぼ一定の約0.016m<sup>3</sup>/sであった.なお、湛水過程 については、流入量と湛水部における水位計との関係よ り近似的にモデル化した(後述,図-4参照).

#### b) 天然ダム決壊過程

本実験(CASE1-1および1-2)における天然ダムの決 壊過程および決壊に要した時間を,表-2に示す.ここで, 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.

なお、予備実験では、パイピングに伴う進行性破壊 (図-1参照)が確認された.この原因は、天然ダムを作 製するために設置した仮設用排水管や土嚢の周辺におい て大きな空隙部が存在していたことにあると推測される.

#### c) 湛水過程および越流侵食過程

天然ダム上流部の湛水部における水位上昇プロセスと CASE1-1および1-2で観測された越流による流出プロセ スとの関係を、図-4に示す.なお、各流量については、 相対比較を目的に無次元化を図った.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  $q_m$  (一定)の比である.なお、時間開 始(湛水開始)時点を、time=0としている.

図-4に示されるとおり, 天然ダム下流法勾配が勾配 1/2の場合(CASE1-1)は1/3の場合(CASE1-2)に比べてピー ク時において流出流量は約1.59倍であり, 一方で洪水決 壊時間は約0.6倍であった. この原因は, 下流法勾配の 違いによる同高さでの水平越流長が異なり, 天端の変形 に影響を及ぼしたことによると推測される.

#### d) 越流量と下流域における洪水流出量との関係

天然ダムからの最大越流量 q<sub>e max</sub>, 下流部(約30m) における洪水最大流出量 q<sub>out max</sub> ならびに天然ダムの上 流部からの流入量(一定) q<sub>o</sub>の関係を, 表-3に示す.各 CASEで確認された天然ダム上部を通過した最大越流量 q<sub>e max</sub>(最大ピーク流量)の差は,下流域の観測地点にお いて殆ど確認されなかった.この要因としては,洪水流 が途中における起伏に富む河道形状の影響を受け,流れ の一部が阻害されたことにより下流域における洪水波形 が低下したと推測される.

#### 3. 計算に用いたモデルの基礎式

今回用いる堆積部中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、里深・水山<sup>6</sup>のモデルを基本に境界条件等の改良を加えて開発したものである.モデルの基礎式に関する概要を、以降に示す.

#### (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

表-2 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)		



表-3 天然ダム決壊過程の結果

Туре	Over- topping flow max $q_{e max}$ $(m^3/s)$	Out- flow max q <sub>out max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Ordinary- flow <i>q<sub>o</sub></i> (m <sup>3</sup> /s)	q <sub>out max</sub>  q <sub>e</sub>	$q_{outmax}$
CASE1-1	0.075	0.037	0.016	0.31	2.31
CASE1-2	0.118	0.039	0.010	0.52	2.44

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.なお、本研究では、前述の小 規模天然ダム越流決壊実験において横侵食に比べて縦侵 食が卓越することが確認されたため、簡単のため鉛直二 次元場を対象とした.

#### (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、 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<sup>8)</sup>を参考に構築されている.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-5).

圧力水頭 $\psi$ と体積含水率 $\theta$ 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、 $\beta$ は飽和時にI、不飽和時に0となる係数である.

また、谷<sup>7</sup>によると、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.

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

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

ここに、 $\theta_s$  は飽和体積含水率、 $\theta_r$  は残留体積含水率、 $\psi_0$  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) 流動層およ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<sub>i</sub>を求める際に用いる変数の配置を、図-6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 Δz'との関係により、次のよう に表される.

$$w_{i} = -K \left\{ \frac{h_{i} \cos \alpha - \psi_{i_{j_{b-1}}}}{\Delta z' - \Delta z/2} + \cos \alpha \right\}$$
(4)

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.

#### (4) 洪水およ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<sup>9</sup>のものを用いる.

全流量の質量保存則,土石流中の砂礫の質量保存則お よび流れの運動方程式は,次のように表される.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} = w_i + \left\{ C_* + \left(1 - C_*\right) \frac{\theta}{\theta_s} \right\}$$
(5)



図-6 水浸透フラックスを求める際の変数配置図





$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial uCh}{\partial x} = i_b C_* \tag{6}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{u w_i}{h} = g \sin \alpha - \frac{\partial (z+h)}{\partial x} g \cos \alpha - \frac{\tau_b}{\rho h}$$
(7)

ここに、hは流動深、uは断面平均流速、 $i_b$ は堆積物 の侵食または堆積速度、 $C_*$ は堆積物中の表面における 土砂濃度および河床の堆積濃度(同等)、Cは土石流中 における土砂濃度、gは重力加速度、 $\tau_b$ は河床せん断力、  $\rho$ は水の密度、 $w_i$ は式(4)によって求められる. なお、 河床せん断抵抗則や河床侵食速度式および平衡土砂濃度 についても堆積層中における浸透流の影響が考えられる が、現段階においては十分な知見が得られていないので、 本研究では従来のモデル<sup>9</sup>をそのまま採用している.

#### 4. 室内実験に基づく不飽和浸透モデルの検証

既往モデル<sup>の</sup>は実験による検証が実施されていないた め、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、実験に用いた試料は、実験の都合上より透水性の高 いアンスラサイトとした.

#### (1) 実験概要

実験に用いた装置を、図-7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



5.3cm<sup>3</sup>/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(CASE2-1:設置無、CASE2-2: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.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-8に示す.

#### (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、図 -8に示される室内実験等で得られた $\theta_s = 0.46$ ,  $\theta_r = 0.06$ ,  $\psi_0 = -0.15$  cm,  $K_s = 10$  cm/sならびに既往研究<sup>例えばの</sup>を参考 にm = 6,  $S_s = 1.0$  と仮定し、 $\Delta x = 10$  cm,  $\Delta z = 0.5$  cm,  $\Delta t = 0.0002$  sとして計算した.

#### (3) 実験結果および計算結果

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-9に示す.また、 CASE2-2における実験開始時刻25分の障害物周辺での流 速(ベクトル)に着眼した拡大図を、図-10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.

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*<sub>s</sub>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.

#### 5. 天然ダム決壊実験を対象にした解析事例

天然ダム実験(CASE1-1)を対象とした不飽和浸透過 程および越流侵食過程について再現計算し,実験結果と の比較を通じてモデルを検証するとともに,今後の課題 について考察した.





図-10 解析結果(CASE2-2の障害物周りにおける流れ場)

#### (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 および越流侵食過程について解析した.解析条件とし て、 $\theta_s = 0.4$ 、 $\theta_r = 0.1$ 、 $\psi_0 = -0.05$  cm,  $K_s = 1.4$  cm/s,  $S_s = 1.0$ , 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、渓床勾配を6度、河床の粒径を0.5 cm,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 m<sup>-1/3</sup> 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) 解析結果と考察

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-11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-11に示されるとおり、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.



図-11 不飽和浸透および越流侵食過程の解析結果(CASE1-1)



図-12 天然ダム天端高さの時間的変化に関する比較(CASE1-1)

解析結果と実験結果の比較を、図-12に示す.全体の 傾向として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-12 に示されるとおり,最終的には実験値と計算値とが収束 している. また, 実験 (図-4) にも示されるとおり, 貯 水池からの流出による時間的遅れにより、最大越流量は 越流開始時刻290秒付近で見られていることから、初期 に見られる侵食の遅れは流出量に対して影響は少ないと 考えられる.

### 6. おわりに

実地形を利用した小規模人工天然ダムの決壊実験により,決壊過程において越流侵食が卓越することが確認された.また,天然ダム下流法勾配の違いによる変形過程が異なっており,特に勾配が急な場合は侵食過程が早く,最大洪水流出流量が大きいことが確認された.今後は,本実験経験結果を踏まえ,実験規模の拡大化が望まれる. また,堆積物中の不飽和浸透過程を対象にした理想的 な条件下での室内試験結果と再現計算結果との比較により、提案した予測モデルの妥当性について検証できた.

ただし、本実験では透水性が安定し比較的均一なアン スラサイトを用いたため、今後は現地発生土砂等の不均 ーな材料を用いた検証が望まれる.最後に、本予測モデ 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.

今後は、より厳密に変形過程を再現するため、流層部 における侵食速度式や抵抗則について河床部である堆積 層の飽和度を考慮するとともに、透水に関する係数およ び貯留係数に関するモデル化に向け、実験等により予測 精度の向上について、更に検討していく必要がある。

謝辞:本研究に際し,実験のご協力および各資料の提供 頂いた谷洋佑氏,藤本美生氏,池田亮和氏,京都大学防 災研究所ならびに立命館大学理工学部流域デザイン研究 室所属の関係各位に対して,感謝の意を表する.なお, 本研究の一部は,砂防・地すべりセンター研究開発助成 費によった.

#### 参考文献

- 建設省土木研究所河川研究室:越水堤防調査最終報告一解説 編一,土研資料2074号,1984.
- 2) 與田敏昭,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.
- 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.
- 4) 水山高久,石川芳治,福本晃久:天然ダムの破壊と対策に関 する研究報告,土木研究所資料, No.2744, 1989.
- 5) 小田晃, 水山高久, 長谷川祐治, 森俊勇, 川田孝信: 天然ダ ムの決壊と決壊時の流出量に関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol.59/No.1, pp.29-34, 2006.
- 6) 里深好文,水山高久: 渓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.
- 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.
- 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.
- 9) 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.

(2012.4.5受付)