

建設省土木研究所 ○水野秀明、南哲行、日本工営株式会社中央研究所 倉岡千郎

1. はじめに

砂防ダムは貯砂容量をより多く持っている程、土石流によって運搬されてくる土砂をより多く捕捉することができる。この観点から、鋼管製透過型ダムは貯砂容量の維持に優れているので、土石流対策として効果のある施設として期待できる。また、全国の土石流危険渓流においても建設されてきている。

さて、鋼管製透過型ダムが土石流を確実に捕捉するためには、その透過部分が確実に閉塞しなければならない。既往研究<sup>1)2)3)</sup>によれば、この透過部分の閉塞に大きく影響を及ぼすパラメータは、透過部分の大きさ(L)と石礫の最大粒径( $d_{max}$ )との比( $L/d_{max}$ )、土石流の土砂濃度(C)等である。また、鋼管製透過型ダムによる土石流捕捉モデルには、確率的な捕捉モデル<sup>2)</sup>や、前述のようなパラメータを考慮した実験式<sup>3)4)</sup>等が提案されている。また、それらのモデルと連続体の原理に基づいた土石流の流動モデルを組み合わせることで、鋼管製透過型ダムの土石流捕捉効果を予測するモデル<sup>2)5)</sup>も開発されている。さらに、個別要素法を用いて、透過部分付近での個々の砂礫の挙動を追跡し、土石流先頭部の捕捉過程を検討したモデル<sup>6)</sup>もある。

ところで、透過部分で上流から運ばれてきた石礫が他の石礫や鋼管と接触し、互いにかみ合うことによって、架橋構造を形成するため、それは閉塞する。つまり、透過部分の閉塞には個々の砂礫の挙動が大きく影響を及ぼす。また、その架橋構造は様々な大きさの砂礫で形成される。これらのことから、透過部分の閉塞に関するモデルは、大小様々な石礫の個々の挙動を十分考慮しなければならない。ところが、現在のところそのようなモデルはほとんどない。

そこで、本研究の目的は、大小様々な石礫の個々の挙動を考慮した予測モデルを開発することとする。具体的には、個々の石礫の挙動を追跡する有効な手法として個別要素法に着目して、数種類の大きさを持った土砂が鋼管製透過型ダムを通過する過程を再現してみる。なお、本研究では鋼管製透過型ダムとして格子型ダムに着目する。

2. 計算方法の概要

2.1 個別要素法の概要

本研究では、2次元上で砂礫の運動を追跡する。計算は次の並進運動と回転運動に関する運動方程式を x 方向、y 方向、回転方向について、時間ステップ毎に加速度、速度、位置(回転運動を除く)の順に計算する。なお、砂礫に作用する外力は重力、流水による抗力、及び衝突時に作用するスプリングとダンパーとし、式(4)のように表される。

$$m_i \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_{xi} \quad \dots(1)$$

$$m_i \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = F_{yi} \quad \dots(2)$$

$$I_i \cdot \frac{d\omega_i}{dt} = M \quad \dots(3)$$

$$F_n^N = B_{n-1}^N + \Delta t \cdot v_{n-1/2}^N \cdot k^N + v_{n-1/2}^N \cdot C_{n-1/2}^N \quad \dots(4)$$

$$F_n^S = B_{n-1}^S + \Delta t \cdot v_{n-1/2}^S \cdot k^S + v_{n-1/2}^S \cdot C_{n-1/2}^S \quad \dots(5)$$

$$F_{xi} = \sum_j (-F_{nij}^N \cdot \sin \theta_{ij} + F_{nij}^S \cdot \cos \theta_{ij}) + m_i \cdot g_x \quad \dots(6)$$

$$F_{yi} = \sum_j (F_{nij}^N \cdot \cos \theta_{ij} + F_{nij}^S \cdot \sin \theta_{ij}) - m_i \cdot g_y + \rho \frac{m_i}{\sigma} g \quad \dots(7)$$

ここで、 $m_i$  は粒子  $i$  の質量、 $g$  は重力加速度、 $\sigma$  は砂の密度、 $\rho$  は水の密度、 $I_i$  は慣性モーメント、 $\omega_i$  は角速度、 $F$  は衝突している2粒子間の作用力、 $k$  はバネ定数、 $C$  は粘性減衰係数、 $\theta_{ij}$  は XY 座標系と粒子  $i$  と  $j$  の中心点を結んだ線とのなす角度、 $\Delta t$  は計算ステップ、 $B$  は弾性力で  $n-1$  の時衝突していなければ0である。なお、添え字の  $ij$  は粒子番号、 $N$  は2粒子の中心点を結んだ方向、 $S$  は  $N$  に対して接線方向で、 $n$  はステップ数である。

2.2 計算方法と条件

計算に際しては、土石流に含まれる水の影響を考慮するために、式(6)と式(7)に粒子に抗力を作用させる。なお、その抗力は流水と砂礫の相対速度に比例したものと2乗に比例したものの和である。また、堆砂の影響も考慮するために、流水の向きと速度は一次元の流れを解析して決定した(図-1)。

また、格子型ダムの透過部分は鉛直方向と水平方向に鋼管を組み合わせた構造をしており、そこで形成さ

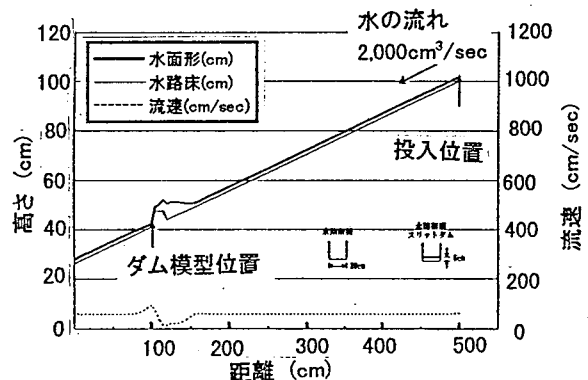


図-1 水面形(水のみ)

れる架橋構造は鉛直方向と水平方向の3次元的なものになる。ところが、本研究では2次元で計算することとしているので、この3次元的な架橋構造の影響を考慮するために、ダム模型の面不透過率(=不透過部分の総面積/ダム模型の断面積)になるように水平方向の鋼管の間隔を表-1に示すように調整した。

計算した砂礫の特性値(粒径、質量、個数、摩擦係数、弾性係数、粘性減衰係数)は表-2に示すとおりである。なお、水路勾配は  $17^\circ$  である。また、計算ステップは  $\Delta t=5.395 \times 10^{-6} \text{sec}$  である。

表-1 ダム模型の鋼管間隔

ダム模型	高さ	鋼管間隔	本数	面不透過率	計算上での間隔
Type-1	180mm	60mm	3	0.333	38.62mm
Type-2	180mm	45mm	4	0.409	21.99mm
Type-3	180mm	36mm	5	0.481	18.72mm

注1) Type-1 の場合、計算上での間隔は土石流先頭部の波高(約3cm)より大きくなるように設定した。

表-2 計算に使用した砂礫の諸元

粒径	個数	密度	初速度	摩擦係数	弾性係数	粘性減衰係数
8mm	748	$2.62 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{mm}^4$	50.5 cm/sec	0.4	100N/mm(Kn) 33.3N/mm(Ks)	0.0036
11mm	75					
17mm	41					

注1) 砂礫の個数と初速度は実験結果<sup>7)</sup>に基づいて決定した。

注2) 摩擦係数、弾性係数、粘性減衰係数は計算上のパラメータとして扱った。

### 3. 堆積形状の比較

図-2は計算結果の一例で、砂礫がダム模型に到達してから約3秒後の堆積形状である。また、図-2の中の実線は水路実験の結果<sup>7)</sup>である。計算結果は、実験結果に比べて Type-1 では低めに、Type-2 と type-3 では高めにしているもの、おおよそ再現できていると言える。

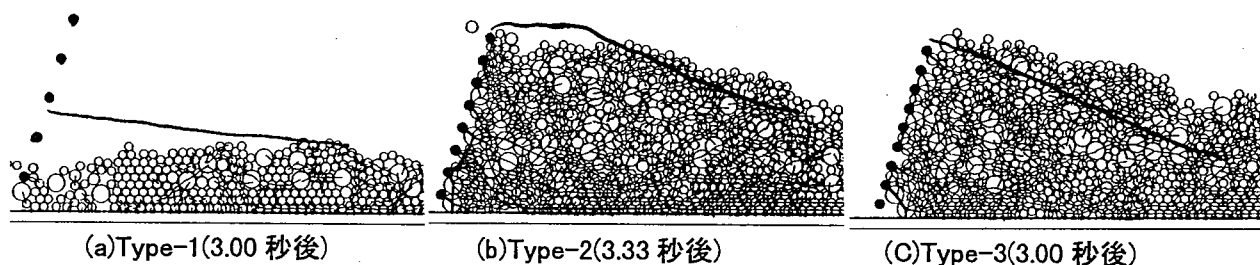


図-3 土石流の堆積形状

### 4. おわりに

本研究では、個別要素法を用いて、3種類の大きさを持つ砂礫集団が格子型ダムを通過する過程を2次元で再現した。その際、3次元的に形成される架橋構造を計算に反映させるために、ダム模型のモデル化を行った。また、流水の影響を考慮するために、抗力を外力として砂礫に作用させた。このように作成されたモデルはダム模型による土石流の堆積形状をよく再現できていると言える。

鋼管製透過型ダムの透過部分の形状を、土石流をより効率的に捕捉できる様に改良すると言った研究<sup>8)</sup>が為されている。今後は、透過部分の閉塞過程、効率的に土石流を捕捉できる透過部分の形状、及び、鋼管製透過型ダムの配置手法等について、今回開発したモデルを基に検討していきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 芦田和夫、高橋保(1980): 土石流の調節制御に関する研究—立体格子型砂防堰堤の水理機能—、京都大学防災研究所年報第23号B-2、pp.433-441
- 2) 芦田和夫、江頭進治、栗田三津雄、荒牧治(1987): 透過性砂防ダムの土石流調節機能、京都大学防砂研究所年報第30号B-2、pp.441-456
- 3) 水山高久、小橋澄治、水野秀明(1995): 格子型ダムのピーク流砂量減少率に関する研究、砂防学会誌 Vol.47, No.5, pp.8-13
- 4) Takahisa MIZUYAMA, Hideaki MIZUNO (1997): Prediction of Debris Flow Hydrographs Passing through Grid Type Control Structure, Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, pp.74-82
- 5) Hideaki MIZUNO, Noriyuki MINAMI, Takashi YAMADA, Takahisa MIZUYAMA(1998): Experimental Study of Methods of Forecasting the Hydrograph of Debris Flow Passing Through a Permeable Type Dam, Environmental Forest Science, IUFRO 8, pp.135-136
- 6) Hideaki MIZUNO, Takahisa MIZUYAMA(1995): Control of the Approaching Debris Flow with Grid Type Dams, Proceeding of the International Sabo Symposium, pp.271-278
- 7) 建設省土木研究所(1998): 透過型ダムを用いた土石流制御に関する水路実験業務報告書
- 8) 水野秀明、水山高久(1996): 上部の格子間隔が狭い格子型ダムに関する研究、砂防学会誌, Vol.49, No.4, pp.3-8