

# オープン型鋼製砂防ダムの礫捕捉効果に関する 個別要素法解析と確率的評価

深和岳人<sup>1</sup>・香月 智<sup>2</sup>・石川信隆<sup>3</sup>・山田 正<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 修(工) 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

<sup>2</sup>正会員 工博 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

<sup>3</sup>フェロー 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

<sup>4</sup>正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

本研究は、オープン型鋼製砂防ダムの鋼管間隔によって土石流中の礫をどのように捕捉するかについて、個別要素法による数値シミュレーション解析を行うとともに、確率的推定法の適用を試みたものである。すなわち、まず個別要素法によって土石流中の巨礫群の流れとオープン型砂防ダムによる閉塞シミュレーション法を提案した。続いて、待ち行列理論を応用して土石流中の巨礫群の礫径分布と砂防ダムの鋼管間隔比によって通過量期待値を求める方法を提案し、シミュレーション結果との整合性を調べた。その結果、2 個要素による閉塞モデルにおける通過確率期待値がシミュレーションとよく一致することを示した。

**Key Words:** distinct element method, open type check dam, debris flow, slit width, stochastic evaluation, damming up performance

## 1. 緒言

砂防施設は、下流域の水運の確保や灌漑・工業用水の利水のために山地源流部および溪流等における土砂生産を抑止するために建設されてきた。加えて、高度成長時代には、住宅地域が扇状地や山地境界部へ進出したために土石流災害防止の機能も要求されるようになり、ますますその土砂移動抑制機能が重視されるようになった。しかし、近年になって海岸域の砂浜がやせ細り、時として消失するなど生態系や生活圏の環境維持が重視されるようになり、河川上流部で土砂生産または移動を一方向的に抑制する区間的土砂管理の概念では限界があることが指摘されている。このため、山地源流部から河口に至る全域での土砂移動を「流砂系」として定義し、河川の個性に応じた総合土砂管理システムの構築が急務とされている<sup>1)</sup>。

このため、砂防ダムの建設においては流砂を妨げないために、コンクリートダムにはスリットを開けるように施策が講じられている。流砂を妨げないためには、スリット間隔が大きいことが望ましいが、土石流や洪水時における下流域の防災機能は以前にも増して重要な機能であるため、むやみに大きなスリットを設けることは出来ない。このような観点から、池谷・上原<sup>2)</sup>は掃流砂の場合を対象として、透過型砂防ダムの閉塞の限界条件を実験的に明らかにし

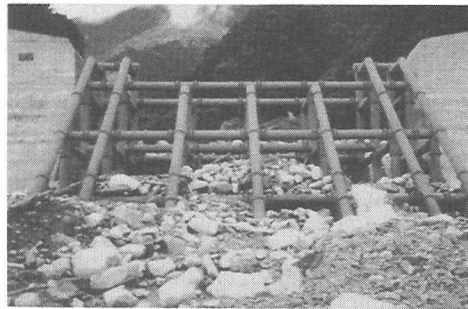


写真-1 鋼製オープン型砂防ダムの例

た。一方で、土石流を対象としたものでは、芦田・高橋<sup>3)</sup>が立体格子型砂防ダムを対象として実験を行い、スリット幅と土石流中に含まれる巨礫の最大礫径の比 ( $l/d_{\max}$ ) が 1.5~2.0 倍であれば、巨礫を含まない通常の流砂は下流に流し、土石流時にはスリットが巨礫によって閉塞されて急造ダムとなることを明らかにした。これを踏まえて鋼製砂防構造物設計便覧では、土石流に対する分級効果を目的とする場合は 1.5 倍以下、土石流のピーク流量の減少を目的とする場合は 2.0 倍以下に設定するよう記載されている<sup>4)</sup>。しかし、コンクリート砂防ダムにスリットを開ける場合には、いわゆるせきとなるため水流が洪水の増加・減少時に複雑に変化し、場合によっては

スリット部より後方において一旦沈降した土石成分が洪水終息時に一気に下流に放出される、いわゆる塞き上げ型の挙動を示す場合もあることが指摘されている。鋼製砂防ダムの中のオープン型砂防ダムは、例えば写真-1に示すように、市販の鋼管を骨組み構造として組み立てるもので、古くは昭和50年の有珠山爆発時に泥流対策として使用されて以来、種々の形式が提案されて使用されている<sup>4)</sup>。オープン型鋼製砂防ダムは、河川幅全体に展開されることを前提に開発されてきたため、前述のスリット型砂防ダムのような塞き上げ効果が現れることなく、鋼管間隔を適切に設定することにより、常時または中小の出水時には流砂を下流に流し、土石流などの異常出水時には、土石流先頭部に集中すると言われる巨礫によって間隔を閉塞することによって、急造ダムとなり、下流域への防災機能を発揮する。ただし、種々の幾何形状があるので、適切な間隔の評価については一般的には水山ら<sup>5)</sup>の実験的研究を踏まえて、土石流中の最大礫径と隣接鋼管の間隔の比率を1.5倍を目安にして設計されることが多い。しかし、近年ではコンクリート砂防ダムのスリット部を大きくとって、その内部にオープン型砂防ダムを組み合わせて使用する等多様な使用法が行われるようになり、通過流水の態様が異なるなどの新しい問題が生じている<sup>6)</sup>。また水理実験を補完するために、現地での巨礫粒径調査も行われている。

ところで Hakuno, Uchida<sup>7)</sup>は個別要素法を用いて土石流の巨礫群の流れを解析的に表現可能であることを示した。また、水野ら<sup>8)</sup>は個別要素法によって、自らの行ったオープン砂防ダムの水理実験結果の捕捉機能を良好に表現できることを示した。このように、水理実験を補完するために今後個別要素法のような数値シミュレーション解析の利用が促進されるものと思われる。

一方、水理実験や個別要素法シミュレーションにおいて、礫集合の大きさや形状のランダム性によって閉塞期待性能がばらつくものと考えられるが、このランダム性を実験や数値シミュレーション解析によって評価するには、同一条件下で多数回繰り返し実験または解析を行う必要があり、多大な時間コストを要するため、包括的な評価法の検討が望まれる。

本研究は、水野ら<sup>8)</sup>の提案した個別要素法によるオープン型砂防ダムの閉塞シミュレーション解析法を応用して、実砂防ダムスケールモデルにおける最大礫径・鋼管間隔比と礫捕捉率について、初期配列のランダム性及び影響を検討した。そのうえで、待ち行列理論をベースとする礫捕捉期待値評価法を提案し、個別要素法によるシミュレーション結果との比較を行い、その適用性について検討したものである。

## 2. 解析モデル

本研究では、土石流の主部は巨礫群の移動によって表されるものとし、細かい砂礫は巨視的に見て周

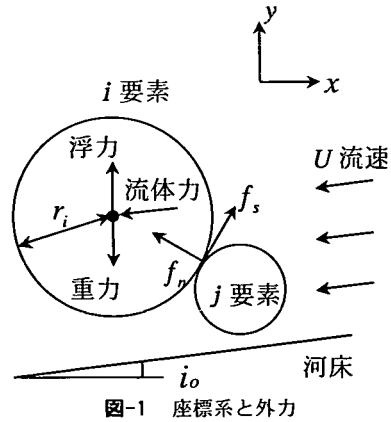


図-1 座標系と外力

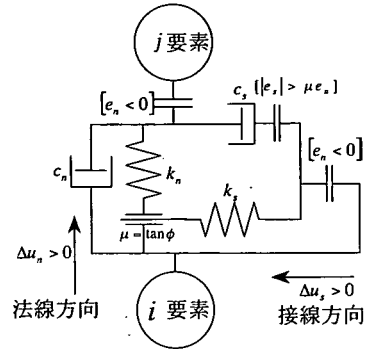


図-2 粒子間に働く接触力

囲の流水として表現できるものとする。さらに、この移動挙動は2次元の個別要素法 (Distinct Element Method: DEM) によって解析できるものとする。DEMでは、図-1に示すような斜面上にある礫に、回りに働く礫群および流水からの相互作用力を受ける礫要素の  $x, y$  方向および回転方向の運動方程式は次式で表される。

$$\frac{d^2 u_{x_i}}{dt^2} = \left\{ \sum_j (f_n \cos \theta - f_s \sin \theta) - D \cdot \cos i_0 \right\} / m_i \quad (1a)$$

$$\frac{d^2 u_{y_i}}{dt^2} = \left\{ \sum_j (f_n \sin \theta + f_s \cos \theta) - m_i g + \rho g V - D \cdot \sin i_0 \right\} / m_i \quad (1b)$$

$$\frac{d^2 u_{\theta_i}}{dt^2} = \left\{ \sum_j (r_i f_{y_j} \cos \theta - r_i f_{x_j} \sin \theta) \right\} / I_i \quad (1c)$$

ここで、 $u_{x_i}, u_{y_i}, u_{\theta_i}$  : それぞれ  $x, y$  および回転方向の  $i$  要素の変位量、 $m_i$  :  $i$  要素の付加質量を含む質量、 $f_n$  : 礫要素  $i, j$  間の法線方向作用力、 $f_s$  : 礫要素  $i, j$  間の接線方向作用力、 $\theta$  : 礫要素  $i, j$  間の接触角、 $I_i$  : 礫要素  $i$  の慣性モーメント、 $r_i$  : 礫要素

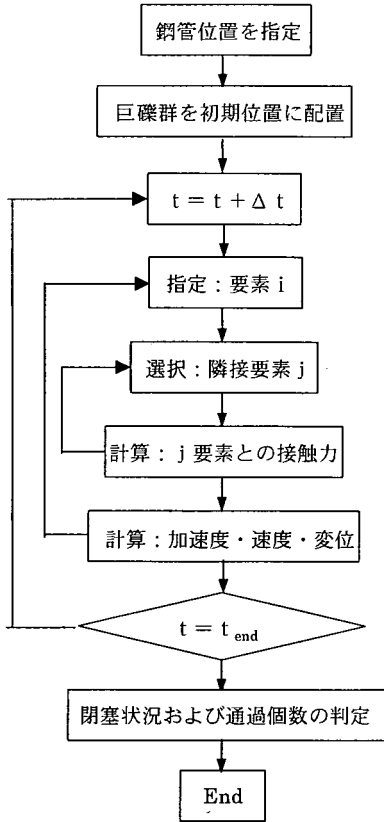


図-3 1回の土石流解析手順

素  $i$  の半径,  $V$ : 礫の体積,  $D$ : 水から受ける抗力である。

局所座標系における, 法線・接線方向の作用力  $f_n$ ,  $f_s$  は図-2 に示すように圧縮方向を正として次のように表す。

$$[f_n]_i = [e_n]_i + [d_n]_i \quad (2a)$$

$$[e_n]_i = [e_n]_{i-\Delta t} + \Delta e_n \quad (2b)$$

$$[d_n]_i = \Delta d_n \quad (2c)$$

$$\Delta e_n = k_n \Delta u_n \quad (2d)$$

$$\Delta d_n = c_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (2e)$$

ただし,  $[e_n]_i < 0$  の時  $[e_n]_i = [d_n]_i = 0$  (2f)

$$[f_s]_i = [e_s]_i + [d_s]_i \quad (3a)$$

$$[e_s]_i = [e_s]_{i-\Delta t} + \Delta e_s \quad (3b)$$

$$[d_s]_i = \Delta d_s \quad (3c)$$

$$\Delta e_s = k_s \Delta u_s \quad (3d)$$

$$\Delta d_s = c_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t} \quad (3e)$$

ただし,  $[e_s]_i < 0$  の時,  $[e_s]_i = [d_s]_i = 0$  (3f)

$$[e_s]_i > \mu [e_n]_i \text{ の時,}$$

$$[e_s]_i = \mu [e_n]_i \cdot \text{SIGN}([e_s]_i) \quad (3g)$$

$$[d_s]_i = 0$$

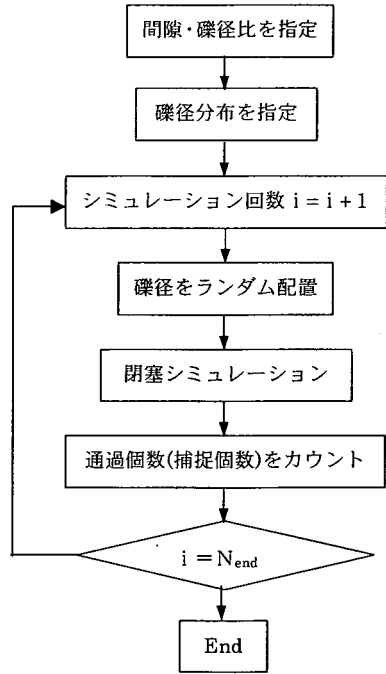


図-4 初期配列ランダムシミュレーション

ここに,  $[ ]_i$ : 時刻  $t$  における物性量,  $e_n, e_s$ : 法線, 接線方向のバネによる抗力,  $d_n, d_s$ : 法線, 接線方向の減衰による抗力,  $\Delta u_n, \Delta u_s$ :  $\Delta t$  間の法線, 接線方向ばねの変形量,  $\mu$ : 動摩擦係数 ( $= \tan \phi_f$ ),  $\phi_f$ : 粒子間の内部摩擦角度,  $\text{SIGN}(a)$ :  $a$  の符号,  $k_n, k_s$ : 法線, 接線方向のバネ定数,  $c_n, c_s$ : 接線, 法線方向の減衰定数である。  
また, 礫要素が水から受ける抗力は次式で表す。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A_i (U - v) |U - v| \quad (4)$$

ここで,  $D$ : 抗力,  $C_D$ : 抗力係数,  $\rho$ : 水の密度,  $A_i$ : 礫要素の流れ方向への投影面積,  $U$ : 水の速度,  $v$ : 礫要素の移動速度である。

水の流速については, 土石流が混相流としての挙動を示すために, 水と砂礫のインタラクションを考慮するべきであるが, 解析が複雑になることや捕捉効果を評価する場合にはあまり重要な因子ではないので, 一様流を仮定した。

以上の基本式を用いて, 個々の要素の時々刻々の運動位置座標を解くが, この際指定した要素に対して, 周囲からの力の有無に関わらず加速度を 0 とすることにより, 固定された閉塞用の鋼管を表現できる。

よって, 式(1)から求められた加速度を用いて, 要素  $i$  の変位量は次のように求められる。

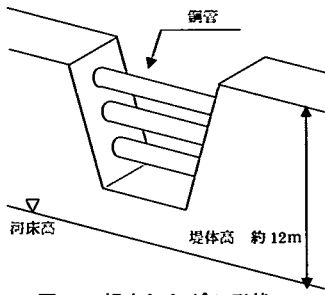


図-5 想定したダム形状

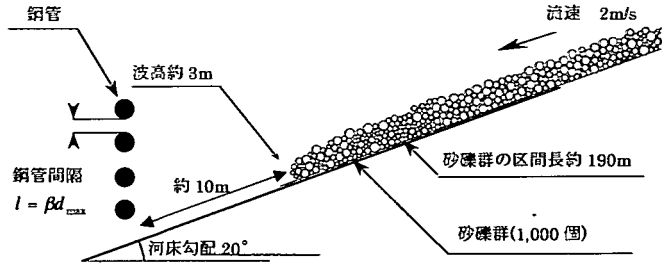


図-6 解析モデル

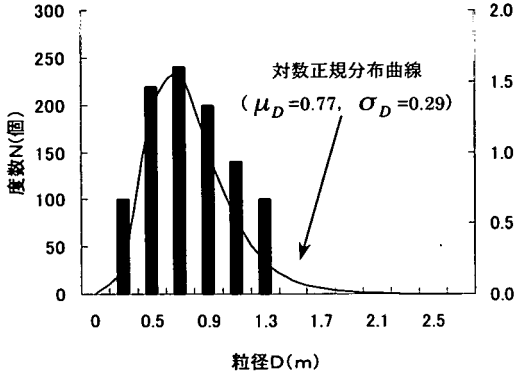


図-7 要素の粒径分布

表-1 想定ダムの諸元

ダムモデル	最上段の高さ	スリット幅 (l)	鋼管本数	鋼管直径	l/d <sub>max</sub>
Type-1	11.4m	1.3m	6	0.6m	1.0
Type-2	13.0m	2.0m	5		1.5
Type-3	11.6m	2.3m	4		1.75
Type-4	12.8m	2.6m	4		2.0
Type-5	10.7m	3.0m	3		2.25
Type-6	11.7m	3.3m	3		2.5

表-2 砂礫の諸元

粒径	個数	密度	ハネ係数	減衰係数		
1.3m	100	2.62 (g/cm <sup>3</sup> )	法線方向 400 (kN/cm)	法線方向 3.5 (kN·sec/s)		
1.1m	140					
0.9m	200				接線方向 133 (kN/cm)	接線方向 2.0 (kN·sec/s)
0.7m	240					
0.5m	220					
0.3m	100					

### 3. シミュレーション結果

#### (1) 計算条件

想定する砂防ダムは、図-5 に示すような堤体高約12mのオープン型スリット砂防ダムであり、開口部には横方向に直径60cmの鋼管製のスリットを有するものとする。水野ら<sup>8)</sup>は格子状のオープン部の実験結果を2次元モデルによってトレース解析している。本研究も図-5の鋼管部分を通る2次元断面を考える。すなわち、図-6のように直線勾配20°の平面状に長さ190m、高さ3m程度に並べられた礫群が砂防ダム直上約10mに接近している状況を想定し、後方から流速2m/sの流体力と自重作用によって流れる礫群の解析を行うものとした。本来は、鋼管部分以外のダム後背部の土石流挙動が3次的に影響を与えるが、ここではこれを無視するものとした。土石流中に含まれる砂礫群は、焼岳での観測結果<sup>9)</sup>を参考に、粒径分布が対数正規分布に従うものとした。すなわち、図-7に示すように最大粒径 $d_{max}$ を1.3mとする6種類の粒径に、曲線で示す対数正規分布に従うように1,000個要素を割り振った。砂防ダム鋼管間隔 $l$ は砂礫の最大粒径 $d_{max}$ に対して、1.0, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5倍とパラメトリックに変化させるものとした。解析に用いるパラメータは次のように決定

$$\left[ \Delta u_{x_i} \right]_t = \left[ \frac{du_{x_i}}{dt} \right]_t \Delta t \quad (5a)$$

$$\left[ \Delta u_{y_i} \right]_t = \left[ \frac{du_{y_i}}{dt} \right]_t \Delta t \quad (5b)$$

$$\left[ \Delta u_{\theta_i} \right]_t = \left[ \frac{du_{\theta_i}}{dt} \right]_t \Delta t \quad (5c)$$

$$\left[ \frac{du_{x_i}}{dt} \right]_t = \left[ \frac{du_{x_i}}{dt} \right]_{t-\Delta t} + \left[ \frac{d^2u_{x_i}}{dt^2} \right]_t \Delta t \quad (6a)$$

$$\left[ \frac{du_{y_i}}{dt} \right]_t = \left[ \frac{du_{y_i}}{dt} \right]_{t-\Delta t} + \left[ \frac{d^2u_{y_i}}{dt^2} \right]_t \Delta t \quad (6b)$$

$$\left[ \frac{du_{\theta_i}}{dt} \right]_t = \left[ \frac{du_{\theta_i}}{dt} \right]_{t-\Delta t} + \left[ \frac{d^2u_{\theta_i}}{dt^2} \right]_t \Delta t \quad (6c)$$

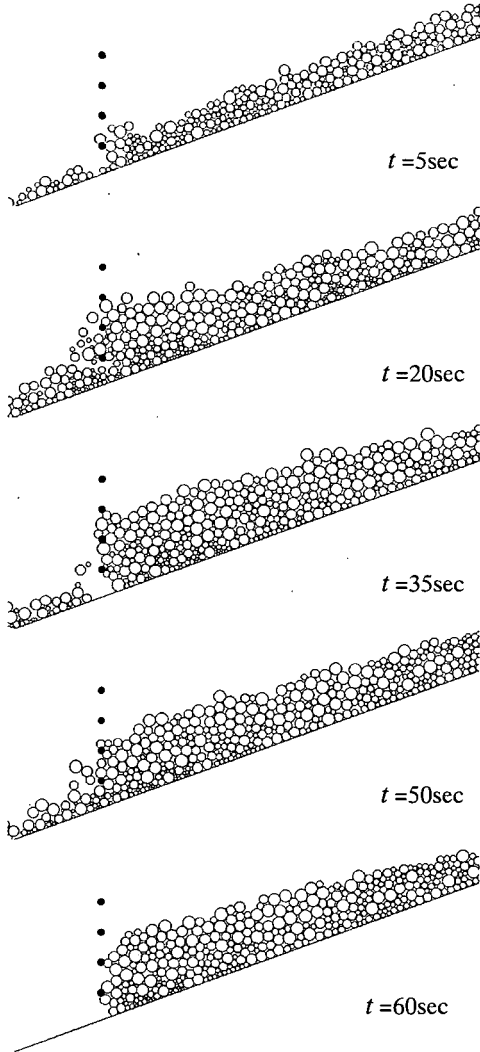


図-8 鋼管間隔  $l/d_{\max} = 2.0$  の場合の閉塞過程

した。まず、水野ら<sup>8)</sup>の実験再現計算で用いられているパラメータ ( $k_n = 1\text{kN/cm}$ ,  $\Delta t = 5.0 \times 10^{-6}\text{s}$ ) を参考に、計算時間短縮を図るために固有周期に着目しつつ  $\Delta t$  を大きくすることを試みた。

その方法として、解析の数値計算安定性を確保しつつ、解析の所要時間を現実的に使用可能な範囲(4時間程度)に確保するためにはバネ係数をやや小さめにとることが望ましい。まず、水野ら<sup>8)</sup>の研究結果をトレースできる最大の  $\Delta t$  と、要素間に不要な重なりが生じず実験結果と一致する解が得られる  $\Delta t$  と  $k_n$  を求めた。続いて、本計算で用いられた要素の大きさと相似則を満たすよう修正すると、砂礫同士の接触力を表すバネ定数を法線方向  $k_n = 400\text{kN/cm}$ 、接線方向  $k_s = 133\text{kN/cm}$ 、減衰定数は接線方向  $c_n = 3.5\text{ kN}\cdot\text{sec/cm}$ 、法線方向  $c_s = 2.0\text{kN}\cdot\text{sec/cm}$  が求められた。砂

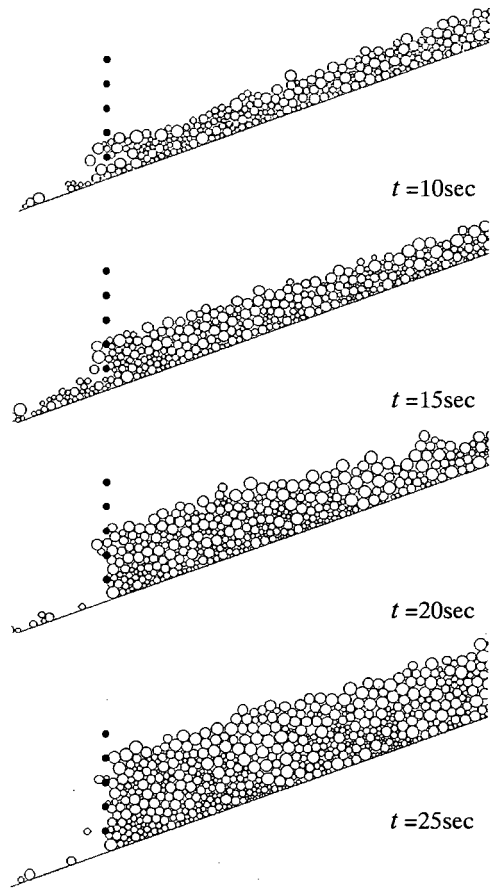


図-9 鋼管間隔  $l/d_{\max} = 1.5$  の場合の閉塞過程

礫要素の密度は  $2.6\text{g/cm}^3$ 、河床勾配は  $20^\circ$  とした。また、時間増分は  $\Delta t = 5.0 \times 10^{-4}\text{s}$  とした。以上の解析パラメータを表-1, 2 に示す。これらの値は、実際の礫要素の波動伝播速度を満たす値とは異なり、比較的やわらかい材料のバネ定数等を用いていることになるが、計算結果で鋼管の間に詰まるか否かの影響はあまりない。また、粒子間内部摩擦角については水野ら<sup>8)</sup>の研究を参考に  $\phi_f = 22^\circ$  (摩擦係数 0.4) とし、河床面との摩擦も同等の値を用いた。本研究では理想円を用いているので、鋼管間隙部で架橋構造を構成するためには、より大きな摩擦係数が必要とも考えられるが、3次元現象を2次元的に解析していることによって詰まりやすくなることなどを総合的に判断して、実際の礫の表面が凸凹であることなどに対する工夫は行っていない。

## (2) 計算結果

図-8 は鋼管間隔が  $2.0 d_{\max}$  の時における解析結果を示したものである。流体力と重力により押し流された砂礫要素は、初期配置より計算開始後 5 秒後には砂防ダムに到達するが最下部の間隔をすり抜けて、先頭部は流れ出している。ちなみに Hakuno, Uchida<sup>7)</sup>

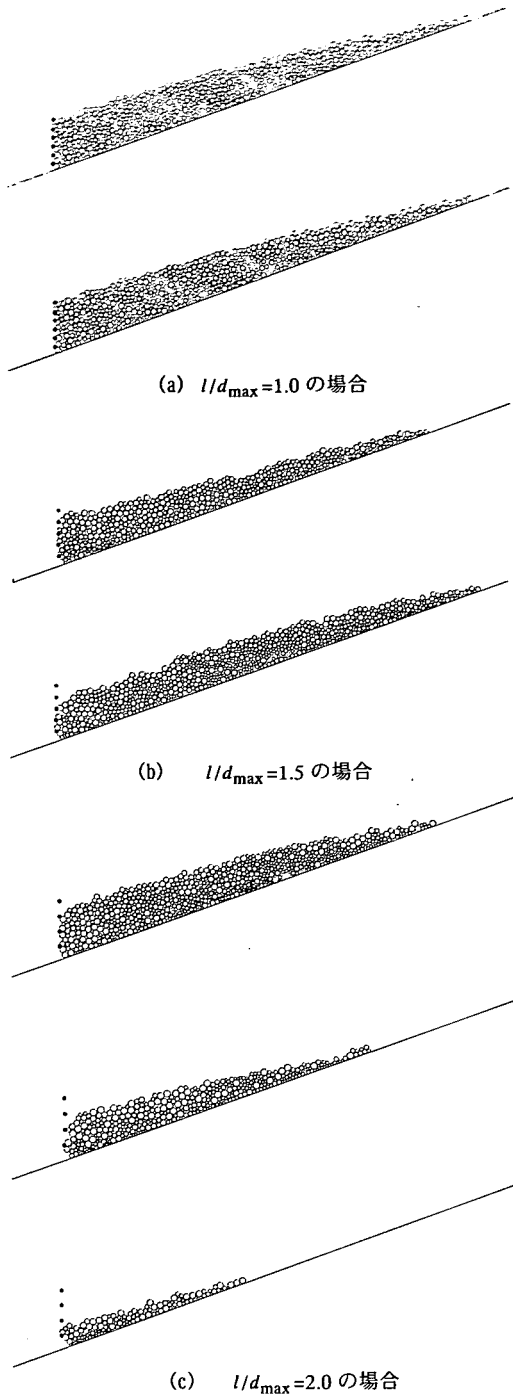


図-10 捕捉最終形状

によると、個別要素法によって大きな径の要素が先頭部に集中する解が得られると報告されているが、本計算ではいくつかのケースで先頭部に大きな径の要素が集中するが、そうでない場合もある。これは鋼管部到達前の流下長が短いと思われる。その

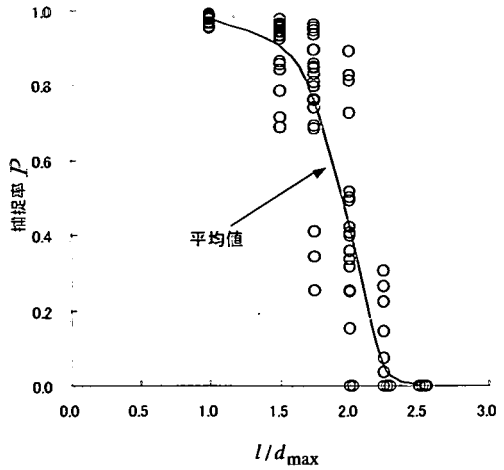


図-11 鋼管間隔と捕捉率の関係

後 20 秒後には、砂礫群は鋼管に衝突しながら堰き上げられるものの、いずれの間隔も閉塞せず通過してしまう。35 秒後にはスリット最下段部が一時閉塞するものの、不安定な状態での架橋構造であったため、後続の砂礫による衝突により架橋構造は崩れ、50 秒では再度通過挙動が開始する。その後、60 秒後によりやく最下段と 2 段目の閉塞が完成し、後続流をせき止める。この計算ケースの捕捉個数は 409 個(41%)であり、半数以上の要素は通過してしまう。参考までに最終の閉塞状況では、河床勾配  $20^\circ$  に対して砂礫の堆積勾配は約  $14^\circ$  となっている。

同様に、鋼管間隔が  $1.5d_{\max}$  の場合における一例を図-9 に示す。この場合、10 秒までは閉塞せずに要素は通過しているものの、15 秒後には最下段部が閉塞し、25 秒後には 4 段目まで閉塞を完成し、後続の砂礫群をせき止める。この場合には、捕捉個数は 865 個(86%)であった。また、砂礫の堆積勾配はこの場合も約  $14^\circ$  である。

図-10 は(a)  $l/d_{\max}=1.0$ 、(b)  $l/d_{\max}=1.5$ 、(c)  $l/d_{\max}=2.0$  における捕捉最終形状を 2~3 例ずつ示したものである。 $l/d_{\max}=1.0$  の場合においては、砂礫群はスリット 5 段もしくは 6 段目まで閉塞しており、どの場合においても 90%以上の砂礫を捕捉している。砂礫の堆積勾配はいずれの場合も約  $13^\circ$  となっており他の例よりやや緩勾配である。 $l/d_{\max}=1.5$  の場合においては、砂礫群は 3 段もしくは 4 段目までの閉塞により後続の砂礫群をせき止めている。ただし、4 段目まで閉塞していても、閉塞までに通過した砂礫の数が多き場合や、3 段目までの閉塞でも、通過した個数が少ない場合など、多様な閉塞パターンが認められる。 $l/d_{\max}=2.0$  の場合においては、1 段、2 段、3 段それぞれの場合の閉塞パターンがあり、砂礫の捕捉個数についても、ばらつきが大ききことがわかる。さらには 1 つも閉塞されない場合もある。

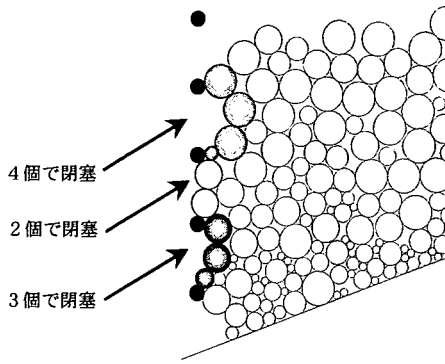


図-12 礫捕捉パターンの一例

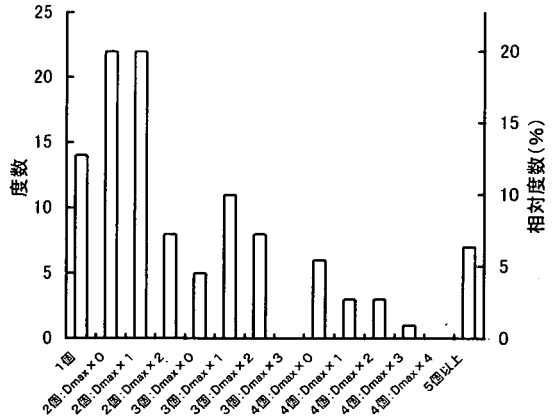


図-13  $l/d_{max}=1.0$ における閉塞パターン

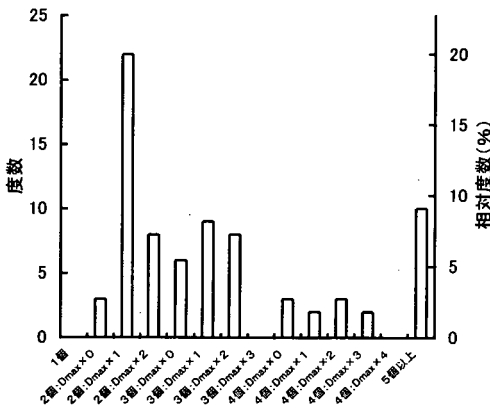


図-14  $l/d_{max}=1.5$ における閉塞パターン

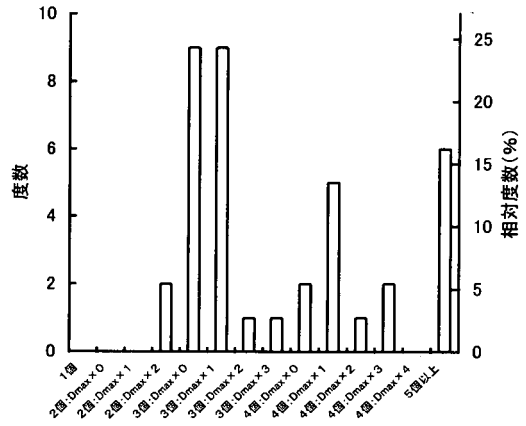


図-15  $l/d_{max}=2.0$ における閉塞パターン

ちなみに、このばらつきが大きな要素が先頭部に集中していることと関係があるかについて観察したが、明確な傾向が見られない。そこで、このようなばらつきの度合いを調べるために、次の捕捉率で評価する。

$$P = \frac{N_T - N_{pass}}{N_T} \quad (7)$$

ここで、 $P$  : 捕捉率,  $N_T$  : 砂礫の全個数,

$N_{pass}$  : 透過した砂礫の個数。

図-11 は鋼管間隔と捕捉率の関係を示したものである。この図から鋼管間隔が大きくなるほど、捕捉率が小さくなり、 $l/d_{max}=1.5\sim 2.0$ においてばらつきが大きくなるのがわかる。ただし、 $l/d_{max} > 2.0$ ではほぼ確実に全要素が通過しており、逆にばらつきは小さくなる。

### (3) 礫捕捉状況の分析

ここでは、個々の鋼管間隔で完成した礫捕捉状況について分析する。図-12は礫捕捉状況の一例を示したもので、複数の礫要素による架橋構造により閉塞

しており、そのパターンも様々である。そこで数値解析の全ケースについて捕捉状況の分類を行う。

図-13は $l/d_{max}=1.0$ の場合に閉塞された各間隙における架橋構造に寄与した要素個数とその中で最大の礫径要素の個数によって分類し、その生起頻度を示している。この場合の閉塞は1個でも起こっているが、2個で閉塞する場合が全体の約40%を占めている。さらに、 $d_{max}$ の占有数を詳細に見ると、2個要素では全く最大礫径要素がない場合と、1個だけ関与する場合がほぼ同頻度である。同様に図-14に $l/d_{max}=1.5$ を、図-15に $l/d_{max}=2.0$ の場合を示す。 $l/d_{max}=1.5$ では、2個要素で閉塞する割合が43%と突出して多く、3個が30%、4個13%と続く。さらに、閉塞に関与する礫要素において $d_{max}$ が関係する割合は、 $l/d_{max}=1.0, 1.5, 2.0$ の順番に57%、84%、71%と頻度が高いことがわかる。さらに $l/d_{max}=2.0$ では3個で閉塞する割合が51%を占めており、4個が27%、5個が16%となっている。すなわち、間隔が広くなるにつれて、閉塞架橋構造の所要個数が増加する。

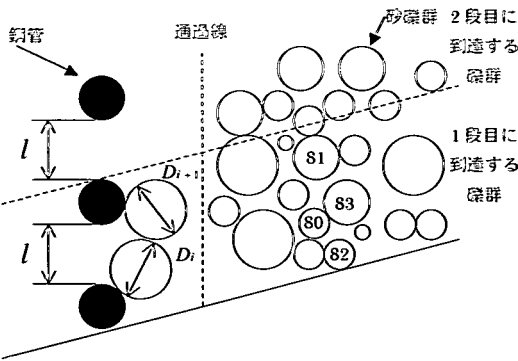


図-16 礫群の到達順位モデル化と閉塞条件

#### 4. 捕捉性能の確率的評価

##### (1) 基礎式

個別要素法による数値シミュレーションから、礫要素径と鋼管間隔の比率によって捕捉性能の期待値(平均値)も変化したが、ばらつき具合も変化することが明らかになった。ここでは、この結果を確率的手法によって推定する手法を提案する。

確率的手法により格子型砂防ダムの閉塞モデルを述べたものに、高橋ら<sup>(10),(11)</sup>によるモデルがあるが、ここでは砂礫要素の直径と鋼管間隔をパラメータとした複数要素による2次元閉塞モデルを考える。すなわち、図-16に示すように、砂防ダムに到達する礫群がオープン部のどの段を通過するのかによって大別されるものと考え、ある段の間隙に向かう礫群に対して、オープン部直前に仮定の通過点を設けてこの通過線の通過順位によって礫に番号が付けられるものとする。以上の仮定を、現実の数値シミュレーションと直接結び付けて管理するものではないが、この仮定に従うことは、現象の2次元の広がりを見捨て、1列に順番に並んだ礫が到達する際に、目的とする条件を満足する事象が発生する確率を取り扱う確率過程(待ち行列)論を適用することが可能である。ここで、連続して到達する $n$ 個の要素の直径の合計が鋼管間隔よりも大きいときに、閉塞するための必要条件が満足され、必要条件を満足した中で、ある確率で閉塞が完成する。十分に大きな母集団の中から現象が導出され、事前に通過した礫群によって、後続する母集団の特性は変化しないポアソン過程に従うものとする。すなわち、 $i$ 個目の要素で閉塞される確率は次式のように与えられる。

$$P_i = \bar{P}_{i-1} \cdot P_s \quad (8a)$$

$$P_s = \alpha_n \cdot P_n \quad (8b)$$

ここで、 $P_i$ :  $i$ 個目の要素が到達後閉塞される確率、 $P_s$ :  $i$ 番目に1回の $n$ 個の要素で閉塞が完成する確率、 $\bar{P}_{i-1}$ :  $i-1$ 番目までに閉塞しない確率、 $P_n$ : 連続する $n$ 個要素の直径の合計が鋼管間隔よりも大きい確率(本研究では閉塞必要条件達成確率と呼ぶ)、 $\alpha_n$ : 閉塞必要条件を満足した $n$ 個要素によって閉塞

される確率。

$P_i$ と $\bar{P}_i$ は背反事象であるから、次式ようになる。

$$P_i = \left\{ \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_s) \right\} P_s \quad (9)$$

これは幾何分布であり、鋼管間隔を通過する個数 $n_p$ の期待値および分散は次式ようになる<sup>(12)</sup>。

$$E(n_p) = n_p = \frac{1 - P_s}{P_s} \quad (10a)$$

$$V(n_p) = \sigma_{n_p}^2 = \frac{1 - P_s}{P_s^2} \quad (10b)$$

さらに間隔が複数である場合には、各間隔の独立性を仮定すると、次式ようになる。

$$E(n_p) = n_p = m \frac{1 - P_s}{P_s} \quad (11a)$$

$$V(n_p) = \sigma_{n_p}^2 = m \frac{1 - P_s}{P_s^2} \quad (11b)$$

ここで、 $m$ : 鋼管間隔の数。

さて、式(8)~(11)では $\alpha_n$ が経験的に与えられるものとするならば、連続する $n$ 個の要素による必要条件を満足する確率を求める必要がある。 $P_n$ は、その定義によって、次式となる。

$$P_n = P(D_i + D_{i+1} + \dots + D_{i+n-1} \geq l) \quad (12)$$

土石流に含まれている砂礫の粒径 $D$ の分布は、対数正規分布に従うものとする、この分布関数は次式となる。

$$f_e(\tilde{D}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\tilde{D}}} \exp\left\{-\frac{(\tilde{D} - \mu_{\tilde{D}})^2}{2\sigma_{\tilde{D}}^2}\right\} \quad (13)$$

ここで、 $f_e$ : 正規確率密度関数、 $\tilde{D} = \ln D$ 、 $\mu_{\tilde{D}}$ 、 $\sigma_{\tilde{D}}$ はそれぞれ対数化された礫径の平均値、標準偏差であり、原変数の平均や分散と次のような関係がある。

$$\mu_D = \exp\left(\mu_{\tilde{D}} + \frac{\sigma_{\tilde{D}}^2}{2}\right) \quad (14)$$

$$\sigma_D = \exp\left(2\mu_{\tilde{D}} + 2\sigma_{\tilde{D}}^2\right) - \mu_D^2 \quad (15)$$

ここで、 $\mu_D$ 、 $\sigma_D$ : 原変数における平均値と分散値。ところで、標準化正規確率変数を次のように定義する。

$$z = \frac{\tilde{D} - \mu_{\tilde{D}}}{\sigma_{\tilde{D}}} \quad (16)$$

よって、式(13)の積分関数は誤差関数で与えられる。

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (17)$$

分布する礫径の代表値としての呼称最大径を5%超過確率値とすると、 $d_{95}$ は次式で求められる。

$$d_{95} = \exp(\tilde{d}_{95}) \quad (18)$$

$$\tilde{d}_{95} = 1.65\sigma_{\tilde{D}} + \mu_{\tilde{D}} \quad (19)$$



表-3 礫群の統計値

	基準値	比較値
分布形	対数正規	対数正規
平均 (m)	0.772	0.5,1.5,2.0 倍
標準偏差(m)	0.2932	0.5,1.5,2.0 倍

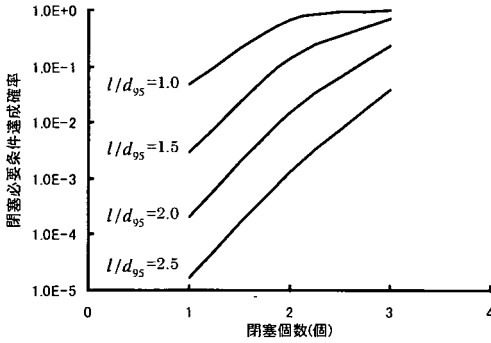


図-17 閉塞個数と閉塞必要条件達成確率の関係  
( $\alpha_n=1.0$ )

呼称最大径  $d_{95}$  とオープン型砂防ダムの鋼管間隔  $l$  との比を  $\beta$  とすると、次式によって求められる。

$$l = \beta d_{95} = \beta \exp(\tilde{d}_{95}) \quad (20)$$

よって、対数化された鋼管間隔  $\tilde{l}$  は次式となる。

$$\tilde{l} = \ln \beta + \tilde{d}_{95} \quad (21)$$

以上の基本式で、例えば 2 つの連続する 2 要素の直径が鋼管間隔  $l$  より大きくなる確率を  $P_{n-2}$  とすると、

$$\begin{aligned} P_{n-2} &= P(D_i + D_{i+1} \geq l) \\ &= \int_0^\infty P(D_i \geq l - D_{i+1})P(D_{i+1})dD_{i+1} \\ &= \int_{-\infty}^\infty P\{\tilde{D}_i \geq \ln(l - D_{i+1})\}f_e(\tilde{D}_i)d\tilde{D}_i \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、次のような対数正規パラメータを導入する。

$$\begin{aligned} \gamma &= \ln(l - D_{i+1}) \\ &= \ln\{l - \exp(\mu_{\tilde{D}_i} + \sigma_{\tilde{D}_i} z)\} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\gamma_z = \frac{\gamma - \mu_{\tilde{D}_i}}{\sigma_{\tilde{D}_i}} \quad (24)$$

よって、2 個要素での閉塞必要条件達成確率は次式となる。

$$P_{n-2} = \int_{-\infty}^\infty \{1 - \Phi(\gamma_z)\}f_e(z)dz \quad (25)$$

これを拡張して、一般に  $n$  個では次式となる。

$$P_n = \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \cdots \int_{-\infty}^\infty \{1 - \Phi(\gamma_z)\}f_e(z_1)f_e(z_2) \cdots f_e(z_{n-1})dz_1dz_2 \cdots dz_{n-1} \quad (26)$$

$$\gamma_z = \frac{\ln(l - D_{i+1} - D_{i+2} - \cdots - D_{i+n-1}) - \mu_{\tilde{D}_i}}{\sigma_{\tilde{D}_i}} \quad (27)$$

ところで、式(25)や(26)において  $\gamma$  を求める際に対数内部が負値となる場合がある。すなわち、

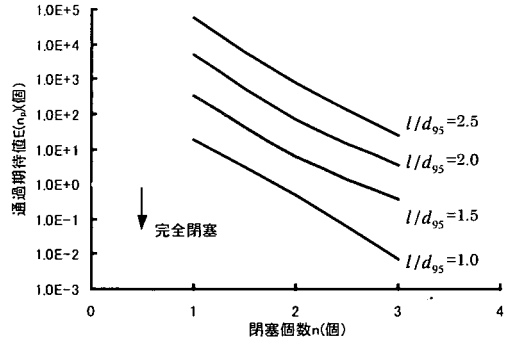


図-18 閉塞個数と通過期待値の関係  
( $\alpha_n=1.0$ , 1 間隔当り)

$$l - D_{i+1} - D_{i+2} - \cdots - D_{i+n-1} \leq 0 \quad (28)$$

この場合には、 $n-1$  個で閉塞必要条件が達成されていることになるので、数値解析技法の便宜上、 $1 - \Phi(\gamma_z)$  の項を 1.0 として取り扱う。つまり、閉塞に関与する個数の見込み値  $n$  を多くすることは、それよりも少ない個数での閉塞必要条件達成確率を内包した積分をすることを意味する。ただし、 $n$  が大きくなると  $\alpha_n$  は小さくなることが考えられ、無用に大きな  $n$  に対する検討は必要ない。

## (2) シミュレーション結果との比較と考察

個別要素法によるシミュレーションでは、図-7 に示すように 6 種類の礫径の離散要素を用いたが、シミュレーション結果との比較を行う前に、このもとになった表-3 のような統計値をパラメトリックに考察する。すなわち、式(25),(26)の定性的意義について検討してみる。

図-17 は基準値における  $\alpha_n=1.0$  と仮定したうえで、 $l/d_{95}$  をパラメータとし、閉塞必要条件達成確率と閉塞個数の関係を示したものである。同一個数では、明らかに  $l/d_{95}$  が大きくなると  $P_n$  が小さくなる。例えば、閉塞個数を 1 として  $l/d_{95}=1.0$  では約 5% であるのに対して、 $l/d_{95}=2.0$  では約  $2 \times 10^{-4}$  となり、約 1/300 になる。仮定する閉塞個数が 1 個、2 個、3 個と増すにつれて確率は大きくなり、 $l/d_{95}=1.0$  では閉塞個数を 3 個と仮定すれば  $P_n \approx 1.0(100\%)$  となる。

図-18 は図-17 に対応する  $P_n$  を用いて式(12)の通過期待値を示したものである。砂礫の通過期待値は指数関数的に単調減少するものであることがわかる。 $\alpha_n=1.0$  の仮定では、閉塞個数を 2 個まで見込めば、 $l/d_{95}=2.0$  でも通過期待値は 100 以下となる。

図-19 は、表-3 における礫径の平均値を 0.5 から 2.0 倍までパラメトリックに変化させたときの通過期待値への影響を分析したものである。 $l/d_{95}=2.0$  の場合には、礫径分布の平均値に関わらず、通過期

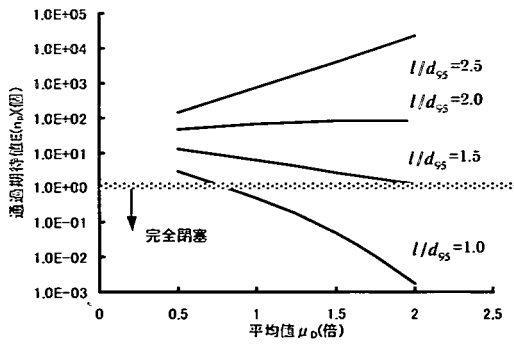


図-19 分布平均値と通過期待値の関係  
( $\alpha_n=1.0$ , 2個で閉塞とした場合, 1間隔当り)

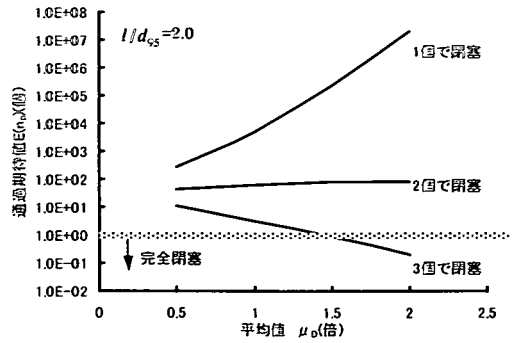


図-20 分布平均値と通過期待値の関係  
( $\alpha_n=1.0$ ,  $l/d_{95}=2.0$  の場合, 1間隔当り)

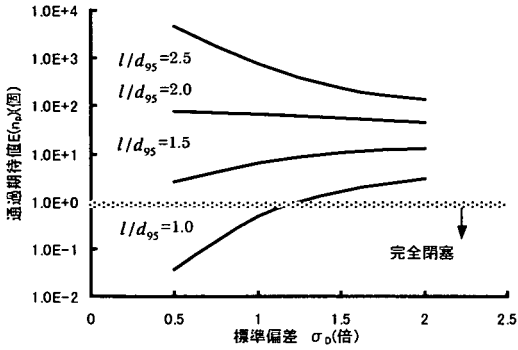


図-21 標準偏差と通過期待値の関係  
( $\alpha_n=1.0$ , 2個で閉塞とした場合, 1間隔当り)

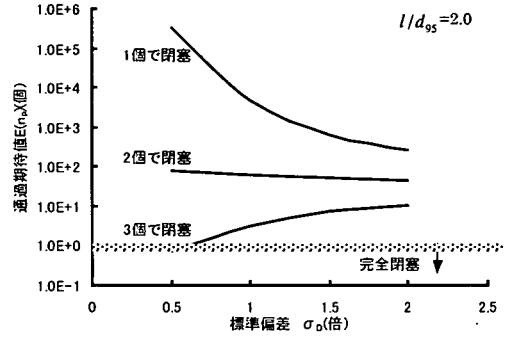


図-22 標準偏差と通過期待値の関係  
( $\alpha_n=1.0$ ,  $l/d_{95}=2.0$  の場合, 1間隔当り)

表-4 通過期待値と標準偏差の比較

$l/d_{max}$	個別要素法		理論推定値 $\alpha_n = 1.0$		理論推定値 $\alpha_n = 0.5$	
	$\mu$ (個)	$\sigma$ (個)	$\mu$ (個)	$\sigma$ (個)	$\mu$ (個)	$\sigma$ (個)
1.0(6段)	18.8	10.8	2.90	2.07	11.8	5.91
1.5(5段)	92.1	87.5	31.1	14.9	67.2	31.1
2.0(4段)	577	248	262	132	529	265
2.5(3段)	1000	0	2230	1280	4460	2580

(理論推定値は, 2個要素で閉塞するとし, 間隙の段数を考慮したもの)

待値はほぼ一定であるのに対し,  $l/d_{95}=1.5$  や  $1.0$  では, 礫平均径が大きくなると通過期待値が減少する傾向が見られ, 閉塞しやすいことがわかる.  $l/d_{95}=2.5$  では平均値を大きくするにつれて通過期待値が増えているが, これは対数正規分布の性格上平均値が大きくなると相対的に小さい粒子の数が増えるため, 閉塞に必要な大きな径の粒子が減るためである.

図-20 は,  $l/d_{95}=2.0$  において閉塞個数を 1, 2, 3 個とした場合の通過期待値と平均礫径の関係を示したものである. 閉塞個数が 2 個では通過期待値は変化しないのに対し, 1 個では礫平均径が大きくなると

通過期待値が増加し 3 個では逆に減少する傾向が見られる.

図-21, 22 は表-3 における基準値の標準偏差を 0.5 ~ 2.0 倍し, 通過期待値の変化を検討したものである. この場合も,  $l/d_{95}=2.0$  で閉塞個数が 2 個では, 粒径のばらつきに影響は少ないが, 他の場合にはばらつきが大きいほど, 通過期待値は  $l/d_{95}=2.0$ ,  $n=2.0$  個に収束する傾向が見られる. 以上のように,  $l/d_{95}$  が例え同じであっても, 礫径分布の基本パラメータ(平均値, 分散値)によって閉塞確率が変化するのは, 分布特性が対数正規分布であることによる非線形性の影響である.

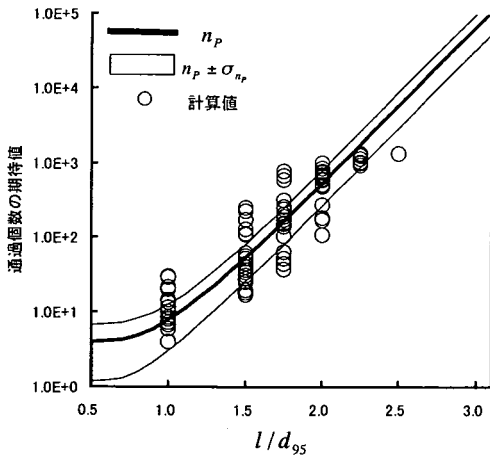


図-23 通過期待値の数値解析との比較  
( $\alpha_n=0.5$ ,  $n=2$ , 鋼管間隔個数4段)

ところで、 $\alpha_n$ については、例え $n$ 個要素によって閉塞必要条件を満たしたとしても、各間隙に到着する要素同士のタイミングのわずかなずれや砂礫間の摩擦、速度、粒径分布の平均値、ばらつき等によって変化するものと思われる。本研究では便宜的に2個要素に対して $\alpha_2=0.5$ を仮定するものとする。

なお、先の個別要素法によるシミュレーションでの粒径分布は、 $\mu=0.77(m)$ 、 $\sigma=0.293(m)$ であり、95%粒径は $d_{95}=1.32(m)$ となるが、最大粒径 $d_{max}=1.3(m)$ とほぼ一致している。

図-23は鋼管間隔の段数を考慮したものに、シミュレーションにより求めた要素通過数を比較図示したものである。表-4は個別要素法による20回のシミュレーションにおける平均値と標準偏差および統計解析による式(11)により求まる、平均値と標準偏差を示したものである。表-4より、 $\alpha_2=1.0$ とした場合の推定値は個別要素法シミュレーションに対して、平均値もばらつきも小さいが、 $\alpha_2=0.5$ ではシミュレーションよりもやや小さいものの概ねよく一致した値を得ることができる。よって、図-23に示すように、期待値±標準偏差のバンドとシミュレーションのばらつきは良い一致傾向を示す。

図-24は、図-11で示したシミュレーションによる捕捉率と、 $l/d_{95}$ の関係と確率推定値との比較を示したものである。確率推定値はシミュレーションのばらつき範囲を完全に網羅することはできないが、概ねその傾向を捉えている。

## 5. 結言

本研究では、オープン型砂防ダムの土石流の礫捕捉効果を確認するために、個別要素法を用いてシミュレーションを行い、確率過程にもとづく理論解と

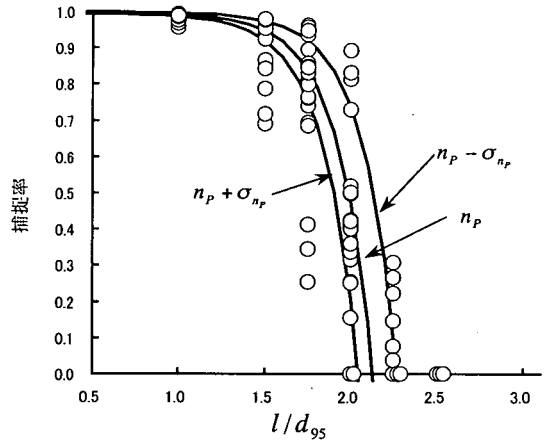


図-24 捕捉率の数値解析との比較

の比較を行ったものである。本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 個別要素法によるシミュレーション解析で土石流の礫捕捉機構をよく表現できる。
- (2) 個別要素法のシミュレーションでは、オープン部の閉塞は要素同士の架構構造によりなされるが、流下する礫の到着の順番と礫径組み合わせのランダム性の影響を受ける。
- (3) 個別要素法のシミュレーション結果でも、 $l/d_{max}=1.0, 1.5$ の場合は高い確率で礫を捕捉することが出来るが、 $l/d_{max}=2.0$ の場合は、捕捉確率が小さくなり、ばらつきが大きくなることが認められた。また、 $l/d_{max}$ が大きくなると、閉塞に関与する礫個数も増加する傾向がある。
- (4) 確率過程モデルによる予測値においても、 $l/d_{95}=2.0$ を境に閉塞期待値の傾向が変化するのであることが認められた。
- (5) 礫径分布が対数正規分布の場合には $l/d_{95}$ が同じであっても、通過期待値は礫の平均値や標準偏差の変化によって変化する。
- (6) 確率モデルによる推定値は個別要素法によるシミュレーションを概ね推定でき、その傾向はよく一致する。

謝辞：本研究の計算については、本校本科学生菅原安宏君の援助を受けた。記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 松村和樹：砂防計画の新しい展開と施設機能，砂防学会誌，Vol.52，No.6，pp.76-80，2000。
- 2) 池谷浩，上原信司：スリット砂防ダムの土砂調節効果に関する実験的研究，砂防学会誌（新砂防），Vol.32，No.3(114号)，pp.37-44，1980。
- 3) 芦田和男，高橋保：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利機能—，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp.433-441，1980。

- 4) 鋼製砂防構造物委員会編集：鋼製砂防構造物設計便覧，平成 13 年版，2001.
- 5) 水山高久，鈴木宏，及川義朗，森田明宏：透過型砂防ダムに関する実験的研究，砂防学会誌(新砂防)，Vol.41, No.2, pp.21-25, 1988.
- 6) 水山高久，小橋澄治，水野秀明：格子ダムのピーク流砂量減少率に関する研究，砂防学会誌(新砂防)，Vol.47, No.5(196号)，pp.8-13, 1995.
- 7) Hakuno, M. and Uchida, Y.: Application of the distinct element method to the numerical analysis of debris flow, *Proc. of JSCE*, No.432/ I -16, pp.31-41, 1991.
- 8) 水野秀明，水山高久，南哲行，倉岡千郎：個別要素法を用いた鋼管製透過型砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析，砂防学会誌，Vol.52, No.6, pp.4-11, 2000.
- 9) 諏訪浩，奥西一夫：土石流の流動特性・材料特性と規模—焼岳上々堀沢の土石流—，京都大学防災研究所年報，第 33 号 B-1, 1990.
- 10) 高橋保，中川一，里深好文，王浩民：格子型砂防ダムの閉塞モデル，京都大学防災研究所年報，第 43 号 B-2, pp.287-294, 2000.
- 11) 高橋保，中川一，里深好文，王浩民：格子ダムの閉塞モデル，平成 12 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.184-185, 2000.
- 12) 東京大学教養学部統計学教室編：統計学入門，東京大学出版会，pp.116-119, 1991.
- 13) 佐藤一幸，上原信司，水山高久，葛西俊一郎：鋼製透過型ダムによる石礫型土石流の捕捉状況と構造応答，砂防学会誌，Vol.53, No.6, pp.61-65, 2001.
- 14) 水山高久，鈴木宏，及川義朗，森田明宏：透過型砂防ダムに関する実験的研究，砂防学会誌(新砂防)，Vol.41, No.2, pp.21-25, 1988.
- 15) 水野秀明，水山高久：上部の格子間隔が狭い格子型砂防ダムに関する研究，砂防学会誌，Vol.49, No. 4(207号)，pp.3-8, 1996.
- 16) 大久保駿，阿部宗平，水山高久：スリットを有する砂防ダム，床固めの建設実態，砂防学会誌(新砂防)，Vol.48, No.5(202号)，pp.16-20, 1996.
- 17) 山本彰，山本修一，鳥井原誠，平間邦興：砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究，砂防学会誌，Vol.51, No.2, pp.22-30, 1998.
- 18) 尾崎幸忠，嶋川義宣，水山高久，葛西俊一郎，嶋丈示：流木が混入した土石流の鋼製透過型ダムによる捕捉形態の調査，砂防学会誌，Vol.51, No.2, pp.39-44, 1998.
- 19) 瀬戸俊彦，葛西俊一郎，山口健太郎，水山高久：鋼製透過型ダムによる砂礫型土石流の捕捉状況，砂防学会誌，Vol.51, No.3, pp.19-26, 1998.
- 20) 西川修司，和田浩，田嶋秀俊，水山高久，小田晃：土石流危険渓流に設置する半透過型スリット砂防ダムの土砂捕捉効果について，砂防学会誌，Vol.52, No.4, pp.42-44, 1999.
- 21) 水野秀明，南哲行，水山高久：連続して配置した鋼管製砂防ダムによる土石流の捕捉効果に関する研究，砂防学会誌，Vol.53, No.1, pp.19-25, 2000.
- 22) 水山高久，阿部宗平，矢島重美，井戸清雄：2 次元河床変動計算のスリット砂防ダムへの適用例，砂防学会誌(新砂防)，Vol.42, No.5(166号)，pp.21-23, 1990.
- 23) 水原邦夫，小川恒一，矢澤昭夫：格子ダムによる河床変動と土石流制御に関する研究，砂防学会誌(新砂防)，Vol.48, No.2(199号)，pp.12-21, 1995.
- 24) 渡辺正幸，水山高久，上原信司：土石流対策砂防施設に関する検討，砂防学会誌(新砂防)，115号，pp.40-45, 1980.
- 25) 高梨和行，村岡俊丸，佐藤義晴：立体格子型鋼製砂防ダムの機能について，砂防学会誌(新砂防)，148号，pp.4-11, 1987.

(2001.5.10 受付)

## SIMULATION AND STOCHASTIC EVALUATION OF OPEN TYPE STEEL CHECK DAM FOR DAMMING UP PERFORMANCE

Gakuto FUKAWA, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA and Tadashi YAMADA

This paper presents both an application of the distinct element method of debris flow passing through the open type steel made check dam structure and a stochastic evaluation method for the damming up performance of the structure hit by the debris flow which includes huge rocks or large gravels.

The simulation by the distinct element method shows very well the plugging mechanism observed at the open space of the check dam by the rocks or gravels and its randomness induced by the randomness of gravel size and gravel arrangement contained in the debris flow. The proposed stochastic evaluation method can estimate very well the expected value and/or its variation for the simulation results by the distinct element method.