

格子形状砂防堰堤の巨礫捕捉確率に関する一考察

Study on Probability of Rock Capturing for Grid Shape Check Dam

片出 亮*, 香月 智**

Ryo Katade, Satoshi Katsuki

*修 (工) ,防衛大学校研究科後期課程, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10 番 20 号)

** 工博, 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10 番 20 号)

On design of grid check dam structures, decision making of the space between steel pipes is substantial because the grid space has to trap a debris flow by use of interlocking effect of rocks. On the other hand, the space has to be kept open usually for biological environmental requirement. This paper shows an evaluation of effect of grid shape on the probability of rocks capturing. First, it is assumed that the capturing events are based on a probability process, i.e., a geometric distribution in a Bernoulli sequence. Second, the probability of what a rectangular space is stuffed by some rocks following log-normal distribution diameter is estimated using Monte-Carlo simulation. Then, characteristics of the rocks which passed through the grid are discussed.

Key Words: Probability of capture, Grid check dam, Geometric distribution

キーワード: 捕捉確率, 格子形状砂防堰堤, 幾何分布

1. 緒言

従来の砂防堰堤の目的は、流砂を貯めて河川勾配を緩和することであるため、コンクリート製などの重力式不透過型砂防堰堤が数多く用いられてきた。また、これらの堰堤は土石流を止める効果もあるため、土石流対策としても用いられてきた。しかし、土石流発生の有無に関わらず常時に土砂を堆積するため、土石流の捕捉容量を低下させるだけでなく、流砂を分断することによる下流への悪影響もあることや、水棲生物などの生態系や河川環境に及ぼす影響が指摘されるようになってきた。このため近年では、写真-1のような開口部を有する鋼製透過型砂防堰堤が数多く建設されるようになってきた¹⁾。

この構造物は、通常時には開口部によって砂礫を下流に供給する一方で、土石流時には巨礫によって透過部が閉塞されて、不透過型堰堤と同様な防災機能が期待されている。なお、鋼製透過型砂防堰堤は鋼管を組み合わせた骨組構造であり、鋼管間隔によって上述の相反する期待性能が決定される。その決定法に関して芦田ら²⁾は、水理実験により格子間隔を最大粒径 D_{95} の1.5~2.0倍程度に設定することにより、アーチ効果によって効果的に巨礫を閉塞させて土石流を捕捉できることを明らかにした。これらの研究^{3)~5)}を基に、平成13年度版の鋼製砂防構造



写真-1 鋼製透過型砂防堰堤

物設計便覧⁶⁾ (以下、旧指針と呼ぶ) には、 D_{95} の1.5倍程度とすることが推奨されていたが、平成21年に改訂された鋼製砂防構造物設計便覧⁷⁾ (以下、新指針と呼ぶ) では、 D_{95} の1.0倍以下にして巨礫捕捉の効果を強化することとなった。

ただし、間隔を狭くして防災機能を高めることは巨礫が閉塞しやすくなって下流への流砂供給性能を低下させる問題が解決されたわけではない。すなわち、この2つの性能は、本質的に巨礫による閉塞確率と非閉塞確率に対する要求性能として評価されるべきであるが、巨礫の捕捉に関する確率的な評価法は未確立なままである。この

観点から高橋ら⁸⁾は、水路実験によって透過型砂防堰堤の閉塞パターンを観測し、砂防堰堤に到達する巨礫の位置や時間をランダムであると仮定した閉塞モデルを構築して、瞬間的な閉塞確率を評価した。しかし、巨礫が格子を閉塞する事象のランダム性に対する確率的なモデル化については未検討であった。一方、深和ら⁹⁾は、連続する数個の巨礫径の合計が砂防堰堤の鋼管間隔を上回ることによって閉塞条件が成立するものとした場合に、土石流の先端から n 個の礫によって閉塞が完成する確率を求める手法を提案し、個別要素法によるシミュレーション結果との整合性を示した。ただし、これらの研究は二次元的な空間における検討であるので、三次元空間での閉塞条件は未検討のままである。

そこで本研究は、格子形状の捕捉面を有する鋼製透過型砂防堰堤が巨礫を捕捉する性能について、巨礫の運動を三次元とし、閉塞枠の高さと幅の二次元パラメータが支配する条件のもとで確率的に評価する手法を検討する。そのうえで、捕捉面を通過する巨礫群の個数や礫群の粒径分布の変化について検討する。

2. 評価手法

(1) ベルヌーイ試行過程

石礫型土石流は、先端部に多くの巨礫が集中する特性を有しているため、複数の巨礫がアーチ効果などで鋼製透過型砂防堰堤の格子に詰まることにより、後続の土石流が捕捉されることとなる。本研究では、巨礫が堰堤にランダムに到達する現象を図-1のように格子平面への到達順に番号付けされて順次に流下するものとする。このとき、任意の巨礫に引き続いて来襲する n_p 個の巨礫によって格子が閉塞する確率 P_s は、何番目の巨礫にとっても同等であると仮定すると、各試行は確率統計的に独立であり、ベルヌーイ試行列としてモデル化することができる。

ところで実験によると、この格子が一旦閉塞されると後続の土石流は全て堰き止められる。すなわち、ベルヌーイ試行列の問題であるため、格子が閉塞される条件は最初に発生するまでの試行回数が幾何分布に従うことになる。よって、格子の閉塞事象が i 回目の試行で初めて実現する場合、それまでの $(i-1)$ 回の試行では閉塞事象は発生しない。その際、事前に通過した巨礫群によって後続の巨礫の母集団特性は変化しないものとする、 i 回目で初めて格子が閉塞する確率は次式によって表わされる。

$$P_{ci} = (1 - P_s)^{i-1} P_s \quad (1)$$

ここで、 P_{ci} : i 個目に到達する巨礫によって格子が閉塞される確率、 P_s : i 番目からの数個の巨礫の組み合わせによって閉塞が完成する試行1回あたりの成功確率(以下、格子閉塞確率と呼ぶ)であり、格子は n_p 個の礫により

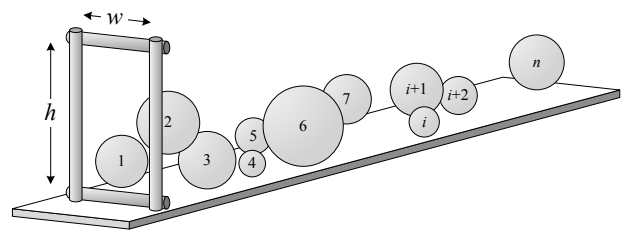


図-1 巨礫の到達順序モデル

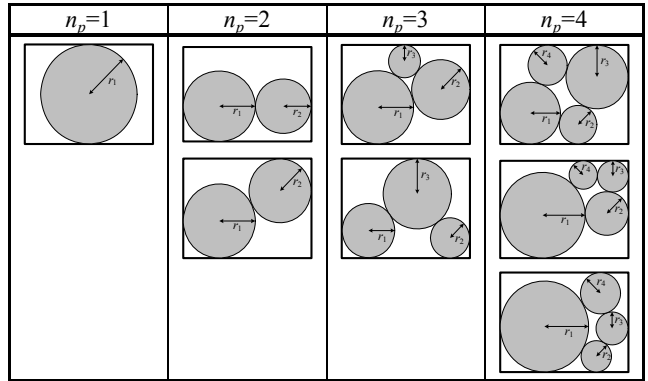


図-2 格子の閉塞状態

閉塞されるものとした。

このとき、格子閉塞確率 P_s は次式によって計算することができる。

$$P_s = \sum_{n_p=1}^{n_m} P_{gnp} \cdot P_{cnp} \quad (2)$$

ただし、 P_{gnp} : 連続する n_p 個の球形礫の粒径が一定の閉塞必要条件を満足する確率(以下、粒径条件確率と呼ぶ)、 P_{cnp} : P_{gnp} が成立した条件下において、実際の閉塞が成功する確率(以下、閉塞個数成功確率と呼ぶ)、 n_m : 閉塞条件で考慮する最大礫数。

ちなみに、式(1)は幾何分布であるため格子 k を通過する巨礫の個数 n_{tk} の期待値 \bar{n}_{tk} および分散 σ_{ntk}^2 は次式となる。

$$\bar{n}_{tk} = \frac{1}{P_s} \quad (3)$$

$$\sigma_{ntk}^2 = \frac{1 - P_s}{P_s^2} \quad (4)$$

(2) 格子閉塞の幾何条件

式(2)における粒径条件確率の前提となる $n_p = 1 \sim 4$ 個までの格子を閉塞する粒子の配置パターンを図-2のように仮定した。すなわち、まず $n_p = 1$ では粒径 r_1 が格子高さ h もしくは幅 w より大きいことによって閉塞されるので、その粒径条件 E_1 は次式となる。

$$E_1 : \quad 2r_1 \geq \min(w, h) \quad (6)$$

2個で閉塞される場合には、アーチ効果により粒径の合計が格子の一边よりも大きくなるものや、格子の対角上に配置された礫が身動きできないようになるものであり、次式のようになる。

$$E_{2-1} : 2(r_1 + r_2) \geq \min(w, h) \quad (7a)$$

$$E_{2-2} : r_1 + r_2 \geq \sqrt{(w - r_1 - r_2)^2 + (h - r_1 - r_2)^2} \quad (7b)$$

3個の場合には、図-2に示すような2パターンが考えられる。その条件を表すと次のようになる。

$$E_{3-1} : (r_2 + r_3)^2 \geq \left(w - r_1 - r_2 - \sqrt{2h(r_1 + r_3) - h^2} \right)^2 + \left(h - r_1 - r_3 - \sqrt{2w(r_1 + r_2) - w^2} \right)^2 \quad (8a)$$

$$E_{3-2} : (r_2 + r_3)^2 \geq \left(w - r_1 - r_2 - \sqrt{2h(r_1 + r_3) - h^2} \right)^2 + (h - r_1 - r_3)^2 \quad (8b)$$

さらに4個になると、図-2に示す3パターンが代表的なものになると考えられる。

$$E_{4-1} : r_1 + r_2 + r_3 + r_4 \geq \sqrt{(h - r_1 - r_4)^2 + (w - r_1 - r_3 - 2\sqrt{r_3 r_4})^2} + \sqrt{(h - r_2 - r_3)^2 + (w - r_1 - r_3 - 2\sqrt{r_1 r_2})^2} \quad (9a)$$

$$E_{4-2} : r_1 + r_2 + r_3 + r_4 \geq \sqrt{(w - r_1 - r_2)^2 + (h - r_1 - r_3 - 2\sqrt{r_2 r_3})^2} + \sqrt{(r_3 - r_4)^2 + \left(w - r_1 - r_3 - \sqrt{2h(r_1 + r_4) - h^2} \right)^2} \quad (9b)$$

$$E_{4-3} : (r_3 + r_4)^2 \geq \left(h - r_2 - r_4 - \sqrt{(r_2 + r_3)^2 - (w - r_1 - r_3 - 2\sqrt{r_1 r_2})^2} \right)^2 + \left(w - r_1 - r_3 - \sqrt{2h(r_1 + r_4) - h^2} \right)^2 \quad (9c)$$

なお、本研究では7個までの閉塞を考慮するものとするが、5個以上では無数に閉塞時の配列パターンが考えられるため、礫の投影面積比によって判断するものとした。

$$E_{n>5} : \omega \sum_{i=1}^{n_p} \pi r_i^2 \geq wh \quad (10)$$

ここで、 ω ：礫の投影面積比の閉塞要件を満たす閾値であり、本研究では筒井らの現地調査報告¹⁰⁾を参考にして0.7とした。

(3) 閉塞個数成功確率 (P_{cn})

ある連続する n_p 個の粒径が図-2で示したような粒径条件を満たしたとしても、 n_p 個の中の数個が遅れて到達すると閉塞せずに流れ出てしまうことや、図-2の配置と異なる位置に到達したりすると空隙は詰まらない。すなわち、 $n=1$ の場合は事象 E_1 が成立すれば100%閉塞することは自明であるが、 $n \geq 2$ では閉塞個数 n_p の増加に伴って閉塞個数成功確率 P_{cn} が小さくなることは容易に推測できる。そこで本研究では、閉塞個数の増加に伴い P_{cn} が減少する関数として、次式を仮定した。

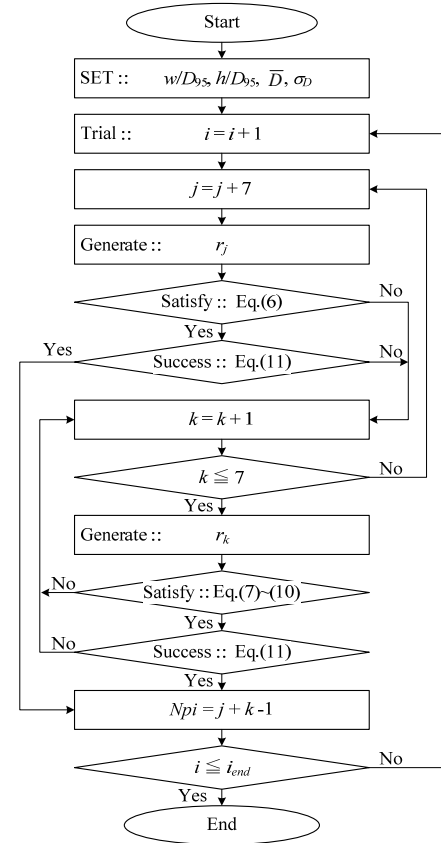


図-3 閉塞に関する MCS 過程

$$P_{cn} = n_p^a \quad (11)$$

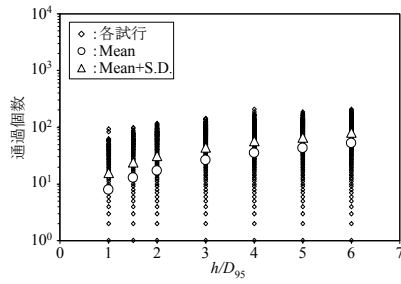
ここで、 a ：低減度を表す係数（負値）であり、実験や観測結果に沿って決定されるものであるが、本検討では $a = -1.0$ とした。

(4) シミュレーション方法

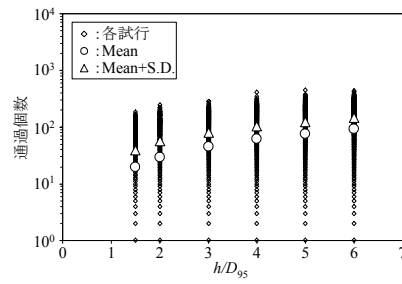
ここでは、モンテカルロシミュレーション（以下、MCS と呼ぶ）により格子形状ごとの式(6)~(10)による粒径条件確率を算出して格子閉塞確率を算出するとともに、格子を通過する礫群の個数や粒径分布について推定する。

(5) 格子閉塞確率の算定

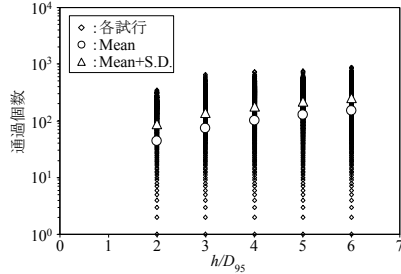
格子を通過する礫群の個数やその粒径特性値について MCS により推定した。この際、堰堤の格子形状は、その格子幅を新指針に基づく $w/D_{95} = 1.0$ 、旧指針で用いられていた $w/D_{95} = 1.5$ 、さらに拡張した $w/D_{95} = 2.0$ の3種類とし、これに対して格子高さ h/D_{95} を1.0間隔に変化させて評価する。なお、格子形状の最小単位は、それぞれ $w/D_{95} = h/D_{95} = 1.0$ とすることにした。また、上流において発生し流下する礫群の粒径分布は対数正規分布に従うものとし、まず変動係数は過去の研究でも100%程度とされているものを参考とした¹¹⁾。そのうえで、実設計の状況を調査すると D_{95} は1~1.5m程度とする場合が多いので、ここでは $D_{95} = 1.0\text{m}$ となるように変動係数 $COV_D = 100\%$ とした。そのうえで、図-3に示す要領により、閉塞が完成するまでに非閉塞とされた通過個数 n_t 個をシミ



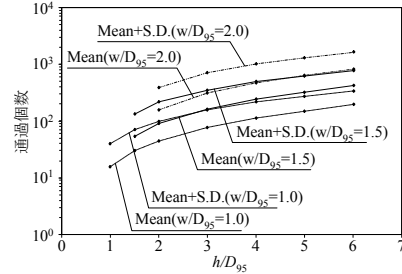
(a) $w/D_{95}=1.0$



(b) $w/D_{95}=1.5$

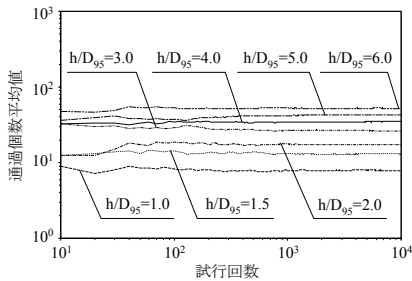


(c) $w/D_{95}=2.0$

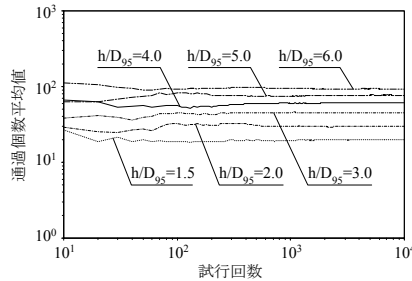


(d) 平均値比較

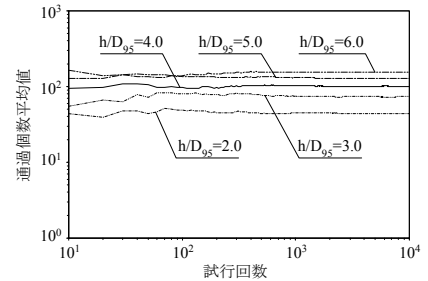
図-4 格子通過個数



(a) $w/D_{95}=1.0$

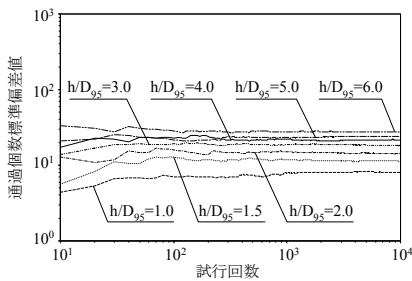


(b) $w/D_{95}=1.5$

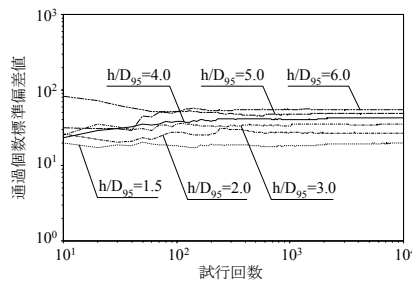


(c) $w/D_{95}=2.0$

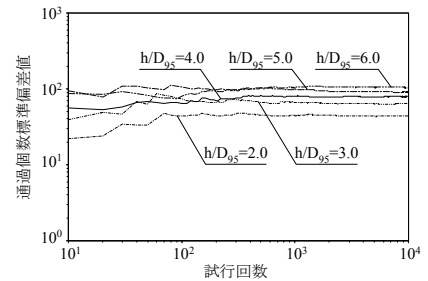
図-5 通過個数平均値の推移



(a) $w/D_{95}=1.0$



(b) $w/D_{95}=1.5$



(c) $w/D_{95}=2.0$

図-6 通過個数標準偏差値の推移

シミュレーションした。すなわち、その手順は次のようになる。

格子の幅 w/D_{95} および高さ h/D_{95} を決定したうえで、対数正規分布に基づく礫群の粒径分布特性値 (\bar{D} , σ_D) を決定する。

①で決定した粒径分布特性値に基づき、ランダムな粒径 ($r_i = 0.5D_i$) の礫を $n_S (= 7)$ 個発生させる。

式(6)~(10)の粒径条件に適合する礫の配列が成立した際、式(11)によりランダムに「成功」・「失敗」を表す閉塞個数成功条件を決定する。

粒径条件に適合せず、閉塞個数成功条件に合致しない場合は通過する礫と判断し、その数 n_{ii} を数える。 i_{end} まで試行を繰り返して通過礫群の特性値を算出する。この際、 $i_{end} = 10^4$ とした。すなわち、総発生個数

は $n_S i_{end} (= 7 \times 10^4)$ 個である。

3. 計算結果

図-4に全シミュレーションの格子形状パラメータごとの格子通過個数 n_t を示す。図中の n_t は個々の通過個数を表しており、各 h/D_{95} において 10^4 個である。図中にはこれらの平均通過個数を、また通過個数の標準偏差を σ_{n_t} で示す。図-4(a)は新指針に基づく $w/D_{95} = 1.0$ を示しており、 $h/D_{95} = 1.0$ とすると、 $\bar{n}_t = 8$ であり、通過個数の最大値は 94 個程度である。さらに、 $h/D_{95} = 1.5 \sim 6.0$ と変化させると、 $\bar{n}_t = 13 \sim 52$ と増加するとともに、標準偏差は $\sigma_{n_t} = 11 \sim 27$ となり、ばらつきも増加することがわかる。

一方、旧便覧に対応する $w/D_{95} = 1.5$ では、図-4(b)に示

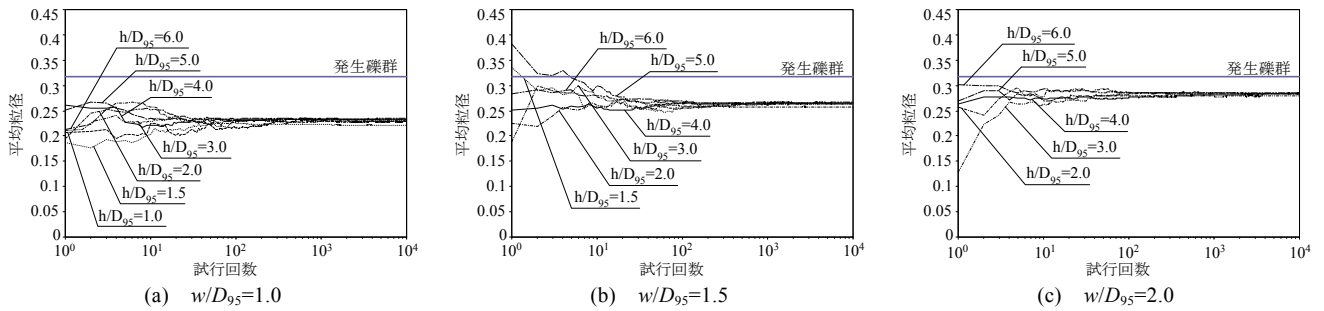


図-7 通過礫群の平均粒径推移

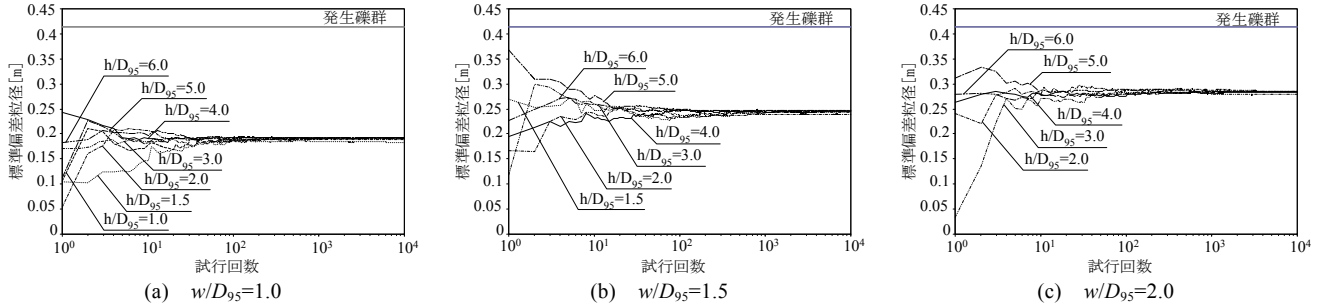


図-8 通過礫群の標準偏差粒径推移

すように $h/D_{95}=1.5$ において $\bar{n}_t = 20$ であることから、新便覧の正方形格子形状による \bar{n}_t の 2.5 倍程度まで増加することがわかる。また、 $h/D_{95}=1.5 \sim 6.0$ と変化させると、標準偏差は $\sigma_{n_t} = 20 \sim 93$ となり、 $w/D_{95} = 1.0$ の 3 倍程度となり、ばらつきはさらに大きくなっている。なお、最大通過個数は $h/D_{95}=1.5$ では 183 個程度であるが、 $h/D_{95} = 6.0$ では 438 個と 2 倍以上に増加する。さらに、図-4(c)に示す $w/D_{95} = 2.0$ において $h/D_{95} = 6.0$ と細長い格子形状では、最大通過個数が 866 個程度にまでなり、閉塞が難しくなると評価される。ここで、興味深いことに図-4(a)~(c)のいずれの場合も最初に到達した 1~2 個目の巨礫によって格子が閉塞し、通過個数 0 の場合もあることがわかる。

次に、これらの平均値を比較したものを図-4(d)に示す。それぞれ $h/D_{95}=6.0$ の場合を比較すると、 $\bar{n}_t = 52, 93, 154$ となり w/D_{95} が大きくなると通過個数が増えることがわかる。また、図中に示した標準偏差でも $\sigma_{n_t} = 27, 55, 103$ と増加する。

図-5, 6 には、図-4 の結果に至るまでのシミュレーション過程で、平均通過個数 \bar{n}_t および標準偏差値 σ_{n_t} を算定した場合の試行回数に伴う収束状況を示す。図-5 に示すように試行 100 回では、 \bar{n}_t については最終収束値よりも大きな値になる傾向が見受けられるが、その後、減少や復元過程があり、1000 回を超えるあたりから安定している。図-6 に示す σ_{n_t} でも同様な傾向が見受けられ、いずれの場合にも 10^4 回の試行により概ね一定値に収束していることがわかる。

ところで、上流から下流に向けて数基の砂防堰堤を設置することにより、逐次に巨礫を捕捉する砂防堰堤の設置システムについても検討されている。このような観点から行った水野らの実験¹²⁾では、下流側の格子形状を上流側のもと同じにすると捕捉効果が小さいことが示されている。この参考とするために、通過前後における粒

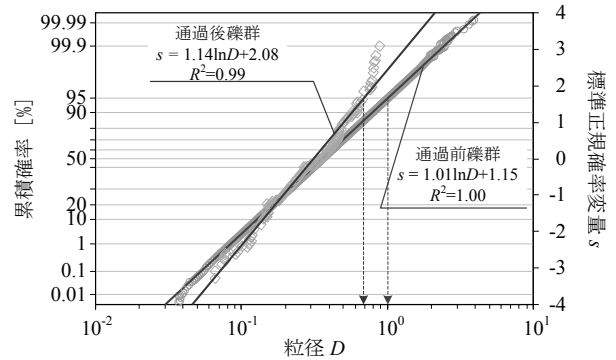


図-9 粒径分布の対数正規プロット

径分布特性の変化について、通過した後の礫群の平均粒径 \bar{D}_p および標準偏差粒径 σ_{Dp} の収束状況として図-7, 8 に示す。前述のように通過前の粒径分布としては $\bar{D} = 0.36\text{m}$ 、変動係数 $COV_D = 100\%$ である。 $w/D_{95} = 1.0, 1.5, 2.0$ と大きくすると、正方形格子の通過礫群の平均粒径は $\bar{D}_p = 0.24, 0.27, 0.29$ と大きくなる。また、通過礫群の標準偏差粒径も $\sigma_{Dp} = 0.26, 0.32, 0.36$ とばらつきも大きくなる。各図には h/D_{95} を変化させたものを示しているが、 $w/D_{95} = 1.0, 1.5, 2.0$ のいずれの場合にも h/D_{95} の影響はさほど小さくなく、まとまった値に収束している。また、各図には通過前礫群の特性値を太線で示すが、明らかに $w/D_{95} = 1.0$ のものの収束値の方が $w/D_{95} = 1.5, 2.0$ のものの収束値より小さくなり、通過前母集団との相違が大きくなる。この傾向は \bar{D}_p よりも σ_{Dp} の方が大きい。

参考までに $w/D_{95} = h/D_{95} = 1.0$ における 10^4 回終了後の通過母集団と通過前母集団の分布特性を対数正規確率紙上にプロットすると図-9 となる。通過前後の礫群の粒径分布は決定係数がどちらも 0.99 以上であり良くフィッティングしている。これより、対数正規分布の粒径を有して流下する礫群は、格子通過後も対数正規分布となることがわかる。

表-1 格子通過後の礫群特性値

w/D_{95}	h/D_{95}	通過個数特性値			通過礫群粒径特性値			
		\bar{n}_t	σ_{n_t}	COV_{n_t}	\bar{D}_p	σ_{D_p}	COV_{D_p}	D_{p95}
1.0	1.0	8	8	1.0	0.24	0.26	1.07	0.69
	2.0	13	11	0.9	0.23	0.25	1.08	0.67
	3.0	17	14	0.8	0.24	0.26	1.09	0.71
	4.0	26	18	0.7	0.24	0.27	1.10	0.71
	5.0	35	22	0.6	0.24	0.27	1.09	0.71
	6.0	43	24	0.6	0.25	0.27	1.09	0.71
1.5	1.5	52	27	0.5	0.24	0.27	1.10	0.71
	2.0	20	20	1.0	0.27	0.32	1.17	0.82
	3.0	30	27	0.9	0.27	0.31	1.15	0.80
	4.0	45	35	0.8	0.27	0.31	1.15	0.80
	5.0	62	43	0.7	0.27	0.32	1.17	0.80
	6.0	77	49	0.6	0.28	0.33	1.17	0.80
2.0	2.0	93	55	0.6	0.28	0.32	1.17	0.83
	3.0	44	44	1.0	0.29	0.36	1.24	0.91
	4.0	74	65	0.9	0.29	0.35	1.22	0.88
	5.0	101	79	0.8	0.29	0.35	1.22	0.88
	6.0	127	91	0.7	0.29	0.36	1.22	0.88

表-1には、通過個数 (\bar{n}_t, σ_{n_t}) および通過礫群特性値 ($\bar{D}_p, \sigma_{D_p}, D_{p95}$) のシミュレーション結果を示す。これより、例えば格子形状を旧指針に基づいて $w/D_{95} = h/D_{95} = 1.5$ とするならば、上流部の D_{95} に対して通過後の 95% 非超過確率粒径 D_{p95} は $0.82D_{95}$ となり、元集団の約 80% を D_{95} の基準値として下流の砂防施設を設置すれば、上流と同様の礫捕捉効果を期待できることがわかる。同様に、新指針に基づいて $w/D_{95} = h/D_{95} = 1.0$ とした格子形状を構成するのであれば、その傾向はさらに強くなり、平均粒径が 75%、標準偏差粒径は 60% となり、 D_{p95} が D_{95} の 69% となる。よって、仮に新指針に基づいて上流砂防堰堤の格子形状を $w/D_{95} = h/D_{95} = 1.0$ と決定すれば、下流の砂防施設では上流堰堤よりも 70% 程度の細かい格子形状にすることにより同様な効果が期待できる。

4. 結言

本研究は、格子形状を有する砂防堰堤の巨礫捕捉確率について MCS を用いて評価したものである。その成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 土石流中の巨礫が格子型砂防堰堤に閉塞される事象をベルヌーイ試行列としてモデル化し、巨礫捕捉性能を確率的に評価する手法について提案した。なお、本現象は幾何分布問題として取り扱うことができるため、下流域への影響が大きい非捕捉個数による評価が可能となることをシミュレーションした。
- (2) 格子が礫により閉塞する条件を幾何学的に定義して格子閉塞確率を算出した。
- (3) 格子形状を変化させることにより、通過する礫群の個数および粒径分布の変化について検討した。これにより、上下流に連続して設置される透過型砂防堰堤の格子形状については、徐々に格子を小さくすることが必要であることを示し、その割合の基準値のシミュレーション結果を示した。

なお、下流側の格子の捕捉性能は、上流側格子の通過個

数と下流堰堤の捕捉個数とのバランスに関する評価が必要であり、今後の検討を要する。

参考文献

- 1) 田端茂清, 守山浩史: 鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題, 砂防学会誌, Vol.62, No.6, pp.47-51, 2010.
- 2) 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理機能—, 京都大学防災研究所年報, 第 23 号 B-2, pp.433-441, 1980.
- 3) 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, 新砂防, 115 号, pp.40-45, 1977.
- 4) 水山高久, 鈴木宏, 及川義朗, 森田明弘: 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.
- 5) 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.
- 6) 財団法人 砂防・地すべり技術センター 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 年度版, 山海堂, 2001.
- 7) 財団法人 砂防・地すべり技術センター 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 21 年度版, 山海堂, 2009.
- 8) 高橋保, 中川一, 里深好文: 格子ダムの閉塞モデル, 京都大学防災研究所年報 第 43 号 B-2, pp.287-294, 2000.
- 9) 深和岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正: オープン型鋼製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, 土木学会論文集 No.703/I-59, pp.165-176, 2002.
- 10) 筒井智照, 石川信隆, 嶋丈示: 鋼製透過型砂防えん堤の土石流捕捉状況に関する一考察, 平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集 O2-05, pp.108-109, 2009.
- 11) 片出亮, 香月智: 砂防堰堤の礫捕捉確率に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-209, 2010.9.
- 12) 水野秀明, 南哲行, 水山高久: 連続して配置した鋼管製透過型ダムによる土石流の捕捉効果に関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol.53, No.1, pp.19-25, 2000.

(2010 年 8 月 6 日受付)