

格子型砂防ダムの閉塞モデル

高橋 保・中川 一・里深好文・王 浩民*

*京都大学大学院工学研究科

要旨

これまで、格子型砂防ダムによる土石流捕捉モデルは種々開発されてきたが、ほとんどの場合は「確定的」に土石流捕捉率などが決定されている。本研究では格子型砂防ダムで巨礫が捕捉される過程は確率過程であるという概念に基づき、まず、水路実験で格子型砂防ダムの閉塞パターンを明らかにすることで、この考え方の妥当性を検証するとともに、石礫濃度と流速を種々変化させて土石流を発生させ、その時の瞬間閉塞確率を求めることによって、確率的な格子型砂防ダム閉塞モデルを開発する。また、このモデルを用いて格子ダムの閉塞過程の再現計算を行う。

キーワード：土石流，格子型ダム，確率過程，閉塞

1. はじめに

近年、人間の生活空間は山地流域や河川周辺に広がっており、土砂の生産・流送などの土砂移動現象が、人々の生活に直接的な影響を与えている。その形態は、侵食による土壌の流亡から崩壊・土石流災害、河道・河岸の侵食、河床上昇によってもたされる洪水・土砂氾濫、さらには流砂の不均衡による河床変動や貯水池による濁水長期化現象にいたるまでさまざまである。とくに、土石流災害は死者を伴う自然災害の中で大きな比重を占めており、その防止・軽減対策は、社会的に極めて重要な課題となっている。そのため、従来から異常豪雨時の土石流あるいは土砂流の調節制御をはじめ各種の目的を持って、数多くのコンクリート製不透過型砂防ダムが設置されてきている。しかしながら、この種の砂防ダムでは土石流や多量の土砂流出を伴うような大洪水

が発生する前の小規模の出水で満砂し、肝心の大洪水時に、十分な土砂調節の機能を果たさない場合も少なくない。その上、これらのダムは土石流を一旦経験すると、殆どの場合満砂に近い状態になるため、目的とする土石流調節機能も失われることが多い。すなわち、不透過型砂防ダムは機能の永続性の面において弱点を持っている。且つ、中小洪水時の流砂を遮断するため、下流河川の水みちが固定化され、河川内の砂州の樹林化をうながすとともに、魚などの生活にも悪影響を及ぼすなどの原因ともなっている。

上記のような欠点への反省から、最近になって、従来の土砂を止めることで目標とする砂防から、危険な土砂流出は確実に抑止し、その上で、下流の生態環境等を保全するために、安全無害な土砂は継続的に流下させる砂防への考え方の変換がなされている。無害な土砂は下流へ流すという思想は古くから

あり、一部で大暗渠ダムが建設されていたが、暗渠部分が壊れやすく、維持が困難であることから次第に顧みられなくなっていた。しかしながら、満砂ダムが十分に土石流調節機能を発揮しないという欠点を払拭するために、約20年前に透過型砂防ダムが注目されることになった。これは通常の出水で移動するような小さな砂礫は堰堤に設けられた隙間から流出させることにより、砂防ダムが満砂して空容量を失うことを防ぎ、土石流の発生時には、その先端部に集中する巨石により隙間が閉塞されることを利用し、ダム上流域に土石流を堆積させようとするものである。

透過型砂防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。従来の研究によると、透過部分の空間幅 L と砂礫の最大粒径 d_{max} との比や土石流の土砂濃度などのパラメータがこの透過部分の閉塞に大きく影響を及ぼすことがわかっている。透過性砂防ダムの一種類である格子型砂防ダムの土石流捕捉モデルに関しては、土砂通過量を確率的に決めるモデル（芦田・江頭ら、1987）や、砂防ダムと土石流の特性値を考慮したモデル（水山・小橋ら、1995）などの提案がなされているが、いずれのモデルにおいても土石流の流入条件及びダムの特性値が与えられると、「確定的」に土石流の捕捉率などが決定される。ところが、実際には、同じ条件であっても、大きな粒子の到着タイミングのわずかのずれなどの影響でダムが閉塞したりしなかったりすることが知られている。そこで、本研究では、透過部の閉塞現象を一つの「確率過程」とし、瞬間閉塞確率が土石流特性値と関係づけられるものと考え、時間の経過に伴うダムの閉塞過程を再現できるモデルを開発する。

2. 実験概要

2.1 実験装置、方法

実験装置を Fig.1 に示している。透過型砂防ダムの透過部分が土石流先端部の巨礫によって閉塞される過程を解明するために、幅 10 cm、勾配 18 度の勾配可変鋼製水路の上に取り付けている 30 度の滑り台から、粒径 1 cm の一様砂礫を一定流量の給水条件下で水路に給砂し、下流端に設置した格子型砂防ダム透過部の閉塞状況と閉塞パターンを明らかにする。さらに、砂礫の数や給水量を種々変化させることによって、格子ダム透過部にやってくる砂礫材料の濃度と速度を変え、格子の閉塞状況の違いを明らかにする。

実験条件を Table 1 に示す。ここに、 v は砂礫の

速度、 c は濃度、 t_m は砂礫の平均到着時間間隔、 $t_{0.2\sim 0.4}$ は閉塞確率 0.2~0.4 に達するまで所要時間である。ここに、実験での閉塞確率については 2.2 に示す。

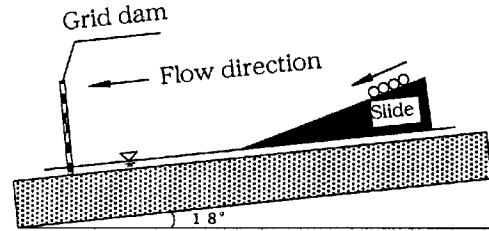


Fig.1 Experimental flume

Table 1 Experimental condition

| CASE | V(cm/sec) | C | t_m (sec) | $t_{0.2\sim 0.4}$ (sec) |
|------|-----------|-------|-------------|-------------------------|
| 1 | 14.3 | 0.039 | 0.469 | 0.6 |
| 2 | 15.7 | 0.031 | 0.538 | 0.71 |
| 3 | 15.9 | 0.047 | 0.350 | 0.35 |
| 4 | 15.9 | 0.03 | 0.549 | 0.76 |
| 5 | 16.5 | 0.031 | 0.512 | 0.54 |
| 6 | 13.7 | 0.07 | 0.273 | 0.27 |
| 7 | 13.8 | 0.051 | 0.372 | 0.72 |
| 8 | 13.3 | 0.056 | 0.352 | 0.57 |
| 9 | 13.6 | 0.069 | 0.279 | 0.25 |
| 11 | 14 | 0.07 | 0.267 | 0.23 |
| 12 | 14.2 | 0.066 | 0.279 | 0.31 |
| 13 | 13.9 | 0.124 | 0.152 | 0.06 |
| 14 | 13.9 | 0.096 | 0.196 | 0.18 |
| 15 | 14.3 | 0.08 | 0.229 | 0.37 |
| 18 | 16.5 | 0.077 | 0.206 | 0.2 |
| 19 | 17.6 | 0.084 | 0.177 | 0.14 |
| 20 | 15.9 | 0.103 | 0.160 | 0.07 |
| 21 | 17 | 0.106 | 0.145 | 0.04 |
| 22 | 17.3 | 0.112 | 0.135 | 0.04 |

実験に使用した格子型砂防ダムを Fig.2 に示す。ダム部材には直径 3mm の銅製棒を用いている。格子間隔 L と粒径 d の比は 1.7 である。

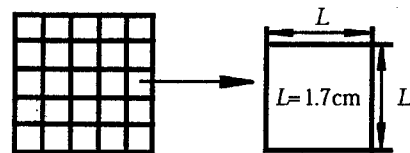


Fig.2 Model of a grid dam

2.2 データ処理方法

実験中、格子型砂防ダムの下流側と側面より、デジタルビデオカメラで、上方より高速ビデオカメラで砂礫の動きを追跡し、ダム透過部の閉塞過程を撮

影した。また、映像データの処理を容易にするために、実験用砂礫には種々色を付けている。映像記録は動体解析ソフト Move-tr32/3D（株式会社ライブラリー製）を使って、0.01 秒ごとにダム透過部に到達した粒子の数と各々の速度を解析し、ダムの格子が閉塞した時刻を計測した。これによって、砂礫材料の平均濃度と平均速度を算出した。

また、実験に使用した格子型砂防ダムには横断面内に一列で五つの格子があるが、格子の間の相互的な影響を無視し、五つの格子に対する一回の試行が一つの格子に対する五回の試行と同じであると見なして、一つの格子が閉塞した時、格子の閉塞確率が20%増え、全部の格子が閉塞した時、閉塞確率が100%に達したと考える。

3. 閉塞モデル

3.1 平均到着時間間隔 t_m

急勾配の深床堆積物が表面流によって侵食され、その水と侵食土砂が混合して流下するというプロセスで形成される土石流は、通常粘土粒子から直径数メートルの巨礫まで広い粒度分布を持っている。土石流先端部付近には最大径クラスの粒子が集まっているので、最大径 d_{max} を持つ粒子がランダムな時間間隔で格子ダム透過部に到達すると考える。従来の研究（芦田・高橋, 1980）により、格子ダム透過部の閉塞には、 L/d_{max} が大きく影響していることが分かっているが、 d_{max} の粒径粒子が透過部に到達する頻度も関係すると考えられる。今、格子の両柱の中心間距離を l とすると、この区間に粒子が到達する平均の時間間隔 t_m は、粒子の平均濃度 c 、粒子の平均移動速度 v 、粒径を d を用いると、次式で表される

$$t_m = \frac{\pi d^2}{6lc v} \quad (1)$$

Fig.3 に示すように、 l が大きい ($l=l_1$) と、column1 と column3 の間に粒子1から粒子9までが次々と到着して、 t_m が小さくなるが ($t_m=t_{m1}$)、 l が小さくなると ($l=l_2$)、粒子1, 4, 7 が column1 と column2 の間に到着することになり、濃度が一定でも t_m は大きくなることわかる ($t_m=t_{m2}$)。

また、 c と v が大きいほど、閉塞確率は大きくなると予想される。Table1 は各ケースの平均到達時間間隔 t_m と閉塞確率が0.2~0.4に達するまでの所要時間 $t_{0.2\sim 0.4}$ を示している。例えば、case2 と case5 を比較すると、同一粒子濃度では流速が大きい case5 の方が t_m は小さく、また、case3 と case4 を比較すると、同一流速では粒子濃度が高い case3 の方が

t_m は小さくなっており、式(1)の傾向を示している。 t_m が小さい場合閉塞しやすくなると考えられるが、 $t_{0.2\sim 0.4}$ も小さくなり、このことを裏付ける結果となっている。

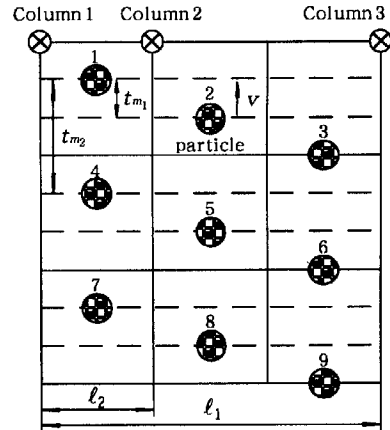


Fig.3 Relationship between t_m and l

3.2 閉塞パターン

実験中の観察によると、粒子の到達位置によって、粒子がダムの柱に衝突する場合と衝突しない場合の二つがあった。Fig.4 に粒子と柱の位置関係を示す。

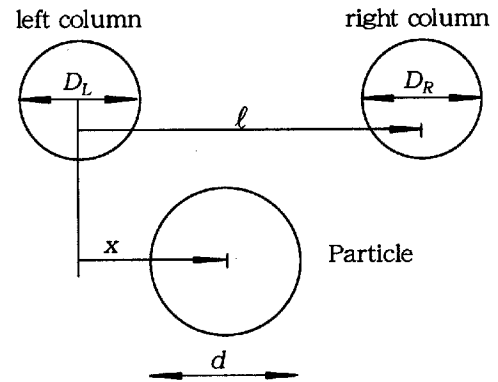


Fig.4 Condition for the particle collision with a column of the dam

同図より、粒子が柱に衝突する条件は次のように表せる。

$$\text{左側の柱に衝突} \quad x < \frac{D_L + d}{2} \quad (2)$$

$$\text{右側の柱に衝突} \quad x > l - \frac{D_R + d}{2} \quad (3)$$

ここに、 x は左側の柱の中心と粒子の中心との間の距離、 D_L は左側の柱の直径、 D_R は右側の柱の直径である。

Fig.5 に示したように、粒子がある角度でダムの柱に当たった後、柱を中心としてある角速度 ω で回

転しながら移動すると考える。実験によって、Fig.4のような回転中の粒子とその後到着する粒子との間でアーチアクションを作ることにより、透過部が閉塞することが判明した。

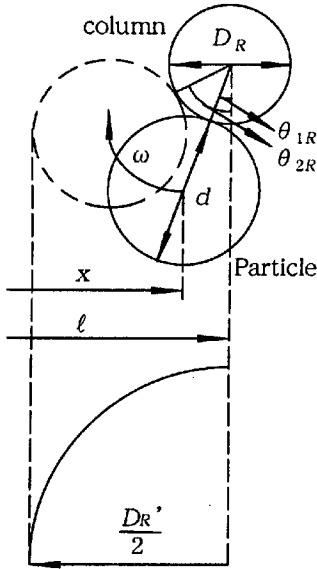


Fig.5 Rotation of a particle around a column of the dam

これらの実験結果をもとに、次のような閉塞モデルを考えた。粒子が柱を軸に回転している間は、後続粒子の通過可能間隔 L が小さくなる。すなわち、粒子が接している柱の直径が大きくなったのと等価であると考え。そのパターンは Fig.6 に示すように3つ大別できる。

ターン 1: i 番目にやってきた粒子がどちらの柱にも当たらないで通過する。この場合、後出の Fig.9 に示すフローチャートにおいて、 $i+1$ 番目の粒子の衝突判定に進み、 T_L 時間内にやってくる粒子が全て通過する場合には、 T_L 時間内では閉塞しなかったと考える。

パターン 2: 2 個の粒子が同時に到達して閉塞する。

パターン 3: 片方の柱に粒子が衝突して回転中に、他の粒子が衝突し、徐々に閉塞する。この場合は、柱の直径が大きくなると考え、新しい D_L 、 D_R を計算し、 $D_L + D_R > L$ となれば、たとえ一時的にでも、透過部が閉塞したと考える。

ただし、複数の粒子が連続して流下してくる場合、次の粒子が流下してくる位置によっては、見掛け上太くなった柱に接触しても、直径を増加させる方向に回転しない場合も生じるので、粒子が見掛け上の柱を太くする条件は次式のようなになる。

$$\text{左の柱に衝突} \quad \frac{D_L - d}{2} x < \frac{D_L + d}{2} \quad (4)$$

$$\text{右の柱に衝突} \quad \ell - \frac{D_R + d}{2} < x < \ell - \frac{D_R - d}{2} \quad (5)$$

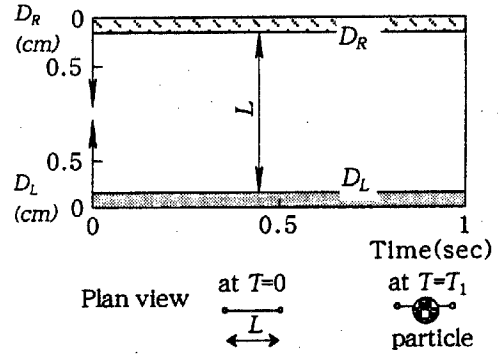


Fig.6(1) Pattern 1: no blockade

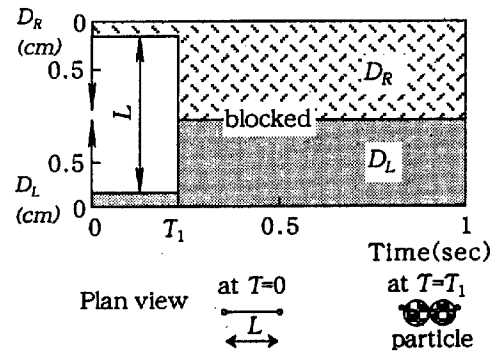


Fig.6(2) Pattern 2: blockade by the simultaneous arrival of two particles at time T_1

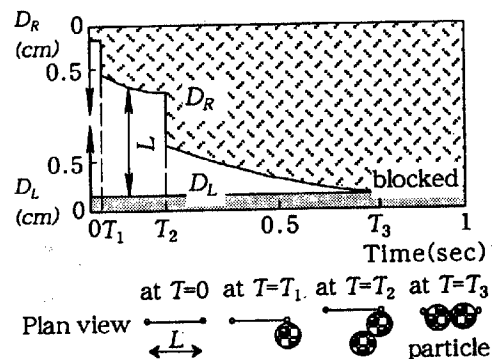


Fig.6(3) Pattern 3: gradual blockade

3.3 柱の直径の計算

上式によって、位置 x を流下してきた粒子が粒子の中心と柱の中心とを結ぶ角度が θ_1 の位置で柱に衝突して、柱を中心に一定の角速度 ω で回転し、限界角度 θ_2 で離脱すると考えると、離脱に要する時間 t_w は下式で表される。

$$t_w = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\omega} \quad (6)$$

実験によれば、限界角度 θ_2 は 60 ~ 65 度である。

今、衝突 t_1 秒後の角度を θ ($\theta_1 < \theta < \theta_2$) とすると、増大したとみなされる柱の直径 D は次式で表される。

$$D = (D+d)\sin(\theta_1 + \alpha t_1) + d \quad (7)$$

ただし、 $D > d$ の時、 D の最小値は D とする。

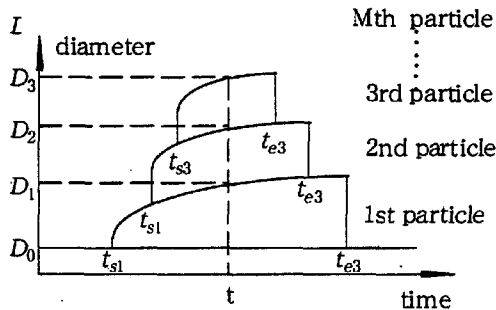


Fig. 7 Calculation of the equivalent column diameter

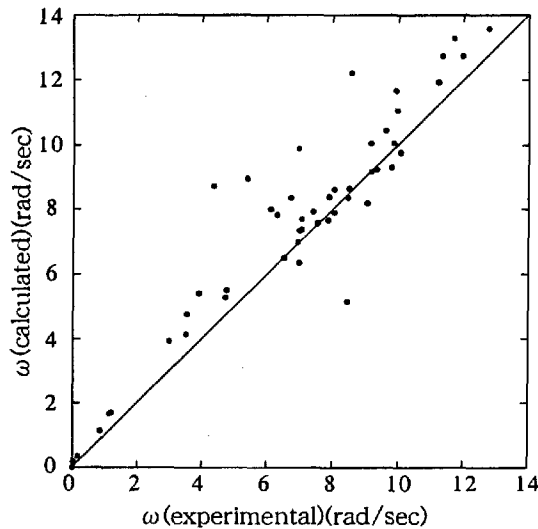


Fig. 8 Comparison of the calculated angular velocity with the experimental one

また、 M 個の粒子が引き続いて接触する場合は、Fig. 7 に示しているように時刻 t において、太くなった柱に対して次の粒子がやってくるとすると、柱の元の直径 D_0 から一段目の新しい直径 D_1 を計算し、 $M-1$ 段目の直径 D_{M-1} から M 段目の直径 D_M を計算するというようにして、時刻 t での見掛け上の直径を計算する。ただし、時刻 t_{s1} に最初の粒子が柱に衝突し、 t_{s2} に回転中の最初の粒子に 2 番目の粒子が衝突するというように記している。図中の t_{e1} , t_{e2} , t_{e3} は柱から粒子あるいは粒子同士の接触が離れる時刻を示している。もちろん時刻 t における見かけ上の

直径 D_3 が L より大きい場合は、その格子は閉塞すると考える。

3.4 回転角速度 ω の計算

粒子が速度 v で柱に衝突して、摩擦力などを無視するとすると、粒子と柱との接触点に関して、粒子に作用する力のモーメントがゼロであるので、角運動量保存則を適用することができる。また、衝突後、粒子は接触点に対する回転運動だけをすると仮定すれば、回転角速度 ω は次式のように求められる。

$$\omega = \frac{10}{7} \frac{v}{d} \sin \theta \quad (8)$$

ところが、このようにして求めた回転角速度 ω はエネルギー損失を考慮していないため、角速度の修正が必要である。各ケースで任意に 50 個の粒子をサンプリングし、これらの粒子の角速度の実験値と計算値との比較を Fig. 8 に示している。回帰分析により、角速度を次式のように修正する。

$$\omega = 1.278 \frac{v}{d} \sin \theta + 0.094 \quad (9)$$

式 (9) を用いた場合の適合度は $R^2=0.8852$ である。

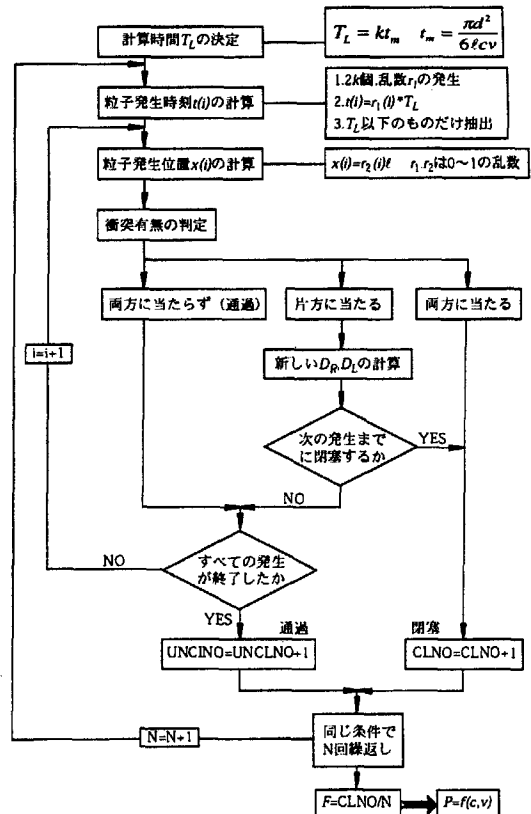


Fig. 9 The flowchart of blocking model

3.5 閉塞モデル

閉塞モデルのフローチャートを Fig. 9 に示す。今、

土砂濃度 c 、速度 v が一定であるとして、ある時間間隔 T_L の間に、 i 個の粒子がランダムな時間 $t_i (0 < t_i < T_L)$ に、ランダムな位置 x_i 上を流下してきて、ダム透過部へ到達すると考えると、粒子と柱との衝突の有無によって、新しい柱の直径を計算し、ダムが閉塞するかどうかを判断する。すなわち、 T_L の間に i 回の試行をし、そのつどダムが閉塞するかどうかを判定する。最終的 ($t=T_L$) に閉塞したかどうかを判定し、同じ条件下で N 回繰り返すと、 T_L 時間内の閉塞確率 F は以下のように求められる。

$$F = \text{閉塞した回数} / N \quad (10)$$

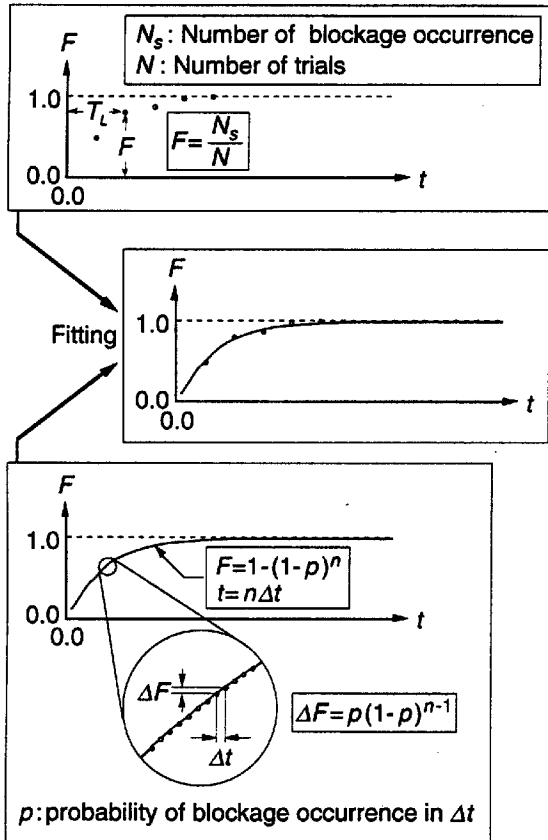


Fig.10 Calculation of instantaneous blocking probability

さらに、 T_L を変えて計算すれば、 T_L と F との関係が離散的に求められる。しかし、実際の数値解析に用いる閉塞確率は T_L より遙かに小さい時間間隔 Δt に対する瞬間閉塞確率 P でなければならないので、Fig.10 のように P を F を用いて表しておくことが必要である。そこで、今、 c 、 v が一定であるならば、 P が一定であると考え、 $T_L = n\Delta t$ 秒後の閉塞確率は $F = 1 - (1 - P)^n$ となるので、 P を求めることができる。

4. 数値解析及び結果

前述した格子型ダムの閉塞に関する実験と同様の

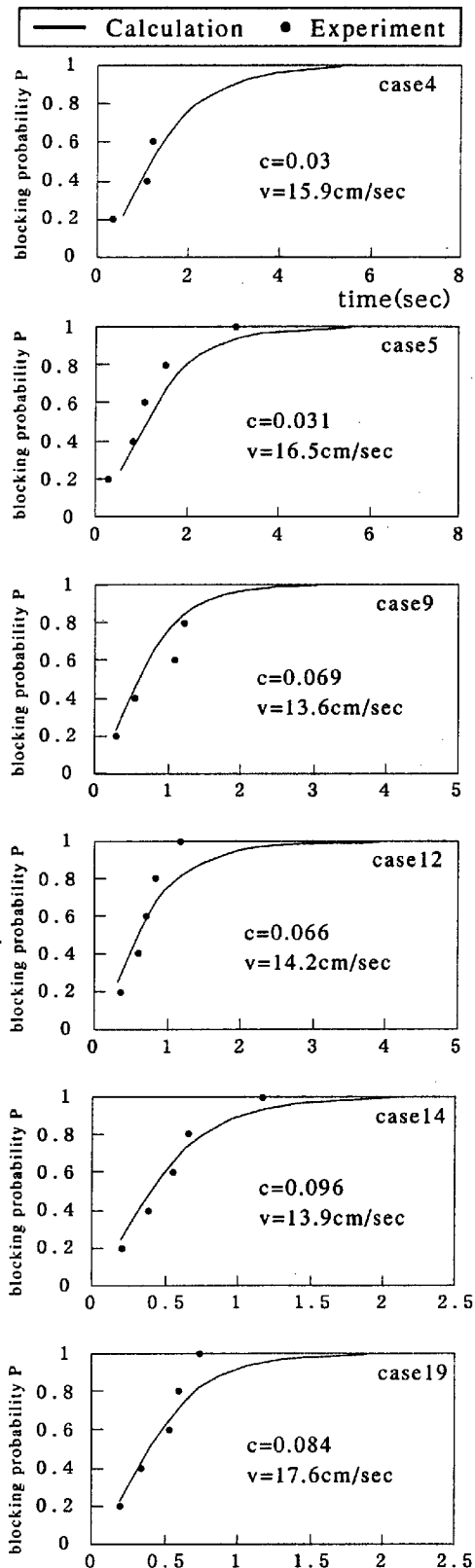


Fig.11 Comparisons between calculated and experimental blocking probabilities

条件のもとでこのモデルを用いて、瞬間閉塞確率 P

に関する数値解析を行った。Fig.11 は閉塞確率 F の計算値と実験値を比較した例である。この図によれば、閉塞確率が大きくなるにつれて、閉塞確率の実験値と計算値との差が大きくなっているが、計算値は実験値の傾向を比較的良好に再現している。

Fig.12 は閉塞確率 0.4~0.6 に達するまでの所要時間の実験値と計算値を比較したものである。平均到達時間 t_m が小さい場合に両者はよく一致している。これは短時間により多くの粒子がやってくる時の方が本モデルの考え方に近い実験条件となるからであろう。

最後に、 $N=1000$, $\Delta t=0.01$ 秒の時の瞬間閉塞確率の計算結果を Fig.13 に示している。この図から、一定の c , v の条件下における Δt に対する瞬間閉塞確率 P が求められる。

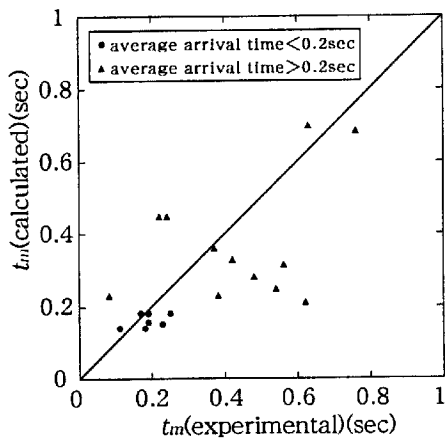


Fig.12 Comparison between the experimental and calculated time to attain the blocking probability of 0.4~0.6

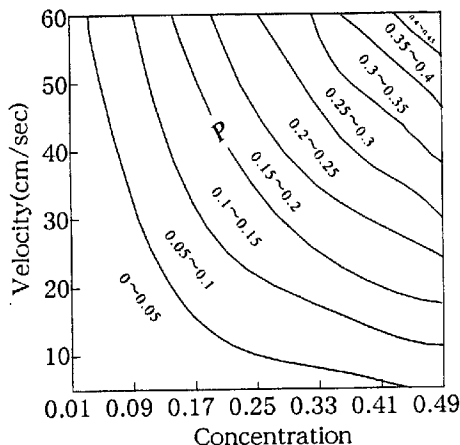


Fig.13 Instantaneous blocking probability(P) under the combinations of particle fraction(c) and velocity(v)

5.おわりに

本研究では、透過型砂防ダムの土砂流出調節機能を明らかにすることを目的として、特に透過型砂防ダムの一種類である格子型砂防ダムの巨礫の閉塞確率の評価法について検討した。まず、格子型砂防ダム透過部の閉塞過程に関して実験的な研究を行い、閉塞に影響を及ぼす要因を明らかにした上で、それらの要因を考慮した巨礫の捕捉モデルを開発した。また、このモデルを用いて格子型砂防ダムの閉塞過程に関する再現計算を行った。本研究で得られた成果と今後の課題は以下のようである。

1. 実験によって、格子型砂防ダムの閉塞に大きく影響を及ぼす格子の両柱中心の間の距離 (l) と砂礫の最大粒径 (d_{max}) との比や土石流の土砂濃度、速度などの要因を確かめた上で、粒子の平均到達時間間隔の概念を提案した。平均到達時間間隔が小さいほど、格子型砂防ダムの閉塞確率が大きくなることが示された。
2. 格子型砂防ダムの閉塞モデルを開発した。格子型砂防ダムの閉塞を一つの確率過程として、一定の土石流の条件下における瞬間閉塞確率 P を求め、これによってダムが閉塞するかどうかを判断するものである。このモデルによって、格子ダムの閉塞過程をある程度再現できることが判明した。この格子型砂防ダム閉塞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によって、格子型砂防ダムの土石流調節効果を評価することができると考えられるので、今後はその検討を行う予定である。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費（基盤研究 B(2) 研究代表者 高橋保, 研究課題名 水系一貫した土砂配分システムの開発及び基盤研究 C(2) 研究代表者 中川一, 研究課題名 透過型砂防ダムの機能評価と流域土砂管理に関する研究）の補助を受けて行ったものであり、関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 芦田和男・高橋保 (1980) : 土石流の調節制御に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 23 号 B-2, pp.433-441.
- 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率に関する研究, 新砂防, Vol.47 No.5(196), January, pp.8-13.

Stochastic Model of Blocking for a Gird-type Dam by Large Boulders in a Debris Flow

Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA, Yoshifumi SATOFUKA and Haomin WANG*

***Graduate school of Engineering, Kyoto University**

Synopsis

Debris flow disaster can be reduced by a grid-type dam, which traps large boulders but passes small size sediments in a debris flow through it. Various models have been developed to predict the trap rate of sediments by a grid-type dam using the characteristics of a debris flow and a grid-type dam. Experimental results show that a little difference of arrival time of a large boulder at a grid-type dam markedly affects the blocking mechanism even though the other conditions are the same. In this research, the blocking phenomenon is regarded as a stochastic process and a new stochastic model of blocking for a grid-type dam by large boulders in a debris flow is proposed.

Keywords: debris flow; grid-type dam; stochastic process; blocking