

格子型砂防ダムの土石流捕捉過程に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DEBRIS FLOW CAPTURING PROCESS OF GRID
TYPE SABO DAM

宮沢直季¹・谷島 亨²・砂田憲吾³
Naoki MIYAZAWA, Toru TANISHIMA and Kengo SUNADA

¹正会員 工修 山梨大学大学院助手 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

²正会員 修(工) 山梨大学研究生 土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

³フェロー会員 工博 山梨大学大学院教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

The debris flow capturing process of the grid type sabo dam was clarified experimentally. The process could be explained as follows; the dam was blocked by debris flow and the sediments deposited upstream of dam. The blocking was affected by the three-dimensional interlocking of gravel near the open spaces. After the blocking of dam, the incoming debris flow jumped due to the collision with the deposited layer. Then, the jumped sediments were divided into the sediments which got over the dam and the ones which returned back and deposited. Then, incoming debris flow rushed over the dam accompanying with the erosion of deposited layer. The debris flow discharged from dam and deposited upstream of dam intermittently by such a process. The separation of sands and gravels occurred by the deference of repulsion force in the process of debris flow jumping and the gravels deposited above sands, that is, the reverse-grading phenomenon of deposition.

Key Words : stony debris flow, grid type sabo dam, intermittent flow from dam, intermittent deposition upstream of dam, 3D interlocking of gravel, reverse-grading phenomenon of deposition

1. はじめに

砂防ダムは土石流対策, 流送土砂調節のために有効な砂防施設である。従来の砂防ダムの多くは, ダム上流部で河床勾配を緩和させて土砂を堆積させる, 不透過型のダムであった。しかしながら, わが国では, 土砂がダム下流に十分に供給されず, それゆえ, 河床低下, 海岸線の後退, 橋脚の洗掘など深刻な問題が生じている。また, 河川環境の視点から, ダムによって魚類・水棲生物の上下流への往来ができないという問題も指摘されている。そのため最近では, 河川流域における総合土砂管理の下で, 水系全体としての適正な土砂移動のバランスを回復し, かつ効率的な対応を図ることを目的とし, その一環として鋼製格子型砂防ダム(図-1), 鋼製スリットダム等の透過型砂防ダムの設置, また既設の不透過型コンクリートダムのスリット化など土砂を流すダム事業が推進されている。これらの透過型ダムの利点として, 土石流発生時, 巨礫が先頭部に集まる性質を利用して, 巨礫が

透過部を閉塞することによって土石流を堆積させること, 平常時, 中小出水時における土砂を下流へ通過させることなどが挙げられる。流域全体の土砂のバランスを保つためにも, 透過型砂防ダムの土石流捕捉効果の定量的な評価が望まれる。そのためには土石流の捕捉のメカニズムとその後の土砂流出過程の両面から検討すべきであるが, 透過を前提としている形式ではまずは, 捕捉過程やその効果を明らかにする必要がある。

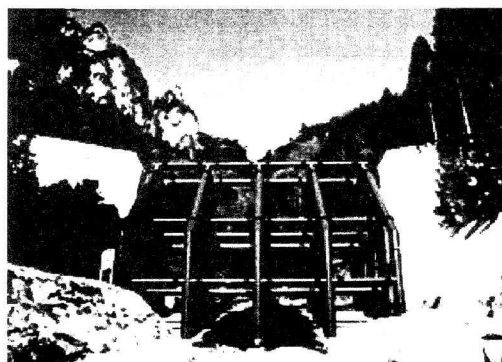


図-1 鋼製格子型砂防ダム

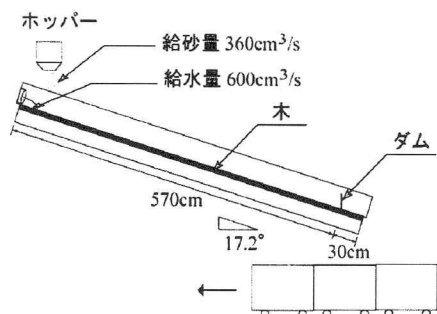


図-2 実験水路

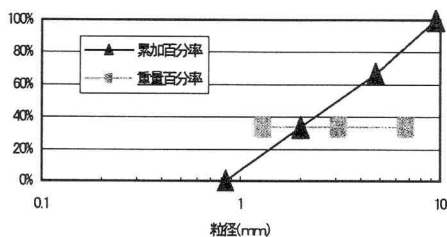


図-3 粒度分布

芦田・高橋¹⁾による格子型砂防ダムの土石流調節に関する実験的研究では、 $L/d_{max}=1.5\sim 2.0$ のとき (L は透過部の間隔、 d_{max} は最大粒径)、格子型砂防ダムが土石流を効果的に捕捉すると述べている。また、水山²⁾、Mizuyama and Mizuno³⁾は格子型砂防ダムの捕捉・減勢させる効果に影響を与える要因として L/d_{max} に加えて、土石流先頭部の砂礫の容積濃度を挙げている。一方、水野⁴⁾は連続して配置した格子型砂防ダムによる土石流捕捉効果を検討し、捕捉のためには上流側の透過部分より下流側の透過部分を小さくする必要があると述べている。さらに、水野・水山⁵⁾は格子型砂防ダムの上部の格子間隔を狭くした方がダムの土石流捕捉効果を向上させることを述べている。いずれの研究においても、土石流がどのようなメカニズムによって格子型砂防ダムによって捕捉されるのか、ダムからどのような粒径の土砂が流出するのか、またダムによって捕捉された土砂がどのような粒径の土砂で構成されるのかについては十分明らかになっていない。

そこで、本研究では、格子型砂防ダムの機能に着目し、実験を通して土石流捕捉効果および捕捉状況等を把握する。

2. 実験概要

最大礫径2m、計画土石流流量の約1.6倍の土石流が実際の鋼製格子型砂防ダムに捕捉される場を想定して実験条件を決定した。想定したダムは釜無川右支川小武川の上流部にある大柵沢第二ダムである。計画土石流諸元は、元河床勾配が $i = 1/5.7$ (10°)、最大粒径が $d_{max} = 2$ m、設計土石流水深が $h = 3$ m、土石流の流速が $U = 7.24$ m/sec

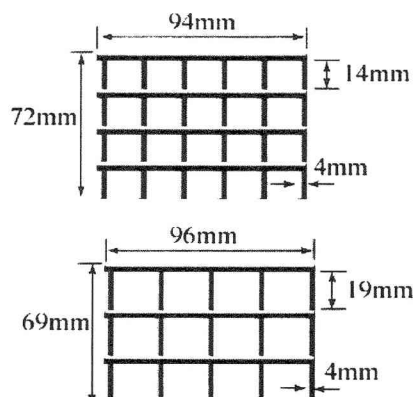


図-4 ダム模型 (上が $L/d_{max}=1.5$, 下が $L/d_{max}=2.0$)

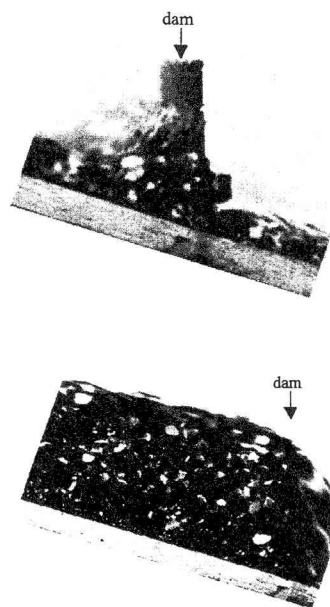
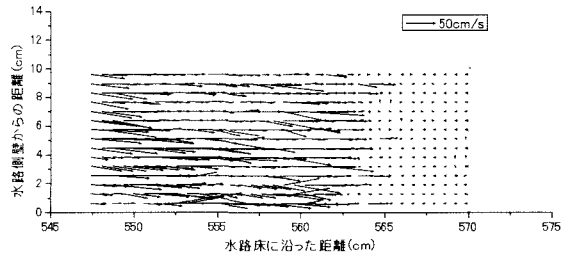


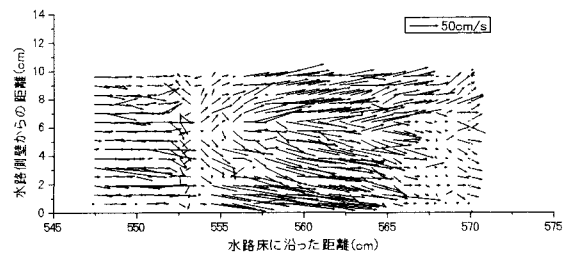
図-5 流動状況の違い (上の写真が土石流がダムに到達してから0.5秒後、下の写真が5秒後、 $L/d_{max}=2.0$)

である⁶⁾。ダム諸元は、ダム高さが $H=14.5$ m、ダム幅が $B=69$ m、水通り幅が $Be = 17.8$ mである。水通り部における格子間隔は $L = 4$ m ($L/d_{max} = 2.0$)である。

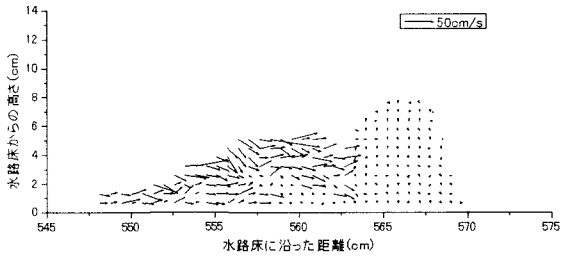
図-2に実験水路を示す。水路長600cm、幅10cm、高さ22cm、水路勾配 17.2° の亚克力製水路に、高さ10cmの所に木製の板を敷いた。上流から水と土砂を20秒間供給することにより土石流を発生させ、下流端で水と土砂を採取した。採取方法は以下の通りである。図-2のようにレールの上に5つの滑車付き採取箱を載せ、約3.3秒ごとに速やかに箱を移動させて水と土砂を採取した。土砂は $0.84\sim 9.52$ mmの混合粒径を使用して、上流端から50cmの位置にあるポッパーから給砂した。ポッパーに入れる土砂の粒度分布は図-3に示すとおりである。また、下流端から30cmの位置に一面の格子型ダム(真鍮製)を配置した。格子型ダムの寸法は図-4に示すとおりで、大柵沢第二ダムの $L/d_{max}=2.0$ (幾何縮尺1/210)とそれよりも格子間隔の狭い $L/d_{max}=1.5$ としている。模型のダム高は大柵沢第二ダムのダム高さと同幾何縮尺より定めた。給水量は



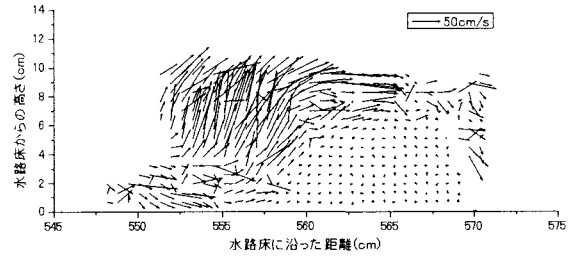
(a) $t=1.5$ sec



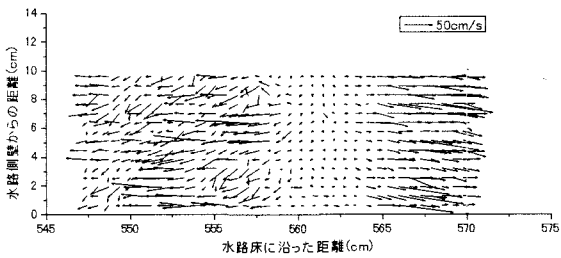
(b) $t=2.0$ sec



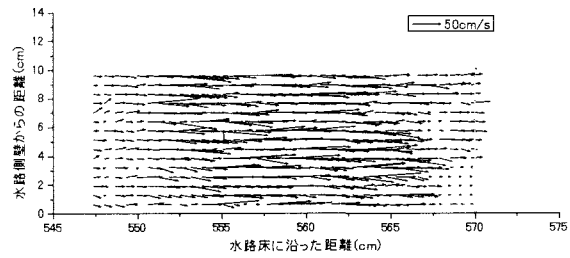
(c) $t=2.5$ sec



(d) $t=3.0$ sec



(e) $t=3.5$ sec



(f) $t=4.0$ sec

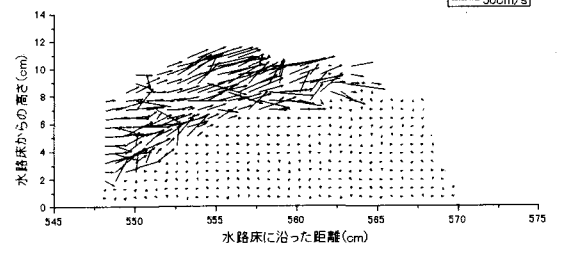
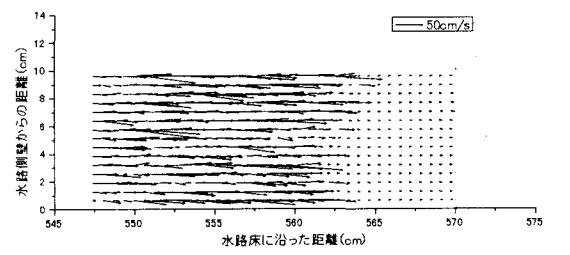
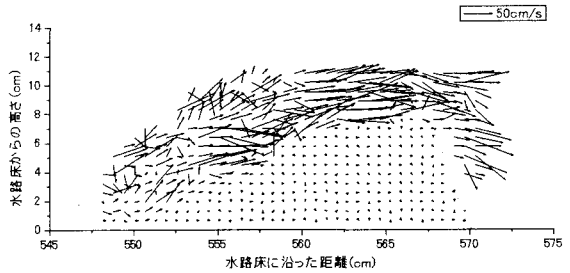
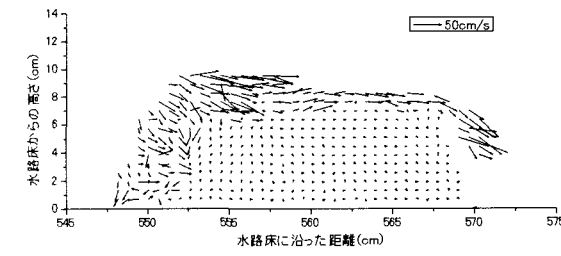
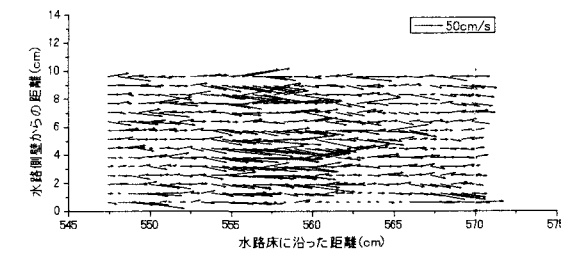
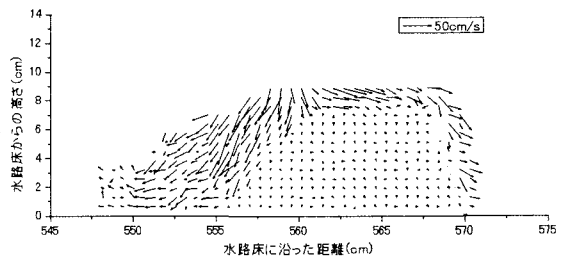


図-6 ダム付近の流動・堆積状況 ($L/d_{max}=1.5$ のケース), 縦断面の縦軸は水路床に対して直角方向の高さを示す.

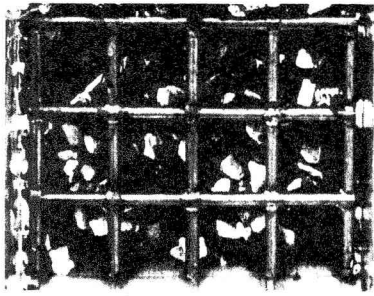


図-7 透過部近くの礫の3次元的噛み合わせ ($L/d_{max}=2.0$)

600cm³/s, 給砂量は360cm³/s, 土石流流量は960 cm³/sである。フルードの相似則を用いると, この流量は610m³/sとなり, 計画土石流流量387m³/sの1.6倍に相当する。計測項目として, 下流端から流出した水と土砂, 格子型ダムによって捕捉された土砂量, 格子ダム付近を側面と上部よりCCDビデオカメラで同時に撮影した。

3. 実験結果及び考察

(1) 土石流の捕捉過程

図-5に格子ダムが $L/d_{max}=2.0$ のケースの流動状況を示す。上の写真が土石流先頭部がダムに到達してから0.5秒後, 下の写真が5秒後の流動状況を示す。0.5秒時には, 土石流は完全に捕捉されずダムの透過部から土砂が流出しているのがわかる。0.5秒後の時刻における流動状況から判断すると, 土砂がダム頂まで捕捉されるのに1~2秒かかり, その後, 土石流は図-5の下の写真で明らかのようにダムの上を流動する。

図-6に $L/d_{max}=1.5$ のケースのダム付近の土石流の流動・堆積状況を示す。礫粒子の瞬間速度ベクトルは, 1/30秒間隔で得られた2枚のデジタル画像を用いて, 相関法⁷⁾によって計算されたものである。それぞれの時刻の上図が水路床に対して直角方向に上から撮影された画像から, 下図が水路床に沿って横から撮影された画像から出したものである。1.5秒時では, 土石流が礫の噛み合い(図-7)によりダムによって捕捉され, すぐにダム頂まで土砂が堆積する。急な勾配で堆積した土砂に上流からの土石流が衝突しようとしているのがわかる。2秒時では, 土石流が堆積層との衝突によってジャンプし, 堆積層の上を覆い被さるように流動する。2.5秒時では, 2秒時にジャンプした土砂が重力によって落ちてきて, 560cm付近でそのままダムの上を流れていく土砂と, 上流に向かって落ちて戻ってきた土砂に分けられ, この時土砂の堆積が起こる。上から見た場合にも560cm付近でその現象が確認できる。3秒時では, 上流から流下してきた土石流が土砂を侵食しながら一気に堆積面を乗り越える様子を表している。3.5秒時には, 2.5秒時のようにダムを乗り越える土砂と戻ってくる土砂に分断されているのが

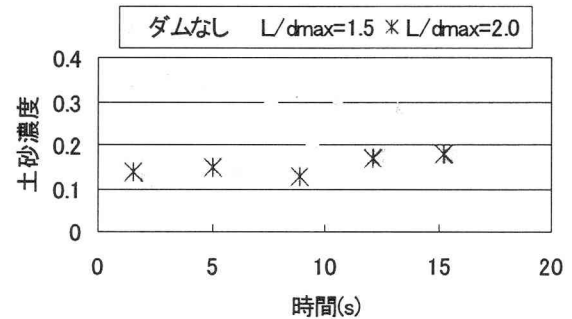
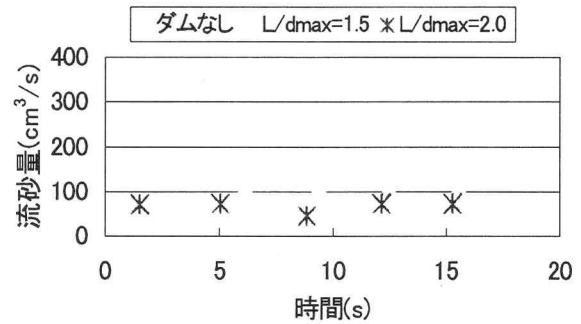


図-8 ダム下流の流砂量及び体積土砂濃度

確認できる。4秒時は, 3秒時のように落ちて戻ってきた土砂が堆積し, 上流から流動してきた土石流が土砂を侵食しながら一気に堆積面を乗り越える様子を表している。土石流はこのようなメカニズムで間欠的に格子ダムから流出し, 同時にダムの上流に堆積する。

図-7は給水・給砂終了後にダムを正面から撮影した写真である。ダム近くで捕捉された土砂はほとんど粒径の大きい土砂からなり, 下部を見ると, アーチ状に土砂が捕捉されていることがわかる。格子型砂防ダムの透過部分の閉塞は礫の3次元的なアーチ状の噛み合わせに因ると言える。

(2) ダム下流の流砂量及び体積土砂濃度

図-8にダム下流の流砂量及び体積土砂濃度を示す。土砂がダムによって捕捉されるため, ダムのないケースと比べて流砂量及び土砂濃度は少なくなっている。また, 流砂量も土砂濃度も時間によってあまり変化しないで, ほぼ一定値と見てよい(前述のように土石流はダムから間欠的に流出するが, 実験値はその採取時間(平均で3.3秒)の平均的な値を示すことに注意する必要がある)。ダムがある場合の流砂量をP, ダムがない場合の流砂量をP₀として通過率をP/P₀で定義する。 $L/d_{max}=2.0$ の場合, 通過率は0.19, 捕捉率は0.81であり, $L/d_{max}=1.5$ の場合, 通過率は0.26, 捕捉率は0.74である。図-6から, 1.5秒時や4秒時ではダムから越流する土砂はほとんどなく, 一方, 3秒時ではダムからの越流流砂量は極めて高い。このような流砂量の間欠性が時間が経過しても同じように起こることを図-8は示している。図-6のケースでは, 間欠性の周期は1~1.5秒であると判断される。

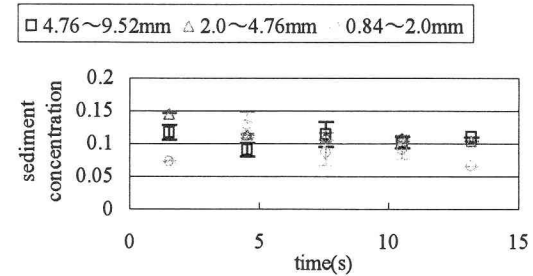
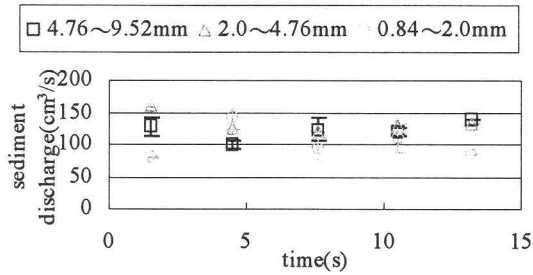


図-9 ダム下流の粒径別の流砂量及び体積土砂濃度 (ダムがない場合)

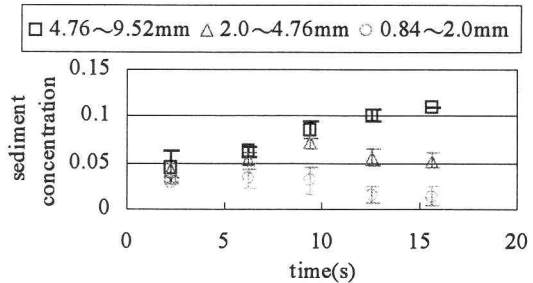
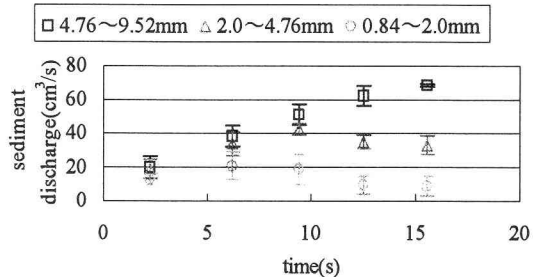


図-10 ダム下流の粒径別の流砂量及び体積土砂濃度 ($L/d_{max}=1.5$ の場合)

ダム高が実験に用いたものよりも低くなると、ダムから流出する土砂量は多くなる、間欠的に流出するが、流砂量の変動は小さくなることが予想される。ダム高の違いが捕捉現象にどのような影響を及ぼすかは今後検討する必要がある。

図-9にダムがない場合の粒径別の流砂量および体積土砂濃度を示す。土石流には先頭部に巨礫が集まる性質があるが、本実験では先頭部において礫が多くなることは明瞭に見られなかった。また、先頭部は土砂濃度が高いとされるが、本実験ではこの傾向は見られなかった。

図-10に $L/d_{max}=1.5$ のケースの粒径別の流砂量及び体積土砂濃度を示す。初期には格子ダムを閉塞するため、どの粒径の流砂量および

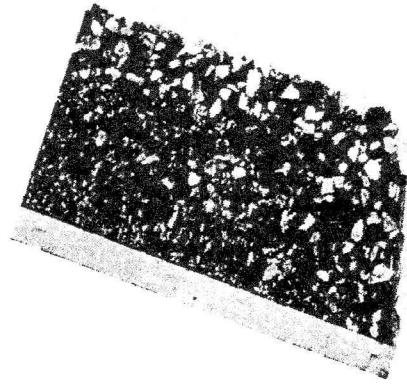


図-11 堆積の逆グレーディング現象

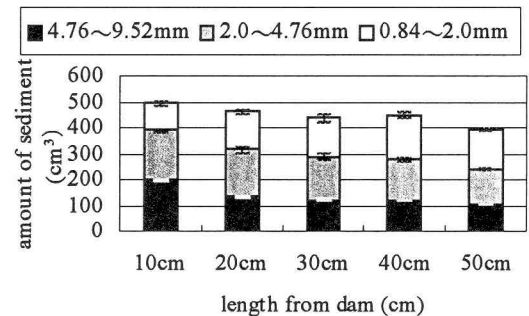
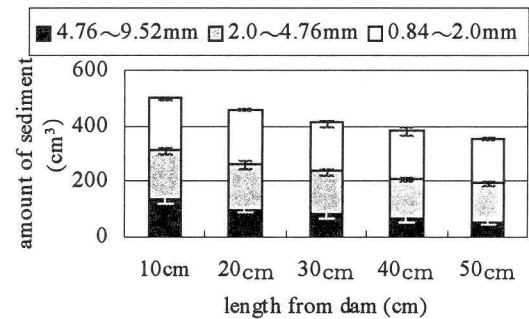


図-12 堆積土砂の容積 (上: $L/d_{max}=1.5$, 下: $L/d_{max}=2.0$)

土砂濃度もほとんど変化しない。それ以後は、格子ダムは土砂によって閉塞され、土石流は堆積層の上を流し出す。時間が経過するにつれて、4.76~9.52mmの粒径の流砂量と土砂濃度は増加し、逆に0.84~2.0mmの粒径の流砂量と土砂濃度は減少する。土石流が堆積層との衝突によってジャンプするとき、砂と礫の分離が起こったと考えられる。礫の反発力は砂の反発力よりも大きいので、礫は砂よりもより高くジャンプする。その結果、落ちて戻ってきた際、下部の方は砂が堆積し、上部になるほど礫が堆積する、いわゆる堆積の逆グレーディング現象(図-11)が起こる。したがって、堆積表面近くの礫は上流からの土石流によって侵食され、ダム下流の礫の流出量が多くなると考えられる。

(3) ダムによって捕捉される土砂

図-12に格子ダムより上流に堆積した土砂の容積を10cm区間ごとに示す。上図が $L/d_{max}=1.5$ のケースであり、下図が $L/d_{max}=2.0$ のケースである。これらの図から、格子

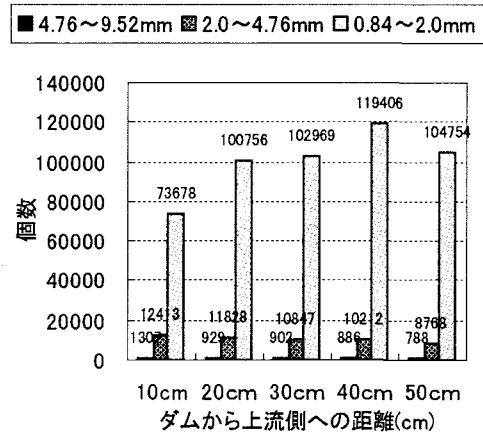
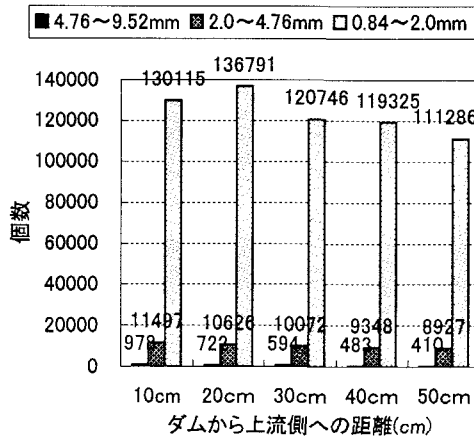


図-13 堆積土砂の個数表示 (左: $L/d_{max}=1.5$, 右: $L/d_{max}=2.0$)

ダムに近づくほど粒径の大きいものが多いことがわかる。 $L/d_{max}=1.5$ のケースでは、 $0.84\sim 2.0\text{mm}$ 及び $2.0\sim 4.76\text{mm}$ の粒子の土砂の容積はどの区間でも変化がなく、全体の堆積土砂のかなりの部分を占める。逆に、 $4.76\sim 9.52\text{mm}$ の土砂の割合は低い。 $L/d_{max}=2.0$ のケースでは、 $L/d_{max}=1.5$ のケースと比べて、 $4.76\sim 9.52\text{mm}$ の粒径の土砂が全体の堆積土砂に占める割合は高い。また、ダムに近いほど $0.84\sim 2.0\text{mm}$ の土砂の容積は少なくなっている。格子間隔が大きい場合には、堆積土砂は主に粒径の大きい礫で構成される。堆積層の上を流動する土石流内の水は容易に堆積層に浸透する。浸透した水が礫の間隙に存在する砂をダムの透過部を通して流出させる。図-13は堆積した土砂量を個数表示したものである。堆積した土砂量を粒径階の平均粒径の球の体積で割った値である。この図でも $L/d_{max}=1.5$ では $0.84\sim 2.0\text{mm}$ の粒子の個数はダム付近でもかなり多く、 $L/d_{max}=2.0$ ではダムに近いほど $0.84\sim 2.0\text{mm}$ の粒子の個数が少なくなっている。

4. 結論

最大礫径2m、計画土石流流量の約1.6倍の土石流が実際の鋼製格子型砂防ダム（大棚沢第二ダム）に捕捉される場を想定して実験を行い、ダム下流への流出量、ダムの捕捉量の計測およびビデオ画像解析により、格子型砂防ダムの土石流捕捉過程およびその効果について考察した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) L/d_{max} (L は格子間隔、 d_{max} は最大粒径)が1.5と2.0のケースでは、格子型砂防ダムが74~81%の土砂を捕捉することがわかった。
- 2) 格子型砂防ダムの閉塞は、透過部近くの礫の3次元アーチ状の噛み合わせによって生じることが確認できた。
- 3) 土石流の捕捉過程が明らかとなった。すなわち、ダムが閉塞した後は、土石流が流れ方向に対して急勾

配に堆積した土砂との衝突によってジャンプし、ダムを乗り越えて流出する土砂と上流方向に戻り、堆積する土砂とに分断される。上流からの土石流は堆積層を侵食しながらダムを乗り越えて流出する。土石流はこのようなメカニズムで間欠的に格子ダムから流出し、格子ダムの上流に堆積する。

- 4) 土石流が堆積層との衝突によってジャンプするとき、砂と礫の分離が起こり、礫は砂の上に堆積する（堆積の逆グレーディング現象）。堆積表面近くの礫は流下してきた土石流によって侵食され、多くの礫がダムの下流へ流出する。
- 5) ダムの上流に堆積した土砂はダムに近いほど礫分が多く、格子間隔が大きいほど全体として礫分が多い。

参考文献

- 1) 芦田和男, 高橋 保: 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, 1980.
- 2) 水山高久, 小橋澄治, 水野秀明: 格子型ダムのピーク流砂量減少率に関する研究, 新砂防, Vol.47, No.5, pp.8-13, 1995.
- 3) Mizuyama, T. and Mizuno, H.: Prediction of debris flow hydrograph passing through grid type control structure, Proceeding of the First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, pp.74-82, 1997.
- 4) 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.
- 5) 水野秀明, 水山高久: 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, 1996.
- 6) 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.
- 7) Miyazawa, N.: Flow behavior of head of stony debris flow on unsaturated erodible bed, Proceedings of the 7th International Symposium on River Sedimentation, pp.293-301, 1998.

(2004. 9. 30 受付)