

透過性砂防ダムの土石流調節機構

芦田 和男・江頭 進治
栗田三津雄・荒牧 浩

DEBRIS FLOW CONTROL BY GRID DAMS

By *Kazuo* ASHIDA, *Shinji* EGASHIRA, *Mitsuo* KURITA
and *Hiroshi* ARAMAKI

Synopsis

Debris flow control becomes a major problem to prevent and to mitigate sediment hazards these ten years. A large number of concrete dams, called sabo dams, have been constructed to reduce or to control sediment runoff from mountain regions. Most of them are filled up soon by sediment in the areas of active sediment yield, decreasing their sediment storage capacities. Concrete dams, consequently, could not have controlled debris flows successfully if they lose their storage capacities. Instead of them, grid dams, which are some kinds of open dams, may be attractive as a sediment control work.

In the present study, two types of grid dam, zigzag and square grid dams, are chosen for considerations, to investigate the mechanisms of debris flow control. Flume tests are made with attention focused on the relation among pass rates of sediment through grid dam, sediment particle sizes and opening lengths of grids. A mathematical model which gives a boundary condition at the dam is presented to evaluate the pass rate of sediment through the dams.

Numerical analyses are made with Asida and Egashira's governing equations of debris flow for the outflowing sediment rate through the dams as well as the deposition of sediment from the debris flows in the upstream reach of the dams. These simulated results compare well with the data from flume tests.

1. 緒 言

近年、土砂災害は顕在化の一途にあり、そのより有効な防止軽減策が望まれている。周知のように、災害防止軽減対策には、避難予警報システムや危険度に応じた土地利用を推進するソフトな対策とともに、構造物を設けることによって外力を制御するようなハードな対策とがある。ハードな対策の代表的なものには砂防ダムがあつて、従来から不透過性のものが多く設置されてきている。この形式のダムは、満砂するまでは本来の機能を十分に発揮するが、満砂後においては、その機能が疑問視されている。これは、ダムが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ことが多いためである。このように、不透過ダムは機能の永続性の面において弱点を持っている。

上述のような状況の中で、従来の大暗渠方式の改良型とも言うべきスリット状や格子状の透過性砂防ダムが注目されるようになってきた。この形式のダムは、外力を直接的に制御する機能を持つと同時に、機能の永続性をねらったものである。すなわち、有害な土砂を貯留・調節することによって、安全に流下させ、常にダムの調節量を確保しておくという着想に基づいている。このように、透過性ダムは機能の永続性の面で大きな可能性を持っている。

透過性のダムは、上述のように対策ダムとして多に期待されており、その機能に関する実験的研究も行

われている。池谷・上原¹⁾は、まず、最大粒径 10 mm で平均粒径が 3.03 mm および 2.08 mm の 2 種類の砂礫を用い、掃流砂に対するスリットダムの調節機構を調べ、スリットの閉そく条件として $l/d_{max} \leq 1.5$ を示すとともに、閉そくしない条件として $l/d_{max} \geq 2.0$ を示した。ここに、 l はスリットの純間隔で、 d_{max} は砂礫の最大径である。

ついで、金山沢第 1 号砂防ダム (A 型スリット) における土石流の実態調査²⁾によって、スリット部の閉そく条件が $l/d_{max} = 1.32 \sim 1.42$ ($d_{max} = 1.3 \sim 1.4$ m) 程度になっていることを示した。渡辺・水山・上原³⁾は、最大径 18 mm, 平均粒径 9.49 mm の砂礫を用いて水路実験を行い、さまざまなタイプの透過ダムを対象にして、土石流に対するそれらの調節機能を検討した。それによって、いずれのタイプのダムも、ピーク流出土砂量の減少効果や貯留効果を発揮することを確認したが、一般的な評価法を見いだすには至っていない。芦田・高橋⁴⁾は、最大径 20 mm, 中央粒径 8.3 mm の砂礫を用いて格子型ダムの土石流調節機能を実験的に検討した。彼らは、 $l/d_{max} = 2.5$ (l は格子間距離) のとき、土石流のわずかな堆積はみられるが、すぐに流出することを示し、 $l/d_{max} = 2.0$ のとき、土石流の到達と同時に堆積が始まり、一部は流出するが、堆積した砂礫は、後続の濃度の低い流れによって侵食・流出することを示した。さらに、 $l/d_{max} = 1.5$ の条件では、殆どが堆積し、後続の濃度の低い流れによっても流出しないと述べている。透過性砂防ダムの土石流調節については、以上のような研究例があり、それらの中でスリット間隔あるいは格子幅と材料の最大径との比が重要なパラメータであることが指摘されている。しかし、いずれの研究も現象の定性的な記述にとどまっている。

上述の研究にも述べられているように、透過性砂防ダムによる土石流の調節機能として、1) 土石流の流量あるいは流砂量波形の変化、2) 流砂形態の変化、3) 土石流材料の篩分けなどが考えられる。これらのうち、1) はピーク流量と流砂量の減少効果、総流出量の変化、貯留に伴う波形の変化などであり、2) は流れの形態を変化させ、エネルギーを減少させる効果、3) はダムにより材料の分離を行うとともに、土石流の濃度を低くする効果などである。これらのことを明らかにしていくためには、ダムにおける土石流の通過あるいは閉塞の機構とダム地点における土石流の特性値を評価することが最も重要となる。本研究においては、透過性砂防ダムとして、千鳥型および方型の格子ダムをとりあげ、これらの土石流調節機構に関する検討を行う。まず、透過部における土石流の通過機構については、ダム部における土石流の挙動を直接的に測定することはかなり困難であるので、間接的な方法でこれを考察する。すなわち、ダムによって土石流の特性値がどのように変化するかを水路実験によって調べ、これを基礎とし、土石流の通過モデルを考察する。ダム地点における土石流特性値は、上流域における土石流の性質と堆砂の勾配やその材料特性に依存するから、ダム地点における時々刻々の土石流の性質を実験的に調べるのはかなり困難である。そこで、この問題については、土石流の堆積過程を数値解析によって明らかにし、これをもとにダム地点における土石流の性質を明らかにする。同時に、ダムによる土石流特性値の変化についても検討する。以上の考察に基づいて、透過ダムのより一般的な機能評価法について考察を深める。

2. 実験とその結果の考察

2.1 装置, 方法, 条件

ダムの模型として、Fig. 1 に示すように、千鳥型 (Zigzag Grid Type) および方型 (Square Grid Type) の透過ダムを用意した。これらは、いずれも従来の不透過砂防ダムの水通部を格子構造にしたものであり、袖部に相当する部分の構造は不透過砂防ダムと同じである。格子部材には直径 5 mm のアクリル棒を用いているが、千鳥型においては、格子間隔、および段と列の組合せを変えた 3 種類を用い、方型においては、2 種類を用いている。ここで以下簡単のため、これらを型式—格子間距離×段数—格子間距離×列数の符号で分類する。ちなみに、Fig. 1 の例では、2 段 5 列 (Z-30×2-60×5; 千鳥型—格子間隔距離 30 mm×2 段—格子間距離 60 mm×5 列) のものが示されており、方形では、2 段 5 列 (S-30×2-30×5) の例が示

されている。

実験に使用した水路は、長さ12 m、幅50 cmの勾配可変の鋼製水路であって、水路側壁の一方はガラス張りになっている。水路下流端より1.6 mの位置に上述のダムを設置し、ダム上流2.4 mの区間を固定床としている。その上流には土石流を発生させるために長さ2 mの移動床区間を設けている。Fig. 2 はこれらを模式的に示したものである。移動床に使用した砂礫は3種類であって、それらの粒度分布を Fig. 3 に示している。これらの最大粒径は、それぞれ、20, 15.9, 10.0 mm、平均粒径は5.96, 5.24, 3.34 mmである。

実験は、所定の勾配に水路を設定して、移動床の材料を水で飽和した後、上流端より一定流量の水を一定時間供給して土石流を発生させ、ダム上下流域における土石流特性値を測定するような方法で行われた。水路下流端においては、採砂・採水箱を用いて通過土石流の流量、流砂量、総流出土砂量の測定を行うとともに、流砂の粒度分布も測定している。一方、ダム上流域においては、ビデオカメラを用いて砂礫を追跡し、土石流の流下速度、堆積形状などを計測している。

実験ケース及び条件は Table 1 に示すとおりである。本表において、 θ は水路勾配、 d_{max} は使用砂礫の最大径、 d_m は平均粒径、 Q は流量、 T は給水時間である。水の給水時間と流量は、土石流がダムを越流しないよう留意して設定している。Run 0-1~0-6 および Run 15, 16 は、ダムを設置しない場合の実験で、Run 13, 14, 35, 36 は従来の不透過型のダムに関する実験であって、これらは透過ダムの結果と比較するために行われている。なお、フルード相似則を用いて実験のスケールを現地規模に変換すれば以下ようになる。すなわち、 $\lambda_v = \lambda_t^{1/2}$ 、 $\lambda_t = \lambda_r^{-1/2}$ 、 $\lambda_q = \lambda_r^{-5/2}$ 、 $\lambda_v = \lambda_r^{-3}$ (λ_r は幾何学的縮率、 λ_v は速度比、 λ_t は時間比、 λ_q は流量比、 λ_r は体積比) であるから、 $\lambda_r = 1/100$ とすれば、以下のようなになる。

Parameter	Model	Prototype	Parameter	Model	Prototype
d_{max}	20 mm	2 m	Velocity	50 cm/s	5 m/s
Volume	10 l	10 ⁴ m ³	Discharge	1 l/s	100 m ³ /s
Time	10 sec	100 sec			

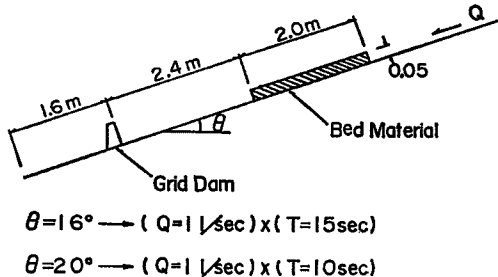


Fig. 2 Side view of experimental flume.

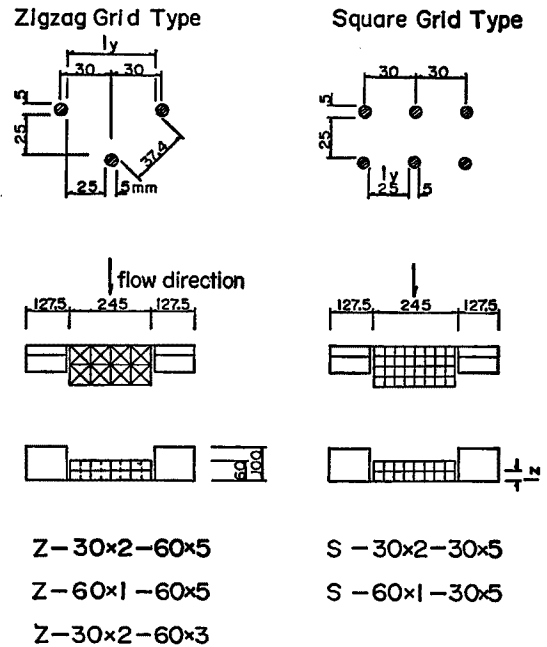


Fig. 1 Zigzag grid and square grid dams.

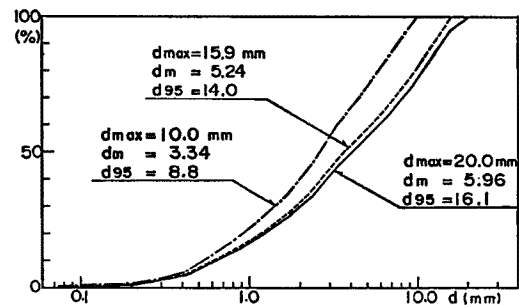


Fig. 3 Particle size distributions of sediment particles employed in experiments.

Table 1 Condition of flume experiments

Run No	type of dam	θ (deg)	d_{max} (mm)	d_m (mm)	Q(l/s)	T(s)
0-1	without dam	16	20.0	5.96	1.0	15.0
0-2		20			1.0	10.0
0-3		16	15.9	5.24	1.0	15.0
0-4		20			1.0	10.0
0-5		16	10.0	3.34	1.0	15.0
0-6		20			1.0	10.0
1-1	Z-30×2-60×5	16	20.0	5.96	1.0	15.0
1-2					1.0	15.0
1-3					1.0	15.0
1-4					1.0	15.0
2-1	Z-30×2-60×3	16	20.0	5.96	1.0	15.0
2-2					1.0	15.0
2-3					1.0	15.0
2-4					1.0	15.0
3-1	S-30×2-30×5	16	20.0	5.96	1.0	15.0
3-2					1.0	15.0
3-3					1.0	15.0
3-4					1.0	15.0
4-1	Z-60×1-60×5	16	20.0	5.96	1.0	15.0
4-2					1.0	15.0
4-3					1.0	15.0
4-4					1.0	15.0
5-1	Z-30×2-60×5	20	20.0	5.96	1.0	10.0
5-2					1.0	10.0
5-3					1.0	10.0
5-4					1.0	10.0
6-1	Z-30×2-60×3	20	20.0	5.96	1.0	10.0
6-2					1.0	10.0
6-3					1.0	10.0
6-4					1.0	10.0
7	S-30×2-30×5	20	20.0	5.96	1.0	10.0
8-1	Z-60×1-60×5	20	20.0	5.96	1.0	10.0
8-2					1.0	10.0
8-3					1.0	10.0
8-4					1.0	10.0
9	Z-30×2-60×5	16	15.9	5.24	1.0	15.0
10	S-30×2-30×5	16	15.9	5.24	1.0	15.0
11	Z-30×2-60×5	20	15.9	5.24	1.0	10.0
12	S-30×2-30×5	20	15.9	5.24	1.0	10.0
13	concrete	16	15.9	5.24	1.0	15.0
14	concrete	20	15.9	5.24	1.0	10.0
15	without dam	16	15.9	5.24	1.0	15.0
16	without dam	20	15.9	5.24	1.0	10.0
17	S-60×1-30×5	16	20.0	5.96	1.0	15.0
18		20	20.0	5.96	1.0	10.0
19		20	15.9	5.24	1.0	10.0
20		16	15.9	5.24	1.0	15.0
21	Z-30×2-60×3	16	15.9	5.24	1.0	15.0
22		20	15.9	5.24	1.0	10.0
23	Z-60×1-60×5	20	15.9	5.24	1.0	10.0
24		16	15.9	5.24	1.0	15.0
25	concrete	16	20.0	5.96	1.0	15.0
26	concrete	20	20.0	5.96	1.0	10.0
27	S-60×1-30×5	20	10.0	3.34	1.0	10.0
28		16	10.0	3.34	1.0	15.0
29	S-30×2-30×5	16	10.0	3.34	1.0	15.0
30		20	10.0	3.34	1.0	10.0
31	Z-60×1-60×5	16	10.0	3.34	1.0	15.0
32		20	10.0	3.34	1.0	10.0
33	Z-30×2-60×5	20	10.0	3.34	1.0	10.0
34		16	10.0	3.34	1.0	15.0
35	concrete	16	10.0	3.34	1.0	15.0
36	concrete	20	10.0	3.34	1.0	10.0

2.2 実験結果の一例

(1) 発生土石流の性質

Fig. 4 は、ダム無しの場合すなわち Run 0-1~0-6 において水路下流端で測定された土石流の流量および体積濃度を使用材料毎に示したものである。ここで、流量は、水と砂礫の混合物の流量 Q_m のことである。これらの結果によれば、流量は、いずれも時間変動が大きく、流出初期にそのピーク値が現れている。

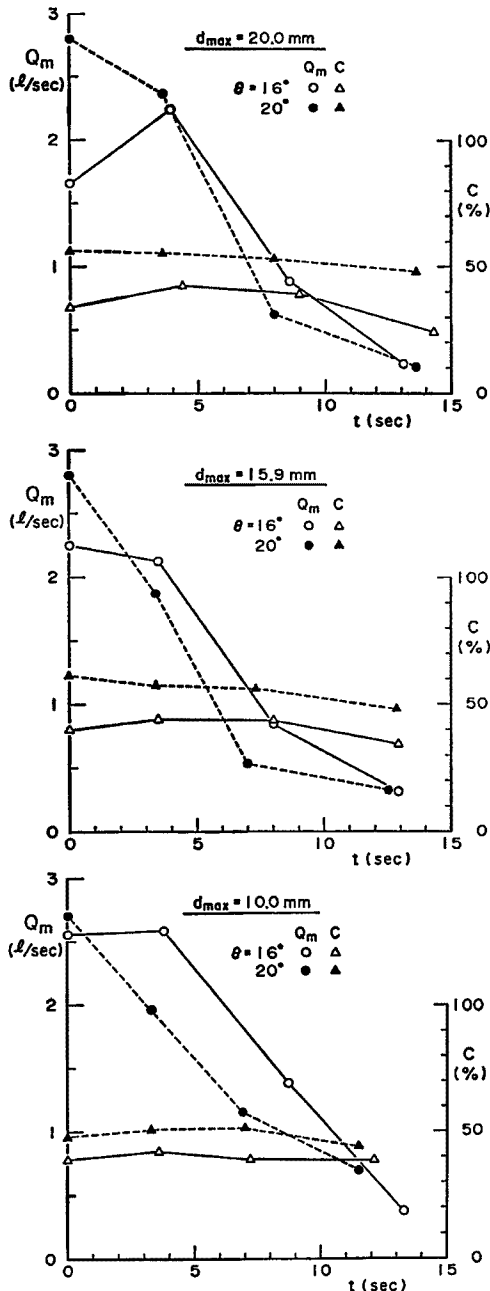


Fig. 4 Characteristic of debris flow measured at the flume end without dams.

その傾向は、とくに勾配の大きい $\theta=20^\circ$ の実験において顕著である。これは、土石流段波や転波列の形成によることが推察される。濃度は、流量のような時間変化は殆ど見られず、ほぼ一定値を示し、しかも勾配の大きい実験において高くなっている。高橋⁵⁾による土石流の平衡濃度式を用いて濃度を算定してみると、砂礫の安息角 $\phi_s=35^\circ$ のとき $\theta=16^\circ$ で $C=42\%$ 、 $\theta=20^\circ$ で $C=65\%$ となる。これらは上述の実験値にほぼ一致している。このことは、実験においてほぼ平衡濃度が達成されていることを意味している。

(2) ダムによる土石流特性値の変化

Fig. 5 は、 $\theta=16^\circ$ 、 $d_{max}=20\text{ mm}$ の実験における下流端流量の測定結果の一例である。ダム無しの場合と比較すれば、流量のピークが著しく減少し、かつ時間変化が偏平になっているのが分かる。これは、ダム内に砂礫が貯留・堆積するばかりでなく、ダムに貯留された水が徐々に流出するからである。ついで、ダムの

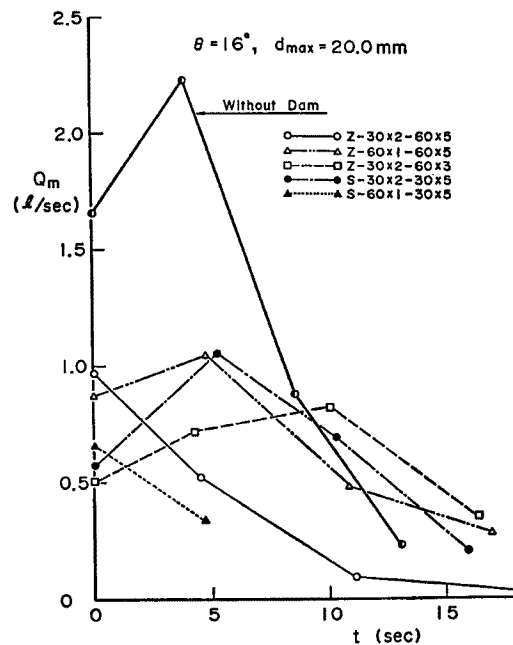


Fig. 5 Debris flow discharge at the flume end with grid dams.

型式、種類による違いについてみると、千鳥型においては、段と列の影響、とくに段の影響がみられ、ピーク流量は、1段 (Z-60×1-60×5) のものが最も大きい。同じ段数と列数をもつ千鳥型と方型のものを比較すると、ピーク流量は後者で小さくなっている。

Fig. 6 は $\theta=16^\circ$, $d_{max}=20\text{ mm}$ の実験で得られた下流端土砂濃度の一例である。Fig. 5 の結果からは、ピーク流量が大きいもの程、流出土砂濃度が高いことが推察される。このような観点より Fig. 6 をみると、千鳥型1段の流出土砂濃度がやはり大きいのが分かる。つぎに、下流端流砂量についてみたのが Fig. 7 である。下流端流砂量は流量と濃度の積であるから、その時間変化は、必然的に流量波形と相似な形になっている。

上述の結果を総合すれば、透過ダムを通過した土石流は、透過部分の段数の影響を最も強く受けるが、列数の影響はそれ程大きくはないことが分かる。換言すれば、透過部第1列の格子において、横方向および垂直方向の格子間距離の影響を強く受けると言える。もちろん、型式による違いも見られるが、これについては後述する。

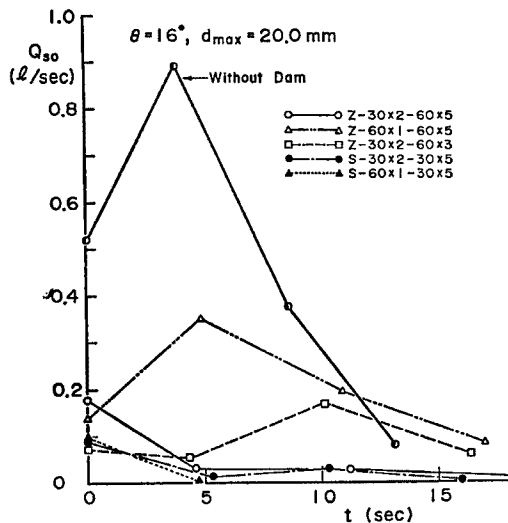


Fig. 7 Sediment discharge of debris flow at the flume end with grid dam.

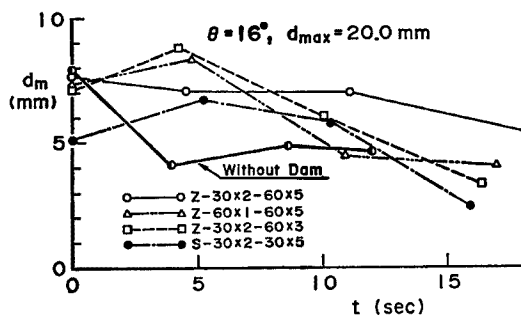


Fig. 8 Changes of mean particle size of sediment transported by debris flow at the flume end with grid dam.

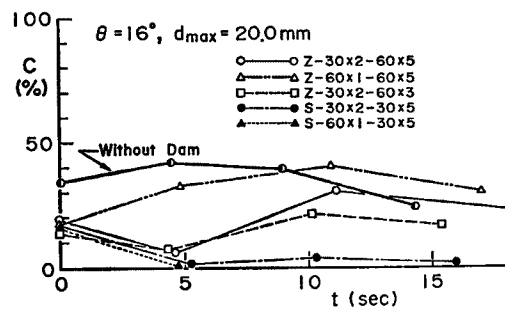


Fig. 6 Sediment concentration of debris flow at the flume end with grid dam.

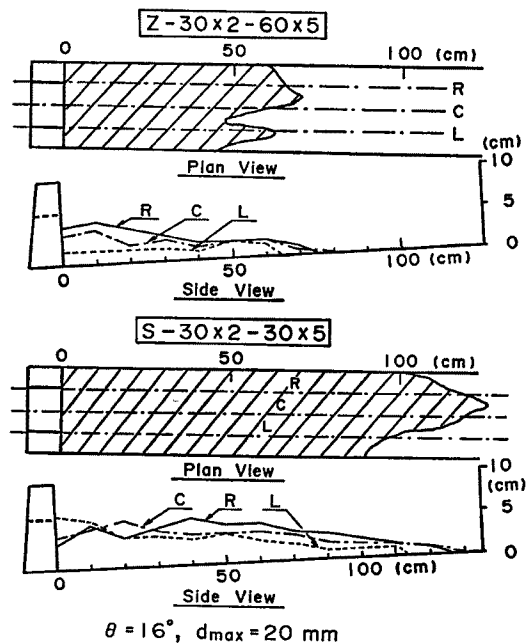


Fig. 9 Sediment deposition from debris flow in the upstream reach of grid dam.

ついで、透過性ダムによる土石流材料の篩分け現象についてみてみよう。**Fig. 8**には、前述のものと同様のケースについて、下流端流砂の平均粒径の時間変化を示している。ダムの有無を問わず、時間経過に伴い平均粒径は減少しているが、ダムの種類や型式の違いによる顕著な差は認められない。このような現象については、渡辺・水山らの実験³⁾でも認められているが、現在のところその解釈は難しい。

(3) ダムによる土石流の堆積形状

Fig. 9は、Z-30×2-60×5とS-30×2-30×5における最終堆積形状を示したものである。**Fig. 1**に示すように、これら二つの形式のダムにおいては、土石流の流向に垂直な射影形状は合同である。それにか

Table 2 Experimental results of total sediment volumes transported by debris flows

Run No	type of dam	θ (deg)	d_{max} (mm)	d_m (mm)	V_i (cc)	V_d (cc)	V_0 (cc)	V_0/V_i			
1-1	Z-30×2-60×5	16	20.0	5.96	6567	4619	1948	29.7			
2-1	Z-30×2-60×3	16	20.0	5.96	7943	4797	3146	39.6			
3-1	S-30×2-30×5	16	20.0	5.96	11407	10767	640	5.6			
4-1	Z-60×1-60×5	16	20.0	5.96	10554	4738	5816	55.1			
5-1	Z-30×2-60×5	20	20.0	5.96	13178	12142	1036	7.9			
5-2					9783	8417	1366	14.0			
5-3					10473	8990	1483	14.2			
5-4					9119	8262	857	9.4			
6-1					Z-30×2-60×3	20	20.0	5.96	12190	11030	1159
6-2	4040	3578	462	11.4							
6-3	11554	11248	305	2.6							
6-4	11490	8612	2878	25.0							
7	S-30×2-30×5	20	20.0	5.96	14630	14437	192	1.3			
8-1	Z-60×1-60×5	20	20.0	5.96	9129	7889	1240	13.6			
8-2					10553	4241	6313	59.8			
8-3											
8-4								10979	1953	9025	82.2
9	Z-30×2-60×5	16	15.9	5.24	12742	5100	7642	60.0			
10	S-30×2-30×5	16	15.9	5.24	9797	9005	792	8.1			
11	Z-30×2-60×5	20	15.9	5.24	8994	4746	4248	47.2			
12	S-30×2-30×5	20	15.9	5.24	13302	12011	1291	9.7			
13	concrete	16	15.9	5.24	7224	7224	0	0.0			
14	concrete	20	15.9	5.24	13059	13059	0	0.0			
15	without dam	16	15.9	5.24	8621	338	8284	96.1			
16	without dam	20	15.9	5.24	10165	298	9867	97.1			
17	S-60×1-30×5	16	20.0	5.96	5454	5212	242	4.4			
18					19625	19486	139	0.7			
19					12603	11781	822	6.5			
20					7366	6709	658	8.9			
21	Z-30×2-60×3	16	15.9	5.24	8200	2221	5979	72.9			
22					13553	7988	5565	41.1			
23	Z-60×1-60×5	20	15.9	5.24	25566	1907	23658	92.5			
24					12257	3038	9219	75.2			
25	concrete	16	20.0	5.96	8996	8996	0	0.0			
26	concrete	20	20.0	5.96	10733	10733	0	0.0			
27	S-60×1-30×5	20	10.0	3.34	15011	2440	12572	83.7			
28					11420	2277	9143	80.1			
29	S-30×2-30×5	16	10.0	3.34	11845	7093	4752	40.1			
30					13834	8261	5573	40.3			
31	Z-60×1-60×5	16	10.0	3.34	15754	2105	13649	86.6			
32					13122	459	12664	96.5			
33	Z-30×2-60×5	20	10.0	3.34	12727	2209	10518	82.6			
34					11111	1802	9309	83.8			
35	concrete	16	10.0	3.34	14149	13119	1030	7.3			
36	concrete	20	10.0	3.34	9112	8083	1030	11.3			

かわらず、堆積形状および堆積量とも相方でかなり異なっており、方形ダムにおいて、堆積長が長く、それに伴い堆積量も多くなっている。これは、射影形状が合同であっても、砂礫の通過量が異なることを意味するものであり、砂礫の通過機構は射影形状における格子間隔ばかりでなく、これ以外の何らかのパラメータにも依存していることを示している。

以上、本研究で行った実験のうち、いくつかの例を選んでそれらの概要を述べた。各ケースにおいて得られた実験結果のうち、発生土石流の総土砂量 V_i 、ダム堆積土砂量 V_d 、流出土砂量 V_o および V_o/V_i に関する結果を Table 2 に示しておく。

3. 砂礫の通過機構

3.1 通過機構に関する次元解析的考察

Photo 1, 2 は、 $\theta=16^\circ$ 、 $d_{max}=20$ mm に関する実験の一例であって、土石流の流向に垂直な射影形状が合同な Z-30×2-60×5 と S-30×2-30×5 のダムにおける砂礫の閉塞状態を示したものである。千鳥型においては、第1列目ばかりでなく、1列と2列目をつなぐ斜め部材と2列目との間に砂礫の閉塞がみられる。一方、方型においては、第2列前面に一部砂礫の閉塞がみられるものの、殆どが第1列前面にとどまっている。要するに、いずれのダムにおいても第2列目を通過した砂礫は、殆どダムを通過していることが理解される。

上述の写真およびこれまで示した実験結果を総合すれば、土石流による輸送砂礫の通過機構は、ダム地点における土石流の運動学的、力学的条件にも依存することも考えられるが、主として、Fig. 10(a), (b) に示すような第1列と第2列における格子の長さスケールと土石流材料の粒径に依存しているようである。ここで、輸送砂礫の通過率について、運動学的、力学的パラメータも含めて次元解析を行えば、通過率は次式のように表示される。

$$P = \frac{Q_{s0}}{Q_{sd}} = F\left(\frac{l_{h1}}{d}, \frac{l_{h2}}{d}, \frac{l_v}{d}, \frac{vd}{\nu}, C, \frac{v^2}{(\sigma-1)gd}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P は通過率、 Q_{s0} はダムの通過土砂量、 Q_{sd} はダム前面における輸送土砂量、 d は土石流材料の代表粒径、 l_{h1} 、 l_{h2} 、 l_v は Fig. 10(a), (b) に示す格子純間隔、 v はダム前面の土石流の平均流速、 ν は水の動粘性係数、 C は土石流の濃度、 σ は砂礫の比重、 g は重力の加速度である。

式(1)の無次元変数のうちの運動学的および力学的変数は、土石流の流れの強さを表しているが、間接的には砂礫間の咬み合う機会の大小を表示するパラメータであるとも言える。しかし、現時点においては、通過率に及ぼすこれらの影響を評価するのは困難である。そこで、いま、透過率 P と幾何学的パラメータに



Photo. 1 Inter-locking feature of sediment particles in the zigzag grid dam.



Photo. 2 Inter-locking feature of sediment particles in the square grid dam.

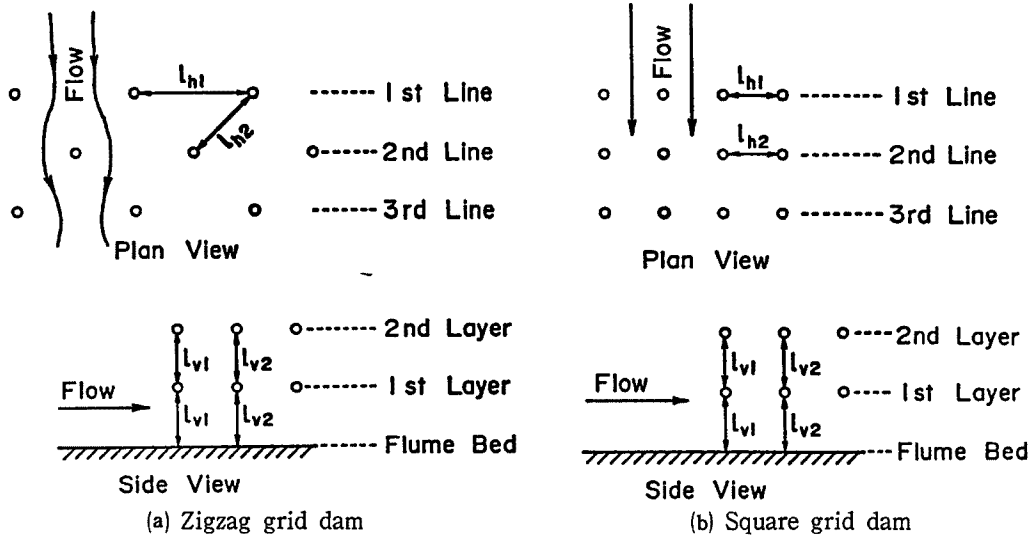


Fig. 10 Span length and particle motion in grid dam.

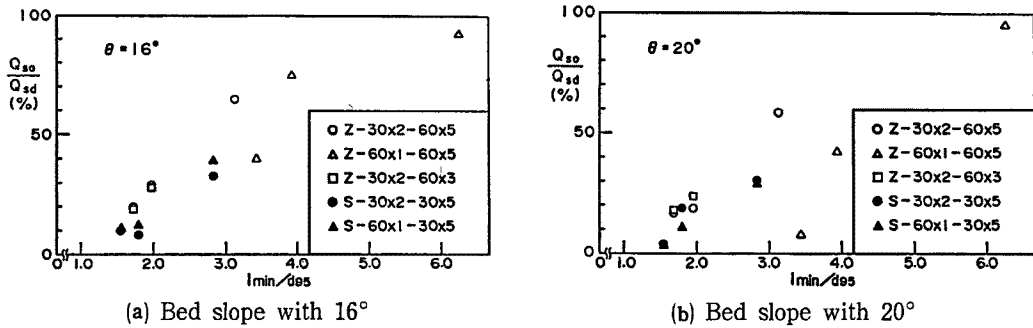


Fig. 11 Ratio of peak sediment discharge passed through the dam to peak inflow sediment discharge.

着目して、実験結果を調べてみる。Fig. 11(a), (b) は、代表粒径として95%粒径 d_{95} を選び、さらに3個の幾何学的パラメータのうちの最小のもの、すなわち、

$$\frac{l_{min}}{d_{95}} = \text{Min}\left(\frac{l_{h1}}{d_{95}}, \frac{l_{h2}}{d_{95}}, \frac{l_v}{d_{95}}\right) \dots\dots\dots (2)$$

に着目して通過率を整理したものである。ここで、 Q_{s0} として水路下流端流砂量の最大値をとり、 Q_{sd} には発生土石流の最大流砂量をとっていることに注意を要す。したがって、図のデータは厳密には最大流砂量の減少率の意味を持っている。このことを念頭におきながら Fig. 11(a), (b) をみれば、千鳥型の通過率が少し大きいようであるが、実験データは、ほぼ一本の滑らかな曲線のまわりにあることが分かる。さらに、 l_{min}/d_{95} が1.3~1.5程度のところで、 Q_{s0}/Q_{sd} が無視できるほど小さくなっている。 $l_{min}/d_{95}=1.3\sim 1.5$ は、池谷・上原が示したA型スリットの閉塞条件にほぼ一致している。Fig. 11(a) に示す $\theta=16^\circ$ の実験と Fig. 11(b) の $\theta=20^\circ$ の実験を比較すれば、 Q_{s0}/Q_{sd} は前者において少し大きな値を示しているようである。これは、 $\theta=16^\circ$ のもの比べて、発生土石流の流速や濃度が $\theta=20^\circ$ において大きくなっており、そのため砂礫の咬み合いによる閉塞が起りやすい条件になっていたものと思われる。

3.2 砂礫の通過モデル

これまでの考察によれば、透過部に到達した砂礫のうち、第2列目を通過したものはダムにとどまること

なく通過してしまい、その通過率は主として格子の最小間隔に依存していることが判明した。しかし、通過率を表現するには格子の最小間隔だけでは不十分であり、第2位の幾何学的パラメータ、さらには、土石流の特性値を示すパラメータが必要なことを示唆している。ここでは、簡単に議論を進めるため、第1列と2列における第1位および第2位の長さスケールをパラメータに選んで通過率の検討を行ってみよう。ここで第1位の長さスケールとは、各列における格子の水平あるいは垂直間隔のうちの最小のものを意味している。

Fig. 12 は、第1列目の格子に囲まれる垂直面を示したものである。粒径 d_i の球形粒子がこの垂直面を通過しようとしたとき、これが格子に接触するような条件では、粒子はこの面を通過できず、粒子の中心が点線で囲まれる面の内側に位置するときに通過できるものとする。すると、透過部第1列目におけるこの粒子の通過確率 P_{1i} は、次式のように書ける。

$$P_{1i} = \frac{(l_{h1} - d_i)(l_{v1} - d_i)}{l_{h1} \cdot l_{v1}} \dots\dots\dots (3)$$

同様に、第2列目の通過確率は、

$$P_{2i} = \frac{(l_{h2} - d_i)(l_{v2} - d_i)}{l_{h2} \cdot l_{v2}} \dots\dots\dots (4)$$

のようになる。上式の l_{h2} として、千鳥型では Fig. 10(a) に示すように、第1列と第2列との純斜距離がとられていることに注意を要す。一般に、混合砂礫が対象になるので、粒径階を n 階級に分割し、粒径 d_i の含有率を f_i とすれば、透過ダムにおける砂礫の通過率 P は、次式のように書ける。

$$P = \sum_{i=1}^n P_{1i} P_{2i} f_i \dots\dots\dots (5)$$

上式は、ダム全体が透過構造になっている場合の輸送砂礫の通過率である。本研究においては、水通し部のみが透過構造になっており、袖部は不透過構造になっているものを考えている。いま、袖部に衝突する砂礫は通過しないものとするれば、式(5)は次式のように書き改められる。

$$P = \frac{B_0}{B_d} \sum_{i=1}^n P_{1i} P_{2i} f_i \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 B_0 は水通し幅、 B_d はダム幅である。

Fig. 13 は、式(6)による通過率の計算値と実験値を比較したものである。ここで、実験値の通過率には、通過土石流のフロント流砂量に対する発生土石流のフロント流砂量の比がとられている。このことを念頭において図を見れば、非常に単純なモデルにかかわらず、両者はかなりよく一致しており、式(6)は砂礫の通過機構をかなり適切に表示しているものと判断される。しかしながら、実験値は実際の通過率を表していないため、式(5)あるいは式(6)を検証するためには、次章で述べるように、ダム上下流域における土石流の追

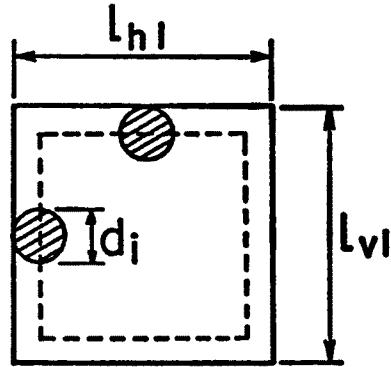


Fig. 12 Pass model of sediment particle in a grid dam.

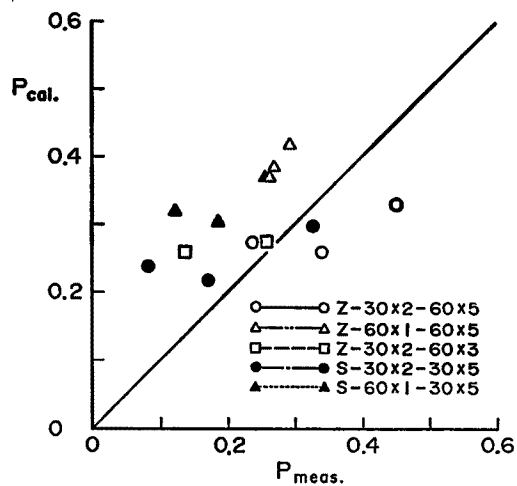


Fig. 13 Comparison between calculated and measured values for pass rate of sediment.

跡が必要である。

4. ダム上・下流域における土石流の追跡

4.1 総輸送土砂の通過率

Fig.14(a), (b) は、 $\theta=16^\circ$ および 20° の実験における総通過土砂量 V_{s0} と発生土石流の総土砂量 V_{s1} との比、すなわち総輸送土砂の通過率を示したものである。同図の横軸は、Fig.11 のものと同じものがとられている。これらの図に示されるように、 V_{s0}/V_{s1} は、Fig.11 の結果同様、 l_{min}/d_{95} を用いれば、かなり一般的に評価されているように見える。図示の関係は、これと似た条件を具備した土石流に対しては、十分にこれを評価するものである。ところが、この関係は、土石流の特性値、輸送土砂量、その材料条件、勾配によって容易に変化することが考えられる。なぜならば、はじめにも述べているように、土石流のダムの通過機構は、ダム地点の土石流の性質とダムの構造に依存しているからであり、ダム地点における土石流の性質は、その上流域における侵食・堆積によって時々刻々変化するためである。したがって、流入土石流に対する通過土砂の特性変化を一般的に議論するためには、ダム地点において適切な境界条件を設定してその上下流域における土石流の挙動を数値的に解析していくことが必要である。

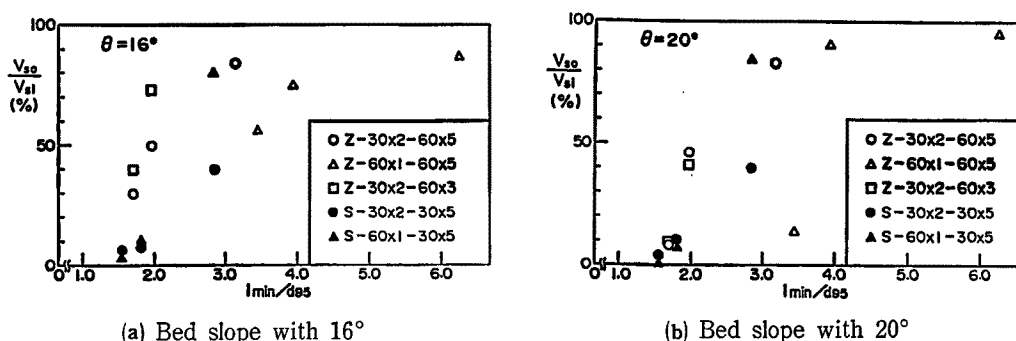


Fig.14 Ratio of sediment volume passed through the dam to the supplied sediment volume.

4.2 土石流の支配方程式と境界条件

(1) 支配方程式

土石流に関しては、これまでにいくつかの研究結果が提案されてきているが、侵食・堆積を伴うような土石流に関しては、芦田・江頭^{6),7)}らのものがより合理的であるように思われる。そこで、これを適用することにすれば、一次元流れに関する支配方程式は、次式のようなものである。

土石流（水と砂礫の混合物）の体積保存則：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = \frac{-D}{c_*} \dots\dots\dots (7)$$

砂礫の体積保存則：

$$\frac{\partial c h}{\partial t} + \frac{\partial c v h}{\partial x} = -D \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 h は土石流の水深、 v は断面平均流速、 c_* は土石流堆積物の体積濃度、 c は土石流の土砂体積濃度、 D は堆積速度である。

運動量保存則：

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \theta - \left\{ \underset{(G)}{g \frac{\partial h}{\partial x}} + \underset{(P)}{\frac{1}{2} g \frac{(\sigma-1) h}{(\sigma-1)c+1} \frac{\partial c}{\partial x}} \right. \\ \left. + \underset{(DE)}{\frac{vD}{c_* h}} - \underset{(YR)}{\mu_* \frac{(\sigma-1)cg \cos \theta}{(\sigma-1)c+1}} - \underset{(FR)}{f_b \frac{1}{(\sigma-1)c+1} \frac{v^2}{h}} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 σ は砂礫の比重、 μ_* は砂礫間の動摩擦係数、 f_b 流体抵抗係数である。右辺の(G)は重力項、(P)は圧力項、(DE)は侵食・堆積に伴う付加応力項、(YR)は降伏応力による抵抗項、(FR)は流体摩擦による抵抗項である。上式で、 μ_* は静摩擦係数の0.7~0.85倍程度の値であり、 f_b は次式で与えられる。

$$f_b = \frac{25}{4} \left(\frac{k_p}{k_s} \right)^{2/3} \left\{ \frac{1-c}{c} \right\}^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 k_p/k_s は形状係数比であって、 $(k_p/k_s)^{1/3}=2$ 程度の値であり、 d は土石流の代表粒径である。

河床位方程式 (流砂の連続式) :

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{D}{c_*} \dots\dots\dots (11)$$

堆積速度の式:

$$\frac{D}{v} = c_* \tan(\gamma - \theta) \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 γ は土石流の平衡勾配であって、次式で与えられる。

$$\gamma = \arctan \left\{ \mu_* \frac{c(\sigma-1)}{c(\sigma-1)+1} + f_b \frac{1}{(\sigma-1)c+1} \frac{v^2}{h} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

以上において、未知量は、 c, h, v, d, z_b の5個であり、これに対して方程式は式(7), (8), (9), (11)および式(12)の5本の式が用意されている。

(2) 境界条件

上流端 $x=0$ における境界条件として、ダムによる堆積の影響が及ばないところで、河床位、土石流の流量、濃度、流動層厚あるいは、流砂量、濃度、流動層厚を与える。一方、ダム地点においては、ダムの通過土砂量、およびダム前面における堆積速度あるいは河床位の条件を以下のように設定する。ダムの通過土砂量 Q_{s0} は、式(5)を用いれば、次式で与えられる。

$$Q_{s0} = PQ_{sd} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 Q_{sd} はダム前面における輸送土砂量である。透過ダムにおいて、単位時間当りに捕獲される土砂量は、 $(1-P)Q_{sd}$ であるから、これが微小区間 Δx に堆積するものとすれば、堆積速度は次式で与えられる。

$$D_d = (1-P)Q_{sd}/B\Delta x \dots\dots\dots (15)$$

境界条件は上述のようであるが、袖部が不透過構造になっており、ダム近傍の流れの扱いには注意を要する。ここではそれを次のように扱うことにする。土石流がダム域に流入して、堆積が少し進むと、Fig. 15に示すように、いわゆる死水域 (Dead zone) が形成されるが、実験の観察によれば、死水域の河床位は、主流域のものとは大きな差はないことが判明している。したがって、ここでは、流れの幅は水通し部の幅 B_0 に縮小されるように扱い、死水域の河床位は主流域のものに等しくなるようにする。そのため、式(14)および(15)の通過率 P は、式(6)ではなく、式(5)で与えられる。

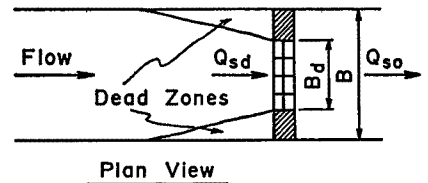


Fig. 15 Schematic flow model near a grid dam.

4.3 支配方程式の適用例

モデルの検証を行うため、まず、従来から用いられてきた不透過ダムにおける土石流の堆砂形状の解析を行う。

計算に必要な条件は次のように与えている。 $\theta=16^\circ$, $B=50\text{ cm}$, $d_m=5.96\text{ mm}$ ($d_{max}=20\text{ mm}$), $\sigma=2.65$, $c_* = 0.6$, $\mu_k = 0.70$, $\Delta x = 5\text{ cm}$, $\Delta t = 0.02\text{ sec}$ などであり, 上流端では, 等流状態を仮定している。ダム地点においては, 不透過ダムであるので $P=0$ としている。Fig. 16 は, このような条件下で算定される堆砂形状とその実験結果を示している。図示のように, 最終堆積形状は上述のモデルによってかなりの確に再現されていることが明かであり, 透過ダム上・下流域における土石流の追跡が可能であることが分かる。

Fig. 17(a), (b) は, 千鳥型透過ダム (Z-30×2-60×5) におけるダム前面の流砂量 Q_{si} , 通過流砂量 Q_{so} , ダム前面における土石流の濃度 c_s , および通過土砂濃度 c_o , 通過土砂の平均粒径 d_{m0} に関する計算結果を示したものである。図中には計算に使われた上流端における土石流の条件, すなわち上流端流砂量 Q_{si} お

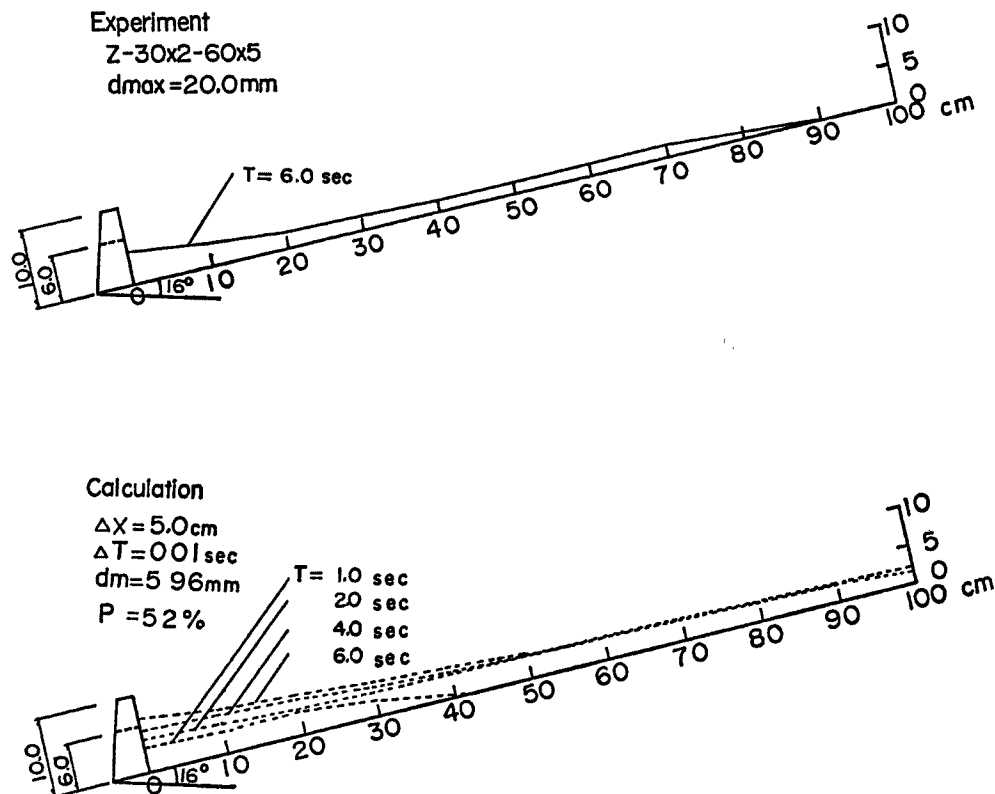


Fig. 16 Measured and simulated bed profiles formed by sediment deposition in a concrete dam.

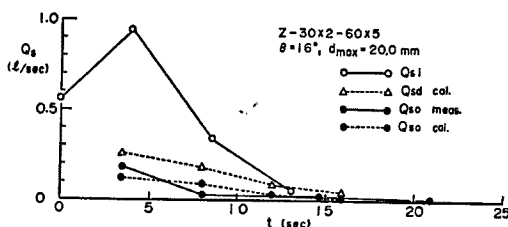


Fig. 17(a) Measured and predicted sediment discharge rates at the front of a dam and the flume end downstream of it.

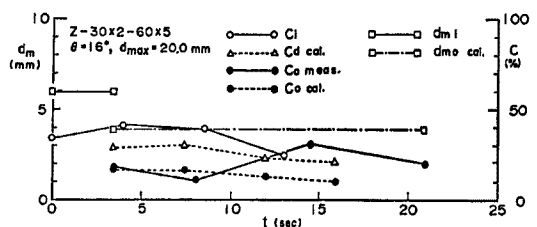


Fig. 17(b) Sediment concentrations and mean particle sizes measured as well as predicted at the front of dam and the flume end downstream of it.

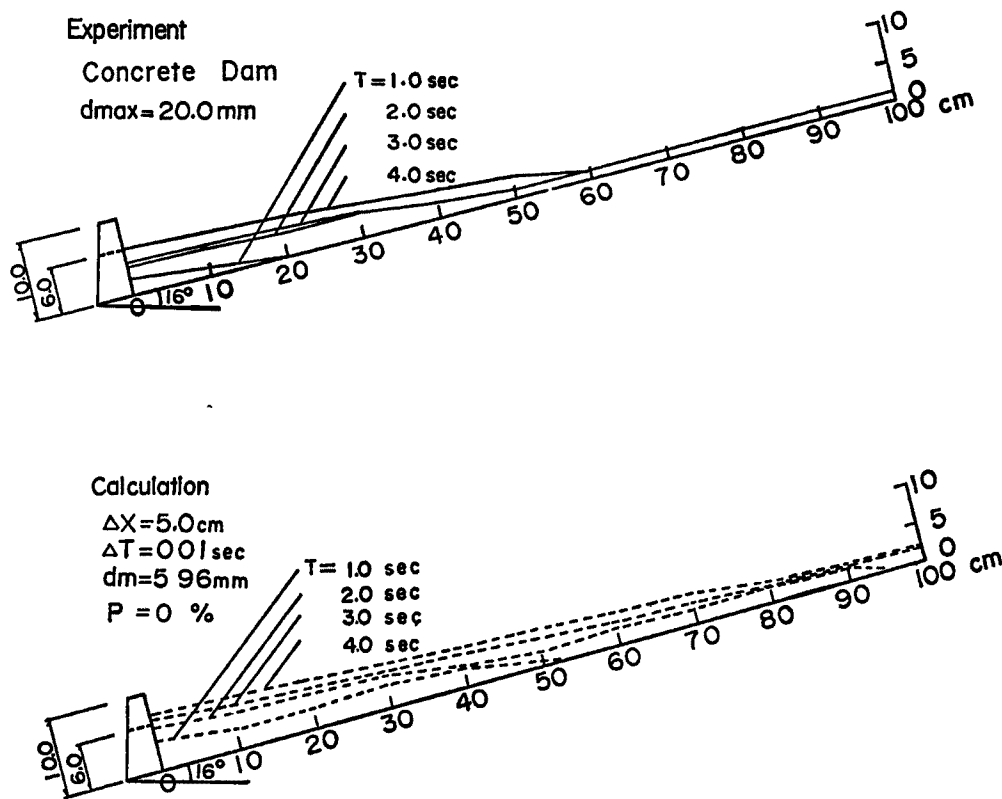


Fig. 18 Measured and simulated bed profiles formed by sediment deposition in a zigzag grid dam.

よび土砂濃度 c_i に関する実験値も示されている。実験データのばらつき等を考慮すれば、 Q_{10} および c_0 に関する実験値と計算値はかなりよく一致していると思ってもよく、現時点においては、十分に満足いく結果が得られていると考える。

Fig. 18 は、上述のものと同じケースにおける堆積形状の比較を行ったものである。実験では、最終堆積形状のみが得られているが、計算によってそれがかなりの確に再現されていることが分かる。

以上の結果より、土石流の追跡法および透過ダムにおける砂礫の通過モデルがほぼ妥当なものであることが判明した。そこで、この方法を用いて Fig. 14 に示す実験値をどの程度説明できるかを調べたのが Fig. 19 である。これによれば、計算値と実験値とがかなりくいちがうデータもある。しかし、Fig. 5~8 に示すように、この種の実験では、データのばらつきは避けられないことを考慮すれば、両者はかなりよく一致していると思ってもよい。

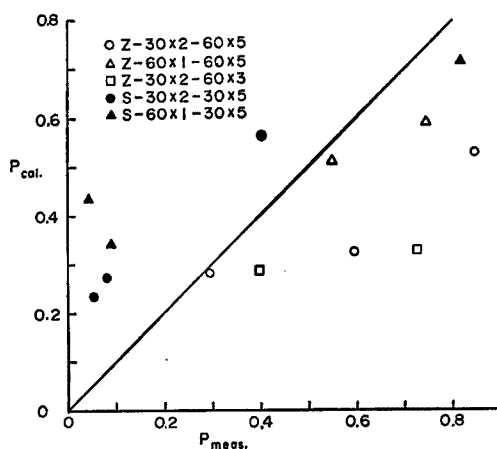


Fig. 19 Comparison Between calculated and measured values for V_0/V_i ; V_i is the supplied sediment volume and V_0 is the outflowing sediment volume.

5. 結 語

本研究においては、透過性砂防ダムのうち、千鳥型および方型の格子ダムを対象として、それらの土石流調節機構ならびに機能について実験および数値解析を通して検討した。ここで対象とした格子ダムは、従来の不透過ダムの水通しに相当する部分を格子構造にしたものである。以下、本研究によって得られた成果を要約する。

- (1) ここで対象とした透過ダムでは、土石流の流量、土砂濃度および流砂量を減少させる効果をもっている。これらの減少率は、主として第1列および第2列を構成する各格子の水平および垂直距離に依存する。
- (2) 上述の土石流特性値は、これらの幾何学的スケールのうち、最も短い格子間距離（第1位の幾何学的スケール）に最も支配される。このことは、構造物の設計上、つぎのような重要な意味をもつ。すなわち、ダムの耐力的な問題を別にすれば、千鳥型と方型ダムにおいて、同じ調節効果を発揮させるのに必要な部材量は、前者の方が少なくよい。
- (3) 土石流による輸送土砂のダム通過率と l_{min}/d_{95} との関係において、通過率は、 $l_{min}/d_{95}=1.3\sim 1.5$ のとき、10%以下になり、 l_{min}/d_{95} が大きくなると上に凸の性状で増加し、これが5を越えると90%以上になる。
- (4) 透過ダムの土石流調節機能、すなわち、土石流の特性値がダムによってどのように変化するかを評価するためには、ダムにおける土砂の通過率を明らかにする必要がある。ここでは、砂礫の閉塞が起こるのは、せいぜい第2列目までであることに着目し、第1列と第2列における格子の水平および鉛直距離、ならびに砂礫径をパラメータとして、通過率の評価式を提案している。
- (5) 侵食・堆積を伴うような土石流の支配方程式を示し、これに上述の通過モデルを適用することによって、透過ダム上・下流域における土石流の追跡法を考案した。これを用いて水路実験におけるダム堆砂の過程、通過流砂量、通過土砂濃度等を解析した結果、十分に妥当な結果を得た。
- (6) (5)の結果は、流入土石流の特性値を与えれば、通過土石流の特性値が評価できること、すなわち、透過ダムの土石流調節機能を評価できることを意味しており、この種のダムのより有用な設計指針を与えるものである。

以上、透過ダムの土石流調節機構やその機能について多くの知見を得たが、今後に解明すべき問題もいくつか残されている。例えば、土石流の支配方程式は著者らの最近の研究成果であって、これそのものが現在検討中のものである。ここで提案した砂礫の通過モデルは、直接的にその妥当性を検討するのはかなり困難であり、実験条件等も含めて今後さらに検討しなければならない。また、土石流に及ぼす不透過部の影響についても、より一般的な検討が必要であるように思われる。

本研究を進めるに当たり、ダム模型製作等において、川鉄建材工業 kk の諸氏に多大の援助をいただいた。また、実験や資料整理、数値計算等、京大防災研究所技官吉田義則氏に御協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 池谷 浩・上原信司：スリット砂防ダムの土砂調節に関する実験的研究，新砂防，114，1980，pp. 37-44.
- 2) 池谷 浩・上原信司：スリット砂防ダムの土砂調節効果，土木技術資料，22-7，1980，pp. 365-370.
- 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，115，1980，pp. 40-45.
- 4) 芦田和男・高橋 保：土石流の調節制御に関する研究，京大防災研究所年報，23号B-2，1980，pp. 433-441.

- 5) 高橋 保: 土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研究所年報, 20号B, 1977, pp.404-435.
- 6) Egashira, S. and K.Ashida: Sediment Transport in Steep Slope Flumes, Proc. Roc-Japan Joint Seminar on Water Resources Eng., Taipei, Mar. 1987, pp.269-286.
- 7) 芦田和男・江頭進治・佐々木浩: 斜面崩壊の発生と土石流の流動機構に関する研究, 京大防災研究所年報, 30号 B-2, 1987 (投稿中)。