

砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究

山 本 彰 山 本 修 一
鳥井原 誠 平 間 邦 興

Impact Load on Sabo Dam due to Debris Flow

Akira Yamamoto Shuichi Yamamoto
Makoto Toriihara Kunioki Hirama

Abstract

The paper discusses experimental and DEM analysis results of impact load due to debris flow on a sabo dam. The impact load experiment was performed with a wall type dam and four types of permeable dams. The simulation analysis was performed for the wall type dam by the modified DEM analysis which takes into consideration the rolling resistant moment, buoyancy and drag of water.

The results obtained are as follows; 1) Two models of impact load on the wall type dam were investigated. The analytical results for the impact load agree well with the experimental results. 2) A model considering the probability of gravel contact with the permeable dam is proposed to calculate the impact load. The results calculated by this model agree well with the measured load. 3) The relation between the behavior of gravel and the impact load is well reproduced by the modified DEM. The stress propagation mechanism from flow layer to sediment layer at overflow time was verified by DEM analysis and shows good agreement with theory.

概 要

土石流が砂防ダムに与える衝撃力の評価を目的として、模型実験と個別要素法によるシミュレーション解析を行った。模型実験では、不透過型ダムと4種類の透過型ダムを対象とした衝撃実験を実施した。また、個別要素法解析では土石流挙動をよりの確に再現できるよう転がり摩擦、水の抗力と浮力を考慮できる機能を付加し、不透過型ダムを対象としたシミュレーション解析を行った。

その結果、1) 不透過型ダムに作用する衝撃力は土石流の流動状態として2つのパターンを仮定することによってほぼその衝撃力を算定することができる、2) 透過型ダムの衝撃力は不透過型ダムの衝撃力と砂礫の堤体への接触率を用いることによってダム形式によらず一義的にその衝撃力を算定できる、3) 機能を拡張した個別要素法によって土石流衝突時の土砂の挙動、衝撃力をよくシミュレートできることが明らかとなった。また、解析によって土石流越流時における流動層の下層堆積部への力の伝達状態を検証することができた。

1. はじめに

我が国には約8万箇所の土石流危険渓流が存在しており、毎年のように融雪時や降雨時に土石流が発生し、社会的に大きな被害を及ぼしている。特に、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・軽減は極めて重要な課題となっている。このため、このような危険渓流では砂防ダムを中心とした種々の砂防対策がなされている。しかし、土石流は巨礫を含む土砂と水とが混合一体となって斜面や渓流を高速で流れ下る現象であり、極めて大きなエネルギーを有していることから、時には砂防ダムなどの構造物が破壊されることもある。このため、砂防ダムの設計に当たっては堤体に作用する衝撃力の評価が極めて重要となる。現在、砂防ダムの設計で用いられている衝撃力の算定方法¹⁾は土石流の特性やダム形式の特徴を反映したものとはなっ

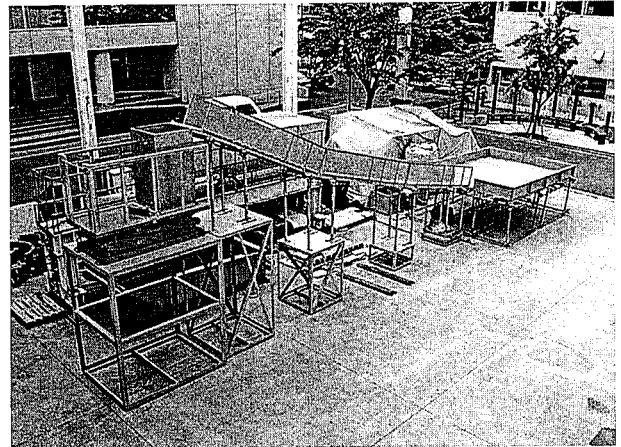


Photo 1 土石流模型実験装置全景
View of Experimental Apparatus

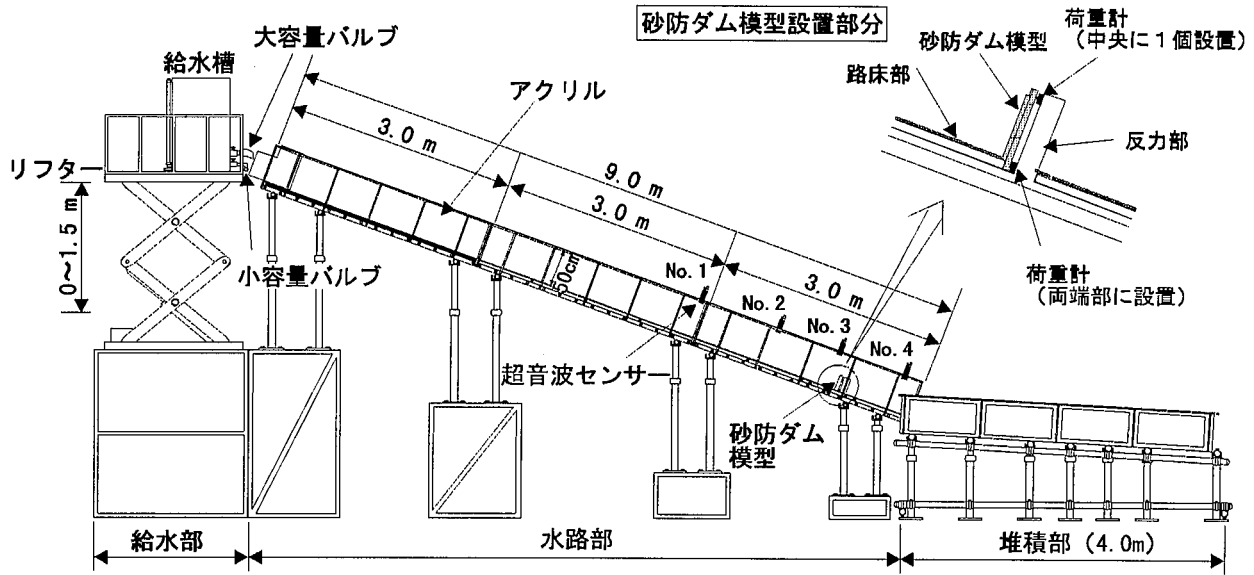


Fig. 1 土石流模型実験装置概要
Side View of Experimental Apparatus

Table 1 実験ケースおよび衝突時の流速
Condition of Experiments

実験 Case	ダム 形式	ダム タイプ	ダム透 過部の 間隔 (cm)		土石流 発生 方法	砂礫 重量 (kgf)	給水量	路床 材質	流速 (cm/sec)
			a	b					
1		1	—	—	1	30	2.2 l/sec	砂	95
2	不 透 過 型	1	—	—	2	60	2.2 l/sec	砂	118
3		1	—	—	3	30	20 l	砂	192
4		1	—	—	3	30	25 l	砂	301
5	透 過 型	1	—	—	1	30	2.2 l/sec	砂利	89
6		1	—	—	3	30	25 l	砂利	224
7		2	3.6	3.6	2	60	2.2 l/sec	砂	119
8	透 過 型	2	4.8	4.8	2	60	2.2 l/sec	砂	109
9		2	7.2	7.2	2	60	2.2 l/sec	砂	127
10		3	2.4	14.4	2	60	2.2 l/sec	砂	128
11	透 過 型	3	3.6	14.4	2	60	2.2 l/sec	砂	125
12		3	4.8	14.4	2	60	2.2 l/sec	砂	127
13		3	7.2	14.4	2	60	2.2 l/sec	砂	115
14	透 過 型	4	4.8	14.4	2	60	2.2 l/sec	砂	113
15		4	7.2	14.4	2	60	2.2 l/sec	砂	126
16		4	9.6	14.4	2	60	2.2 l/sec	砂	104
17	透 過 型	5	18.3	3.6	2	60	2.2 l/sec	砂	96
18		5	18.3	4.8	2	60	2.2 l/sec	砂	124
19		5	18.3	7.2	2	60	2.2 l/sec	砂	122

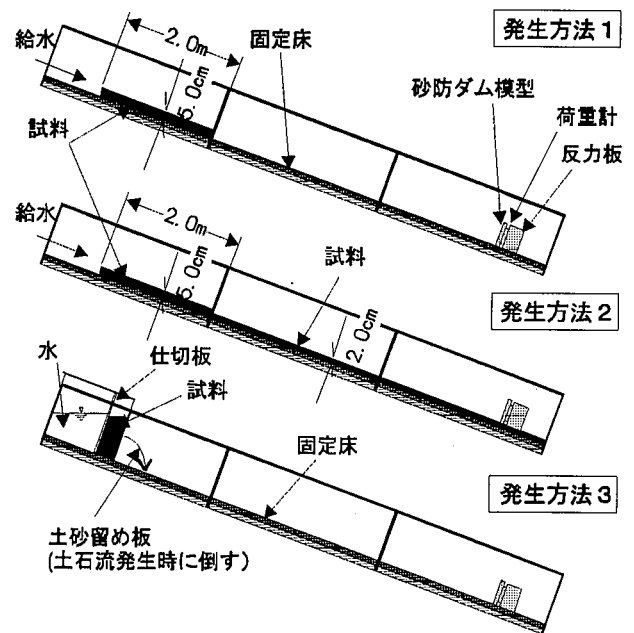


Fig. 2 土石流の発生方法
Trigger Methods of Debris Flow

ておらず、また提案されている土石流の衝撃力の算定式^{2), 3)}についても、パラメータの決定が難しいものが多く、実用化には至っていない。

そこで、この研究では不透過型ダムおよび4タイプの透過型ダムの模型を作成し、土石流模型実験と個別要素法によるシミュレーション解析を行い、不透過型ダム及び透過型ダムに作用する衝撃力に関する検討とその算定式の提案を行っている。

2. 実験方法

2.1 模型装置の概要

Photo 1, Fig. 1は実験に用いた土石流模型実験装置の概要を示しており、模型装置は給水部、水路部、堆積部からなっている。水路部の寸法は幅20cm、高さ50cm、長さ9mであり、水路側面はアクリルと塩化ビニールででき

ているため側面からの観察が可能である。砂防ダムの模型は図中に示しているように流路の末端部から約1.0mの位置に設置した。模型ダムには衝撃力を測定するために荷重計を3個、水路上部には土石流の水深を測定するために超音波センサーを4個取り付けており、500Hzで計測している。また、実験に当たっては高速度ビデオカメラを用いて土石流の砂防ダムへの衝突時の状況を250コマ/秒で撮影している。路床には2mmのふるいで調整した砂を張り付けた路床と粒径8~10mmの比較的均一な砂利を張り付けた路床を作成し、粗度を変化させた。土石流用の試料としては最大粒径24mm、平均粒径 $d_{50}=14$ mmの砂利を用いた。

Table 1は実験ケースおよび超音波センサーの計測結果から求めた土石流先頭部の流速を示しており、土石流の発生方法としてはFig. 2に示す3種類の方法を採用した。

(1) 発生方法1 渓床部の堆積土砂が流水の増加によって発生する土石流を想定した発生方法であり、上流部2mの区間に層厚5cmの砂礫を敷設し、上流部から一定流量の水を供給して土石流を発生させる。土石流流動部分は固定床としている。

(2) 発生方法2 土石流の発生方法は(1)と同じであるが、固定床部分に層厚2cmの砂礫を敷設している。

(3) 発生方法3 天然ダムの決壊によって発生する土石流を想定した発生方法であり、水路上端部で仕切板を取り外し、その後土砂と水とが混ざり合った時点で前面の板(土砂留め板)を下流側に倒して土石流を発生させる。路床は固定床としている。

なお、実験中の水路勾配はいずれも20°で一定としている。

Fig. 3は砂防ダム模型の形状を示しており、ダムの形式は不透過型ダム(タイプ1)と透過型ダム(タイプ2~5)の計5タイプである。1/100モデルを用いてフルード数が一致するよう実験条件を設定すると、実現象に対する実験の相似率は流速、時間および荷重について1/10, 1/10, 1,000,000となる。

3. 実験結果

3.1 不透過型ダム

3.1.1 衝撃力の経時変化と土粒子の状態 Fig. 4, 5はCase5, 6における衝撃力の経時変化を示しており、Photo 2, 3は図中の記号a~dに対応する土砂の状態を示している。

まず、土石流が砂防ダムに衝突した際の土砂の状態に着目すると、堆積形態はCase5とCase6でやや異なるが、土砂の状態は概ね以下の4段階に分けて考えることができる。

- ① 先頭部が砂防ダムに到達する段階(Photo 1, 2のa)
- ② 水深の大きい部分(水深が平均的な深さとなる部分)がダムに到達する段階(Photo 1, 2のb)
- ③ 後続の土石流がせり上がる段階(Photo 1, 2のc)
- ④ 砂防ダムに堆積した土砂の上を後続の土石流が越流する段階(Photo 1, 2のd)

Fig. 4, Photo 2から、Case5ではこれら4段階のうち、④の段階で最大の衝撃力が作用しており、堆積土砂が衝撃力に大きな影響を与えるものと考えられる。一方、Case6では②の段階で最大の衝撃力が作用しており、衝突時の流速が大きな影響を与えるものと考えられる。

次に、土石流による衝撃力の作用パターンに着目すると、Case5では土石流が砂防ダムに到達した後、衝撃力はなだらかに増加しており、顕著なピークは見られない。一方、Case6では土石流が砂防ダムに到着した直後

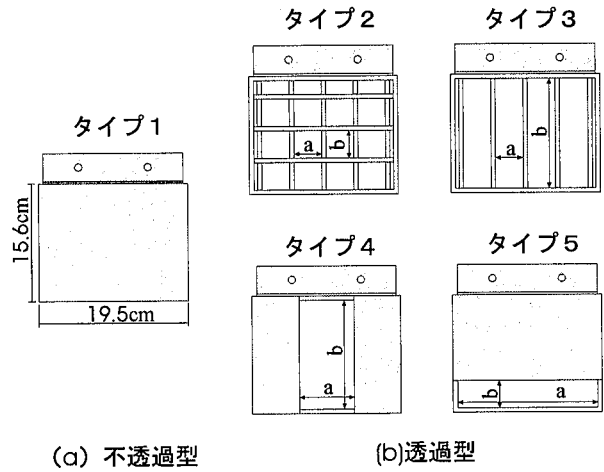


Fig. 3 砂防ダムのタイプ Type of Dams

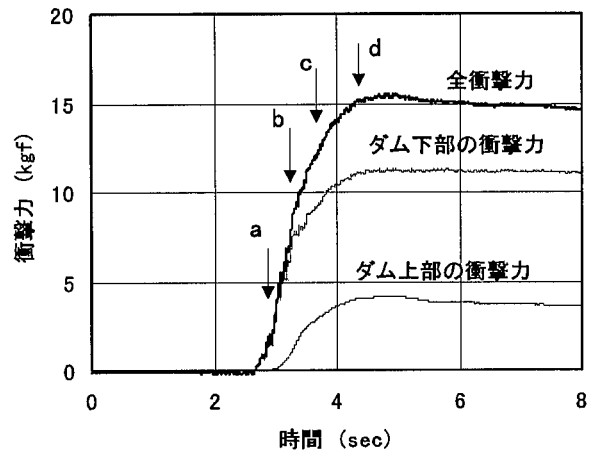


Fig. 4 衝撃力の計測結果 (Case5) Measured Impact Load

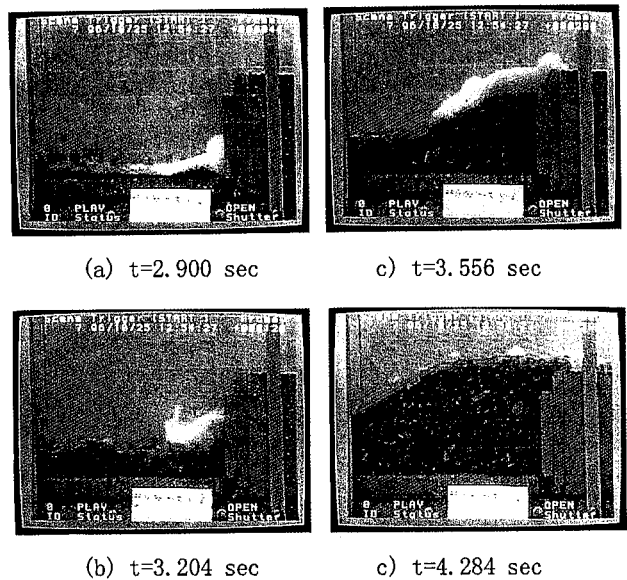


Photo 2 衝突時の土砂の状況 (Case5) Behavior of Debris Flow at Clash

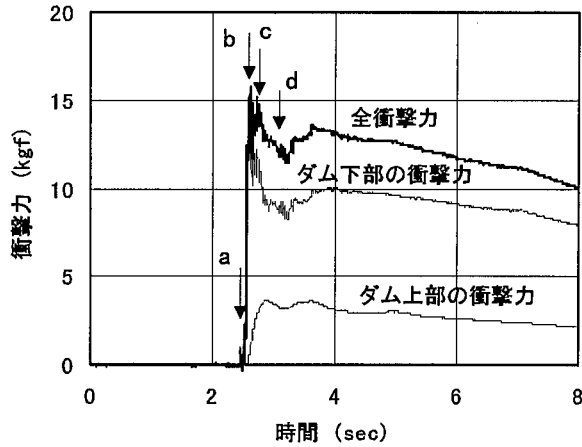


Fig. 5 衝撃力の計測結果 (Case6)
Measured Impact Load

に衝撃力は急激に大きくなり、ピークに達した後、減少する傾向が見られる。そこで、同様に他の実験ケースも含め、今回の実験で得られた衝撃力の作用パターンを分類するとFig. 6に示している3つに分けられる。

パターンⅠ：衝撃力は時間とともに漸増し、土石流が越流し始めた段階（④の段階）でピークに達する。

パターンⅡ：土石流が砂防ダムに到着した直後（②の段階）に、短時間でピークに達する。

パターンⅢ：土石流到着直後、および越流し始めた段階の2つの段階でピーク値を持つ（パターンⅠとⅡの両方の性質を有している）。

これらのことから、砂防ダムに作用する最大の衝撃力は衝撃力の作用パターンⅠ、Ⅱのうち、大きい方の値で与えられるものと考えられる。

また、Fig. 7は土石流が砂防ダムに到達し、最大衝撃力が作用するまでの作用時間と流速との関係をパターン別に分類し、プロットしたものである。この図から、パターンⅡでは作用時間が小さく、流速が大きい部分に分布しているのに対し、パターンⅠでは逆に、作用時間が大きく、流速が小さい部分に分布する傾向が見られる。このことから、衝撃力の作用パターンは流速や作用時間と密接な関係にあると考えられる。

3.1.2 衝撃力の算定方法 現在、砂防ダムの設計に用いられている土石流の衝撃力は、土石流を定常噴流とみたときに発生する動水圧による荷重を基準として考えており、流体力として式(1)で与えられている⁷⁾。なお、定常噴流の動水圧による荷重とは、流速Uの噴流が面に当たって90度方向を変えるときに面の受ける力である。

$$f = \alpha \frac{\rho_d}{g} h U^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、f：単位幅当たりの流体力、 ρ_d ：流体の単位体積重量、g：重力加速度、h：平均水深である。

Fig. 8は実験で得られた最大の衝撃力と式(1)を用いて算定した衝撃力との関係を示している。この図から、パ

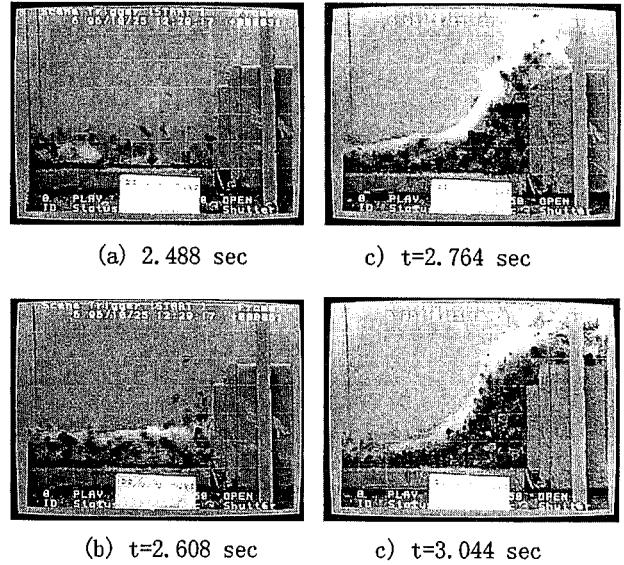


Photo 3 衝突時の土砂の状況 (Case6)
Behavior of Debris Flow at Clash

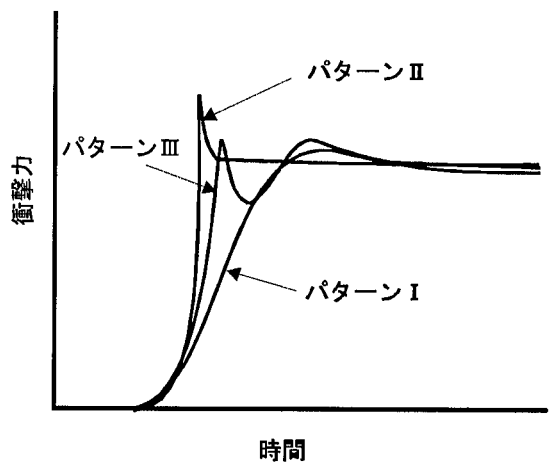


Fig. 6 衝撃力の作用パターン
Pattern of Impact Load

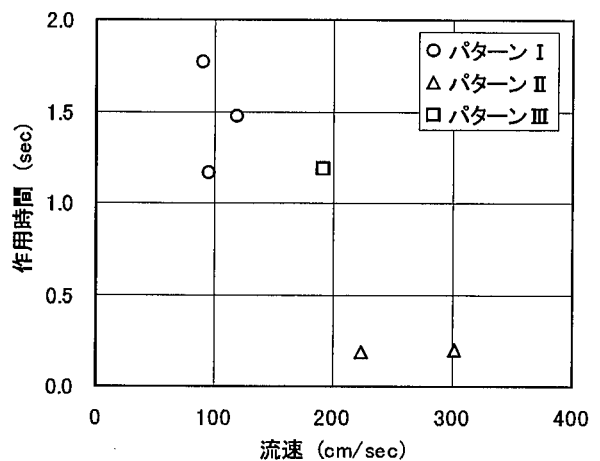


Fig. 7 作用時間と流速の関係
Relation between Velocity and Time Lag

ターンII, IIIに分類されているCase3, 4, 6は実験結果と解析結果が対応しているが、パターンIに分類されているCase1, 2, 5では実験結果に比べ計算結果の方がかなり小さめとなっている。これは、3.1.1項で述べたようにパターンIIの場合の最大衝撃力の作用段階はまさに式(1)で想定している状態によく対応しているためであるといえる。一方、パターンIではピーク時の土砂の状態が式(1)で想定している土砂の状態とは全く異なるため、計算結果と実験結果との間に大きな差異を生じたものと考えられる。

そこで、パターンIの場合の最大衝撃力は、実験時の土砂の流動、堆積状態に基づき、簡易的にFig. 9に示すように水路に対して勾配 $45^\circ - \phi/2$ (ϕ は内部摩擦角)で、砂防ダム天端まで堆積した領域とその上を土石流が越流する状態を想定し、その時に砂防ダムに作用する力として算定する。このとき、砂防ダムに作用する力としては、①ダム背面の土圧、②ダム背面の静水圧、③堆積土砂の表面を流れる土石流のせん断力を考える。

(1) ダム背面の土圧、水圧の算定 ダム背面に作用する土圧、水圧はクーロン土圧等の式を用いて次式によって算定できる。

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c_* g H^2 b + K_a \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c g H \frac{h}{\cos \zeta} b \dots \dots (2)$$

$$P_w = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 P_a は土圧、 K_a は主動土圧係数、 ρ は水の密度、 σ は土粒子密度、 c_* は堆積部の土粒子の体積密度、 c は流動部の土粒子の体積密度、 g は重力加速度、 H は土圧作用面のダムの高さ、 b はダムの幅、 h は流動部の水深、 ζ ($=45^\circ - \phi/2 - \theta$)は堆積部表面の勾配、 P_w は水圧である。また、 P_x 、 P_y は砂防ダムに作用する水圧の水平方向成分と鉛直方向成分であり、次式で与えられる。

$$P_x = \frac{1}{2} \rho g H \left(H + \frac{2h}{\cos \zeta} \right) b \dots \dots \dots (4)$$

$$P_y = \frac{1}{2} \rho g H \tan \delta \left\{ H(1 - \tan \alpha \tan \zeta) + \frac{2h}{\cos \zeta} \right\} b \dots \dots (5)$$

ここに、 δ はダムの傾斜角 ($0 \leq \delta < 90^\circ$) である。

(2) 堆積部表面を流れる土石流のせん断力の算定
堆積部の表面を流れる土石流と堆積土砂の間に作用するせん断応力は江頭らの構成式⁴⁾に基づき、次式で与えられる。

$$\tau = p_s \tan \phi = \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c g \frac{h}{\cos \zeta} \tan \phi \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 τ はせん断応力、 p_s は骨格粒子の垂直応力、 ϕ は内部摩擦角である。

さらに、堆積部表面の長さを l とすると流動部分と堆積部分の間に働くせん断力 S による砂防ダムへの作用力

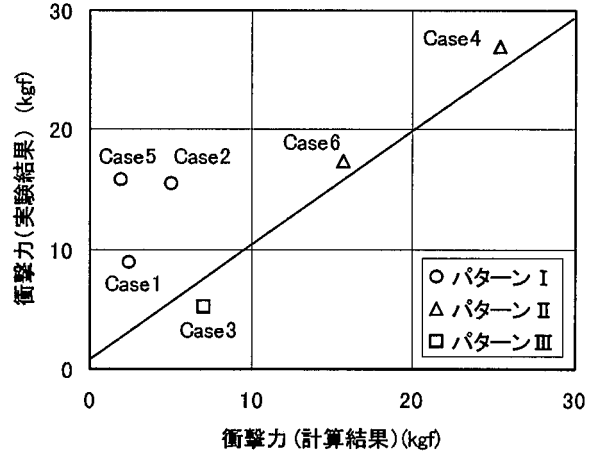


Fig. 8 実験結果と計算結果(式(1))の比較
Comparison between Measured and Calculated Load

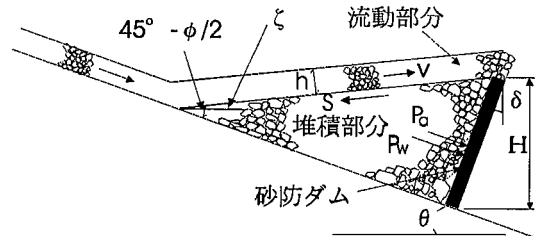


Fig. 9 衝撃力算定モデル(パターンI)
Model of Flow and Deposition at Clash

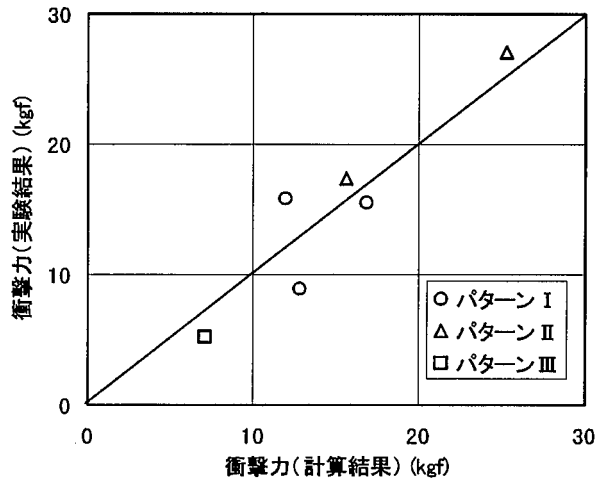


Fig. 10 実験結果と計算結果(提案方法)の比較
Comparison between Measured and Calculated Load

S_h は次式で与えられる。

$$S_h = S \cos \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \tau b \cos \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \dots \dots \dots (7)$$

したがって、パターンIの場合の衝撃力は式(2)、(3)、(7)の和として与えられる。

Fig. 10は式(1)、および式(2)~(7)を用いて求めた衝撃力と実験で得られた衝撃力との関係を示しており、い

ずれもよく対応している。このことから、土石流衝突時の状態として先の2つのパターンI, IIを仮定することによって、不透過型の砂防ダムに作用する衝撃力はほぼ算定できるものと考えられる。

3.2 透過型ダムの衝撃力の算定方法

Fig. 11は土石流が透過型ダムに到達した直後の各ダムに作用する最大の衝撃力を求め、透過部の最小間隔との関係でプロットしたものである。この図から、最小間隔4.8cm, 7.2cmの場合に着目するとタイプ4の衝撃力が最も大きく、タイプ2, 5, 3の順で小さくなっており、一義的な関係は見られない。しかし、透過部の最小間隔が小さくなるほどダムタイプ別の差は小さくなり、タイプ1の衝撃力に漸近する傾向が見られる。

そこで、透過型ダムの堤体(フレーム)に接触する土粒子の確率を用いて、その衝撃力を算定する方法について述べる。

芦田らは透過部での粒子の通過率ξを次式によって与えている⁹⁾。

$$\xi = \frac{B_0}{B_d} \sum_{i=1}^n \frac{(l_h - d_i)(l_v - d_i)}{l_h l_v} f_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 l_h は透過部の水平間隔、 l_v は縦間隔、 d_i は土粒子径、 B_0 は水通し幅、 B_d はダム幅、 f_i は粒径 d_i の粒子の含有率、 n は離散化した粒径の数である。

式(6)において B_0 を透過部の面積 A_p 、 B_d を土石流を受ける砂防ダムの面積 A_d に置き換え、透過部の個数を m とすると土石流の通過率は次式のように書き換えることができる。

$$\xi = \frac{A_p m}{A_d} \sum_{i=1}^n \frac{(l_h - d_i)(l_v - d_i)}{l_h l_v} f_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

したがって、土石流の粒子が透過部周辺のフレームに接触する確率(以下、接触率と呼ぶ)は次式によって求めることができる。

$$\bar{\xi} = 1 - \xi \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、同規模の不透過型ダムに作用する衝撃力を P_0 とすると、透過型ダムに作用する衝撃力は次式によって与えられる。

$$P = \bar{\xi} P_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 12は不透過型ダムの衝撃力 $P_0=15.58\text{kgf}$ 、粒度試験から求めた d_i, f_i を用い式(11)で求めた透過型ダムの衝撃力と模型実験で得られたそれとの関係を示しており、よく対応していることが分かる。したがって、透過型ダムに作用する衝撃力はダムタイプによらず、同規模の不透過型ダムの衝撃力と接触率によって一義的に求めることができ、式(11)によって算定できる。

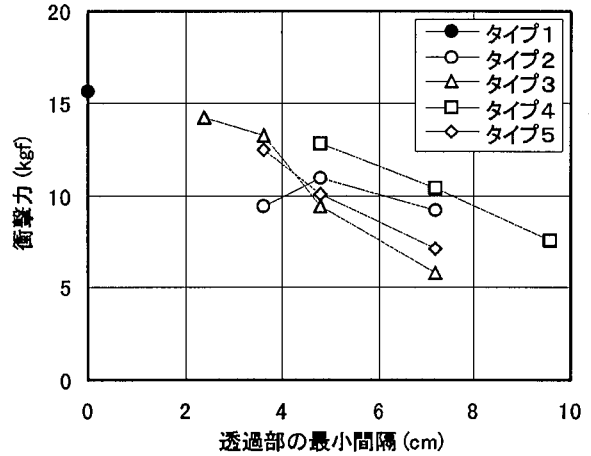


Fig. 11 衝撃力と透過部最小間隔の関係
Relation between Minimum Space and Load

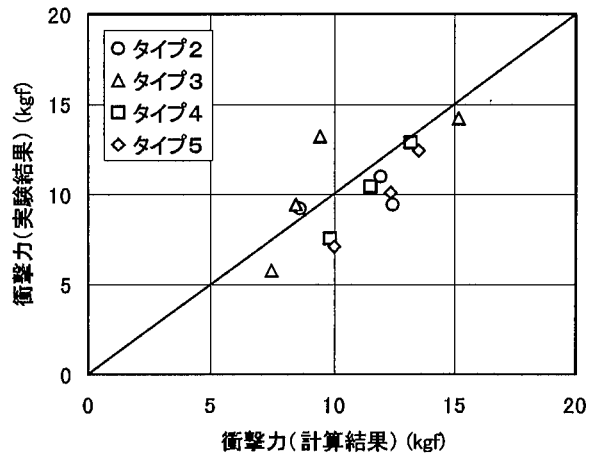


Fig. 12 実験結果と計算結果(式(11))の比較
Comparison between Measured and Calculated Load

Table 2 解析定数
Parameters of DEM Analysis

パラメータ(単位)	
法線方向バネ定数 k_N (kgf/cm)	2.0×10^4
接線方向バネ定数 k_S (kgf/cm)	6.7×10^2
法線方向粘性定数 η_N (kgf sec/cm)	3.2×10^2
接線方向粘性定数 η_S (kgf sec/m)	5.8×10^3
粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	1.8
粒子間摩擦角 ϕ_μ (deg.)	24
転がり抵抗係数 B/r	0.13
抗力係数 C_D	0.44

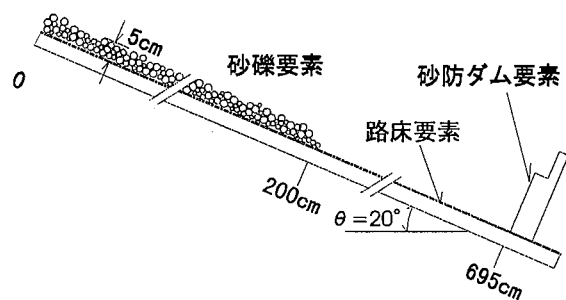


Fig. 13 解析モデル
Model of DEM Analysis

4. シミュレーション解析

4.1 解析方法

解析では土石流に含まれる砂礫を個々にモデル化できる個別要素法を用い、Case5について二次元シミュレーション解析を実施した。Fig. 13は解析モデルを示しており、実験では路床に粒径8~10mmの砂利を張り付けていることから、解析では路床部に直径10mmの粒子を隙間無く並べ、全自由度を拘束している。土石流試料は実験に用いた試料の粒度分布に従って粒子を乱数発生させ、水路上流部の路床上に長さ2m、高さ5cmとなるよう積み上げ、重力だけを作用させて初期状態を作成した。なお、粒子径は9.5, 13.5, 19.0, 22.0, 24.0mmの5種類とした。

砂防ダムは剛体要素を用いて、実験と同じ位置に同じ形状になるようモデル化した。解析定数は礫の弾性係数、反発係数、流体のレイノルズ数などを考慮し、Table 2のように決定した。なお、粒子の密度は単位奥行き当たりの粒子の密度が実験時のそれと一致するよう設定した。

また、解析に当たっては土石流の挙動をより正確にシミュレートするため以下の機能を付加した。

(1) 転がり摩擦の導入 解析時の粒状体の内部摩擦角と実験に用いた砂礫の内部摩擦角が一致するよう転がり摩擦を導入した⁶⁾。転がり摩擦は転がり抵抗モーメント M_{rf} として転がりを止めようとする方向に作用する。転がり抵抗モーメント M_{rf} は次式で表される。

$$M_{rf} = BN \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 B は接触幅に比例する転がり摩擦係数(長さの単位を持つ量)、 N は粒子間に作用する垂直力であり、転がり摩擦係数を粒子径 r で割った値で定義される転がり抵抗係数 B/r は定数として与えられる。

(2) 浮力と抗力の導入 解析では流体の効果として、砂礫に作用する抗力と浮力のみを考慮する方法を用いた。土粒子に作用する浮力 f_b および抗力 f_d は次式で与えられる。

$$f_b = \rho V_s g \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$f_d = C_D \rho A v^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 ρ は水の密度、 V_s は砂礫粒子体積、 g は重力加速度、 C_D は抗力係数、 A は流れ方向への粒子の投影面積、 v は粒子と流体の相対速度である。

解析ではFig. 14に示しているように、砂礫の堆積部背面から水が浸透する状態を仮定し、この水が個々の粒子部分に到達した段階で、浮力と抗力が粒子に作用するものとした。この時の水の速度としては、水路に平行な一定流速 v_w を仮定し、砂礫を取り除いた水路に土石流実験での給水量と同量の水を流したときの平均流速($v_w=110\text{cm/s}$)とした。

Fig. 15はこの解析モデルを用いてシミュレートした土石流流動時の粒子速度の水深方向の分布を示している。解析結果と実験結果はよく対応しており、解析モデルは土石流の流動性状をよくシミュレートできるものと

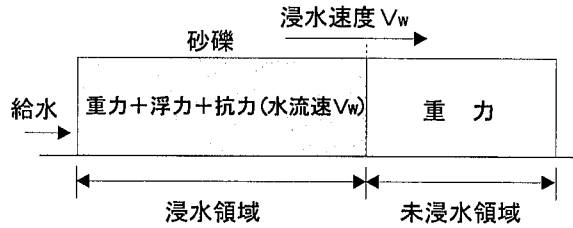


Fig. 14 浸透モデル Model of Seepage into Gravel

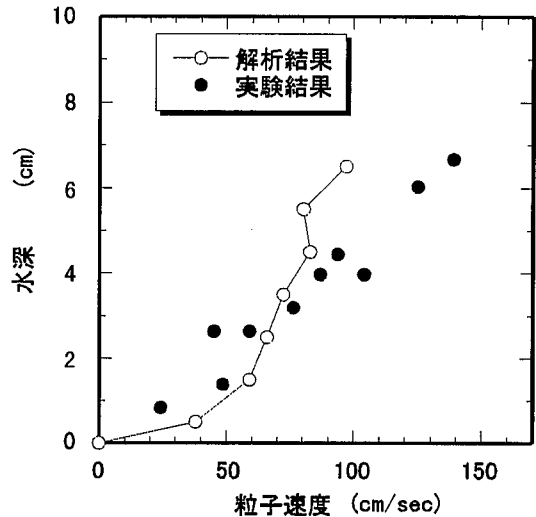


Fig. 15 粒子速度分布の比較 Particle Speed Distribution

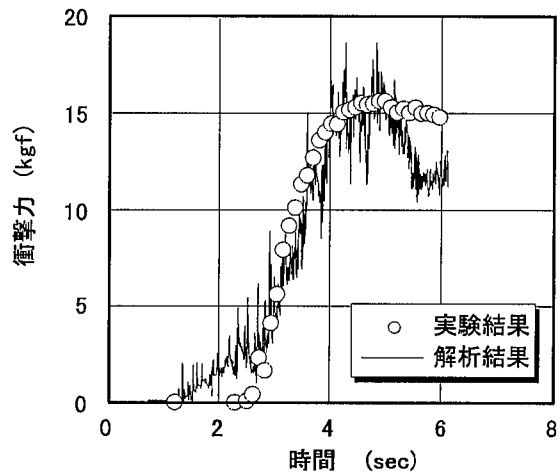


Fig. 16 実験結果と解析結果の比較 Comparison between Measured and Calculated Load

考えられる。

4.2 解析結果

Fig. 16は砂防ダムへの衝撃力を実験結果と比較したものである。この図から、解析結果は最大衝撃力を含めて実験時の衝撃力特性を定量的によくシミュレートしていることがわかる。なお、衝突初期において実験結果の衝撃力が急激に立ち上がるのに対して解析結果の衝撃力が徐々に大きくなるのが見られるが、これは、解析では土石流先頭部の前方を10~20粒子が先行して転がり落ちる

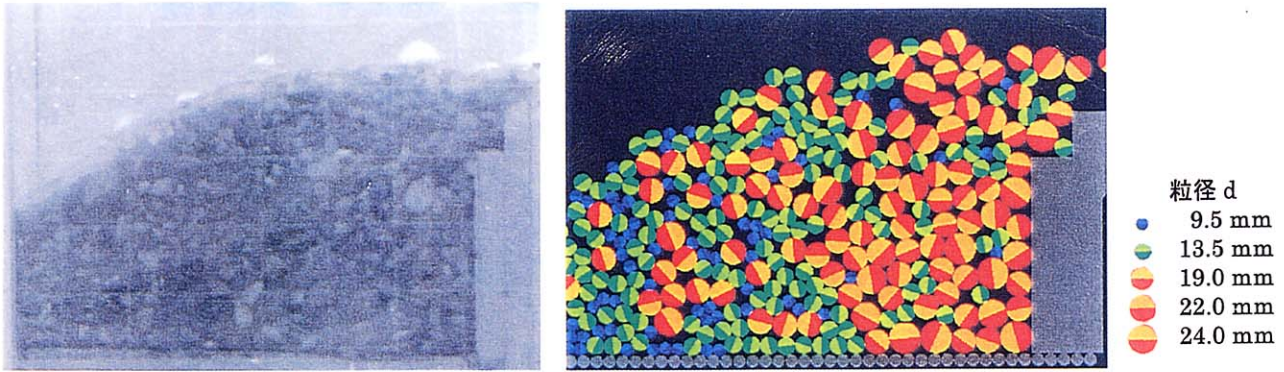


Fig. 17 砂防ダム近傍の流動形態に関する実験結果と解析結果の比較 (t=4.284sec)
Comparison between Measured and Calculated Behavior of Garavel

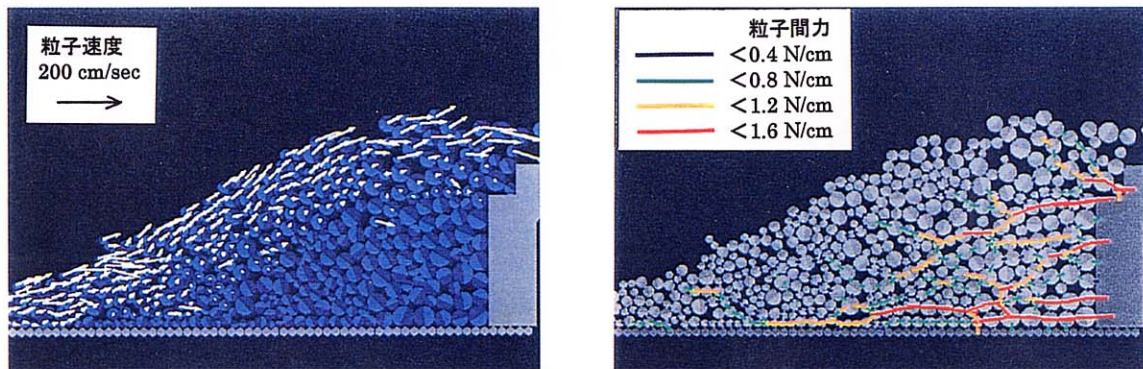


Fig. 18 砂礫要素の速度ベクトルと粒子間力ベクトル図 (t=4.284sec)
Particle Velocity Vector and Intergranular Force Vector

かたちとなっており、一体となった土石流が砂防ダムに衝突する前にそれらの粒子が衝突したためである。Fig. 17はCase5の衝撃力のピーク時における、粒子の流動状態について実験結果と解析結果を同一時刻で比較したものである。この図から、粒子の堆積形態、分布形態とも解析結果と実験結果はよく対応している。また、Fig. 18はFig. 17と同一時刻での砂礫要素の速度ベクトルと粒子間力ベクトルの変化を対応させて描いたものである。この図から、衝撃力ピーク付近では堆積した砂礫を乗り越えるように流動する数粒子分の流動層が見られ、この流動層の下部堆積粒子へのせん断力が砂防ダムまで伝達される様子がよくわかる。このシミュレーション結果からも、土石流の衝撃力の算定において式(7)で示した堆積土砂上面でのせん断力の導入が妥当なものであったことが分かる。

5. むすび

この報告では不透過型ダムおよび4種類の透過型ダムのモデルを作成し、砂防ダムに作用する土石流の衝撃力について検討した。

その結果、以下の結論が得られた。

1) 不透過型ダムの衝撃力は土石流の流動状態として定常噴流の状態と後続流が堆積土砂上を越流する状態の2つのパターンを仮定することによってほぼその衝撃力を算定することができる。

2) 透過型ダムの衝撃力は不透過型ダムの衝撃力と粒

子の堤体への接触率を用いることによってダムタイプによらず一義的にその衝撃力を算定できる。

3) 機能を拡張した個別要素法によって実験時における土石流衝突時の土砂の挙動、衝撃力をよくシミュレートすることができた。また、解析によって土石流越流時における流動層の下層堆積部への力の伝達状態を検証することができた。

参考文献

- 1) 鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，砂防・地すべり技術センター，(1993)
- 2) 三好 岩生，鈴木 雅一：土石流の衝撃力に関する実験的研究，新砂防，Vol. 43, No. 2, p11-19, (1990)
- 3) 大同 淳之：土石流の衝撃力とそれに対応するコンクリートダムの設計，平成9年度砂防学会研究発表会概要集，p222-223, (1997)
- 4) 芦田 和男，江頭 進治，栗田 三津雄，荒牧 浩：透過性砂防ダムの土石流調節機構，京都大学防災研究所年報，第30号，B-2, p441-456, (1987)
- 5) 江頭 進治，芦田 和男，矢島 啓，高濱 淳一郎：土石流の構成則に関する研究，京都大学防災研究所年報，第32号，B-2, p487-501, (1989)
- 6) 山本 修一：個別要素法による粒子間の転がり抵抗が粒状体の内部摩擦角に及ぼす影響の検討，第32回地盤工学研究発表会，p497-498, (1997)