

透過性砂防ダムの土石流調節機構

MECHANISM OF DEBRIS FLOW CONTROL WITH GRID DAM

京都大学防災研究所 正 員 芦田 和男 Kazuo ASHIDA
 京都大学防災研究所 正 員 江頭 進治 Shinji EGASHIRA
 滋 賀 県 正 員 栗田三津雄 Mitsuo KURITA
 川鉄建材工業(株) 荒牧 浩 Hiroshi ARAMAKI

1. 緒 言

土石流の流下域における土砂災害対策構造物として、従来から不透過性のコンクリート製砂防ダムが広く用いられている。このタイプのダムは、未満砂の状態では機能を発揮するが、満砂後においては、機能が著しく低下するものと考えられる。これに代わる構造物として鋼製スリットや格子状の透過性砂防ダムが注目されてきている。ところが、ダムの土砂調節機能の評価法が解明されておらず、より効果のある設計や配置計画を行う上で大きな支障になっている。

透過性砂防ダムは、大きい運動エネルギーを有する土砂を一時的に貯留することによって、これを安全に流下させ、常に調節量を確保しておくという着想に基づいたものであって、機能の永続性の面で大きな可能性を持っている。このタイプの土石流調節機能として、1)土石流の流量波形や流砂量波形の変化、2)流砂形態の変化、3)材料の篩分け、などが考えられる。このようなダムの機能は、流入土石流の特性値、堆砂域(貯留域)での特性変化および透過部における砂礫の通過特性に依存する。

本研究においては、まず水路実験によって所定の特性値をもつ土石流を発生させ、2種類の透過ダムを対象として堆砂域における土石流の挙動やダム部における砂礫の通過特性を調べる。ついで、砂礫の通過モデルについて考察し、これとダム上・下流域の土石流追跡モデルを用いた調節機能の評価法について検討する。

2. 実験と結果の考察

ダムの模型として、図-1 に示すように、千鳥型(Zigzag Grid Type)および方型(Square Grid Type)の透過ダムを用いた。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5mmの亚克力棒を用いているが、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種類を使い、方型においては、2種類を用いている。以下簡単のため、こららを型式-格子間距離x段数-格子間距離x列数の符号で分類する。ちなみに、図-1 の例では、2段5列(Z-30x2-60x5:千鳥型-格子間距離30mm x 2段-格子間距離60mm x 5列)のものが示されており、方型では、2段5列(S-30x2-30x5)の例が示されている。

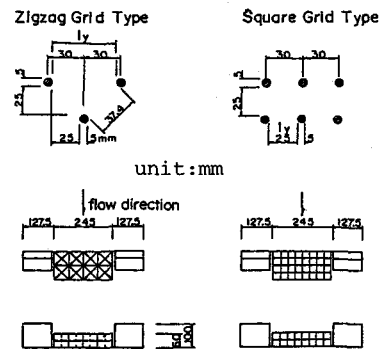


図-1 透過性ダム模型

実験に使用した水路は、長さ12m、幅50cmの勾配可変の鋼製水路である。水路下流端より1.6mの位置にダムを設置し、ダム上流2.4m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2mの移動床区間を設けている。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図-2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、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

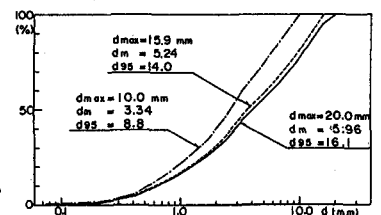


図-2 実験用砂

特性値を測定するような方法でおこなわれた。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。

実験条件は、ダムの型式、砂礫の材料、勾配 θ (16° 、 20°) を種々組み合わせて設定されているが、給水流量はいずれのケースにおいても 1 l/sec とし、給水時間は $\theta = 16^\circ$ のとき15秒、 20° のとき10秒である。なお、比較のため不透過性のダムおよびダムを設置しない場合の実験も行っている。

図-3は、最大径 $d_{\max} = 20.0 \text{ mm}$ を用いて行ったダム無しの場合の水路下流端における土石流の流量および体積濃度を示したものである。流量は、水と砂礫の混合物の流量 Q_m のことである。この結果によれば、流量の時間変動は大きく、流出初期にそのピーク値が現れている。この傾向は、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¹⁾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、実験値にほぼ一致しており、実験においてはほぼ平衡濃度が達成されていることを意味している。

図-4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、かつ流量波形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。ダムの型式、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-60x1-60x5)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。

図-5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。図-4の結果からは、ピーク流量が大きいものほど、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図示の結果をみると、千鳥型1段の流出土砂濃度がやはり大きいのが分かる。

上述の結果を総合すれば、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列の格子部において、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。

図-6は、Z-30x2-60x5とS-30x2-30x5における最終堆積形状を示したものである。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空間は合同である。それにかかわらず、堆積形状および堆積量ともかなり異なっており、方形ダムにおいて、堆積長は長く、それに伴い

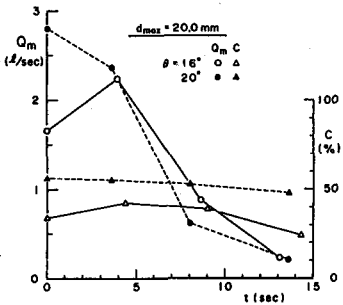


図-3 発生土石流の特性値

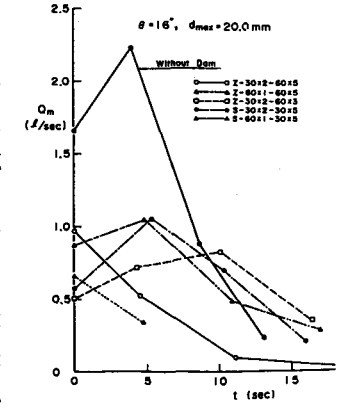


図-4 流量波形の変化

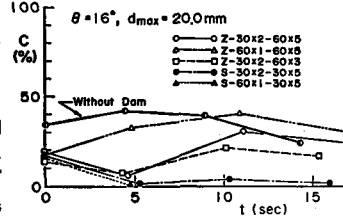


図-5 通過土砂濃度の変化

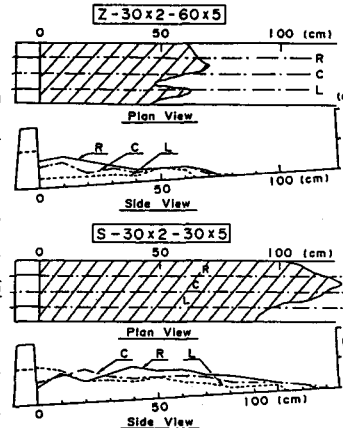


図-6 最終堆積形状

堆積量も多くなっている。これは、砂礫の通過機構が射影空間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。

3. 砂礫の通過率

3.1 通過機構に関する考察

写真1、2は、 $\theta = 16^\circ$ 、 $d_{\max} = 20 \text{ mm}$ の実験の一例であって、土石流の流向に垂直な射影空間が合同であるZ-30x2-60x5とS-30x2-30x5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。以上、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統合すれば、土石流による輸送土砂の通過機構は、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、第1列と第2列における格子間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。そこで、まず最大径として d_{95} をとり、格子間の最小間隔長 $l_{\min}$ と d_{95} との比をパラメータとして、これと砂礫の通過率との関係を調べてみよう。

図-7は、 $\theta = 16^\circ$ と 20° の実験における総通過土砂量 V_{so} と発生土石流の総土砂量 V_{si} との比 V_{so}/V_{si} と $l_{\min}/d_{95}$ の関係をみたものである。図示の結果によれば V_{so}/V_{si} は $l_{\min}/d_{95} = 1.5$ 程度のところからかなり小さくなり、 $l_{\min}/d_{95}$ の増加に伴い大きくなっているが、データのばらつきはかなり大きい。 V_{so} がダム地点の土石流の特性値と透過部における砂礫の通過特性に依存し、ダム地点の特性値は時々刻々変化することを考えれば、このようなデータのばらつきは当然のことである。

そこで、ダム堆砂域の影響をあまり受けていないと考えられる土石流フロントの流砂量に着目し、 Q_{so}/Q_{sd} と $l_{\min}/d_{95}$ との関係をみると、

図-8のようになる。ここに、 Q_{so} は通過土石流フロントの流砂量、 Q_{sd} はダム無しの場合の土石流フロントの流砂量である。これによれば、 Q_{so}/Q_{sd} は $l_{\min}/d_{95}$ とかなりよい相関を示しているが、それでも十分と言えない。また、 $\theta = 16^\circ$ と 20° の結果を比較すると、同一の $l_{\min}/d_{95}$ に対する Q_{so}/Q_{sd} は前者において大きい。これは、上述したように、透過部の格子間距離のうちの $l_{\min}$ ばかりではなく、これ以外の幾何学的スケールや土石流の特性値そのものが関与していることを示唆するものである。これらのことを実験的に調べるためには莫大な時間と労力が必要である。

3.2 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

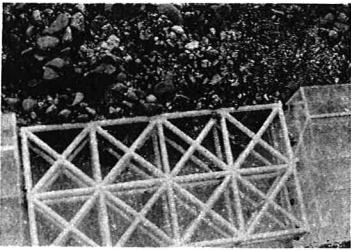


写真 1

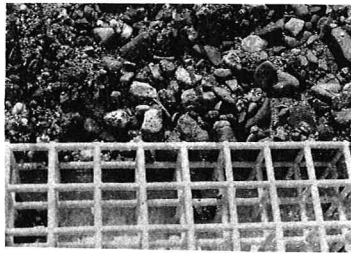


写真 2

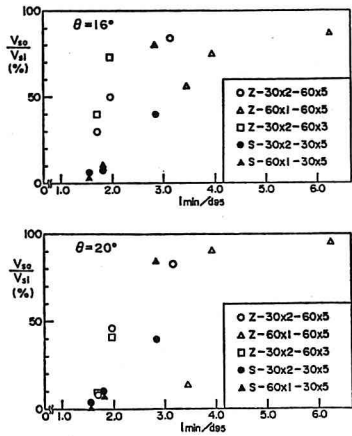


図-7 全土砂量の通過率

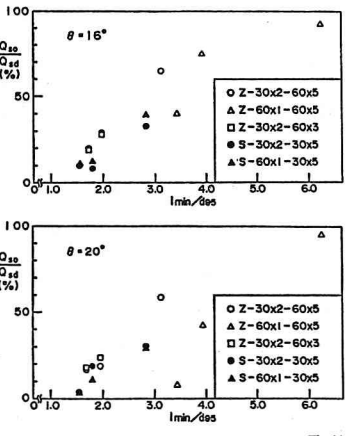


図-8 フロント流砂量の通過率

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る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最小のものを意味している。

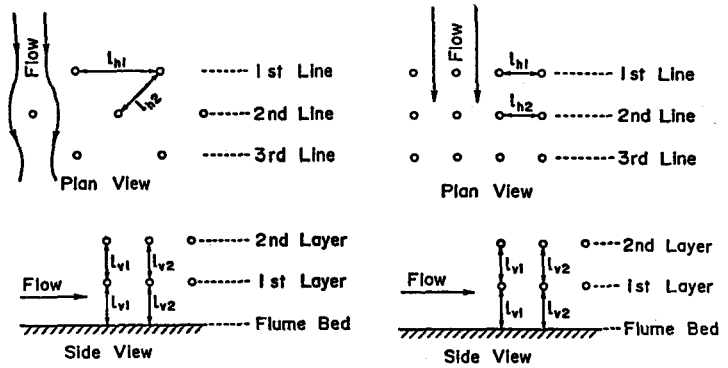


図-9 格子部の幾何学的スケール

図-9は、格子ダム部の砂礫の流れを模式的に示したものである。粒径 d_i の球形粒子が第 1列目を通しようとしたとき、これが格子に接触するような条件では、粒子はこの列を通過できないものとする。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、次のように書ける。

$$P_{1i} = (l_{h1} - d_i)(l_{v1} - d_i) / l_{h1} l_{v1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

同様に、第2列目の通過確率は、

$$P_{2i} = (l_{h2} - d_i)(l_{v2} - d_i) / l_{h2} l_{v2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

のようになる。上式の l_{h2} として、千鳥型では図-9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、次のように書ける。

$$P = \sum_{i=1}^n P_{1i} P_{2i} f_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

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。袖部が不透過構造になっている場合には、袖部に衝突する砂礫は通過しないものとすれば、式(3)は 次式のように書き改められる。

$$P = \frac{B_o}{B_d} \sum_{i=1}^n P_{1i} P_{2i} f_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 B_o は水通し幅、 B_d はダム幅である。

図-10は、式(4)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。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(4)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、実際には、実験値は実際の通過率を表していないため、式(3)あるいは式(4)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 支配方程式と境界条件

土石流に関しては、いくつかの流動則が提案されているが、ここでは、芦田・江頭^{2),3)}らのものを適用する。

水と砂礫の混合物に関する体積保存則および砂礫に関する体積保存則は、それぞれ次式で与えられる。

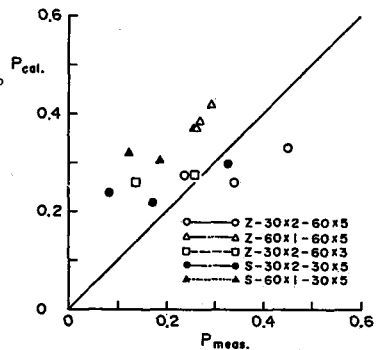


図-10 通過率に関する計算値と実験値と比較

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial vh}{\partial x} = -D/c_* \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial cvh}{\partial x} = -D \quad \dots\dots\dots(6)$$

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。ついで、運動量保存則は、

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \theta - g \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{(\sigma-1)h}{(\sigma-1)c+1} \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{vD}{c_* h} - \mu_k \frac{(\sigma-1)cg \cos \theta}{(\sigma-1)c+1} - f_b \frac{1}{(\sigma-1)c+1} \frac{v^2}{h} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 σ は砂礫の比重、 μ_k は砂礫間の動摩擦係数、 f_b 流体抵抗係数であり、次式で与えられる。

$$f_b = \frac{25}{4} \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{2/3} \left\{ \frac{1-c}{c} \right\}^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

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

河床位方程式および堆積速度式はそれぞれ次のようである。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = D / c_* \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$D / v = c_* \tan(\theta_e - \theta) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 θ_e は、土石流の平衡勾配であって、次式で与えられる。

$$\theta_e = \arctan \left\{ \mu_k \frac{(\sigma-1)c}{(\sigma-1)c+1} + f_b \frac{1}{(\sigma-1)c+1} \frac{v^2}{gh} \right\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

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(5)、(6)、(7)、(9)および式(10)の5本の式が用意されている。

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_{so} は、式(3)を用いれば、次式で与えられる。

$$Q_{so} = PQ_{sd} \quad \dots\dots\dots(12)$$

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。

$$D_d = (1-P)Q_{sd} / B \Delta x \quad \dots\dots\dots(13)$$

4.2 土石流の追跡

図-11は、千鳥型透過ダム($Z-30 \times 2-60 \times 5$)におけるダム前面の流砂量 Q_{sd} 、通過流砂量 Q_{so} 、ダム前面における土石流の濃度 c_d 、および通過土砂濃度 c_o 、通過土砂の平均粒径 d_{mo} 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} および土砂濃度 c_i に関する実

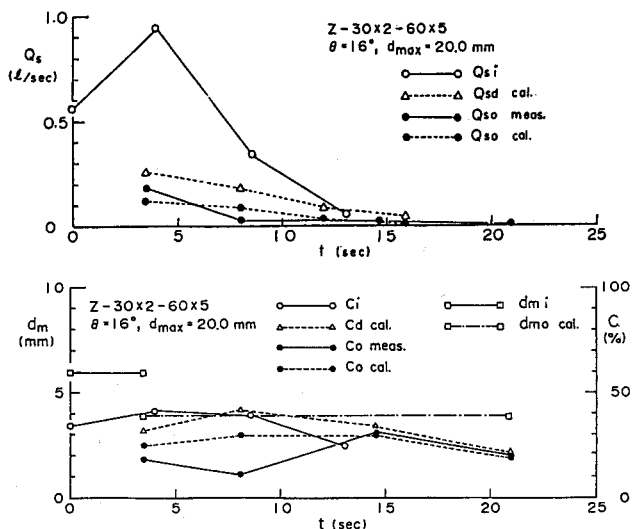


図-11 通過土砂量とその平均粒径、通過土砂濃度に関する計算値と実験値の比較

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_{so} および c_o に関する実験値と計算値はかなりよく一致していると見なしてもよく、現時点においては、十分に満足 of いく結果が得られていると考える。

図-12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。

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形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、従来の不透過ダムに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) 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。
- (3) 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。
- (4) 侵食・堆積を伴うような土石流の支配方程式、および上述の通過モデルを適用した土石流の追跡モデルを考案した。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。
- (5) (4)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の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。

本研究は、一部文部省科学研究費 試験研究(1) (代表者 芦田和男)の補助をうけている。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) 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。
- 2) 芦田和男・江頭進治・佐々木浩：斜面崩壊の発生と崩土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、pp.507-526。
- 3) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構、第32回水理講演会論文集、1988。

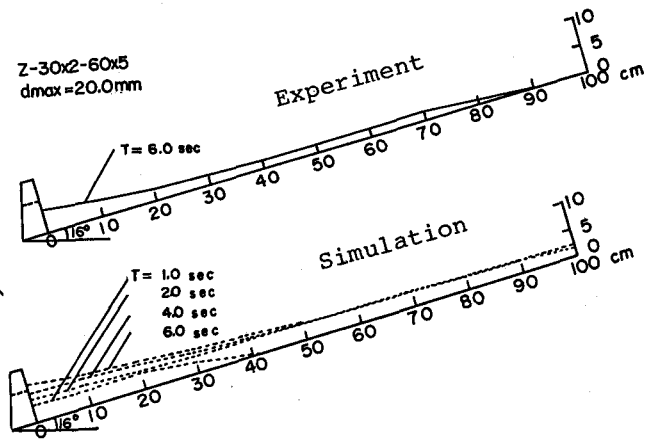


図-12 堆積形状に関する計算値と実験値の比較