

## 2 土石流の流下に伴い発生するせん断力、垂直荷重に関する実験

建設省土木研究所

○石川芳治、井良沢道也、福本晃久

ミシガン工科大学

James W. Vallance

(財) 砂防・地すべり技術センター

宮本邦明

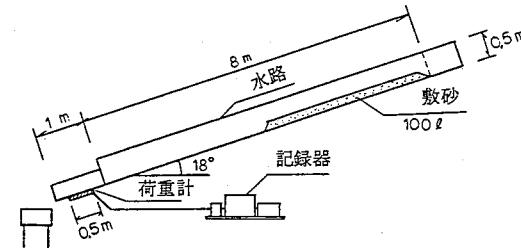
### 1.はじめに

土石流覆工等の土石流対策施設を設計する際には、土石流の流下に伴い流路底面に作用するせん断力及び垂直荷重を精度良く推定する必要がある。ここでは、水理模型実験により土砂の粒度分布、給水流量、水路床面の粗度を変化させて土石流を発生させ、水路床面に作用する垂直荷重、せん断力を同時に測定した。さらに土石流先端部の形状、流速、流動深、土砂濃度も同時に測定してこれらの値を土石流の運動方程式に代入して水路床面に作用するせん断力と垂直荷重を計算し、測定値と計算値の比較を行い、計算値の適合性を検討した。さらに土砂の粒度分布、水路床面の粗度がせん断力と垂直荷重に及ぼす影響についても検討した。

### 2. 実験の概要

実験は幅20cm、高さ50cm、長さ約9mの片面ガラスの固定床水路を用いて行った（図-1）。実験に使用した河床材料は図-2に示すような粒度分布を持ったA,B,C,3種の土砂である。

水路勾配は $18^{\circ}$ で固定し、水路上部に長さ5m、厚さ10cmで計100ℓの土砂を敷きならし、上流端より給水（ $1.5 \text{ ℓ/s} \sim 8.0 \text{ ℓ/s}$ ）して土石流を発生させた。水路下流部においては、水路床面の幅20cm、長さ50cmの部分に作用するせん断力（水路床面と平行方向）及び垂直荷重（水路床面に垂直方向）を測定するための荷重計を設置し、動歪計を介してデータレコーダにより記録した。またビデオカメラにより、土石流下時の形状、流動深を撮影した。さらに水路末端では土石流の先端部到達後1秒毎に流出した土石流を採取し、土砂濃度を測定した。実験条件を表-1に示す。



### 3. 土石流の運動方程式とモデル化

図-1 実験装置概念図

一次元の土石流の運動方程式は次式により表される。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = \rho b x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \dots \dots \dots \quad (1)$$

これを $z$ 方向及び $x$ 方向に長さ $\ell$ の区間I-IIについて土石流に作用する力を積分すると次のようになる

$$\rho u_m \frac{\partial A}{\partial t} + \rho \beta' u_m (u_m h_{out} - u_m h_{in}) = \rho A g \sin \theta - (P_{down} - P_{up}) - T \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ は土石流の密度、 $u_m$ は土石流の平均流速、 $A$ は区間 $\ell$ における土石流の側面積、 $\beta'$ は運動量補正係数(1.25)、 $h_{out}$ 、 $h_{in}$ は下流側と上流側の土石流の流動深、 $g$ は重力加速度、 $P_{down}$ 、 $P_{up}$ は下流側と上流側に作用する土石流圧及び $T$ は水路床面に平行に作用するせん断力である。

区間I-IIを流下する土石流の先端部を図-3に示すようにモデル化すると、実験において $\rho$ 、 $u_m$ 、 $\alpha$ 、 $h$ を測定することにより式(2)を用いて水路床面に平行に作用するせん断力 $T$ を計算することができる。なお、以下では単位幅当たりのせん断力及び垂直荷重を用い、 $T$ 及び $N$ の単位はdyne/cmとする。なお、計算により得られる荷重は土石流が区間I-IIを通過する状態に応じて図-4に示すように大きくは4段階に変化する。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 発生した土石流の概要

今回の実験において発生した土石流の水路末端(荷重計の近傍)における諸性質と給水流量、用いた土砂の粒度分布及び水路床面の粗度との関係を以下に述べる。

- (1) 土石流フロント部の最大流動深(図-5)：粗度が大きく土砂の粒径が大きい程流動深も大きい。
- (2) 土石流フロント部の流速(図-6)：給水流量が大きいほど流速は大きくなる。
- (3) 土石流のフロント部のピーク流量(図-7)：給水流量が大きい程ピーク流量も大きくなり、ピーク流量は給水流量の1.8~5.3倍になる。
- (4) 土石流フロント部の土砂濃度(図-8)：給水流量が小さい程土砂濃度がわずかながら高くなる。
- (5) 土石流フロント部の角度( $\alpha$ )(図-9)：給水流量が大きい程角度も大きくなる傾向がある。

##### 4.2 水路床に作用するせん断力と垂直荷重

模型実験により得られた各実験ケース毎の土石流の密度、平均流速、土石流先端部の縦断形状(流動深及びフロント部の角度)をもとに、式(2)に示した運動方程式に基づいて土石流通過に伴い水路床(長さ50cm)に作用する単位幅当たりのせん断力と垂直荷重を計算した。この計算結果と実験により得られたせん断力と垂直荷重の一例を図-4に示す。ほとんどの実験ケースで段階2~3に至るせん断力のピーク値は測定されず、基本的には図-4に示すようなピーク値の明確でない荷重の変化が測定された。各実験ケースの土石流フロント部におけるせん断力及び垂直荷重の最大値について計算値と実験値を比較したものを図-10及び図-11に示す。これらの図より計算値と実験値はほぼ適合しているものの粗度が大きい場合には実験値の方が計算値よりも大きく、粗度が小さい場合には実験値の方が小さくなる傾向が認められ、水路床の粗度がせん断力、垂直荷重に与える影響は大きいことが判明した。なお給水流量及び土石流の土砂の粒径による差は認められなかった。垂直荷重(N)に対するせん断力(T)の比( $T/N$ )に関して計算値と実験値を比較した結果を図-12に示す。水路床勾配が $18^\circ$ であるから $T/N \geq 0.32 = \tan 18^\circ$ であるが、土石流の先端部付近が非定常流であることの影響を受けて計算及び実測による $T/N$ は $\tan 18^\circ = 0.32$ よりも、実測では0.1N、計算では0.2N程度大きい値の範囲にある。従って土石流覆工等の設計において安全側を考慮すると、河床面に平行に作用するせん断力としては、土石流の自重の河床面に平行方向の分力の他にこのようなせん断力の増加を考慮する必要がある。

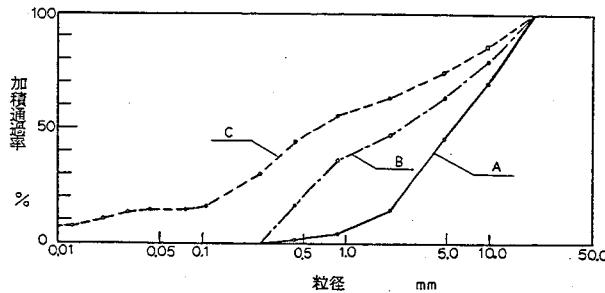


図-2 実験に用いた砂礫の粒径分布

表-1 実験ケース一覧表

| ケース | 給水流量<br>( $\ell/s$ ) | 実験砂 | 粗度 | 図の記号 |
|-----|----------------------|-----|----|------|
| 1   | 8.0                  | A   | A  | ●    |
| 2   | 8.0                  | A   | B  | ○    |
| 3   | 8.0                  | B   | B  | △    |
| 4   | 8.0                  | C   | B  | □    |
| 5   | 4.0                  | A   | A  | ●    |
| 6   | 4.0                  | A   | B  | ○    |
| 7   | 4.0                  | B   | A  | ▲    |
| 8   | 4.0                  | B   | B  | △    |
| 9   | 4.0                  | C   | C  | △    |
| 10  | 4.0                  | C   | B  | □    |
| 11  | 4.0                  | C   | C  | □    |
| 12  | 2.0                  | A   | A  | ●    |
| 13  | 2.0                  | B   | A  | ▲    |
| 14  | 2.0                  | B   | C  | △    |
| 15  | 2.0                  | C   | C  | □    |
| 16  | 1.5                  | A   | A  | ●    |
| 17  | 1.5                  | A   | B  | ○    |
| 18  | 1.5                  | B   | B  | △    |
| 19  | 1.5                  | C   | B  | □    |

\*粗度Aには粒径5~10mm(平均粒径7.5mm)を用いた  
粗度Bには粒径2.5~5mm(平均粒径3.8mm)を用いた  
粗度Cには粒径1.25~5mm(平均粒径3.1mm)を用いた

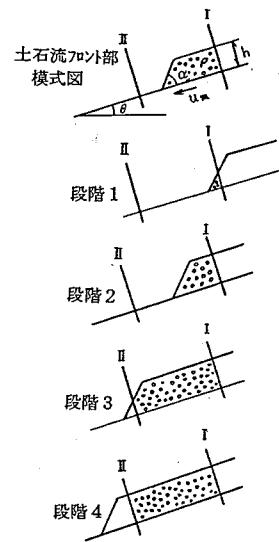


図-3 フロント部通過模式図

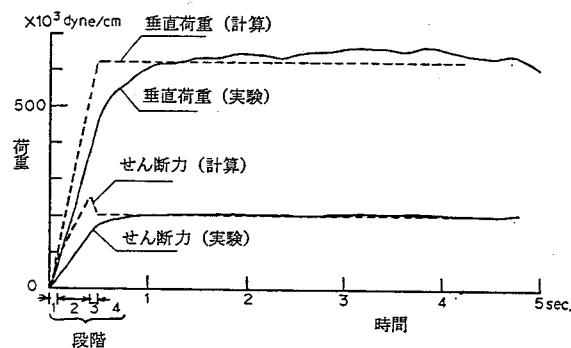


図-4 実験結果と計算結果の比較

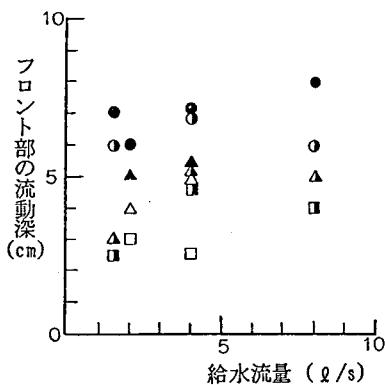


図-5 フロント部の流動深

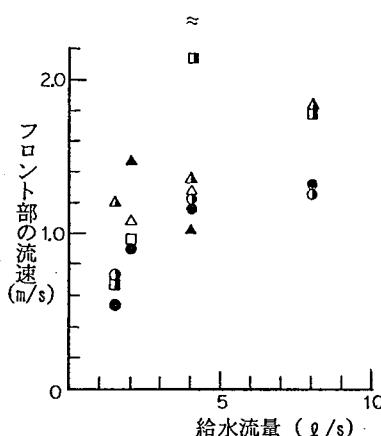


図-6 フロント部の流速

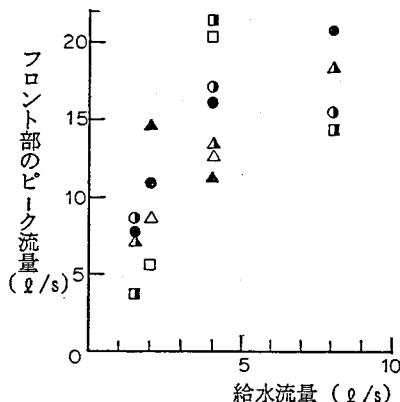


図-7 フロント部のピーク流量

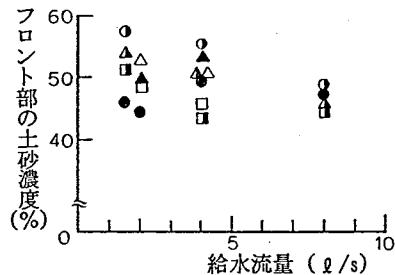


図-8 フロント部の土砂濃度

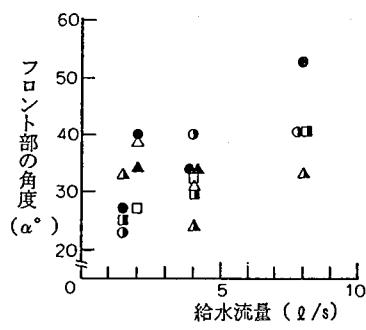


図-9 フロント部の角度

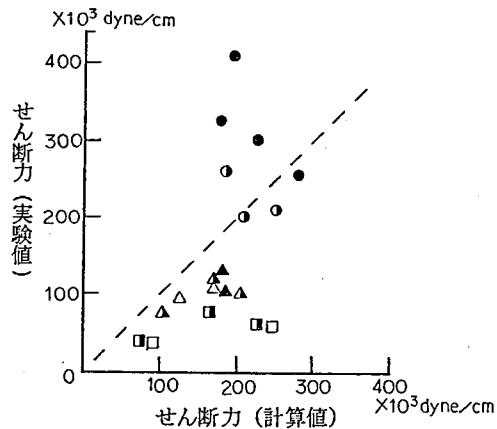


図-10 せん断力の計算値と実験値

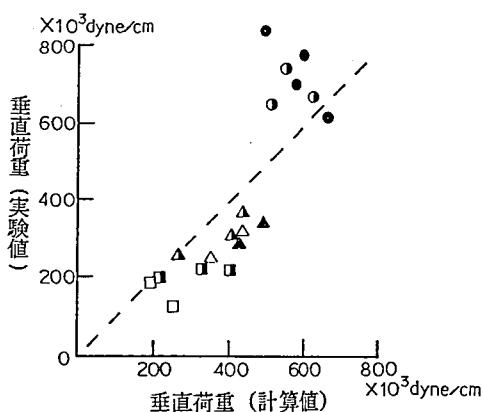


図-11 垂直荷重の計算値と実験値

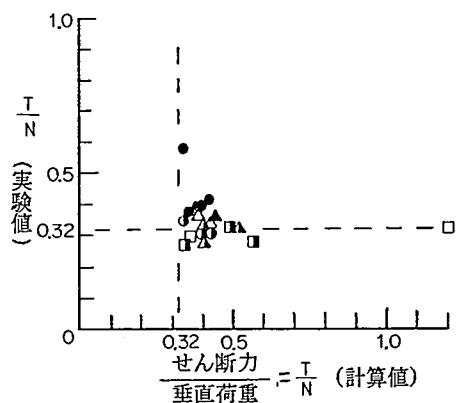


図-12 せん断力と垂直荷重の比

5.まとめ：土石流の通過時に水路床（河床面）に作用するせん断力と垂直荷重について、水理模型実験を行ってその値を測定するとともに、計算により求められた値と比較した。この結果、水路床の粗度が大きい場合にはせん断力、垂直荷重とも実験値が計算値よりも大きく、粗度が小さい場合には両荷重とも実測値の方が小さい傾向が認められた。またせん断力と垂直荷重の比（ $T/N$ ）は水路床上の静的釣合における比よりも1～2割大きい値を示した。従って土石流覆工等の設計においては安全を考慮してこのようなせん断力の増加を考慮する必要がある。