

## 流下域における土石流の制御法に関する研究

高橋 保・藤井 由之

### DEBRIS FLOW CONTROL ONCE UNDER WAY

By *Tamotsu* TAKAHASHI and *Yoshiyuki* FUJII

#### Synopsis

Efficacies of the newly devised methods to control debris flow once under way are discussed experimentally and numerically. These methods are retarding and storing the debris flow by the series of alternately projecting groynes, stopping the debris flow front by removing water from it through the grating layed on the bed or on the channel wall, and changing the flow regime from inertial to macro-viscous range, i. e., slow down the velocity by adding a kind of chemicals.

First, a numerical simulation method which is useful to discuss the behaviour of debris flow around such structures is presented. Then, the processes of retardation, deformation and stoppage of debris flow by the structures are examined by both the flume experiments and the numerical simulations.

Second, the characteristics of macro-viscous flow produced by adding water absorbent into debris flow are observed experimentally and a new flow equation to explain those characteristics is presented. After that, possibility and the problems to be cleared for the practical use are pointed out.

#### 1. 緒 論

我が国においては毎年どこかで土石流災害が発生しており、その強大な破壊力のために人命の損失を伴うことが多く、社会的に注目を集めており、有効な防止・軽減策の開発が急務となっている。従来、土石流対策として、構造物によるいわゆるハード対策と、危険地域からの避難を中心とするソフト対策とがとられているが、土石流危険渓流の数がおびただしいことから、近年ではソフト対策が注目をあびてきている。しかしながら、我が国の土地事情等を勘案すれば、やはりハード対策は重要であり、より有効かつ安価な土石流制御対策を考案して行く必要性が高い。

構造物による土石流対策の考え方としては、①土石流を発生させない、②発生した土石流を流下中に調節し、下流部に対して無害な量あるいは質のものに変化させる、③流動を渓流内で停止させる、④土石流を無害な範囲にのみ氾濫させたり、無害な場所へ誘導する、等があるであろう。このうち、従来主として用いられてきたのは、②あるいは③の考え方のうち、とくに砂防ダムの機能に依存するものである。中でも数多く築造されてきたコンクリート製の不透過型砂防ダムはその貯砂容量が十分に確保されている限りにおいては、機能を十分に発揮し土石流を完全に抑止することが可能であるが、土石流発生前の通常洪水による流砂によって満杯状態となり、土石流が来たときには十分な効力を発揮できない事例も多い。最近では、通常の流砂はそのまま通過させて土石流調節容量を確保しようというもろみから、鋼鉄製の透過型砂防ダムも建造されるようになってきている。これとて、一旦土石流を捕捉して満砂状態になってから以後の堆砂容量の自然の回復はおそらく困難で、永続的な土石流調節機能は期待できないであろう。

このようなことから、本論文においては、土石流流下域における調節機能が半永久的に確保できるのではないかとの期待から、新たに横堤群の設置による土石流の調節の可能性について検討した。また、すでに提案されている新工法の一つである水抜きスクリーンの機能評価も試みた。研究手法としては、横堤群の機能に関しては水路実験と数値シミュレーションを行い、水抜きスクリーンに関しては主として数値シミュレーションによった。さらに、土石流の流動時の性質そのものを変化させて、破壊力を低下させたり、停止させたりできないだろうかという発想から、流動中の土石流に市販の吸水剤を混入することを考えた。これに関しては、まず、吸水剤混入による粒子間隙流体の粘性増加が流動則に与える影響について基礎的な実験および考察を行い、次いで実験水路を流下中の砂礫型土石流に吸水剤を投入して、その後の土石流の挙動を観察し、このような手法の実用化の可能性を模索した。

2. 数値シミュレーション法

実際の土石流では、おそらく流れに含まれている微細粒子の浮遊の影響により流動性が大きく、かなりの緩勾配の区間でも流下することが稀ではない。実験室における模型実験では、通常の砂礫を用いたのはこのような性質の再現がスケールの関係で難しい場合が多い。この点、数値シミュレーション法ではこの

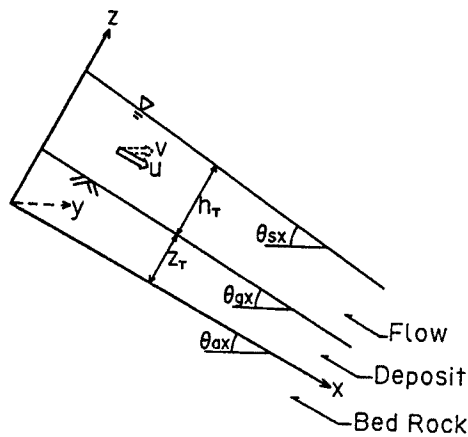


Fig. 1. Coordinate system.

このような性質を再現することは比較的容易であり、また、種々の場合について簡単に数値実験を行うことができるという利点を持っている。ただし、土石流ではその流動則等がまだ確立されたものとは言い難い状況にあるので、用いる流動モデルがどの程度の妥当性を持っているのかを実験によって検証することも重要である。

ここでは著者らが従来行ってきた土石流の数値シミュレーション法<sup>1),2),3)</sup>を横堤群や水抜きスクリーンの機能評価に便利なような形式で示す。

2.1 基礎方程式

Fig. 1 に示したように、x-y 平面を基礎地盤上にとり、z 軸をそれに垂直に設定する。流動層と堆積層の2層に分けて考え、それぞれの厚さを  $h_T$ ,  $z_T$  と定義する。

流動層の運動量式は

x 方向:

$$\frac{\partial M_T}{\partial t} + \beta_M \frac{\partial u M_T}{\partial x} + \beta_M \frac{\partial v M_T}{\partial y} = gh_T \left\{ \sin\theta_{ax} - \cos\theta_{ax} \frac{\partial(z_T + h_T)}{\partial x} \right\} - \frac{\tau_x}{\rho_T} \dots\dots\dots (1)$$

y 方向:

$$\frac{\partial N_T}{\partial t} + \beta_M \frac{\partial u N_T}{\partial x} + \beta_M \frac{\partial v N_T}{\partial y} = gh_T \left\{ \sin\theta_{ay} - \cos\theta_{ay} \frac{\partial(z_T + h_T)}{\partial y} \right\} - \frac{\tau_y}{\rho_T} \dots\dots\dots (2)$$

のように表わされる。ここに、 $M_T$ ,  $N_T$ : x, y 方向の単位幅流量,  $u$ ,  $v$ : x, y 方向の流速,  $\beta_M$ : 運動量補正係数,  $\rho_T$ : パルクの密度,  $\tau_x$ ,  $\tau_y$ : x, y 方向の底面せん断力である。運動量補正係数は、石礫型土石流 ( $C_L \geq 0.3$ ) では  $\beta_M = 1.25$  であるが<sup>4)</sup>、掃流状集合流動および掃流の領域では、便宜的ではあるが、

$$\beta_M = 1.05 + 0.74C_L (C_L < 0.3, C_L: \text{粗砂濃度}) \dots\dots\dots (3)$$

のように与えられるものとする。

流動層の連続式は、水、主に衝突や掃流によって輸送される粗砂、および浮遊によって輸送される細砂

の3相に分けて考え、次のように表示する。

水：

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial M_w}{\partial x} + \frac{\partial N_w}{\partial y} = i_{wED} + i_{wZ} \dots\dots\dots (4)$$

粗砂：

$$\frac{\partial h_L}{\partial t} + \frac{\partial M_L}{\partial x} + \frac{\partial N_L}{\partial y} = i_{LED} \dots\dots\dots (5)$$

細砂：

$$\frac{\partial h_F}{\partial t} + \frac{\partial M_F}{\partial x} + \frac{\partial N_F}{\partial y} = i_{FED} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $h_w, h_L, h_F$ ：単位面積上の流動層内の水、粗砂、細砂の体積、 $M_w, M_L, M_F, N_w, N_L, N_F$ ：それぞれ各相の  $x$  方向および  $y$  方向の単位幅流量、 $i_{wED}, i_{LED}, i_{FED}$ ：侵食または堆積に伴う各相の単位時間、単位面積当りの移動量、 $i_{wZ}$ ：透水速度であり、

$$h_T = h_w + h_L + h_F \dots\dots\dots (7)$$

$$i_T = i_w + i_L + i_F \dots\dots\dots (8)$$

である。ただし、 $i_T$ ：侵食または堆積速度である。

堆積層の連続式は

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = -i_{wED} - i_{wZ} + i_{wSC} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial z_L}{\partial t} = -i_{LED} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\partial z_F}{\partial t} = -i_{FED} \dots\dots\dots (11)$$

である。ここに、 $z_w, z_L, z_F$ ：単位面積の堆積層中の各相の体積、 $q_x, q_y$ ：各方向単位幅当りの横浸透による流出入水量、 $i_{wSC}$ ：底面スクリーンがある場合の水の流出速度である。堆積層厚  $z_T$  は

$$z_T = \max\left(\frac{z_L}{c_{*L}}, z_L + \frac{z_F}{c_{*F}}\right) \dots\dots\dots (12)$$

とする。ここで、 $c_{*L}, c_{*F}$ ：粗砂、細砂の堆積濃度である。

抵抗則は

$$\frac{\tau_x}{\rho_T} = \left(\frac{U}{u_*}\right)^{-2} uu_a \dots\dots\dots (13a)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_T} = \left(\frac{U}{u_*}\right)^{-2} vu_a \dots\dots\dots (13b)$$

のように表現する。ただし、 $u_a$  は流速の絶対値であって

$$u_a = \sqrt{u^2 + v^2 + uv \sin \theta_{ax} \sin \theta_{ay}} \dots\dots\dots (14)$$

とする。

(13) 式に含まれている流速係数は、石礫型土石流では<sup>4)</sup>

$$\frac{U}{u_*} = \frac{2}{5} \left(\frac{1}{a_i \sin \alpha} \frac{\rho_T}{\sigma}\right)^{1/2} \left\{ \left(\frac{c_{*L}}{c_L}\right)^{1/3} - 1 \right\} \frac{h_T}{d_L} \dots\dots\dots (15)$$

掃流状集合流動の領域 ( $0.02 \leq c_L < 0.3^5$ ) においては、後述の従来の実験結果のデータの平均的傾向から、

$$\frac{U}{u_*} = 0.8 \frac{\rho_F h_T}{(\sigma - \rho_F) d_L} \dots\dots\dots (16)$$

掃流の領域 ( $c_L < 0.02$ ) においては、芦田・道上<sup>6)</sup>に従い

$$\frac{U}{u_*} = 6.0 + 5.75 \frac{h_T}{d_L(1+2\tau_*)} \dots\dots\dots (17)$$

とする。ただし、 $a_s \sin \alpha$ : 定数 ( $\approx 0.02$ )  $\sigma$ : 砂礫の密度、 $\rho_F$  微細砂を浮遊させた水の密度、 $\tau_*$ : 無次元掃流力である。

侵食・堆積速度は高橋ら<sup>2)</sup>の堆積速度式をそのまま侵食にも拡張して用いられるものとして、

$$i_T = \beta_{ED} \frac{c_L - c_{L\infty}}{c_{*L}} \frac{M_a}{d_L} \dots\dots\dots (18)$$

とする。ここに、 $\beta_{ED}$ : 係数 ( $\approx 0.05$ )、 $c_{L\infty}$ : 平衡濃度、 $M_a$ : 単位幅流量の絶対値である。

(18) 式に含まれる平衡濃度は、土石流の領域では<sup>4)</sup>

$$c_{L\infty} = \frac{\rho_F \tan \theta_{sa}}{(\sigma - \rho_F)(\tan \phi - \tan \theta_{sa})} \dots\dots\dots (19)$$

掃流状集合流動の領域では、高橋の式<sup>5)</sup>を少し変形して、

$$c_{L\infty} = \frac{2.3\rho_F}{(\sigma - \rho_F)} \left( \frac{\tan \theta_{sa}}{\tan \phi - \tan \theta_{sa}} \right)^2 \left( 1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right)^2 \dots\dots\dots (20)$$

掃流の領域では、Takahashi<sup>7)</sup>に従って、

$$c_{L\infty} = (1 + 5 \tan \theta_{sa}) \frac{\rho_F}{\sigma - \rho_F} \tan \theta_{sa} \left( 1 - \alpha_0^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left( 1 - \alpha_0 \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \dots\dots\dots (21)$$

のようにして求める。ここで、 $\tan \phi$ : 石礫群の内部摩擦係数、 $\tau_{*c}$ : 限界掃流力、 $\alpha_0$ : 係数、 $\theta_{sa}$ : 流れ方向の水面勾配であり、

$$\alpha_0^2 = \frac{2 \left( 0.425 - \frac{\sigma}{\sigma - \rho_F} \tan \theta_{sa} \right)}{1 - \frac{\sigma}{\sigma - \rho_F} \tan \theta_{sa}} \dots\dots\dots (22)$$

$$\tan \theta_{sa} = \frac{u \sin \theta_{sx} + v \sin \theta_{sy}}{(u^2 \cos^2 \theta_{sx} + v^2 \cos^2 \theta_{sy})^{1/2}} \dots\dots\dots (23)$$

ただし、 $\theta_{sx}$ 、 $\theta_{sy}$ :  $x$ 、 $y$  方向の水面勾配である。

さらに、

$$M_a = \sqrt{M^2 + N^2 + 2MN \sin \theta_{sx} \sin \theta_{sy}} \dots\dots\dots (24)$$

である。

$i_T$  は全体としての侵食・堆積の速度を表すものであるが、これを各相の成分に分けるためには、侵食 ( $i_T > 0$ ) のとき、

$$i_{WED} = (z_W/z_T) i_T, \quad i_{LED} = (z_L/z_T) i_T, \quad i_{FED} = (z_F/z_T) i_T \dots\dots\dots (25)$$

堆積 ( $i_T < 0$ ) のとき、

$$i_{WED} = (1 - c_{Fh})(1 - c_{*L}) i_T, \quad i_{LED} = c_{*L} i_T, \quad i_{FED} = c_{Fh}(1 - c_{*L}) i_T \dots\dots\dots (26)$$

のようにする。

浸透流は実際には乱流として流れる場合も多いと思われるが、ダルシー則に従うものとして取り扱う。

まず、メッシュを横断する方向の浸透流量は、

$$q_x = -k_z (\partial h_s / \partial x) S_{RZ} \cdot z_W \dots\dots\dots (27a)$$

$$q_y = -k_z (\partial h_s / \partial y) S_{RZ} \cdot z_W \dots\dots\dots (27b)$$

とする。ここに、 $k_z$ : 堆積層の飽和透水係数、 $\partial h_s / \partial x$ 、 $\partial h_s / \partial y$ :  $x$ 、 $y$  方向の動水勾配、 $S_{RZ}$ : 堆積層の飽和度であり、

$$k_z = \frac{\rho_w g (1 - c_{TZ})^3 d_s^2}{144 \cdot \mu_f \cdot c_{TZ}^2} \dots\dots\dots (28)$$

とする。ただし、 $d_s$ ：有効粒径（＝10% 粒径）、 $\mu_f$ ：流体の粘性係数、 $c_{TZ}$ ：堆積層の土砂濃度である。また、縦方向の浸透流量は

$$i_{wz} = k'_z \left( \frac{\partial h_s}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (29)$$

とする。この場合の透水係数は、堆積層が不飽和である場合も考慮に入れるものとし、河野・西垣<sup>9)</sup>の実験式により、

$$k'_z = k_z \cdot S_{rz}^{3.2} \dots\dots\dots (30)$$

とする。

2.2 基礎方程式の差分化

前述の基礎方程式を差分化して示す、

運動量方程式（1）および（2）は

$$\begin{aligned} & \frac{M_{Ti,j+1/2}^{n+2} - M_{Ti,j+1/2}^n}{2\Delta t} + \beta_M \frac{(uM_T)_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - (uM_T)_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}}{\Delta x} \\ & + \beta_M \frac{(vM_T)_{i,j+1}^{n+1} - (vM_T)_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = g \frac{h_{Ti-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \\ & \left\{ \frac{\sin\theta_{axi-1/2,j+1/2}^{n+1} + \sin\theta_{axi+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} - \frac{\cos\theta_{axi-1/2,j+1/2}^{n+1} + \cos\theta_{axi+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \right. \\ & \left. \cdot \frac{(z_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1})}{\Delta x} \right\} - \frac{c_{xi,j+1/2}^{n+1}}{(\rho_{Ti-1/2,j+1/2}^{n+1} + \rho_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1})/2} \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ti+1/2,j}^{n+2} - N_{Ti+1/2,j}^n}{2\Delta t} + \beta_M \frac{(uN_T)_{i+1,j}^{n+1} - (uN_T)_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \beta_M \frac{(vN_T)_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - (vN_T)_{i+1/2,j-1/2}^{n+1}}{\Delta y} \\ & = g \frac{h_{Ti+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \left\{ \frac{\sin\theta_{ayi+1/2,j-1/2}^{n+1} + \sin\theta_{ayi+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \right. \\ & \left. - \frac{\cos\theta_{ayi+1/2,j-1/2}^{n+1} + \cos\theta_{ayi+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \cdot \frac{(z_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1})}{\Delta y} \right. \\ & \left. - \frac{(z_{Ti+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{Ti+1/2,j-1/2}^{n+1})}{(\rho_{Ti+1/2,j-1/2}^{n+1} + \rho_{Ti+1/2,j+1/2}^{n+1})/2} \right\} \dots\dots\dots (32) \end{aligned}$$

のように差分化される。ここで、非線形項は風上差分法を用いるものとし、次のように表わされる<sup>9)</sup>。

$$(uM_T)_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} = \begin{cases} \dot{u}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n & (\dot{u}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} \geq 0) \\ \dot{u}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} \bar{M}_{Ti+1,j+1/2}^n & (\dot{u}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (33)$$

$$(vN_T)_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} = \begin{cases} \dot{v}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} \bar{N}_{Ti+1/2,j+1/2}^n & (\dot{v}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} \geq 0) \\ \dot{v}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} \bar{N}_{Ti+1/2,j+1}^n & (\dot{v}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (34)$$

$$(vM_T)_{i,j}^{n+1} = \begin{cases} v_{i+1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n + v_{i-1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n & (v_{i+1/2,j}^{n+1} > 0, \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n > 0, v_{i-1/2,j}^{n+1} < 0, \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n < 0) \\ v_{i+1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n + v_{i-1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n & (v_{i+1/2,j}^{n+1} < 0, \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n > 0, v_{i-1/2,j}^{n+1} > 0, \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n < 0) \\ v_{i+1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n & (v_{i+1/2,j}^{n+1} > 0, \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n > 0, (v_{i-1/2,j}^{n+1} \geq 0 \text{ or } \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n \geq 0)) \\ v_{i-1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n & (v_{i-1/2,j}^{n+1} < 0, \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n < 0, (v_{i+1/2,j}^{n+1} \leq 0 \text{ or } \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n \leq 0)) \\ v_{i+1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n & (v_{i+1/2,j}^{n+1} < 0, \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n > 0, (v_{i-1/2,j}^{n+1} \leq 0 \text{ or } \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n \geq 0)) \\ v_{i-1/2,j}^{n+1} \cdot \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n & (v_{i-1/2,j}^{n+1} > 0, \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n < 0, (v_{i+1/2,j}^{n+1} \geq 0 \text{ or } \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n \leq 0)) \\ 0 & ((v_{i+1/2,j}^{n+1} \leq 0, \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n \geq 0, v_{i-1/2,j}^{n+1} \geq 0, \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n \leq 0) \\ & \text{or } (v_{i+1/2,j}^{n+1} \geq 0, \bar{M}_{Ti,j-1/2}^n \leq 0, v_{i-1/2,j}^{n+1} \leq 0, \bar{M}_{Ti,j+1/2}^n \geq 0)) \end{cases} \dots\dots\dots (35)$$

$$(uN_T)_{i,j}^{n+1} = \begin{cases} u_{i,j+1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n + u_{i,j-1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n & (u_{i,j+1/2}^{n+1} > 0, \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n > 0, u_{i,j-1/2}^{n+1} < 0, \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n < 0) \\ u_{i,j+1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n + u_{i,j-1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n & (u_{i,j+1/2}^{n+1} < 0, \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n > 0, u_{i,j-1/2}^{n+1} > 0, \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n < 0) \\ u_{i,j+1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n & (u_{i,j+1/2}^{n+1} > 0, \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n > 0, (u_{i,j-1/2}^{n+1} \ge 0 \text{ or } \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n \ge 0)) \\ u_{i,j-1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n & (u_{i,j-1/2}^{n+1} < 0, \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n < 0, (u_{i,j+1/2}^{n+1} \le 0 \text{ or } \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n \le 0)) \\ u_{i,j+1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n & (u_{i,j+1/2}^{n+1} < 0, \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n > 0, (u_{i,j-1/2}^{n+1} \le 0 \text{ or } \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n \ge 0)) \\ u_{i,j-1/2}^{n+1} \cdot \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n & (u_{i,j-1/2}^{n+1} > 0, \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n < 0, (u_{i,j+1/2}^{n+1} \ge 0 \text{ or } \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n \le 0)) \\ 0 & ((u_{i,j+1/2}^{n+1} \le 0, \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n \ge 0, u_{i,j-1/2}^{n+1} \ge 0, \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n \le 0) \\ & \text{or } (u_{i,j+1/2}^{n+1} \ge 0, \bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n \le 0, u_{i,j-1/2}^{n+1} \le 0, \bar{N}_{T_{i-1/2,j}}^n \ge 0)) \end{cases} \quad (36)$$

ここで、 $\bar{M}_T, \bar{N}_T$  は時間平均された単位幅流量で、

$$\bar{M}_{T_{i,j+1/2}}^n = \frac{M_{T_{i,j+1/2}}^{n-2} + M_{T_{i,j+1/2}}^n}{2} \quad (37a)$$

$$\bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n = \frac{N_{T_{i+1/2,j}}^{n-2} + N_{T_{i+1/2,j}}^n}{2} \quad (37b)$$

である。また、流速  $u, v$  はメッシュ中央と境界の両方で定義され、メッシュ境界の流速は

$$u_{i,j+1/2}^{n+1} = \frac{\bar{M}_{T_{i,j+1/2}}^n}{(h_{T_{i-1/2,j+1/2}}^{n-1} + h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1} + h_{T_{i-1/2,j+1/2}}^{n+1} + h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n-1})/4} \quad (38a)$$

$$v_{i+1/2,j}^{n+1} = \frac{\bar{N}_{T_{i+1/2,j}}^n}{(h_{T_{i+1/2,j-1/2}}^{n-1} + h_{T_{i+1/2,j-1/2}}^{n+1} + h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n-1} + h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1})/4} \quad (38b)$$

メッシュ中央の流速は

$$\dot{u}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} = \frac{u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i+1,j+1/2}^{n+1}}{2} \quad (39a)$$

$$\dot{v}_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} = \frac{v_{i+1/2,j}^{n+1} + v_{i+1/2,j+1}^{n+1}}{2} \quad (39b)$$

のように定義する。

流量および流砂量は、

$$M_{L_{i,j+1/2}}^{n+2} = \begin{cases} (h_{L_{i-1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i-1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} & (M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} > 0) \\ (h_{L_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} & (M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} < 0) \end{cases} \quad (40a)$$

$$M_{R_{i,j+1/2}}^{n+2} = \begin{cases} (h_{R_{i-1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i-1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} & (M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} > 0) \\ (h_{R_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} & (M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} < 0) \end{cases} \quad (40b)$$

$$M_{W_{i,j+1/2}}^{n+2} = \begin{cases} (h_{W_{i-1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i-1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} & (M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} > 0) \\ (h_{W_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} & (M_{T_{i,j+1/2}}^{n+2} < 0) \end{cases} \quad (40c)$$

$$N_{L_{i+1/2,j}}^{n+1} = \begin{cases} (h_{L_{i+1/2,j-1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j-1/2}}^{n+1}) \cdot N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} & (N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} > 0) \\ (h_{L_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} & (N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} < 0) \end{cases} \quad (40d)$$

$$N_{R_{i+1/2,j}}^{n+1} = \begin{cases} (h_{R_{i+1/2,j-1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j-1/2}}^{n+1}) \cdot N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} & (N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} > 0) \\ (h_{R_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} & (N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} < 0) \end{cases} \quad (40e)$$

$$N_{W_{i+1/2,j}}^{n+1} = \begin{cases} (h_{W_{i+1/2,j-1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j-1/2}}^{n+1}) \cdot N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} & (N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} > 0) \\ (h_{W_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}/h_{T_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1}) \cdot N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} & (N_{T_{i+1/2,j}}^{n+1} < 0) \end{cases} \quad (40f)$$

として求まる。

連続式 (4), (5), (6) および (9), (10), (11) は、それぞれ、

$$\frac{h_{W_{i+1/2,j+1/2}}^{n+1} - h_{W_{i+1/2,j+1/2}}^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{M_{W_{i+1,j+1/2}}^n - M_{W_{i,j+1/2}}^n}{\Delta x} + \frac{N_{W_{i+1/2,j+1}}^n - N_{W_{i+1/2,j}}^n}{\Delta y}$$

$$= i_{WEDi+1/2,j+1/2}^{n+1} + i_{Wz,i+1/2,j+1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (41)$$

$$\frac{h_{Li+1/2,j+1/2}^{n+1} - h_{Li+1/2,j+1/2}^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{M_{Li+1,j+1/2}^n - M_{Li,j+1/2}^n}{\Delta x} + \frac{N_{Li+1/2,j+1}^n - N_{Li+1/2,j}^n}{\Delta y}$$

$$= i_{LEDi+1/2,j+1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (42)$$

$$\frac{h_{Fi+1/2,j+1/2}^{n+1} - h_{Fi+1/2,j+1/2}^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{M_{Fi+1,j+1/2}^n - M_{Fi,j+1/2}^n}{\Delta x} + \frac{N_{Fi+1/2,j+1}^n - N_{Fi+1/2,j}^n}{\Delta y}$$

$$= i_{FEDi+1/2,j+1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (43)$$

$$\frac{z_{Wi+1/2,j+1/2}^{n+1} - z_{Wi+1/2,j+1/2}^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{Q_{Wxi+1,j+1/2}^n - Q_{Wxi,j+1/2}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{Wyi+1/2,j+1}^n - Q_{Wyi+1/2,j}^n}{\Delta y}$$

$$= -i_{WEDi+1/2,j+1/2}^{n+1} - i_{WZi+1/2,j+1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (44)$$

$$\frac{z_{Li+1/2,j+1/2}^{n+1} - z_{Li+1/2,j+1/2}^{n-1}}{2\Delta t} = -i_{LEDi+1/2,j+1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (45)$$

$$\frac{z_{Fi+1/2,j+1/2}^{n+1} - z_{Fi+1/2,j+1/2}^{n-1}}{2\Delta t} = -i_{FEDi+1/2,j+1/2}^{n+1} \dots\dots\dots (46)$$

のように差分化される。

(12) 式以下の各式は差分化の操作は不要であり、メッシュ中央の各変数の値によって計算可能である。ただし、抵抗則における各変数の値は、前後2メッシュの値を平均操作したものをを用いる。

境界条件としては、流入する土石流の流量ハイドログラフおよび粗砂、細砂それぞれの濃度を与える。水路下流端からの流出は段落ち流れとして取り扱う。流れの先端条件としては従来と同様に流動深1mmの閾値を設け、それよりも流動深が小さく計算されるメッシュからの流出は0とする。堆積層内の浸透流についても同様である。

### 3. 横堤群による土石流の制御

#### 3.1 実験方法と実験条件

実験には Fig. 2 に示すように、一方の側壁をガラス張りとした、幅20cm、長さ17mの可変勾配水路を用いた。水路下流端より7.2mの位置に高さ10cmの堰を設置し、それから上流4mの区間に実験材料の砂を堆積させておく、堰より下流の水路床には粒径2.4mmの均一砂を粗度として貼り、堰から下流4.0m～5.2mの範囲に板で作った横堤群を設置する。横堤群の上流側と下流側で側壁を通してビデオ撮影を行い、横堤群への流入ハイドログラフと横堤群からの流出ハイドログラフを読みとった。また、横堤群の上方からもビデオ撮影を行い、流動の状況および水位、堆積厚の変化を読み取った。下流端では流れを採取して砂濃度を測定した。実験条件としては、横堤群のパターン、水路勾配、土砂の粒度分布、供給水量を変化させた。横堤群の配置パターンは Fig. 3 に示す7通りであり、実験に使用した土砂の特性は Fig. 4 に示す通りである。数値実験のみを行ったケースを含めて、全実験ケースを Table 1 にまとめておく。

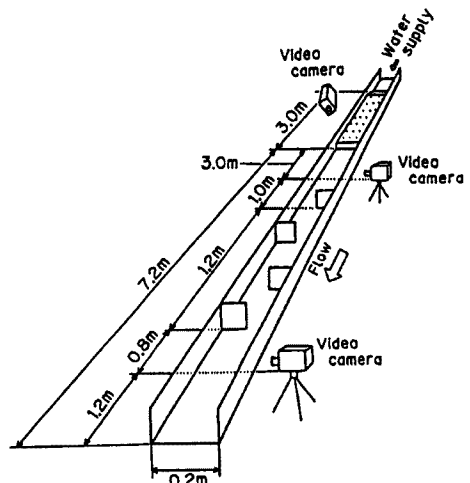


Fig. 2. Experimental flume and camera set up.

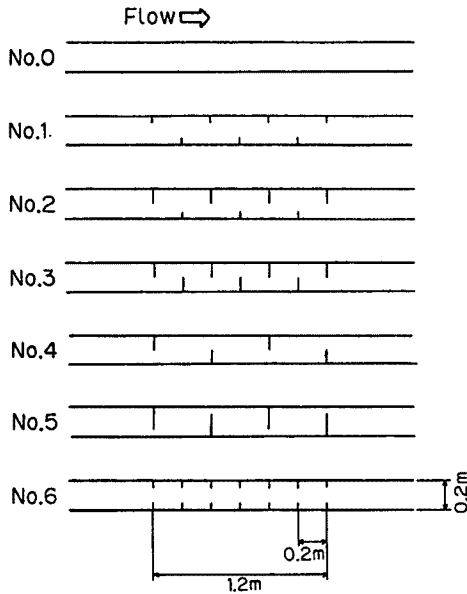


Fig. 3. Setting of groynes in the experiments.

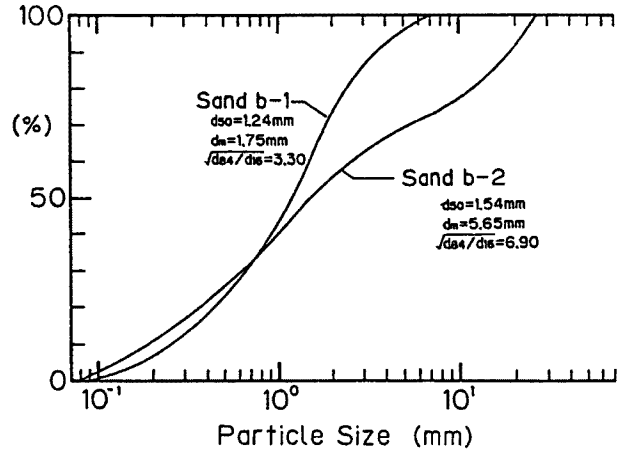


Fig. 4. Particle size distributions in the experiments materials.

3.2 実験結果とその考察

無施設部における先端移動速度と横堤群を通過中の先端移動速度の比較を Fig. 5 に示す。予想される通り、水通し部の幅が狭いほど、上下流方向の横堤間隔が小さいほど減速効果は大きい。また、流量の多少や、流路の平均勾配の緩急による流入土石流の先端移動速度の違いよりもむしろ横堤の配置パターンによって横堤群中での移動速度が規定されているようである。

Fig. 6 は同一の流入土石流に対して異なるパターンの横堤群を設けた場合に得られた下流側ハイドログラフの比較を示したものである。横堤の張り出し幅の小さいものでは先端は減速されているものの、ピーク流量はほとんど減少せず、逆に大きくなっているケースさえ存在する。横堤の張り出し幅の大きい場合には、減速効果とともにピーク流量の減少効果も著しい。

Fig. 7 (a) は流し終わった後の最終堆積厚の等高線図である。ただし、これは一旦先端部の高濃度の部分を堆積させた後に後続流によって多少侵食された結果を示しているものであるから、これだけで横堤群の貯留効果を論ずるのは十分ではないが、このような堆積厚さの違いは貯留効果を示す一つの有用な指標であるとみなされる。張り出し幅の大きいものや横堤間隔の小さいもので貯留効果の大きいこと、横堤群の中の流れの状況等をうかがい知ることができる。

最大粒径の大きな土石流の場合、水通し幅が狭ければ水通し部で粗粒土砂の噛み合わせによってほとんどの部分が捕捉されてしまう場合も生じるが、それよりも水通し幅が広い場合には粒度の違いによる特に顕著な相違は見出せなかった。

次に数値実験の結果について述べる。計算条件としては、 $\Delta x = \Delta y = 0.05 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0.002 \text{ sec}$ ,  $\beta_{ED} = 0.05$ ,  $\tan\phi = 0.57$ ,  $c_* = 0.65$ ,  $c_{*L} = 0.5$ ,  $c_{*F} = 0.3$  のように与えた。また、上流側の境界条件は、同じ条件で発生させた土石流の当該地点におけるハイドログラフの計測値を平均して与えたものである。さらに、簡単のため、横堤は常にメッシュ境界上で1メッシュ幅に一致するように与え、その境界を通過する流量が0となるものとしている。

Fig. 8 には流量ハイドログラフの実験値と計算値の比較を示す。ただし、上流側の地点の計算値は境界条件として与えたものである。したがって、下流側の実験値と計算値の一致の程度が問題となるが、図は計算によってほぼ妥当な結果が得られることを示している。なお、計算は12ケースについて行っている。



Table 1. Experimental conditions in Series B

Run No.	$\theta$ (deg)	Pattern No.	$Q_{in}$ (l/s)	$t_{max}$ (sec)	Sand No.	Exp.	Cal.
B- 1	16	0	0.5	20	b-1	○	○
B- 2	16	1	0.5	20	b-1	○	○
B- 3	16	3	0.5	20	b-1	○	○
B- 4	16	4	0.5	20	b-1	○	○
B- 5	16	5	0.5	20	b-1	○	○
B- 6	16	0	1.0	20	b-1	○	
B- 7	16	1	1.0	20	b-1	○	
B- 8	16	2	1.0	20	b-1	○	
B- 9	16	3	1.0	20	b-1	○	○
B-10	16	4	1.0	20	b-1	○	○
B-11	16	5	1.0	20	b-1	○	
B-12	20	0	0.5	20	b-1	○	
B-13	20	1	0.5	20	b-1	○	
B-14	20	3	0.5	20	b-1	○	○
B-15	20	4	0.5	20	b-1	○	○
B-16	20	0	1.0	20	b-1	○	
B-17	20	1	1.0	20	b-1	○	
B-18	20	2	1.0	20	b-1	○	
B-19	20	3	1.0	20	b-1	○	○
B-20	20	4	1.0	20	b-1	○	○
B-21	20	5	1.0	20	b-1	○	
B-22	20	3	1.0	10	b-1	○	○
B-23	16	4	1.0	20	b-2	○	
B-24	20	4	1.0	20	b-2	○	
B-25	16	6	0.5	20	b-1		○

るが、計算と実験の一致の程度はおおむね同様である。

Fig. 7 (b) は計算で得られた堆積厚分布の等高線図である。Fig. 7 (a) の実験結果と比較して、ここで示したような小流量の場合にはほぼ再現性があることを示している。しかしながら、大流量の場合には、後続流による侵食過程に側岸侵食と崩落を繰返すような現象が目立つようになり、計算ではそれが無

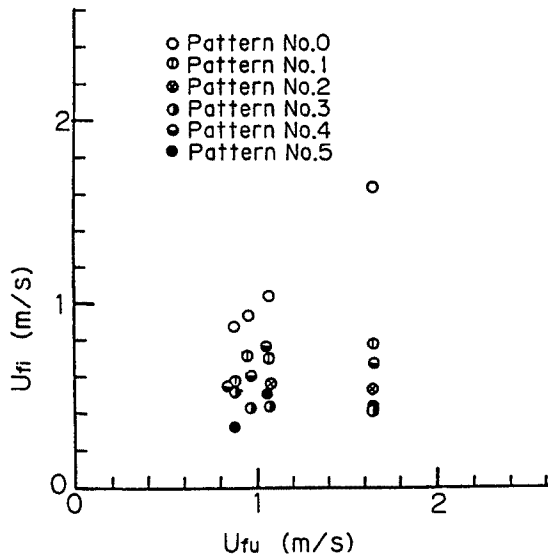


Fig. 5. Comparisons of front velocities in the uniform straight channel and in the channel with alternately projecting groynes.

視されているので精度が少し劣るようになることがわかった。

Fig. 9は流速ベクトルの時間変化の計算結果の例である。徐々に水みちを形成して行く様子などメッシュの粗さの割によく表現されているものと判断されよう。

Fig. 10は横堤群を通過した総流出土砂量の実験値と計算値の比較である。先述のように側岸侵食機構が計算に反映されていないので大流量時の流出土砂量が小さ目に計算される傾向が認められるけれども、全体として、数値計算による現象の再現性は悪くないものと考えられる。

以上の結果をふまえて、横堤群の土石流調節効果を整理し、横堤を効果的に配置する方法について考えてみよう。横堤群による土石流制御機能としては、1) 流速の減少効果, 2) ピーク流量の減少効果, 3) 土石流としての総流出土砂量の減少効果を挙げることができる。流速を効果的に減少させるためには、土石流が横堤への衝突を繰り返

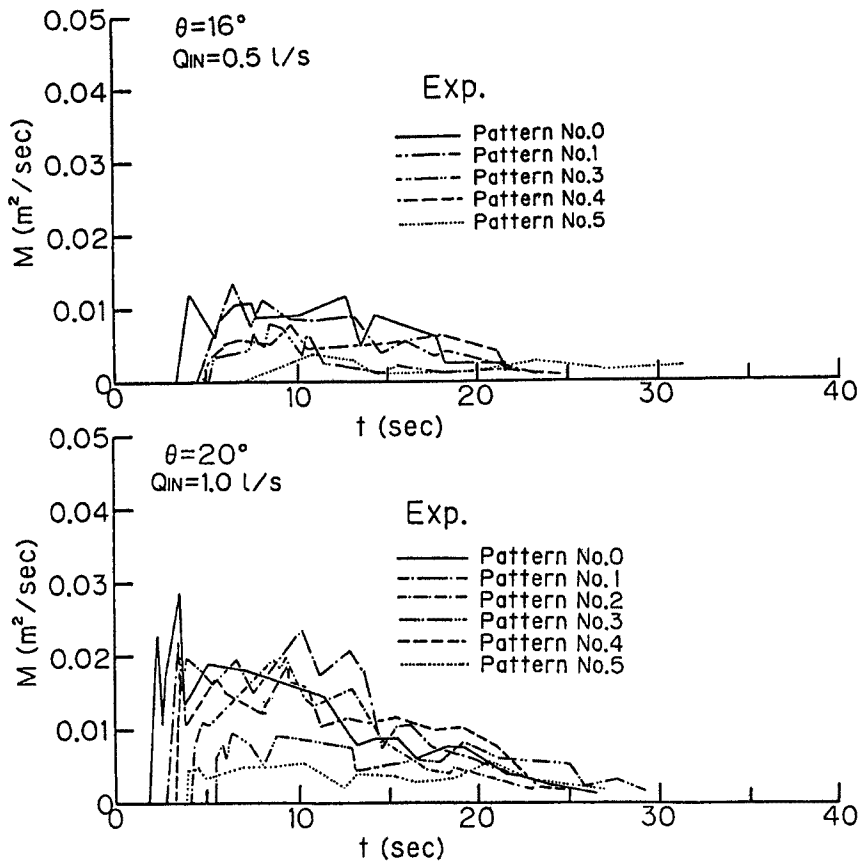


Fig. 6. Difference in hydrographs downstream of series of groynes under the same upstream rectangular hydrograph.

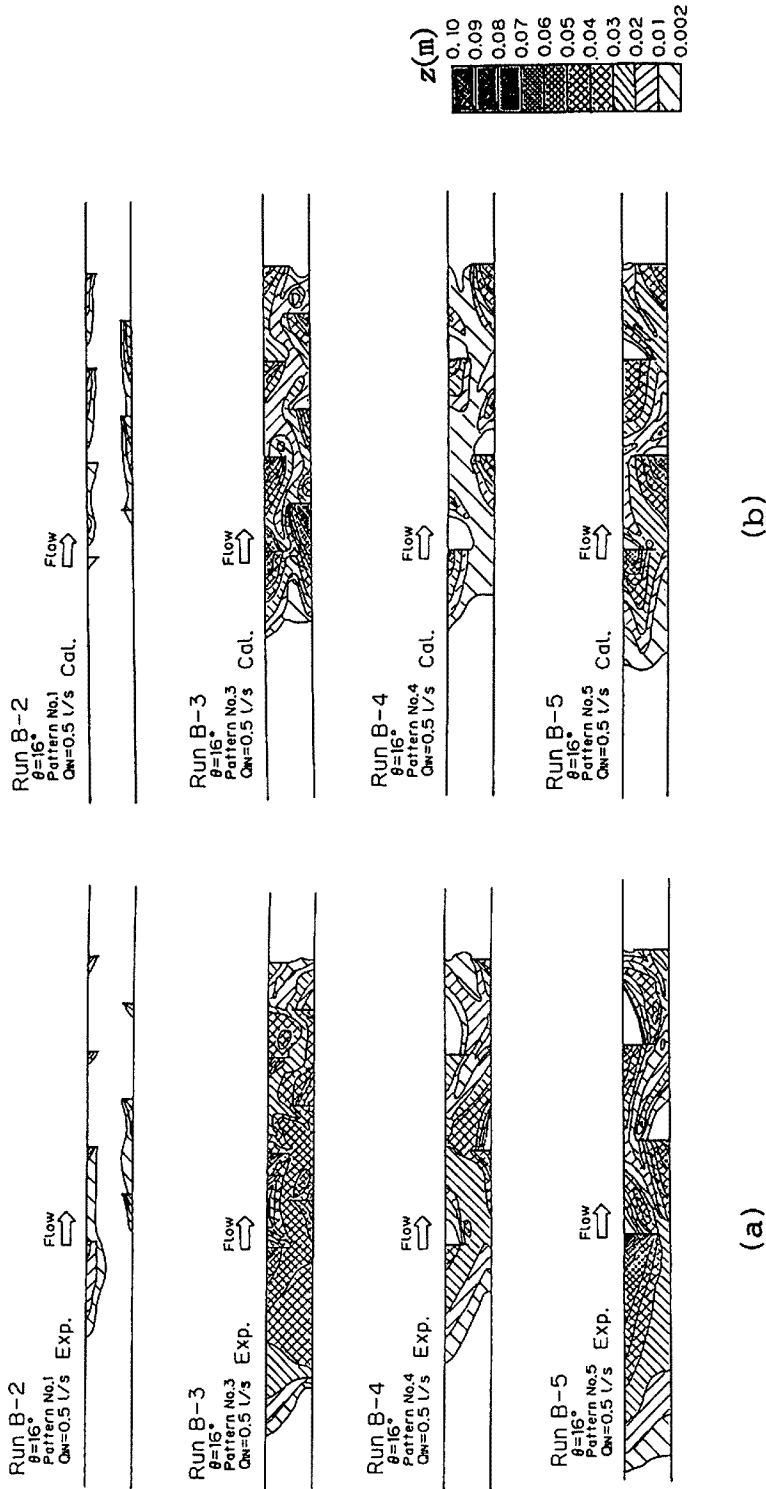


Fig. 7. (a) Contour maps of depositing depth at the end of experiments  
(b) Calculated depositing depth.

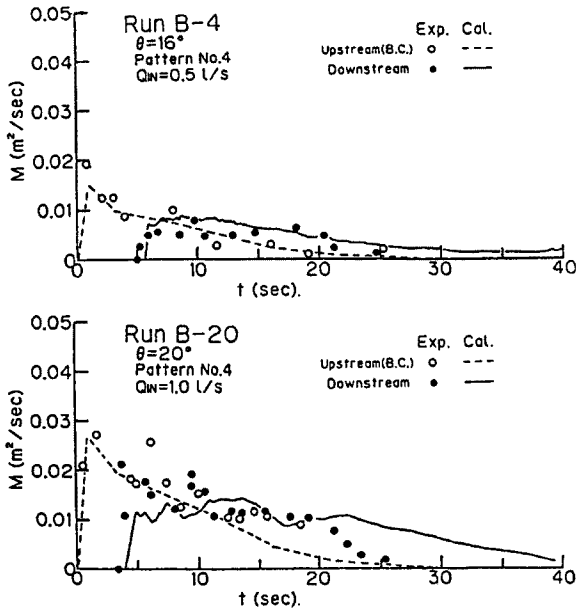


Fig. 8. Hydrographs in the experiments and by the calculations.

返しながら流下するように配置する。すなわち、水衝部となる位置へ横堤を配置することが効果的である。しかし、横堤の幅が十分でない場合には、一時的に流速が減少してもその後のピーク流量が逆に大きくなるような現象すら生ずる場合があることが実験的に示されたので注意する必要がある。ピーク流量を効果的に減少させるためには、土石流の流路を強制的に確実に曲流させ、さらに一時的にでも土砂を堆積させることが必要である。このためには、流路の直線部をなくし、また、横堤の張り出し幅を大きくするほど効果的である。また、土砂を効率よく堆積させるためには、やはり張り出し幅を大きくとることが有効であるが、横堤の裏側（下流側）の陰になる部分が主流路とならないようにして、貯留域として機能するようになるのがよい。横堤の張り出し幅があまり過大になると、丁度スリットあるいは格子型の砂防ダム

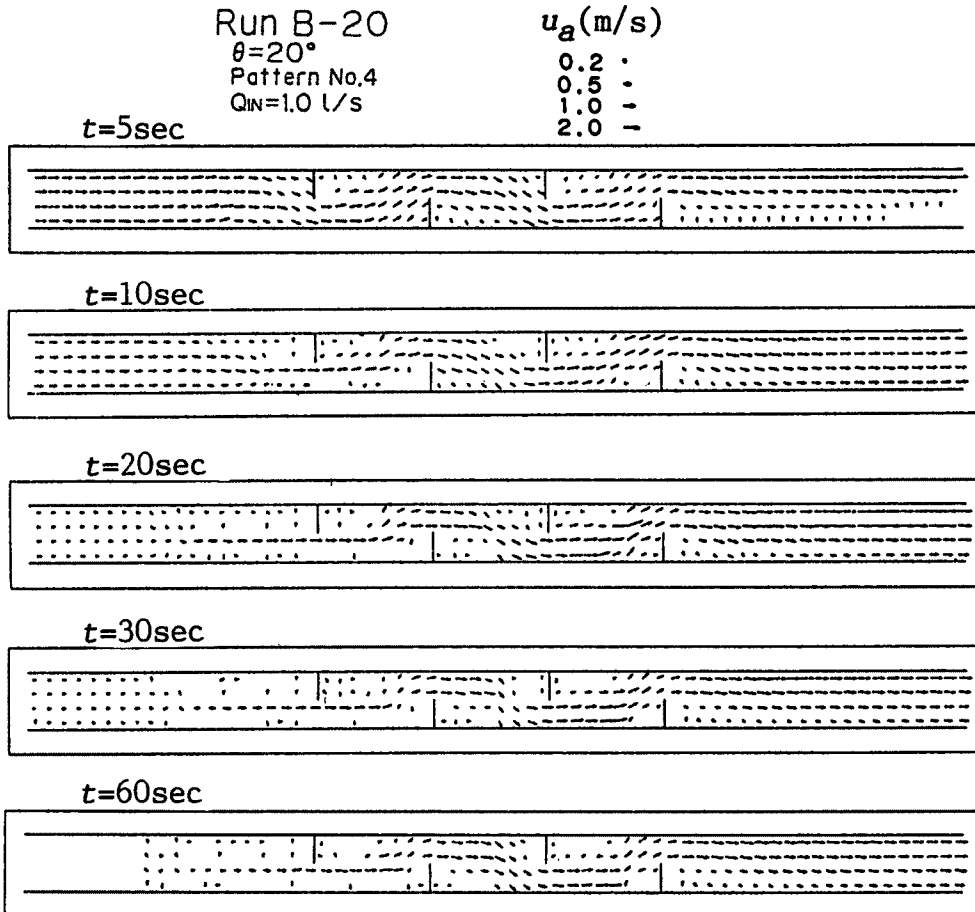


Fig. 9. Time lapse change in velocity vectors by the calculation.

のように最大粒径級の粒子の噛み合わせによって水通しが閉塞してしまい、後の中小洪水によっても機能回復が難しい場合が生ずることが予想される。

以上は横堤群の機能だけに関する研究であって、横堤の具備すべき強度、構造や流れを強制的に彎曲させるために生ずる溪岸への流れの衝突による溪岸崩壊の誘発問題等今後の検討が必要である。

#### 4. 水抜きスクリーンによる土石流の制御

##### 4.1 建設省土木研究所の実験<sup>10)</sup>

建設省土木研究所では、砂礫型土石流として扱える土石流は、底面水抜きスクリーン上で一定の量の加速度で減速、停止し、堆積するとして、実験的に以下に示す各式を求めている。

停止距離  $L$  (必要スクリーン長):

$$L = 1.4U_f^2 \frac{\sin(\phi_r - \theta)}{\sin(\phi_r - \theta_{sc})} \quad (m - sec) \dots\dots\dots (47)$$

最大堆積厚  $Z_{Tmax}$ :

$$Z_{Tmax} = 1.4U_f^2 \tan(\phi_r - \theta) \quad (m - sec) \dots\dots\dots (48)$$

ここに、 $U_f$ : 流入土石流の先端移動速度、 $\theta$ : 平均河床勾配、 $\theta_{sc}$ : スクリーンの勾配、 $\phi_r$ : 土石流材料の安息角である。

##### 4.2 数値実験

第2章で示した数値シミュレーション法を用いて、底面水抜きスクリーンおよび側面水抜きスクリーンに関する数値実験を行う。この場合、Fig. 11 に示すような流路をモデルとしており、計算条件は、 $\Delta x = \Delta y = 0.05$  m、 $\Delta t = 0.002$  sec、 $\beta_{ED} = 0.05$ 、 $\tan\phi = 0.57$ 、 $c_* = 0.65$ 、 $c_{*L} = 0.5$ 、 $c_{*F} = 0.3$  のように与えた。上流端の境界条件としては土木研究所の実験条件から堆定される流量および流砂量のハイドログラフを与えた。底面スクリーンはスクリーン面を透水性が非常に高い地盤であるとみなして計算する。その際、地盤への浸透流量は、スクリーン上に2mm以上の厚さの堆積物が存在するとき、その堆積物の粒径と土砂濃度に依存する透水係数を与え、堆積物が無視できる場合には流動層の粒径と濃度に依存する透水係数を与えて求めた。また、側面スクリーンの場合は、運動量解析によって計算される横方向流量のうち、水のみを通過させるような膜が存在するとして求めた。Table 2 には計算条件を、Fig. 12 には計算に用いたハイドログラフを示す。

まず、土石流先端の走時曲線を土木研究所の実験結果と本計算結果との比較の形で Fig. 13 に示す。Run C-1 においては計算ではスクリーン上で完全に停止する結果とならなかったため、少量ながらさらに下流へ流動を続けてしまっているが、実験においてもスクリーン下流端近傍まで達しており、計算は概して現象をよく説明していると判断される。Figs. 14, 15 にはスクリーンの長さおよびスクリーン設置勾配を変化させたときの停止距離あるいは流速の変化を示している。(47) 式で示される停止距離よりも長

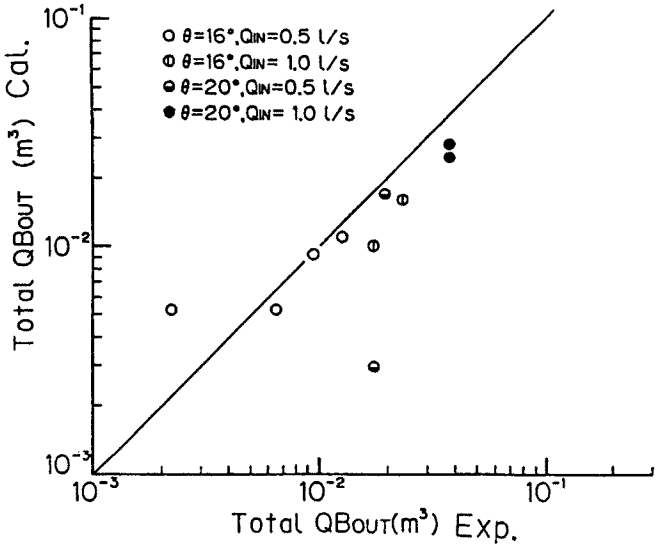


Fig. 10. Total sediment volumes which passed through the series of groynes in the experiments and in the calculations.

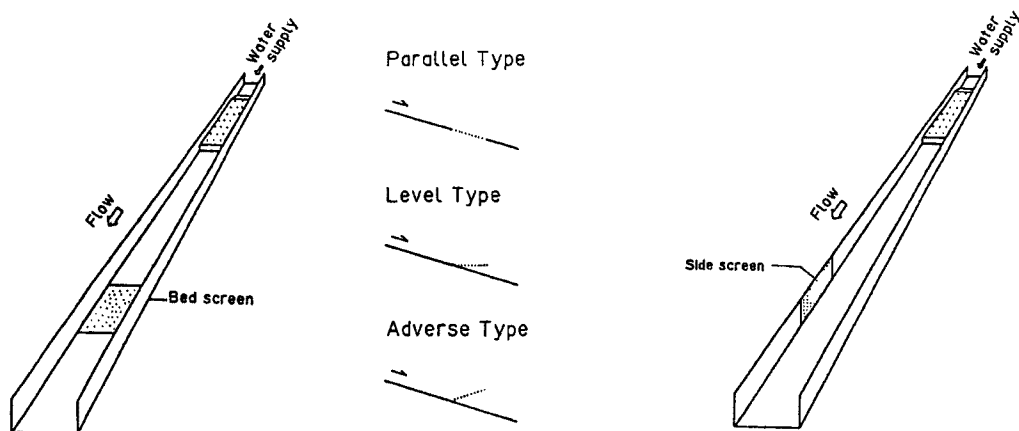


Fig. 11. Models of the bottom type and side wall type gratings.

Table 2. Calculating conditions

Run No.	Screen Type	Slope grad. $\theta$ (deg)	Screen grad. $\theta_{sc}$ (deg)	Screen length $L_{sc}$ (m)	Hydro No.
C- 1	Bed(Para.)	16.1	16.1	0.45	1
C- 2	Bed(Level)	16.1	0.0	0.45	1
C- 3	Bed(Adve.)	16.1	- 16.1	0.45	1
C- 4	Bed(Para.)	16.1	16.1	1.0	1
C- 5	Bed(Para.)	16.1	16.1	1.0	2
C- 6	Bed(Para.)	16.1	16.1	1.0	3
C- 7	No(Para.)	16.1	16.1	×	1
C- 8	No(Level)	16.1	0.0	×	1
C- 9	No(Adve.)	16.1	- 16.1	×	1
C-10	Side	16.1	16.1	1.0	1
C-11	Side	16.1	16.1	1.0	2

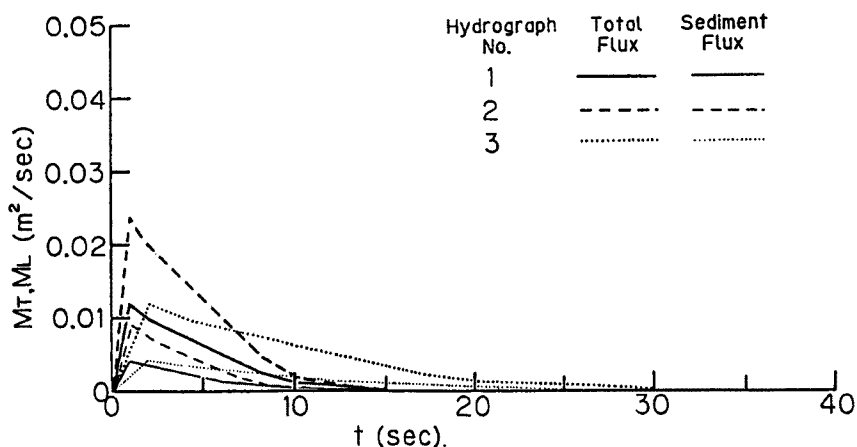


Fig. 12. Hydrographs used in the calculations.

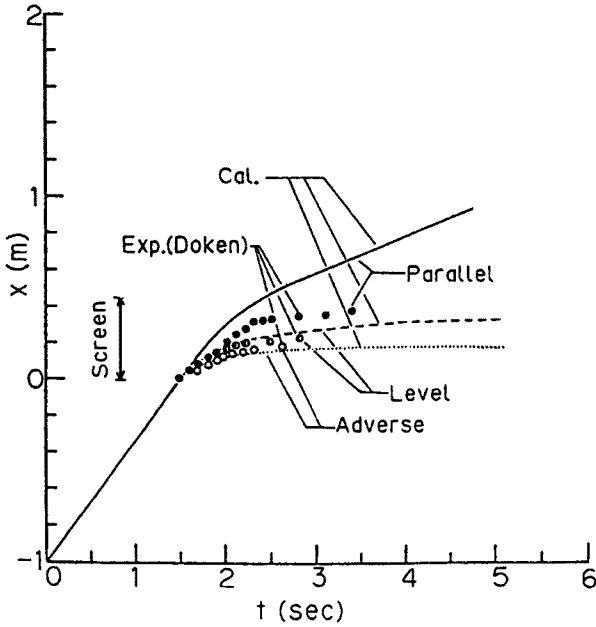


Fig. 13. Front arrival distances versus time in the calculations and in the experiments carried out by the ministry of construction (Doken).

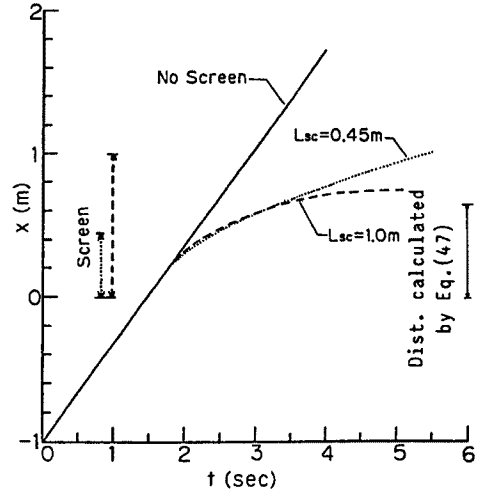


Fig. 14. Front arrival distances versus time for different screen lengths.

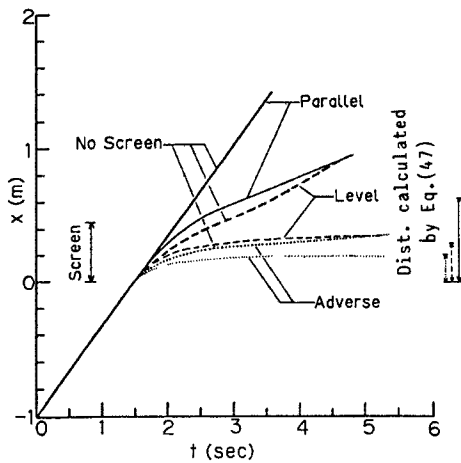


Fig. 15. Front arrival distances versus time for different screen setup slope.

いスクリーンの場合には、ほぼ (47) 式で与えられるような距離で停止しており、計算の適合性は悪くない。

Fig. 16 はスクリーン設置に伴って生ずる堆積の形状を示している。計算によってはうまく説明できるようである。ただし、計算においては、浸透水の流れを層流として取り扱っているが、実際には乱流となる場合も多いと予想されるし、スクリーン間隔に比較して細かい粒子はスクリーンを通過するので、式中の  $c_p$  は変化するはずであるがその効果は

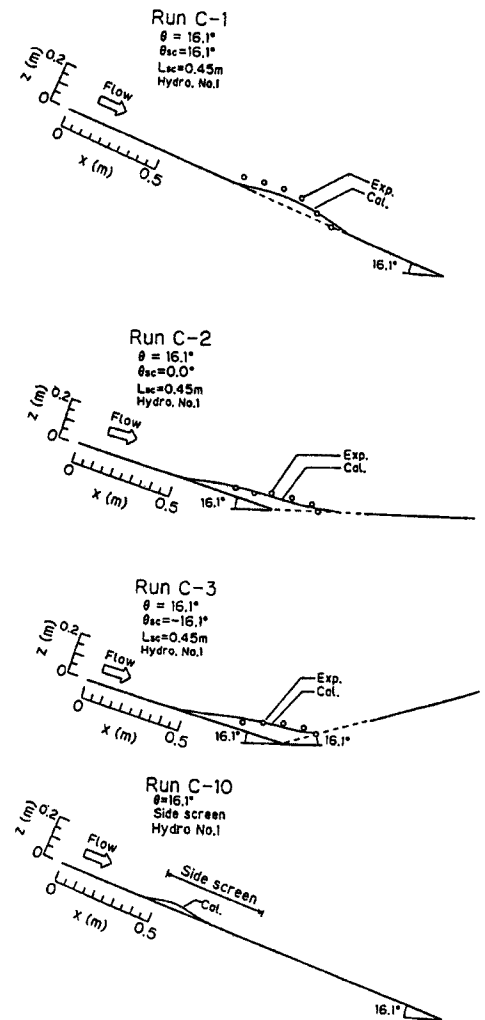


Fig. 16. Longitudinal profiles of deposition for various types of screen.

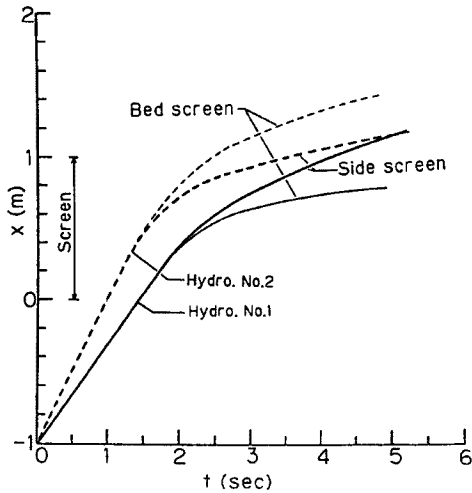


Fig. 17. Comparison between the bed type and side wall type gratings.

考慮されていない。このような点に関してはさらに検討を必要としている。

側面水抜きスクリーンについては側壁面にスクリーンを設置した単純な形式を考えた。これについては比較できる実験データがないので明確なことは言えないが、Fig. 17に同じ条件の土石流について、底面スクリーンと側面スクリーンの双方について計算して比較した結果を示している。ハイドログラフ No. 1 (小流量) については底面スクリーンで停止距離が短かく、ハイドログラフ No. 2 (大流量) では逆の結果を示している。このような結果の違いはとくにスクリーンを通しての浸透水量の評価にかかわっているものと思われ、底面スクリーンの場合に対する粒度分布の効果とともに、さらに透水の機構に焦点をあてた詳細な実験的検討が必要である。このようなことが分ってはじめてスクリーンの所要長等の定量的評価が可能になるものと考えられるので、例えば (47) 式のような実験式は一つの情報を与えてはいるが、実地の設計に使えるほどの一般性を持っている

かどうかはさらに多くの資料の蓄積があてはじめて明らかとなる。

### 5. 吸水性材料による土石流の制御

#### 5.1 吸水性材料添加による土石流の変質

水に市販の吸水性材料 (商品名サンウェット) を混入すると、その混入量に応じて粘性が高くなる。したがって、流動中の土石流に吸水性材料を添加すれば、土石流の流動特性が変化することが期待される。

粒子間の流体の粘性の効果が重要となるような流れについて、Bagnold<sup>(11)</sup> は、砂粒レイノルズ数に類似のパラメーター

Sand a-1 d <sub>50</sub> =1.15mm d <sub>n</sub> =1.15mm √(d <sub>n</sub> <sup>3</sup> /d <sub>50</sub> <sup>3</sup> )=1.33	Sand a-2 d <sub>50</sub> =1.60mm d <sub>n</sub> =1.61mm √(d <sub>n</sub> <sup>3</sup> /d <sub>50</sub> <sup>3</sup> )=1.30	Sand a-3 d <sub>50</sub> =2.72mm d <sub>n</sub> =2.67mm √(d <sub>n</sub> <sup>3</sup> /d <sub>50</sub> <sup>3</sup> )=1.22	Sand a-4 d <sub>50</sub> =5.23mm d <sub>n</sub> =5.23mm √(d <sub>n</sub> <sup>3</sup> /d <sub>50</sub> <sup>3</sup> )=1.25
---	---	---	---

を導出し、

$$G^2 = \frac{\sigma d^2 \tau}{\lambda \mu_f} \dots \dots \dots (49)$$

を導入し、 $G^2$  が 100 以下で、

$$\tau = (1 + \lambda) \left( 1 + \frac{\lambda}{2} \right) \mu_f \frac{du}{dz} \dots \dots (50)$$

$$p = 1.3\tau \dots \dots \dots (51)$$

のようになるとしている。ここに、 $\lambda$ : 線濃度、 $\mu_f$ : 間隙流体の粘性係数、 $d$ : 粒径、 $\tau$ : せん断力、 $p$ : 垂直応力、 $du/dz$ : 速度勾配である。

(50) 式の関係は  $G^2$  が 3000 以上の慣性領域では  $\tau$  が  $(du/dz)$  の 2 乗に比例するのと相違して、ニュートン流体的な  $(du/dz)$  の 1 乗に比例する形をしており、慣性領域に属する土石流に吸水剤を添加して、粘性領域に属する流れに変換して土石流を

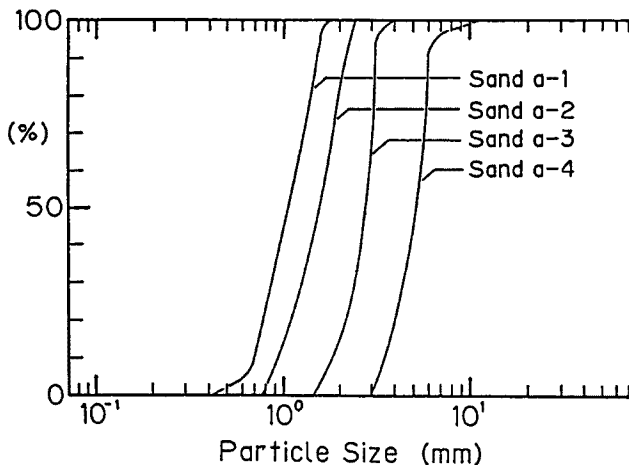


Fig. 18. Experimental materials.



Table 3. Experimental conditions in Series A

Run No.	$\theta$ (deg)	$\mu_f$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$d_m$ ( $\times 10^{-3} \text{m}$ )	$c$	$h$ ( $\times 10^{-2} \text{m}$ )	$u_*$ (m/s)
A-1	12	$1.50 \times 10^{-1}$	1.61	0.055	1.0	0.143
A-2	16	$1.20 \times 10^{-1}$	1.61	0.249	1.5	0.201
A-3	20	$1.28 \times 10^{-1}$	1.61	0.338	1.8	0.246
A-4	25	$1.30 \times 10^{-1}$	1.61	0.338	1.4	0.241
A-5	16	1.12	1.61	0.111	1.1	0.172
A-6	20	1.12	1.61	0.170	1.2	0.201
A-7	25	1.24	1.61	0.249	1.0	0.204
A-8	20	$2.55 \times 10^{-1}$	5.23	0.466	2.7	0.301
A-9	20	$2.50 \times 10^{-1}$	2.72	0.296	1.8	0.246
A-10	20	$2.50 \times 10^{-1}$	1.61	0.194	0.8	0.164
A-11	20	$2.50 \times 10^{-1}$	1.15	0.165	0.8	0.164
A-12	12	$1.21 \times 10^{-3}$	1.61	0.158	1.2	0.156
A-13	16	$1.22 \times 10^{-3}$	1.61	0.339	1.4	0.194
A-14	20	$1.24 \times 10^{-3}$	1.61	0.515	1.5	0.224

制御する可能性を示唆するものである。そこで、実験によって流れの特性を調べることにした。

実験は防災研究所宇治川水理実験所の急勾配流砂実験水路を幅 10 cm にして仕切り、上流側に堰を設け、堰の上流に堆積させた砂に、吸水材を加えて粘性を高くした流体を補給することによって土石流を発生させ、ビデオ撮影によってその流速、流動深等を読み取り、また流れを採取することによって濃度の測定を行った。

実験用砂は Fig. 18 に示すようなものである。また、実験条件としては、Table 3 に示すように、粘性、勾配、粒径等を変化させた。

Fig. 19 は実験の結果得られた流速分布の例を示している。図中には流動深方向の濃度が一様に分布しているとの仮定のもとに、慣性領域の Bagnold の構成式から導かれた高橋の流速分布式<sup>4)</sup>、間隙流体の粘性のみを考えた流速分布式

$$\frac{u}{u_*^2} = \frac{\lambda \gamma z (2h - z)}{2\mu_f h} \dots \dots \dots (52)$$

粘性領域における Bagnold の考えによる式

$$\frac{u}{u_*^2} = \frac{\rho_f z (2h - z)}{2(1 + \lambda)(1 + \lambda/2)\mu_f h} \dots \dots \dots (53)$$

森・乙竹<sup>12)</sup>による固体粒子混入による粘性増加式を考慮した

$$\frac{u}{u_*^2} = \frac{\rho_f z (2h - z)}{2\{1 + sd/(1/c - 1/c_*)\}\mu_f h} \dots \dots \dots (54)$$

において、粒子形状が球形であるという近似の下、 $sd = 3$  として求められた流速分布とともに、後述の本研究によって導出された流速分布式による計算結果も示している。RunA-13 のように粒径が粗く、間隙流体が水である慣性流域の流れでは、当然、高橋の式がよく適合しているが、間隙流体の粘性が大きくなれば高橋の式はもちろん、(52)、(53)、(54) 式の適合性も悪くなっている。

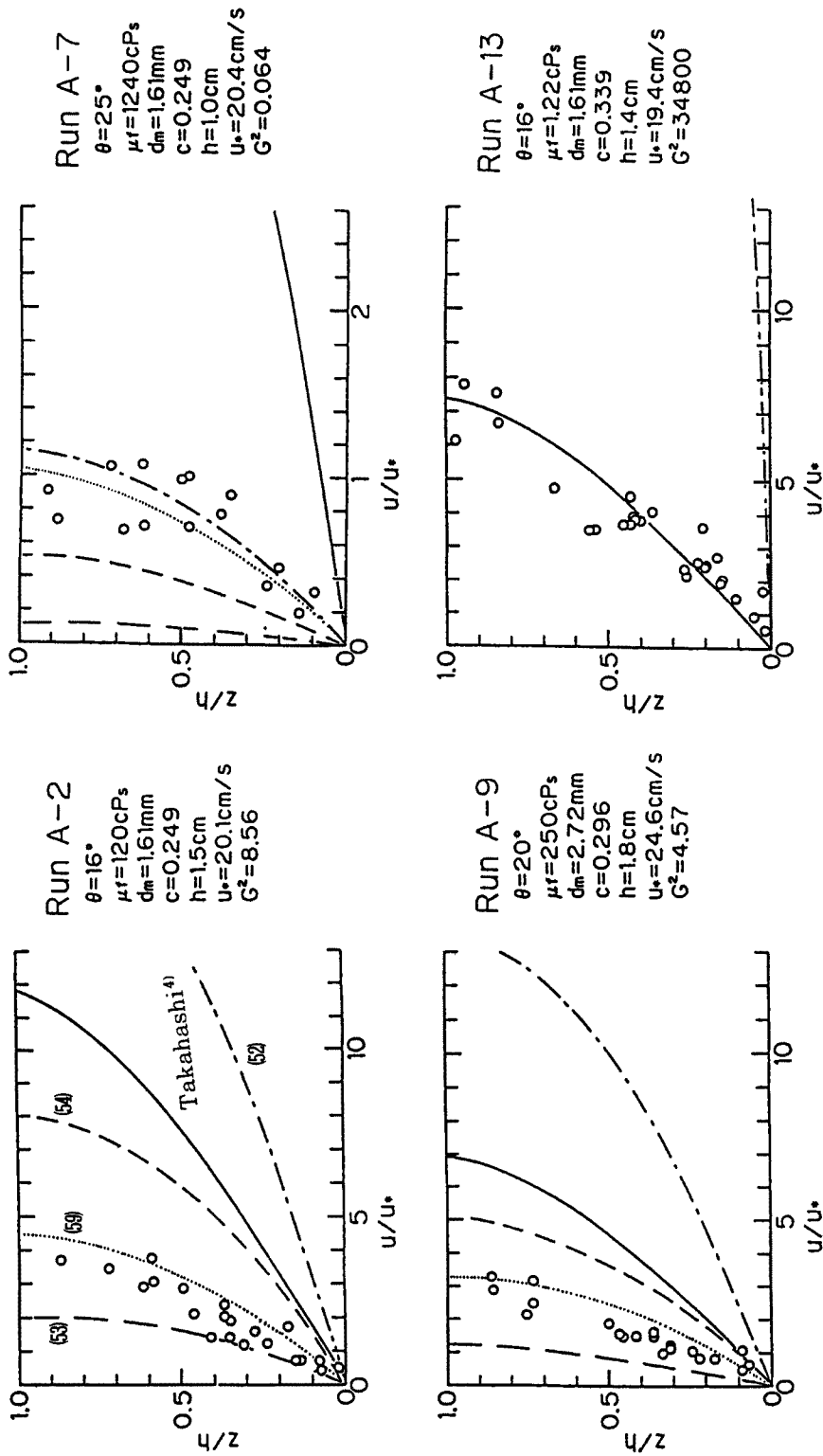


Fig. 19. Velocity distribution in the experiment and some theoretical velocity distributions.

バルク全体としての見かけの粘性係数  $\mu_T$  を, 間隙流体の粘性係数  $\mu_f$  と粒子の接触・接近に伴う粘性係数の増分  $\mu_s$  とに分離できるものと考えて,

$$\mu_T = \mu_f + \mu_s \quad \dots\dots\dots (55)$$

のようにおけば, 森・乙竹は

$$\mu_s = \frac{sd}{(1/c - 1/c_*)} \cdot \mu_f \quad \dots\dots\dots (56)$$

のように, 粒子群の効果による粘性の増分が間隙流体の粘性係数に比例するものとして取り扱っていることになる, Bagnold もほぼ同様である。ところが, 今回の実験によれば, 粘性係数の高い流体を用いた場合ほど流体粘性に対する相対的な粒子群の効果が小さくなっており, 粒子群の効果による粘性の増分は間隙流体の粘性係数に比例すると考えるよりも, それとは独立なものであるとする方が妥当なようである。そこで, ここでは, 粒子群による粘性係数を

$$\mu_s = f(c) \cdot \mu_c \quad \dots\dots\dots (57)$$

$\mu_c$ : 粘性係数の次元を持つ一定の係数

とする。ここで,  $f(c)$  はその定性的に具備すべき条件より, 仮りに,

$$f(c) = \frac{1}{(1/c - 1/c_*)} \quad \dots\dots\dots (58)$$

とおくものとする。すなわち,

$$\frac{u}{u_*^2} = \frac{\rho_T z (2h - z)}{2 \{ \mu_f + \mu_c / (1/c - 1/c_*) \} h} \quad \dots\dots\dots (59)$$

である。Fig. 19 中に示した (59) 式は  $\mu_c \equiv 1000$  cp<sub>s</sub> として求めたものである。一部の実験ケースを除いてこのような式が比較的よく適合するようである。

(59) 式を積分して抵抗則の形に書き変えると,

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\frac{\rho_T}{\{ \sigma(\sigma - \rho_w)c \}^{1/2} \lambda^{1/2}}}{3 \left\{ 1 + \frac{\mu_c}{\mu_f (1/c - 1/c_*)} \right\}} \cdot G \cdot \frac{h}{d} \quad \dots\dots\dots (60)$$

のようになる。そこで, 実験結果を Fig. 20 のようにまとめて示すと, 水中比重や相対水深の変化幅の小さいデータのためのやや不十分であるが, 流速係数と  $G^2$  との間に高い相関が読みとれ, さらに (60) 式を見ても  $\mu_f$  が大きくなると流速係数が小さくなるので, 流下中の土石流に吸水剤を混入して間隙流体の粘性を増大させると流速が減少することが期待される。

Fig. 21 は実験で求められた平衡濃度と河床勾配の関係である。図中には慣性領域で求められた高橋の平衡濃度式も示されている。全体的な傾向として, 間隙流体の粘性が高いほど低濃度でしか流れ得ないようである。現在のところこのような平衡濃度の決定機構は未解明であるが, 今後の重要な研究課題である。

## 5.2 吸水性材料の投入による土石流制御に関する実験と考察

実験は Fig. 22 に示すように, 上流側水路幅 10 cm, 長さ 17 m, 下流側氾濫台の幅 2 m, 長さ 6 m で, それぞれ,  $0^\circ \sim 35^\circ$ ,  $0^\circ \sim 10^\circ$  の範囲で勾配を設定できる水路を用いた。勾配変化点から上流 7.0 m の位置に高さ 10 cm の堰を設け, 水路には粒径 2.4 mm の一様砂を貼った。吸水性材料は前述のものと同じであり, 水路へ水を供給して土石流を起し, それが堰を越える際に上方から吸水剤を投入した。

吸水剤投入の効果の定量的評価にまでは至らず, また, 実際の土石流制御に有効な結果を見出し得なかったが, 定性的な実験事実を以下に示す。

### 1) 先端部にのみ大量の吸水剤を投入した場合

土石流の先端部は一時的に停止した。しかし, 後続流によってそれは簡単に決壊し, 吸水剤の粘着性によって土砂粒子が結合して形成された巨大な塊を先端とする大規模な土石流となって流下した。

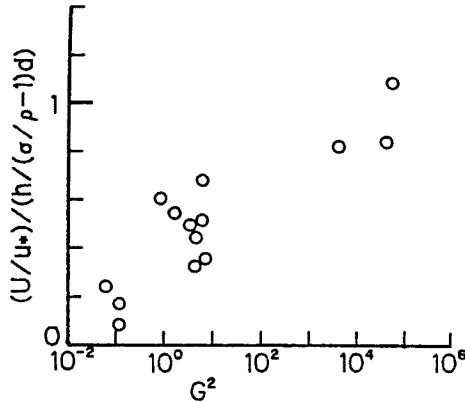


Fig. 20. Resistance to flow versus  $G^2$ .

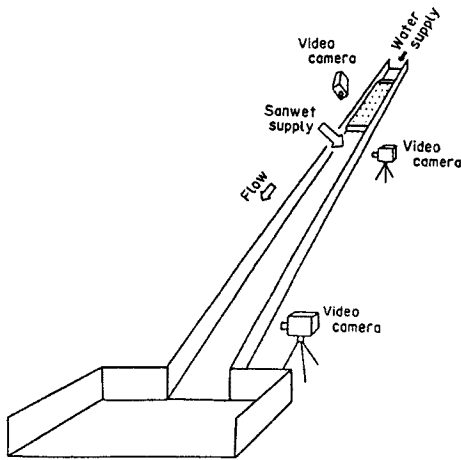


Fig. 22. Experimental setup for Series A.

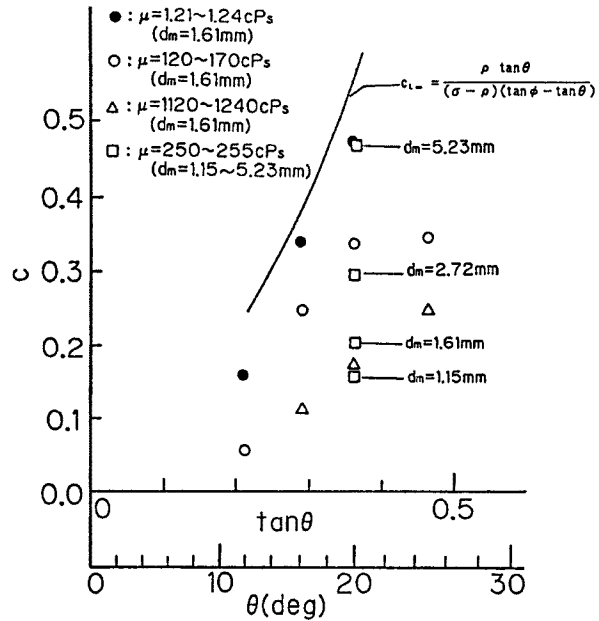


Fig. 21. Equilibrium solid concentration in the flow and the slope.

- 2) 土石流全体に大量の吸水剤を投入した場合  
土石流を停止させることは可能であった。これは大量の吸水剤添加による粘着性のために付着したという表現が適切であり、投入した吸水剤のほとんどが未反応状態で残された。
- 3) 先端部に比較的少量の吸水剤を投入した場合  
流動中の状況にはほとんど影響が見られず、先端部の土砂同士が吸水剤によって結合して大きくなった塊が見られた。
- 4) 土石流全体に比較的少量の吸水剤を投入した場合  
流動中の状況にはほとんど影響は見られなかった。下流の

氾濫台上での堆積については、氾濫範囲は吸水材料を投入しなかった場合とほとんど変わらず、粗粒土砂堆積層の上に覆いかぶさるように微細土砂を含んだ高粘性流体層が停止しているような状況が見られた。

実験に使用した吸水材料の特性としては、自重の700～1000倍の吸水能をもち、また、重量パーセントで0.5%を水に混入するだけで20000 cp<sub>s</sub>の粘度が得られる。見かけ密度は0.5 g/cm<sup>3</sup>である。もし、土石流中の水と速かに混合し、かつ速かに反応させることができれば増粘効果と平衡濃度の減少効果によって、土石流制御に役立たせることができるものと思われるが、現状では全吸水量の80%程度を吸水するのに2～3分を必要とし、実験室規模の土石流ではその継続時間が数秒であるのでその効果を調べるのが困難であった。ただし、実験でも単純に土石流の上から振りかける程度では、吸水剤を混合させるのが難しいことがうかがわれた。これらのことから、実際の土石流においては、混合の適切な方法を開発すれば効力を発揮させることもあながち不可能ではないものと予想される。

## 6. 結 論

本研究で得られた主要な成果を列挙して結論とする。

- 1) 土石流下域において、局所的に種々の構造物が存在するような場における数値シミュレーション

モデルを構築し、計算プログラムを開発した。現時点では、精度、計算時間等必ずしも十分とは言えないが、実験結果と比較対照してほぼ妥当な結果が得られることが示された。

- 2) 連続横堤群による土石流制御法について、実験的、計算的にその機能評価を行った。計画規模・性質の土石流を想定した最適の横堤群の配置法を明示するところまでは行かなかったが、横堤群による土石流の変形、貯留を予測することは可能となった。維持管理問題やコストパフォーマンスの問題等の検討が必要であるが、土石流発生後の自然の制御能力の回復が期待できる新しい有力な方法であると考えられる。
- 3) 底面および側面水抜きスクリーンによる土石流の変形、スクリーン地点およびその近傍における土砂堆積の形状等を予測することが可能となった。しかしながら、スクリーンの土石流制御機能を定量的に把握するためにはさらに、土石流および土石流堆積物からスクリーンへの浸透流量の的確な評価が必要である。
- 4) 間隙流体の粘性が卓越するような領域での土石流流動式および平衡濃度について検討し、新しい流動則を提示した。
- 5) 吸水剤の投入による土石流制御の可能性について議論し、吸水剤の改良、水との混合方法の開発等によって、実用に値する可能性もあり得ることを示した。

最後に、本研究を推進するにあたって、計算プログラムの開発に防災研究所中川一助手、実験にあたって、京都大学大学院生原田達夫君の協力を得た。ここに記して感謝するものである。

#### 参考文献

- 1) 高橋 保・辻本浩史：土石流氾濫、堆積の数値シミュレーション，京大防災研年報，第 27 号，B-2，1984，pp.467-485.
- 2) 高橋 保・中川 一・山路昭彦：土石流氾濫危険範囲の指定法に関する研究，京大防災研年報，第 30 号，B-2，1987，pp.611-626.
- 3) Takahashi, T., H.Nakagawa, and S. kuang: Estimation of debris flow hydrograph on varied slope bed, Proc. of the Corvallis Symposium on Erosion and Sedimentation in the pacific Rim, IAHS Publ. No.165, 1987, pp.167-177.
- 4) 高橋 保：土石流の力学的機構，1980 年度水工学に関する夏期研修会講義集，A，土木学会水理委員会，1980，pp.1-17.
- 5) 高橋 保：土石流の停止・堆積機構に関する研究—土石流扇状地の二次侵食—，京大防災研年報，第 25 号，B-2，1982，pp.327-348.
- 6) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 206 号，1972，pp.59-69.
- 7) Takahashi, T.: High velocity flow in steep erodible channels, Proc. of tech. Session A, XX 11 Congress of IAHR, 1987, pp.42-53.
- 8) 河野伊一郎・西垣 誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 307 号，1981，pp.59-69.
- 9) 高橋 保・中川 一・西崎丈能：堤防決壊による洪水危険度の評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 29 号，B-2，1986，pp.431-450.
- 10) 矢澤昭夫・水山高久・森田昭宏：土石流ブレーカー（底面水抜きスクリーン）に関する実験的研究，土木研究所資料，第 2374 号，1986.
- 11) Bagnold, R. A.: Experiments on a gravity-free dispersin of laige Solid spheres in a

Newtonian fluid under shear, Proc. of the Roy. Soc. London, Series A, Vol. 225, 1954, pp. 49-63.

- 12) 森 芳郎・乙竹 直：懸濁液の粘度について，化学工学，第20卷，第9号，1956.