

京都大学防災研究所 ○高橋 保
鴻池組 藤井由之

1. はじめに

構造物による土石流対策には種々のものがあるが、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目的では、従来主として砂防ダムが用いられてきている。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れなりの効果を発揮しているものの、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十分な効力を発揮できない事例も多く、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くろみから、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杯状態になって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、ここでは、一旦堆積した土石流が後続流あるいは其の後の洪水流によって自然に侵食されて土石流調節容量が半永久的に確保できる可能性を求めて、両側岸から交互に出した横堤群による土石流調節機能に着目して、実験的な検討を加え、さらに、数値実験的検討の可能性を探った。

2. 実験的検討

2. 1 実験の方法と条件

実験には、図1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、その上流4mの区間に実験材料の砂を堆積させておく。これに予め飽和状態となるように浸透流を供給しておき、突然所定の流量で給水を行なえば土石流が発生して堰を乗り越えて流下する。堰より下流側には、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の範囲に横堤群を設置した。横堤群の上流側と下流側で側壁からビデオカメラで撮影し、ハイドログラフを読み取った。また、横堤群の上からもビデオ撮影を行ない、流動の状況および水位・堆積圧の変化を読み取った。下流端では流れを採取して土石流中の砂礫濃度を測定した。

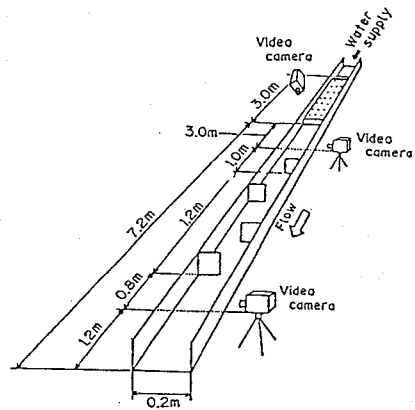


図1 実験水路

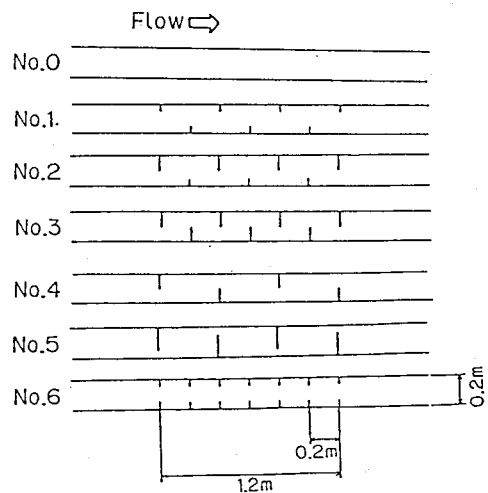


図2 横堤群の配置

実験条件としては、横堤群の配置パターン、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図2に示す7通りであり、実験に使用した砂は、A : $d_m=1.75\text{mm}$, $(d_{84}/d_{16})^{1/2}=3.3$, B : $d_m=5.65\text{mm}$, $(d_{84}/d_{16})^{1/2}=6.9$ の2通りである。

2.2 実験結果およびその考察

無堤部での土石流先端移動速度 (U_{r0})と横堤群中での先端移動速度 (U_{ri})の比較を図3に示す。予想されるとおり、水通し部の幅が狭いほど、あるいは横堤の間隔が小さいほど、移動速度を小さくする効果大きい。また、やって来る土石流の流速の大小は横堤群中の流速には顕著な影響を与えていないようである。

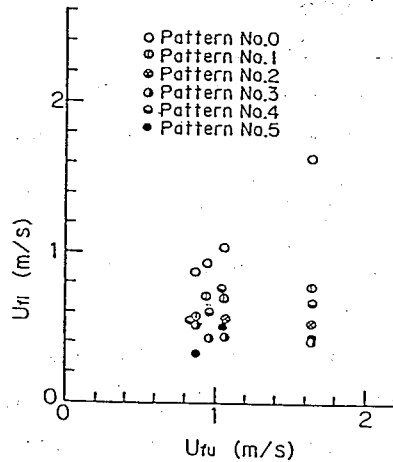


図3 先端移動速度

横堤群を通過した土石流のハイドログラフの例を図4に示す。ここには示していないが、横堤の張り出し幅の小さいものでは、到達時刻は確かに遅くな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見られたが、横堤の張り出し幅の大きいものでは、図に見るように、ピーク流量は確実に減少している。

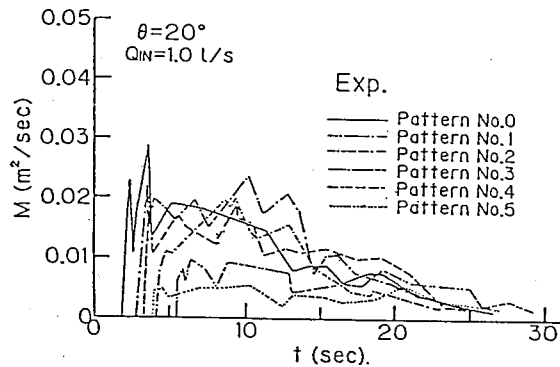


図4 流量ハイドログラフの相違

図5には、流し終わった後の最終堆積厚さの分布を示している。ただし、これは、先端部の高濃度部分を一旦堆積させた後に、後続流によって侵食された結果としての堆積厚であって、これだけでは土石流の貯留効果を論じることにはできないが、一つの有用な指標となるものと考えられる。この図において、横堤の張り出し幅の大きいもので土砂の貯留量が多くなっており、また、交互に張り出す横堤によって、蛇行する水みちが形成され、その効果に

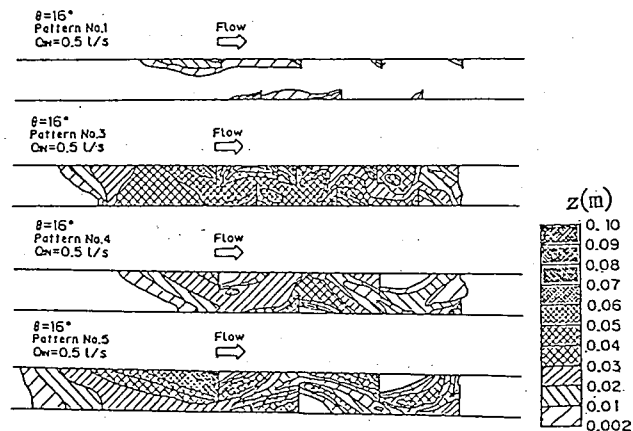


図5 最終堆積厚さの分布

よる侵食が期待されることを示している。また、実験の範囲においては、最大粒径の大きい土石流の場合、水通し幅が狭ければ、そこで粗粒土砂の噛み合わせによって土石流の殆どの部分が捕捉されてしまう場合があったが、それ以外には粒度の影響は顕著ではなかった。

3. 数値実験

3. 1 基礎方程式

x-y 平面を基礎地盤上に取り、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。流動層の運動量方程式は、x 方向、y 方向に対して、

$$\frac{\partial M_T}{\partial t} + \beta_m \frac{\partial u M_T}{\partial x} + \beta_m \frac{\partial v M_T}{\partial y} = g h_T (\sin \theta_m - \cos \theta_m \frac{\partial(z_T + h_T)}{\partial x}) - \frac{\tau_x}{\rho_f} \quad \frac{\partial N_T}{\partial t} + \beta_m \frac{\partial u N_T}{\partial x} + \beta_m \frac{\partial v N_T}{\partial y} = g h_T (\sin \theta_m - \cos \theta_m \frac{\partial(z_T + h_T)}{\partial y}) - \frac{\tau_y}{\rho_f}$$

である。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、 β_m : 運動量補正係数、 ρ_f : パルクの密度、 τ_x, τ_y : x, y 方向の底面剪断力である。運動量補正係数は慣性領域(砂澱型土石流)では1.25であり、掃流状集合流動及び掃流の領域では、便宜的に $\beta_m = 1.05 + 0.74 c_L$ (c_L : 粗砂濃度) で与えられるものとする。また、流動層の連続式は、水と、衝突や掃流によって輸送される粗砂、浮遊によって輸送される細砂の3相について別々に、

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial M_w}{\partial x} + \frac{\partial N_w}{\partial y} = i_w + i_z \quad \frac{\partial h_L}{\partial t} + \frac{\partial M_L}{\partial x} + \frac{\partial N_L}{\partial y} = i_w \quad \frac{\partial h_F}{\partial t} + \frac{\partial M_F}{\partial x} + \frac{\partial N_F}{\partial y} = i_w$$

の様に表示する。ここで、 h_w, h_L, h_F : 単位面積中の流動層内の水、粗砂、細砂の堆積、 $M_w, N_w, M_L, N_L, M_F, N_F$: 各成分の単位幅流量、 i_w, i_L, i_F : 侵食、堆積に伴う各成分の単位時間、単位面積当たりの移動量、 i_z : 透水速度 であり、 $h_T = h_w + h_L + h_F$ $i_T = i_w + i_L + i_F$ の様に表わされる。堆積層の連続式は、

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = -i_w - i_z \quad \frac{\partial z_L}{\partial t} = -i_L \quad \frac{\partial z_F}{\partial t} = -i_F$$

である。ここに、 z_w, z_L, z_F : 単位面積堆積層中の各成分の体積、 q_x, q_y : 単位幅横浸透流量である。堆積層厚 z_T は $z_T = \max(z_L/c_L, z_L + z_F/c_F)$ 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、 $\tau_x/\rho_f = (U/u_*')^{-2} \cdot u_*'$ $\tau_y/\rho_f = (U/u_*')^{-2} \cdot v_*'$ $u_*' = (u^2 + v^2 + 2uv \cdot \sin \theta_m \cdot \sin \theta_w)^{1/2}$ とする。ここで、 U/u_*' は土石流 ($c_L \geq 0.3$)、掃流状集合流動 ($0.02 \leq c_L \leq 0.3$)、掃流に対してそれぞれ、

$$\frac{U}{u_*'} = \frac{0.4}{\lambda} \left(\frac{\rho_f}{\sigma \alpha \sin \alpha} \right)^{1/2} \frac{h_T}{d_L} \quad \frac{U}{u_*'} = 0.8 \frac{h_T}{(\sigma/\rho_f - 1) d_L} \quad \frac{U}{u_*'} = 6.0 + 5.75 \cdot \log \left[\frac{h_T}{d_L \cdot (1 + 2 \cdot \tau_x)} \right]$$

とする。侵食、堆積の速度は、ここでは簡単に、 $i_T = \beta_{ED} (c_L - c_{Lw}) / c_L \cdot (M_w/d_L)$ で与えられるものとする。 β_{ED} : 係数、 c_{Lw} : 平衡濃度、 M_w : 単位幅流量の絶対値であり、

$M_w = (N_T^2 + N_F^2 + 2M_T N_T \cdot \sin \theta_m \cdot \sin \theta_w)^{1/2}$ で計算する。平衡濃度は流れ方向の水面勾配の関数であって、

土石流: $c_{Lw} = \frac{\rho_f \cdot \tan \theta_m}{(\sigma - \rho_f) \cdot (\tan \alpha - \tan \theta_m)}$ 掃流状集合流動: $c_{Lw} = 3.3 \cdot \frac{\rho_f}{(\sigma - \rho_f)} \left| \frac{\tan \theta_m}{(\tan \alpha - \tan \theta_m)} \right|^2 \cdot \left(1 - \frac{\tau_x}{\tau_y} \right)^2$

掃流: $c_{Lw} = (1 + 5 \tan \theta_m) \frac{\rho_f \cdot \tan \theta_m}{\sigma - \rho_f} \left(1 - \alpha^2 \frac{\tau_x}{\tau_y} \right) \left(1 - \alpha \left(\frac{\tau_x}{\tau_y} \right)^{1/2} \right)$

である。また、各成分の侵食速度 ($i_T > 0$) は、例えば、 $i_{wED} = (z_w/z_T) i_T$ で求め、堆積速度は $i_{wED} = (1 - c_{Fn}) (1 - c_L) i_T$, $i_{LED} = c_L i_T$, $i_{FED} = c_{Fn} (1 - c_L) i_T$ のように求める。

3. 2 数値計算

基礎方程式を著者の従来の方法と同様に風上差分表示し、 $\Delta x = \Delta y = 0.05m$, $\Delta t = 0.002sec$, $\beta_{ED} = 0.05$, $\tan \phi = 0.07$, $\tan \alpha = 0.57$, $c_w = 0.65$, $c_L = 0.5$, $c_F = 0.3$ として、実験条件に対する数値計算を実行

した。ただし、横堤は常にメッシュ境界上でメッシュの全幅に一致するように位置するものとして与え、その境界を通過する流量を0とした。

3. 3 数値計算の結果

図6に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、上流側のものは境界条件として与えたものである。図7は実験終了時の最終堆積厚さの分布の計算値であって、図5の実験結果に対応するものである。実験によれば、後続流による侵食は、大流量あるいは急勾配のときには側岸侵食と崩落を繰り返すような現象が卓越するが、計算ではその効果が無視されていることもあり、決して精度は良いとは言えないが、図6および図7の結果を総合して、数値実験による横堤群の効果の検討が定量的にもある程度可能であることを示している。このこ

とはさらに、図8をみてもわかる。これは横堤群を通過した総土砂量の実験値と計算値の比較であるが、大流量に対しては先に述べた理由で多少計算値が小さくなる傾向があるが、概して良好な結果を与えている。

4. おわりに

横堤群の効果を実験と数値実験によって示したが、その機能を総括すると、1)流速の減少効果、2)ピーク流量の減少効果、3)流下土砂量の減少効果を挙げることができる。1)の機能を効果的に発揮するためには横堤を水衝部の位置に配置するのが効果的であり、2)の効果をも大きくするためには、土石流の流路を強制的に曲流させ、一時的にでも土砂を堆積させる。このためには横堤幅を大きくし、間隔を詰めるのが有効であるが、最適の幅や間隔を選定するためには数値実験の手法が有力であろう。そのためには、側岸侵食機構等の取り入れが必要である。さらに、横堤の強度、水衝部の溪岸保護問題等、実際に採用する前に検討しなければならない事項は色々あるが、本研究により、横堤群がかなり有効な機能を持っていることが判明した。

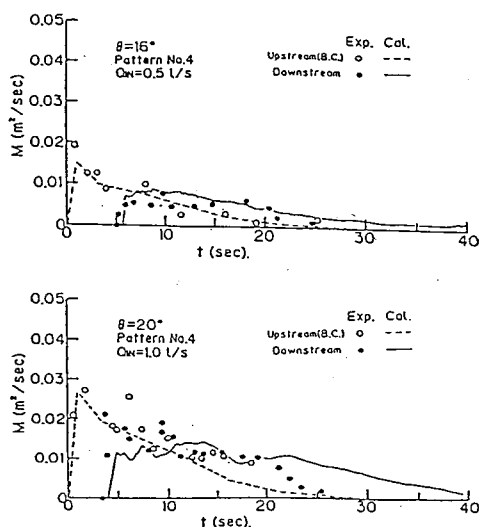


図6 ハイドログラフの計算値

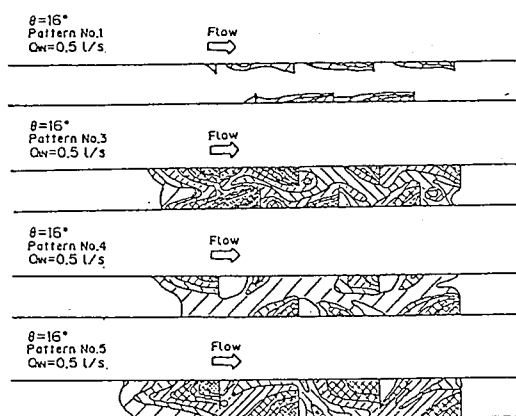


図7 最終堆積厚さ分布の計算値

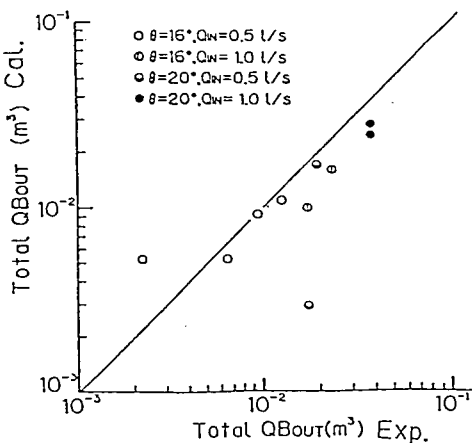


図8 総流出土砂量の計算値と実験値の比較