

4 微細粒土砂を含んだ土石流氾濫シミュレーション

八千代エンジニアリング株式会社 ○井戸清雄

建設省 土木研究所 砂防研究室 石川芳治、草野慎一、福澤誠

1. はじめに

土石流の危険区域を設定するための手法の一つとして、氾濫水の平面解析手法¹⁾を適用した土石流氾濫シミュレーション手法の研究開発を実施しており、実際の災害、実験結果の再現計算を通じて計算条件の設定法の検討、計算手法の改良を行なっている。ここでは、昨年²⁾と同様、水理実験結果の土石流シミュレーション計算を実施したのでその結果について示す。

2. 計算手法

この計算モデルは土石流、泥流による土砂移動から土石流が停止するような緩勾配での土砂氾濫、再侵食も取り扱うことができるよう平面を格子（メッシュ）に切り、各メッシュを出入りする時々刻々の流量、流砂量を計算し、その土砂収支から地盤高を計算する。

つまり、土石流の流動、堆積を土砂と水が一体となって流れ、堆積は停止したときに生じるという考え方ではなく、実際には流送能力に応じて濃度が減少して堆積（停止）するという見地にたって計算モデルを組み立てている。したがって、堆積しつつ流動したり、侵食しつつ流動する過程を表現することを目的としている。

具体的には、次の4種類の方程式、①土砂を含んだ水流の運動方程式、②土砂を含んだ水流の連続式③流砂量式及び④流砂の連続式を差分化¹¹し、連立して経時的に逐次計算を実施する。

2.1 土石流、洪水流の平面流れを表現する運動方程式

計算域の平面座標を X-Y 座標として示し、X 方向の運動方程式を整理すると以下のとおりである。
ただし、Y 方向については同型であるので省略する。

ここで、 M 、 N : X 、 Y 方向の流量フラックス、 β : 運動量補正係数、 u 、 v : X 、 Y 方向の流速、 h : 土石流等流体の水深、 g : 重力加速度、 τ_{bx} 、 τ_{by} : 各々 X 、 Y 方向の底面せん断応力、 ρ_0 : 流体の密度、 H : 水位 ($= z + h$)、 z : 地盤高、 h : 水深である。

τ_{bx} , τ_{bu} 項は、流体としての抵抗力であり、マニング型の抵抗則を用いると、以下のように表される。

ここに、 g ：重力加速度、 n ：マニングの粗度係数である。

2.2 土石流、洪水流全体の連続式

土石流、洪水流の連続式は下記の通りである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

2.3 流砂量の連続式

流砂量の連続式は、流动深中の土砂濃度を考慮し、粗粒、細粒の土砂各々について連続式をたてると次のようになる。Iは粗粒分を、fは細粒分を示す。

$$\frac{\partial (h + C_1)}{\partial t} + \frac{\partial z^1}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \cdot \left\{ \frac{\partial q Bx^1}{\partial x} + \frac{\partial q By^1}{\partial y} \right\} = 0 \quad \dots \dots (4)$$

$$\frac{\partial (h + C_f \cdot \cdot)}{\partial t} + \frac{\partial z^t}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \cdot \left\{ \frac{\partial q_{Bx^t}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By^t}}{\partial y} \right\} = 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 C_1 ：流動深中の粗粒土砂の濃度、 C_f ：流動深中の細粒土砂の濃度、 C_r ：流動深中の粗粒土砂分を除いた細粒土砂の濃度であり、下記の関係で土砂濃度で定義する。

2.4 流砂量式

流砂量式は、粗粒土砂分については次の高橋の土石流濃度式を用いた。

$$C_d = \frac{q_b}{q_a} = \frac{\rho_n \cdot s}{(\sigma - \rho_n) \cdot (\tan \phi - s)} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 ρ_n : 細粒土砂によって増加した土石流中の泥水の密度 ($\sigma \cdot C_f + (1.0 - C_f) \cdot \rho$) 、 ϕ : 内部摩擦角、 σ : 碾の密度、 q_b : 土石流中の粗粒分の流砂量、 q_t : 土石流全体の流量 ($= q_w + q_b + q_s$) すなわち流量フラックス M、N、 q_w : 土石流中の水の流量、 q_f : 土石流中の細粒分の流砂量である。s は地盤勾配、エネルギー勾配の大きい方で代表させた。

細粒分についてはWASH・LOADとして扱えるような微細粒子(0.1mm以下)を対象としたので、下記(8)のように代表粒径に対する沈降速度 W_t と当該地点の摩擦速度 U との対比によって設定した。

$$W_f > U \text{ のとき } C_f = 0 \quad \boxed{\quad} \quad (8)$$

3. 実験概要と計算条件

3.1 実験概要³⁾

実験は図-1に示したような土石流発生水路から勾配10~0.5度に漸減する12mの扇状地模型に土石流を氾濫させて実施された。その過程、結果が観察、測定されている。また、その時の使用された実験材料は図-2のとおりである。

土石流発生水路から流出する波形は水路末端で土砂濃度測定が実施されており、流出の最初10秒間は約60%の高濃度であるが60秒後では約40%、90秒後では約20%、120秒後では0%と濃度が減少する結果となっている。実験ケースは、氾濫域の地形条件、実験材料を変化させて実施された。

3.2 計算条件

計算の対象としたのは、通水開始90秒後（氾濫土砂量の総量、約240t）である。土砂の供給は、上

記の測定結果を10秒単位でモデル化して作成した。

計算メッシュ: 10cm・10cmの正方形メッシュ、粗粒分、細粒分の代表粒径: 3mm、0.05mm(図-2より0.1mm以下の代表として決定)、細粒運動量補正係数 $\beta = 1.0$ とした。計算時間刻みは0.01秒である。粗度係数n、内部摩擦角 ϕ は試算の結果、 $n = 0.02$ 、 $\phi = 20^\circ$ とした。

4. 計算結果

ここでは、4ケースの実験に対し、再現計算を実施した例を示す。計算結果と実験結果とを図-3～6に対比した。図-3は、扇状地に何もない状態に対して、重量比15% (容積比25%) のフライアッシュを含んだ土石流が扇状地に氾濫した場合の実験結果と計算結果である。この計算では計算と実験とがほぼ適合するように式(7)の内部摩擦角 ϕ を40°、30°、20°と減少させていった。40°、30°では水路出口近傍で堆積してしまい実験とはかなり異なる結果となった。図-3($\phi = 20^\circ$)に示した計算結果では、水流(細粒土砂)の氾濫範囲は、実験のものをよく近似している。堆積深10mm以上の土砂の堆積域も実験と計算との適合度は高いが形状が異なること、計算の方が上流部での堆積深が大きく、実験ほど下流に土砂が運ばれていない。細粒土砂成分の重量比30% (容積比50%) の計算結果(図-4)では、その傾向が顕著になっている。しかし、全体的な氾濫範囲は、よく近似されている。この計算結果から土砂濃度を内部摩擦角 ϕ を小さくすることで泥流的な微細土砂を多く含んだ土石流の流動、堆積を表現することができるものと考えられる。

図-5(盛土)、図-6(家屋群)では、構造物が扇状地にある場合の計算結果を示している。図-5では盛土で遊砂池的に土砂が貯えられ、堆積が下流に生じている状況が計算結果でよく表現されている。図-6では家屋群による影響を見たものであるが、計算は実験結果より堆積範囲、堆積深が大きいが、この場合も氾濫範囲はほぼ適合している。

5. 考察

高橋の濃度式の内部摩擦角 ϕ を減少させることによって微細土砂を含んだ土石流の氾濫・堆積状況の再現性を高めることができた。細粒土砂の量、割合による内部摩擦角 ϕ の設定法の一般化が必要であり、今後の課題としたい。

*) 参考文献

- 1)高橋、中川、西崎：堤防決壊による洪水危険度評価に関する研究(京大防研年報第29号)
- 2)井戸、水山、石川、福沢：細粒土砂を考慮した土石流氾濫シミュレーション計算(平成2年度砂防学会概要集)
- 3)石川、水山、福沢：扇状地における土石流の氾濫・堆積に関する実験的研究(平成2年度砂防学会概要集)

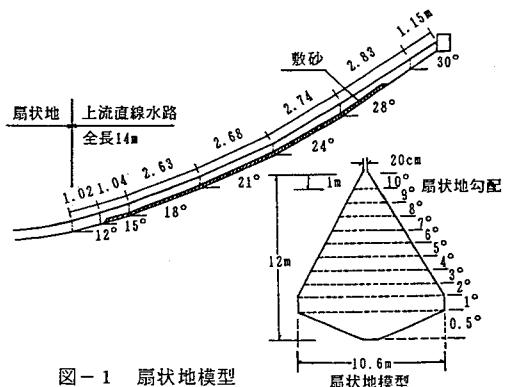


図-1 扇状地模型

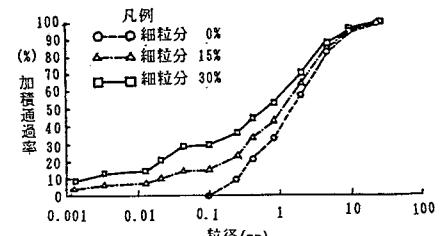


図-2 実験に用いた砂礫の粒径分布

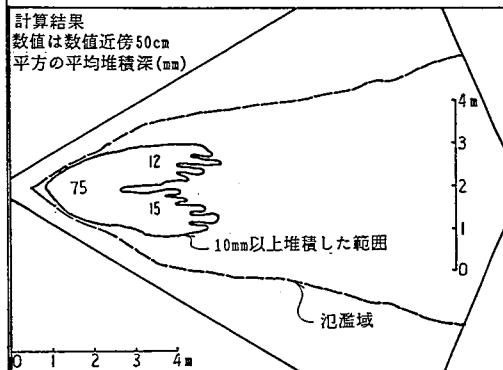
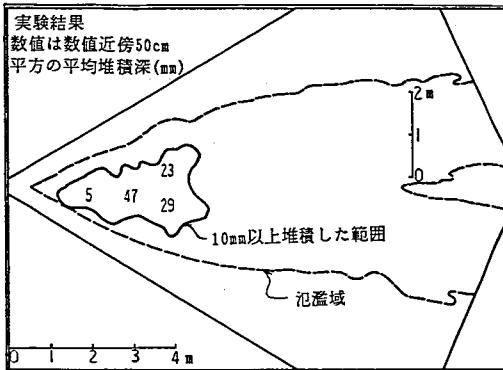


図-3 実験結果と計算結果との比較（細粒分15%）

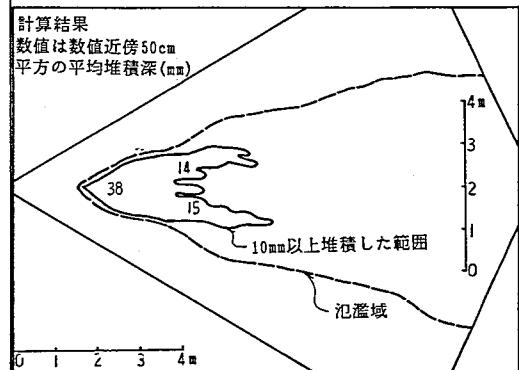
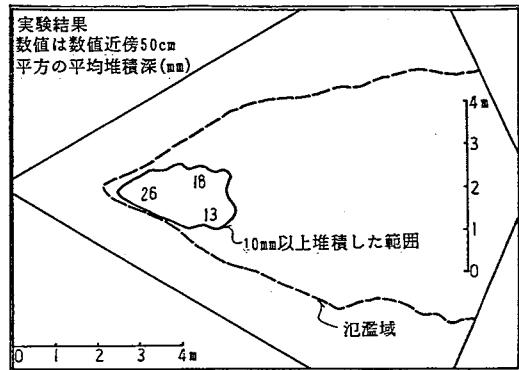


図-4 実験結果と計算結果との比較（細粒分30%）

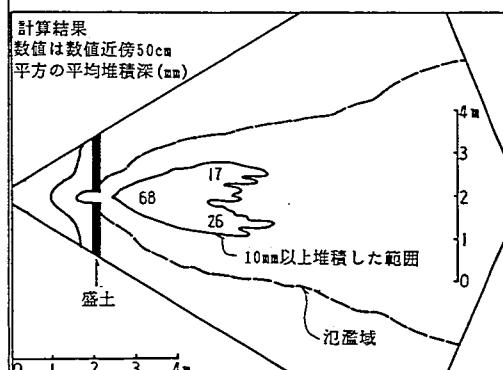
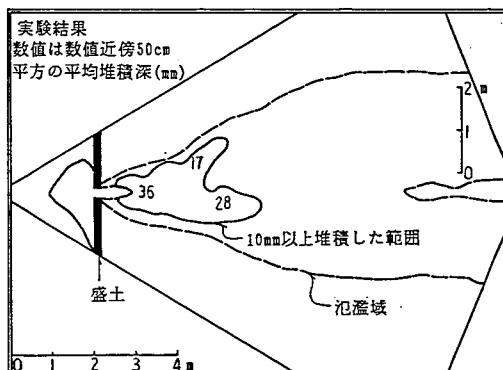


図-5 盛土がある場合の実験結果と計算結果の比較
(細粒分15%)

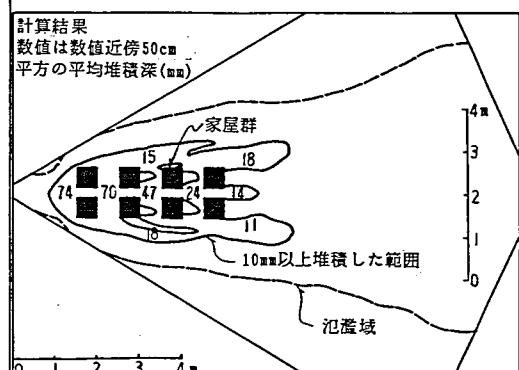
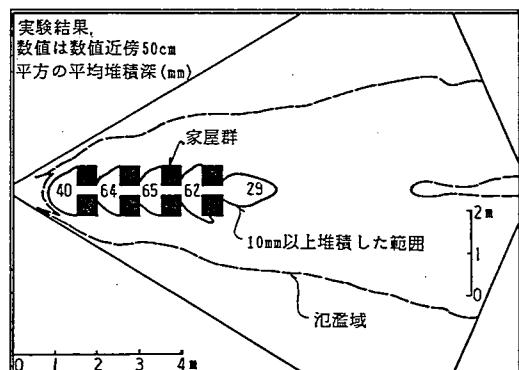


図-6 家屋群がある場合の実験結果と計算結果との比較
(細粒分15%)