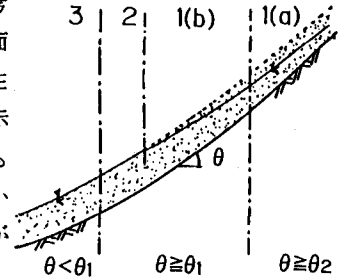


京都大学防災研究所 正員 高橋 保
 京都大学大学院 学生員 匡 尚富

1. はじめに 従来、土石流に関する理論的・実験的研究は、一様勾配、無限長堆積場を対象としたものが多いが、実際の流域で生ずる土石流の規模を予測するためには、変勾配、不規則堆積物上での土石流の発生過程が解析されなければならない。本研究は変勾配堆積物の表面流の発生に伴う土石流化の過程を取り扱う計算モデルを提示し、実験によって検討するものである。

2. 理論的考察 いま、図1のような勾配が連続的に変化する堆積層を考える。ここで、 θ_1 は土石流発生限界勾配であり、 θ_2 は浸透流が堆積層の表面に達した時に崩壊が発生する限界の勾配である。したがって、浸透流が存在する場合に堆積層が安定しているとすれば、浸透流の縦断形状は大略図に示したようであろう。このような場へ、上流から急激に表面流が供給されたものとする。1(a)および1(b)の間では、浸透流の水面が地表に達していないから、堆積物は表面流によって上から順に侵食されて行く。水と侵食土砂が2の領域に達すると、堆積層は全体に飽和されているので、表面流の流体力



のみならず、静的なせん断力の不均衡によって堆積層の上部が不安定となつて侵食を受ける。このようにして発達した土石流は3の領域に入り、もし濃度が過大であれば一部の土砂を堆積して流下して行く。このような過程は以下の方程式を連立に解くことによって解析されるであろう。

(1)式は流動式であり、Chezy型では $p = 1/2$ 、

$$q = ChR^p \sin \theta \tag{1}$$

dilatant型では $p = 3/2$ である。表面流が流入する

$$C = 0.7 g^{1/2} \frac{h}{d_m} R^{1/2-p} \tag{1a}$$

上流端近くでは濃度が薄く粗粒成分は流動層全体に分散できずに掃流状集合流動となる。このとき(1)

$$C = \frac{2}{5 d_m} \left[\frac{q}{0.02} \{ CL + (1 - CL) \frac{\rho_m}{\sigma} \} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C \cdot DL}{CL} \right)^{1/3} - 1 \right\} \tag{1b}$$

式の中の C を(1a)式のようにする。その後、濃度が十分に高くなると(1b)式を用いる。 d_m は粗粒分の平均粒径である。

$$\frac{dh}{dt} + \frac{dq}{dx} = j + r \tag{2}$$

(2)式は体積の連続式であり、 j は侵食・堆積速度、 r は単位長さ当りの横流入量である。

$$\frac{dV_L}{dt} + \frac{d(qCL)}{dx} = \begin{cases} iC_{*L} & : i \geq 0 \\ iC_{*DL} & : i < 0 \end{cases} \tag{3}$$

(3)、(4)式はそれぞれ粗粒成分および細粒成分の固体の連続式であり、 V_L 、 V_F は単位底面積の流動層の柱の中に含まれる粗粒および細粒の体積、 CL は粗粒が全容積中に占める濃度、 CF は粗粒成分を除いた容積中の細粒分濃度、 C_{*L} 、 C_{*F} は堆積層中の粗粒と細粒の濃度、 C_{*DL} は流動物が堆積するとき粗粒分が堆積する濃度である。

$$\frac{dV_F}{dt} + \frac{d[q(1-CL)CF]}{dx} = \begin{cases} iC_{*F} & : i \geq 0 \\ i(1-C_{*DL})CF & : i < 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$\frac{dD}{dt} + i = 0 \tag{5}$$

$$\theta = \theta_0 - \tan^{-1} \frac{dD}{ax} \tag{6}$$

(5)、(6)式はそれぞれ粗粒成分および細粒成分の固体の連続式であり、 V_L 、 V_F は単位底面積の流動層の柱の中に含まれる粗粒および細粒の体積、 CL は粗粒が全容積中に占める濃度、 CF は粗粒成分を除いた容積中の細粒分濃度、 C_{*L} 、 C_{*F} は堆積層中の粗粒と細粒の濃度、 C_{*DL} は流動物が堆積するとき粗粒分が堆積する濃度である。

$$i = f(\psi) \tag{7}$$

$$i = \alpha \frac{CT_{\infty} - CL \frac{(\sigma - \rho_m) \{ \tan \phi - \frac{CT(\sigma - \rho)}{CL(\sigma - \rho_m)} \tan \theta \}}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)}}{C_{*} - CT_{\infty}} \frac{q}{d_m} \tag{8}$$

$$i = \beta \frac{CL_{\infty} - CL}{C_{*DL}} \frac{q}{d_m} \tag{9}$$

(5)式は堆積層厚さの変化を、(6)式は堆積層表面の勾配変化を示す。 θ_0 は初期勾配である。

$$\rho_m = \sigma CF + (1 - CF)\rho \tag{10}$$

i 、 r 、およびその他の初期、境界条件等が与えられれば、(1)~(6)式によって、形成土石流のハイドログラフおよび濃度変化等をもとめることができる。ここで i が問題となる。図1の1(a)、1(b)の区

$$CT_{\infty} = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \tag{11}$$

$$CL_{\infty} = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \tag{12}$$

間では表面流の影響によって侵食され、侵食土砂は容易に運ばれるものと考えられるので、例えば、(7)式のような表現が可能であろうと推察される。2の区間では、静的な作用せん断力と抵抗力との考察から不安定となる厚さを求め、これがある時間遅れを取りながら移動して行くとの考察より、(8)式が得られ、堆積の場合には(9)式が得られる。 α 、 β は定数である。この考えは、流動土流の濃度がその地点の勾配で決まる流砂能力一杯の濃度よりも小さいほど侵食速度が大きくなり、逆にその濃度を上回るほど堆積速度が大きくなるということを示しており、微細成分の存在は(10)式のように流体密度を大きくすることによって、流砂能力を大きくすることに寄与している。

3. 実験 図2のような流路の幅が7cmの実験水路を製作して実験を行った。ここでは初期の堆積層の長さが下流端から270cm、堆積層厚10cmで、上流端から200cc/secの矩形波状の給水を行った実験ケースについて述べる。実験材料は図3のAのような粒度分布を持っており、 $C_u=0.64$ 、 $\tan \phi=0.75$ 、 $\sigma=2.65g/cm^3$ である。実験開始前に堆積層には浸透流を与えるが、このとき下流端から150cmの $\theta_0=18^\circ$ 地点より下流では僅かに表面流が発生して飽和状態となっているが、それより上流では浸透流水面は地表面下にある。

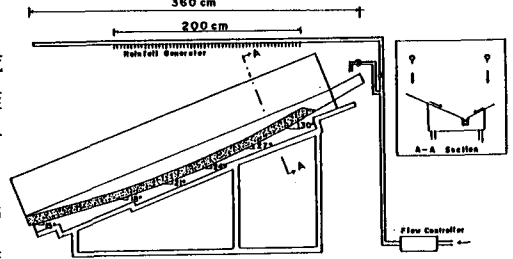


図2 実験水路

4. 実験と計算の比較 実験によって(7)式の関数関係を決定するまでに至らなかったため、上流部で実験による侵食速度と勾配の関係の回帰式を作成して計算にはこれを用いた。また、本実験では堆積がなく α 、 β のうち α が問題であるが、試行錯誤の後、最適値として $\alpha=0.0007$ を得た。微細砂と粗粒砂は便宜的に25%粒径で分け、抵抗力を決定する粗粒子は図3のBのような粒度分布を持っているものとし $d_m=1.8mm$ とした。図4、5、6は計算と実験の比較であり、ここで示した計算法によって比較的良好な現象が説明されていることが分かる。

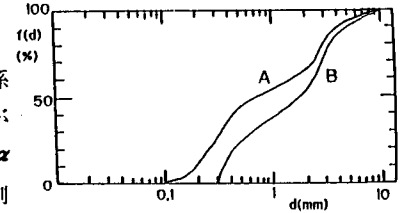


図3 実験材料の粒度分布

5. おわりに 図6において20秒以後実験値と計算値が合っていないのは固定床に与えた抵抗係数が不適當であったことによるが、全般に実験の流動深の変化が急激である。これは図5にも示されているように、侵食が進んだ時、上流部で全層流動に遷移することの影響である。今後この効果を加味した解析や不飽和域での侵食速度を与える式を求めることが必要である。

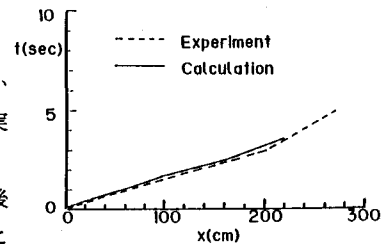


図4 先端到達速度

数値解析にあたって中川 一助手の助力を得た。また本研究の一部に文部省科学研究費、一般研究(C)60550362の補助を受けた。感謝する次第である。

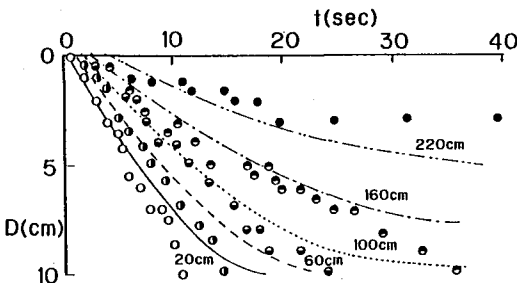


図5 堆積層の侵食

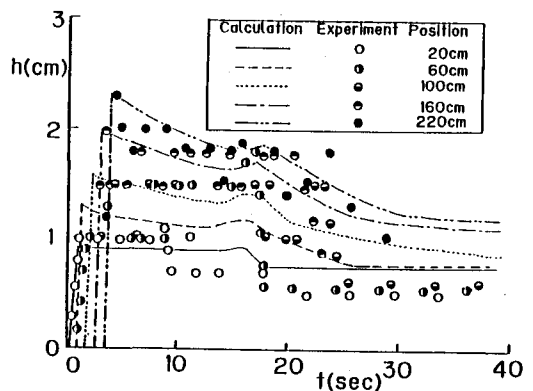


図6 各位置での流動深の変化