

泥流型土石流の氾濫堆積シミュレーション

A Numerical Simulation Method of the Mud Flow Deposition

新井宗之*・高橋 保**

By Muneyuki ARAI and Tamotsu TAKAHASHI

This paper describes a numerical simulation method for the deposition of the debris flow with high content of fine and cohesionless sediment. The model assumes that the excess quantity of sediment than the equilibrium deposits with the settling velocity. The validity of the simulation method is proved by the experiment in which the steep channel abruptly debouches to flat area.

Keywords: mudflow, deposition, simulation, experiment

1. はじめに

土石流の堆積過程についてはおもに石礫型土石流について多くのことが明らかにされている。石礫型土石流の堆積過程の研究で特徴的なことは、抵抗項の作用によって流れが停止堆積するということがある。この抵抗項として、高橋ら^{1),2),3)}は、含有する粒子群の衝突効果によって底面に作用するクーロン摩擦応力を考慮し、土石流の先端到達距離など堆積過程をうまく説明できることを見出している。奥田や武居⁴⁾はクーロン摩擦応力の他に流速の2乗に比例するような流体抵抗力を考慮したモデルを採用している。また、江頭・芦田ら^{5),6)}は土石流を連続体の流動であるとする概念において、流動中にもある降伏応力が働いており、勾配の変化によって推進力が降伏応力を下まわると直ちに停止・堆積するというモデルによって説明している。また、平野・橋本ら⁷⁾は粒子の停止距離に確率的な手法を取り入れている。しかしながら、非粘着性の微細な粒子を高濃度に含む流れにおける堆積過程についてもそのようなモデルが適応できるのかどうか必ずしも十分明らかにされていない。そこで、そのような泥流型土石流の堆積過程について検討し、急勾配の渓流から平坦な流域へ急激に流出する場合の堆積状況を推測できるシミュレーション法を考案した。

* 正会員 工修 名城大学講師 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区植釜口1-501)

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

2. 基礎方程式

微細な粒子を高濃度に含む流れは、固体粒子が停止・堆積するまでは連続体であるとしての取扱いが可能であると考えられる。そこで圧力項を静水圧近似とする漸変流とすれば、底面摩擦が卓越するとした2次元平面上の連続体の x 方向及び y 方向の運動量方程式はそれぞれ次式のようなものである。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta' \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \beta' \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta' \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \beta' \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (2)$$

ここに、 $M(=h \cdot u)$, $N(=h \cdot v)$: x および y 方向の流量フラックス, u, v : x および y 方向の平均流速, $H = z_b + h$, h : 流動深, z_b : 基準面からの河床高さ, τ_{bx}, τ_{by} : x および y 方向の底面摩擦応力, ρ_m : 流体の見かけの平均密度, g : 重力加速度, i : 堆積・侵食速度, β' : 運動量補正係数である。

また流動体の連続式及び粒子成分の固体部分に関する連続式はそれぞれ次式のようなものである。

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

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} + \frac{\partial(CM)}{\partial x} + \frac{\partial(CN)}{\partial y} = iC_* \quad (4)$$

ここに、 C : 個体粒子成分の容積濃度, C_* : 堆積層中の粒子の容積濃度, $V_s(=Ch)$: 流動深 h に含まれる個体粒子成分の容積である。

ここで式(1)および(2)の底面摩擦応力を次のような形で与えるものとする。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_m} = \frac{f}{8} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho_m} = \frac{f}{8} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

摩擦係数の f としては泥流型土石流の抵抗則である次式を用いる⁸⁾。

$$f = 8 \left[\frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1}\left(\frac{1}{\phi}\right) - \sinh^{-1}\left(\frac{Y_0}{\phi}\right) - \sqrt{1 + \phi^2} + \phi \right\} \right]^{-2} \quad (7)$$

$$\phi^2 = \lambda^2 \left(\frac{\alpha_0}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_m} \right) \left(\frac{d}{h} \right)^2, \quad \lambda = \frac{1}{(C_*/C)^{1/3} - 1} \quad (8)$$

ここに、 $Y_0 = y_0/h$ で、滑面のとき $y_0 = (a\nu_0)/u_*$, $a = 1/9.025$, 粗面のとき $y_0 = bk_s$, $b = 1/30$, k_s : 粗度高さ, ν_0 : 水の動粘性係数, α_0 : Bagnoldによる定数 ($a; \sin \alpha = 0.022$), α : 粒子の衝突角, κ : カルマン定数⁹⁾, $u_* = \sqrt{gh \sin \theta}$, θ : 河床勾配である。ただし、式(7)を適用するのは、その誘導過程において、 s を粒子の水中比重とすれば、

$$\frac{h}{d} \geq \frac{s \left\{ \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu_0^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu_0^2}{sgd^3}} \right\}}{\sin \alpha \left\{ sC \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \right) + 1 \right\}} \quad (9)$$

を満足する必要がある、これを満足しない場合には、次式のように対数則を用いるものとする。

$$f = 8 \left\{ A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) \right\}^{-2} \quad (10)$$

浮遊粒子の濃度 C を平衡濃度とするような摩擦速度を U_{*c} とすると、流れの U_* が U_{*c} よりも大きい場合には堆積はなく、小さい場合には粒子は沈降堆積するものと考え、堆積速度 i を

$$i = f(\tau_*, C, w_s) = \begin{cases} -f_1(\tau_*) \frac{C - C_d}{C_*} w_s, & U_* < U_{*c} \\ 0 & U_* \geq U_{*c} \end{cases} \quad (11)$$

のように表すことができるであろう。ここに、 C_d は対象地点に対応する平衡濃度で、 $f_1(\tau_*)$ は無次元掃流力 τ_* の関数であるとする。ここで取り扱うような急激な非定常な現象において f_1 などの関数関係を明確にする事は今のところ困難であるが、流速 u が U_{*c} に対応する流速 U_c よりも小さくなればなるほど急激に堆積が進くと、 $C_* \gg C_d$ の場合を考えると、上式は、

$$i = \begin{cases} -\{1 - (\frac{|u|}{U_c})^m\} \frac{C}{C_*} w_s, & U_* < U_{*c} \\ 0 & U_* \geq U_{*c} \end{cases} \quad (12)$$

のように近似できるものとする¹⁰⁾。

また地盤高の変化と堆積速度の関係は次式のようなのである。

$$\frac{dz}{dt} + i = 0 \quad (13)$$

3. 計算法

数値計算は高橋・中川らによって汜濫解析に使用された中央差分による方法¹¹⁾を基にした差分計算法を用いる。

基礎式の差分式として中央差分を用いれば、 x 方向の運動方程式(1)式は、非線形項 $\partial(uM)/\partial x$, $\partial(vM)/\partial y$ をそれぞれ XDX , XDY と表し、次のように求められる。

$$\begin{aligned} & \frac{M_{i-1/2,j}^{n+1} - M_{i-1/2,j}^n}{\Delta t} + XDX + XDY \\ & = -g(h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n) \frac{H_{i,j}^n - H_{i-1,j}^n}{2\Delta x} - \frac{f}{8} u_{i-1/2,j}^n \sqrt{(u_{i-1/2,j}^n)^2 + (v_{M_{i-1/2,j}^n})^2} \end{aligned} \quad (14)$$

$$v_{M_{i-1/2,j}^n} = \frac{v_{i,j-1/2}^n + v_{i,j+1/2}^n + v_{i-1,j-1/2}^n + v_{i-1,j+1/2}^n}{4} \quad (15)$$

$$u_{i-1/2,j}^n = \frac{M_{i-1/2,j}^n}{\frac{1}{2}(h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1})} \quad (16)$$

$$v_{i,j-1/2}^n = \frac{N_{i,j-1/2}^n}{\frac{1}{2}(h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1})} \quad (17)$$

式中の XDX , XDY は、流速の正負により前進差分と後退差分を使い分ける風上差分を用い、それぞれ

次式のような差分を用いる.

$$XDX = \frac{\partial(uM)}{\partial x} = \begin{cases} u_{i-1/2,j}^n M_{i-1/2,j}^n - u_{i-3/2,j}^n M_{i-3/2,j}^n, & \text{if } u \geq 0 \\ u_{i+1/2,j}^n M_{i+1/2,j}^n - u_{i-1/2,j}^n M_{i-1/2,j}^n, & \text{if } u < 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$XDY = \frac{\partial(vM)}{\partial y} = \begin{cases} v_{i-1/2,j}^n M_{i-1/2,j}^n - v_{i-1/2,j-1}^n M_{i-1/2,j-1}^n & \text{if } v \geq 0 \\ v_{i-1/2,j+1}^n M_{i-1/2,j+1}^n - v_{i-1/2,j}^n M_{i-1/2,j}^n & \text{if } v < 0 \end{cases} \quad (19)$$

また, y 方向の運動方程式 (2) に対しても同様に差分化することができ次式のようなである.

$$\frac{N_{i,j-1/2}^{n+1} - N_{i,j-1/2}^n}{\Delta t} + YDX + YDY \quad (20)$$

$$= -g(h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n) \frac{H_{i,j}^n - H_{i,j-1}^n}{2\Delta x} - \frac{f}{8} v_{i,j-1/2}^n \sqrt{(u_{M,i,j-1/2}^n)^2 + (v_{i,j-1/2}^n)^2}$$

$$u_{M,i,j-1/2}^n = \frac{u_{i-1/2,j}^n + u_{i+1/2,j}^n + u_{i-1/2,j-1}^n + u_{i+1/2,j-1}^n}{4} \quad (21)$$

$$YDX = \frac{\partial(uN)}{\partial x} = \begin{cases} u_{i,j-1/2}^n N_{i,j-1/2}^n - u_{i,j-3/2}^n N_{i,j-3/2}^n, & \text{if } u \geq 0 \\ u_{i,j+1/2}^n N_{i,j+1/2}^n - u_{i,j-1/2}^n N_{i,j-1/2}^n, & \text{if } u < 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$YDY = \frac{\partial(vN)}{\partial y} = \begin{cases} v_{i,j-1/2}^n N_{i,j-1/2}^n - v_{i-1,j-1/2}^n N_{i-1,j-1/2}^n & \text{if } v \geq 0 \\ v_{i+1,j-1/2}^n N_{i+1,j-1/2}^n - v_{i,j-1/2}^n N_{i,j-1/2}^n & \text{if } v < 0 \end{cases} \quad (23)$$

計算上の格子点の取り方は従来から用いられているように, M , N 及び h の関係を図 - 1 (a) のように $\Delta x/2$, $\Delta y/2$ ずつずらして配置するような格子点としている. また時間ステップは, M , N , h を同一時間上として計算した.

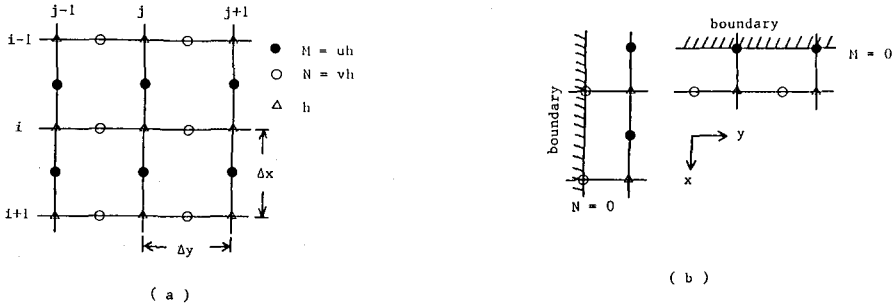


図-1 計算格子

境界条件については, 急勾配の狭い水路から流路幅が急拡し, かつ, 地表面勾配が急に緩くなる地点へ土石流が流出する場合を取り扱うので, 境界メッシュを1次元水路と平面域との接続部, 平面水路壁面及び平面水路下流端で設けるものとする. 平面域への流入部境界格子においては, 流量フラックス M , N 及び流速 u , v の流入ハイドログラフを与え, 壁面における境界条件は図 - 1 (b) のように, x 方向の壁面上に流量フラックス N が, y 方向の壁面上に流量フラックス M が配置されるようにとり, M , N それぞれを 0 とする. また, 下流端での流れは自由放出とし, 限界水深を与えるものとした.

流れの連続式 (3) 式, および粒子成分の連続式 (4) 式の差分は, それぞれ次式のようなである.

$$\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{M_{i+1/2,j}^{n+1} - M_{i-1/2,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{N_{i,j+1/2}^{n+1} - N_{i,j-1/2}^{n+1}}{\Delta y} = i_{i,j}^{n+1} \quad (24)$$

$$\frac{V_{s,i,j}^{n+1} - V_{s,i,j}^n}{\Delta t} + \frac{C_{i,j}^{n+1} M_{i+1,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1} M_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{C_{i,j}^{n+1} N_{i,j+1}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1} N_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = i_{i,j}^{n+1} C_* \quad (25)$$

また、堆積速度を表す式(11)の差分式は次式のようなのである。

$$\frac{z_{i,j}^{n+1} - z_{i,j}^n}{\Delta t} = i_{i,j}^{n+1} \quad (26)$$

泥流の抵抗則は基礎方程式のところで述べたように、式(9)を満足する場合には泥流型土石流の抵抗則(7)式を用い、満足しない場合には式(10)の対数則を用いるものとする。堆積速度*i*については式(12)とし、式中の*U_c*は泥流型土石流の適応条件すなわち粒子の浮遊条件式(9)で両辺が等しくなる損失勾配*θ*を泥流型土石流の流動式(27)に代入して得られる流速で与えることにする。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi} \right) - \sqrt{1 + \phi^2} + \phi \right\} \quad (27)$$

4. 実験の概要

実験水路は、図-2に示すように、上流側の直線水路と下流側平面水路で構成されている。上流側水路は、長さ6 m、幅15 cm、水路勾配 $\theta_u = 18^\circ$ 、下流側平面水路は190 cm四方の平板であり縦断勾配は $\theta_d = 0 \sim 3^\circ$ で可変である。

また、上流側直線水路の両側壁はアクリル製、河床はスチール製でペンキ塗布仕上りである。下流側平面水路は、アクリル製で、河床がアクリル材のままの滑面の場合と実験砂を塗布した粗面の場合とで実験を行っている。

実験砂は、図-3に示すようにそれぞれ中央粒径 $d_{50} = 0.339, 0.203, 0.084$ mm、密度 $\sigma = 2.63, 2.60, 2.66$ g/cm³、充填濃度 $C_* = 0.54, 0.58, 0.57$ である。

実験は水路の上流端より給水及び給砂を所定の時間行い、下流側平面水路に土石流を流入させた。濃度、流量はあらかじめ給水、給砂の検定を十分行い所定の実験条件に設定した。

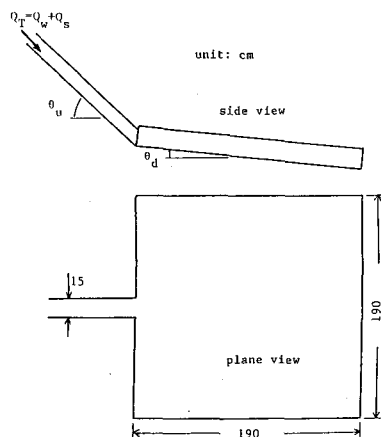


図-2 実験水路

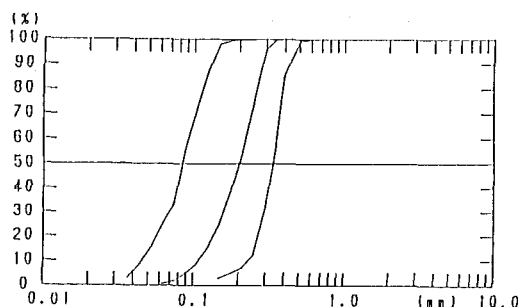


図-3 粒径累加積曲線

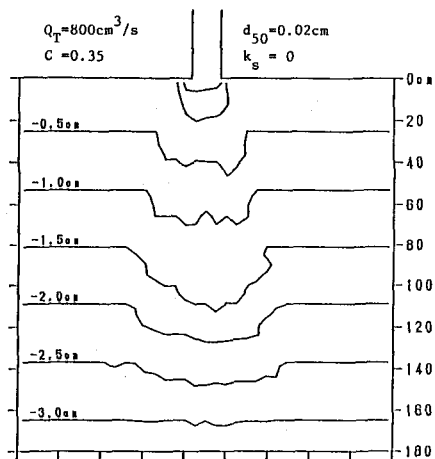


図-4 堆積等高線($k_s = 0$)

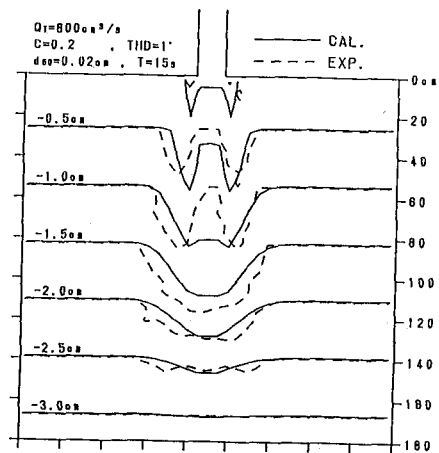


図-7 堆積等高線($C = 0.2$)

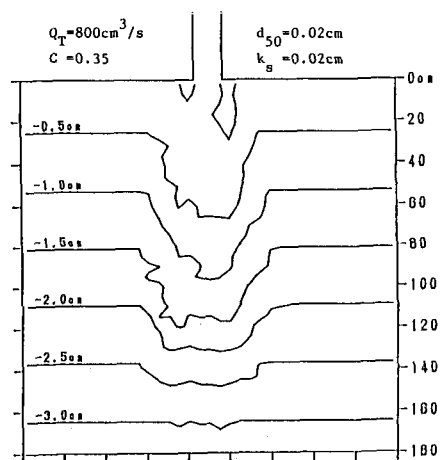


図-5 堆積等高線($k_s = d$)

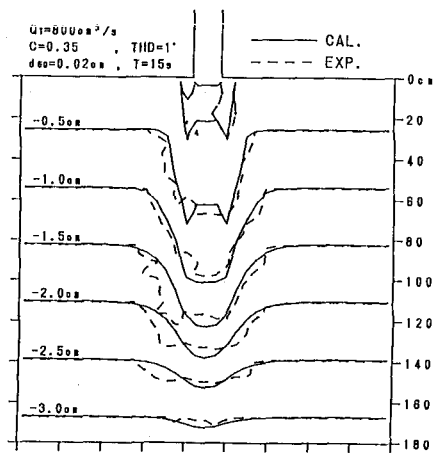


図-8 堆積等高線($C = 0.35$)

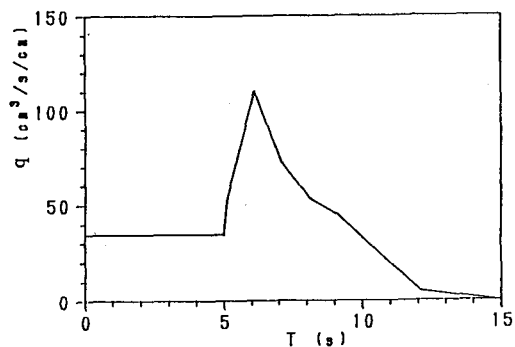


図-6 流入ハイドログラフ

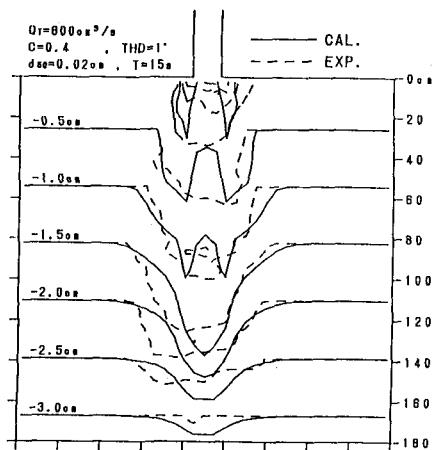


図-9 堆積等高線($C = 0.4$)

5. 考察

図 - 4および 図 - 5は濃度 $C = 0.35$, 粒径 $d_{50} = 0.203 \text{ mm}$, 平面水路の勾配 $\theta = 1^\circ$, 上流端供給流量 $Q_T = 800 \text{ cm}^3/\text{s}$ を5秒間供給した実験結果である。図 - 4は平面水路の河床が発砲スチロールの滑面の場合で, 図 - 5は実験砂と同じ土砂を塗布したものである。河床に実験砂を塗布した図 - 5は図 - 4の実験結果に比べ流入点近くで若干堆積高が大きいがいさほど大きな違いはないようである。数値計算においては, 粗度をつけてある場合の実験結果との比較検討をしている。計算での境界条件は平面水路流入部でハイドログラフを与え, 他の境界面では図 - 1(b)のように x 軸に平行な境界は N の格子点上にとり, y 軸に平行な境界は M の格子点上にとり, それぞれ M, N の流量フラックスは0としている。図 - 6は計算条件としての流入ハイドログラフである。最初5秒間清水を流しその後土砂を供給して濃度を $C = 0.35$ としたハイドログラフである。ただし, これは水路出口で測定した表面流速をもとに推測したものである。図 - 7, 図 - 8および 図 - 9は上流端流量 $Q_T = 800 \text{ cm}^3/\text{s}$, 平面水路勾配 $\theta_d = 1^\circ$, 粒径 $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$, それぞれ濃度 $C = 0.2, 0.35, 0.4$ で供給流量を5秒間供給した後の堆積形状である。破線が実験結果であり, 実線が計算結果である。また, 図 - 10は濃度 $C = 0.35$ の場合の横断方向(y 軸方向)の堆積断面形状の図であり, 実線, 破線は同様に計算値, 実験結果を表している。図は流入点から下流へそれぞれ, $x = 60, 100, 160 \text{ cm}$ の位置での堆積形状を示している。実験結果と計算値は比較的良好に一致しているといえる。図 - 11は流入部中央から流下方向(x 方向)への縦断面を表している。同様に, 計算値, 実験結果が実線, 破線で示してある。 $x = 0$ の流入点付近では実験では堆積はほとんどないが, 計算では堆積を示している。しかしながら全体には, 計算結果と実験値は良く対応している。これは, 非粘着性の泥流型土石流の堆積過程においては, 過剰な濃度の粒子が沈降堆積するという考えに基づく式(12)の堆積速度のモデルの妥当性を示しているものと思われる。

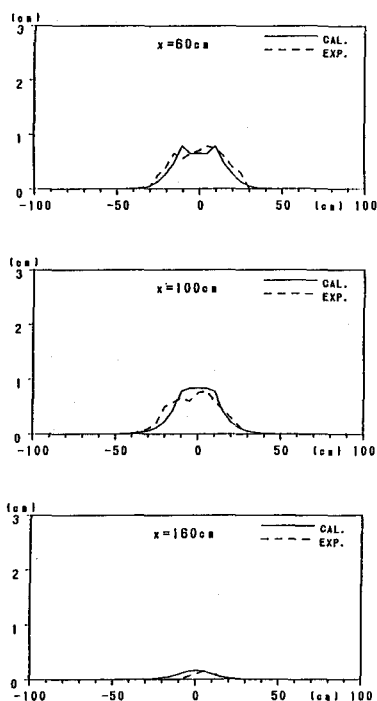


図-11 縦断堆積高

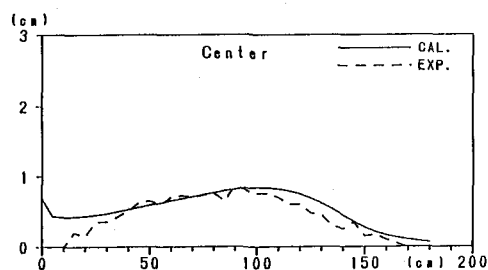


図-10 縦断堆積高

6. 結 語

以上、非粘着性の微細な粒子を高濃度に含む流れの堆積過程について実験及びその数値シミュレーションによって検討した。石礫型土石流の堆積過程においては、抵抗項にクーロン摩擦応力が重要であるとしてその現象が説明されてきている。しかし、泥流型土石流では、勾配急変に基づく外力の低下によって過剰となる浮遊粒子が沈降堆積するというモデルを提案し、その妥当性を示した。

参考文献

- 1) 高橋 保, 吉田 等: 土石流の停止・堆積機構に関する研究(1) — 勾配の急変による堆積 —, 京都大学防災研究所年報, 第22号 B-2, 1979, pp. 315-327.
- 2) 高橋 保: 土石流の停止・堆積機構に関する研究(2) — 土石流扇状地の形成過程 —, 京都大学防災研究所年報, 第23号 B-2, 1980, pp. 443-456.
- 3) 高橋 保: 土石流の停止・堆積機構に関する研究(3) — 土石流扇状地の二次侵食 —, 京都大学防災研究所年報, 第25号 B-2, 1982, pp. 327-348.
- 4) 武居有恒: 確率論的手法による危険範囲の予測, 「扇状地における洪水土砂災害の発生とその防止軽減に関する研究」(研究代表者 芦田和男), 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果, 1982.8, pp. 82-91.
- 5) 江頭進治, 芦田和男, 佐々木 浩: 土石流の流動機構, 第32回水理講演会論文集, 1988, pp. 485-490.
- 6) 芦田和男, 江頭進治, 矢島 啓: 土石流の流動・堆積機構, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-2, 1988, pp. 411-422.
- 7) 平野宗夫, 橋本晴行, 田崎武詞, 宮島正悟: 勾配の急減と幅の急拡による土石流の堆積過程 — 粒子の停止距離について —, 水工学論文集, 第35巻, 1991, pp. 543-458.
- 8) 新井宗之, 高橋 保: 泥流型土石流の流動機構, 土木学会論文集, No.375, 1989, pp. 69-77.
- 9) Arai, M. and Takahashi, T.: The Kármán constant of the flow laden with high sediment, Proc. 3rd International Symposium on River Sedimentation, Mississippi, 1986, pp. 824-833.
- 10) Arai, M. and Takahashi, T.: Depositing process of mud flow on gentle slope bed plunging from steep slope, Proc. of 6th Congress A.P.D.-IAHR, Vol.2-1, 1988, pp. 83-90.
- 11) 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.