

土石流の流出土砂量に及ぼす形状係数の重要性

IMPORTANCE OF CORRECTION FACTOR ASSOCIATED WITH SEDIMENT CONCENTRATION DISTRIBUTION IN DEBRIS FLOW

伊藤隆郭¹・江頭進治²
Takahiro ITOH and Shinji EGASHIRA

¹正会員 博士(工学) 立命館大学理工学部環境システム工学科 講師(〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学理工学部土木工学科 教授(〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

Debris flow characteristics such as flow discharge, mean flow velocity, mean sediment concentration, sediment runoff volume and so on are usually predicted by solving the governing equations numerically. Formulas for erosion/deposition rate and flow resistance play important roles in mass and momentum equations. In addition, potential erosion depth and sediment correction factor also affect largely the debris flow characteristics.

The present study emphasizes the importance of the correction factor for sediment concentration and velocity profiles in predicting sediment transport rate and sediment runoff volume. According to Egashira et al.'s theory, sediment is concentrated near the bed, and this non-homogeneity increases with decreasing bed slope. This means the flux sediment concentration of a debris flow differs from the volumetric cross-sectional mean concentration. Correspondingly, sediment runoff volume simulated without a correction factor is very different from actual runoff volume. In this paper, we present a method for predicting the correction factor for sediment discharge, and discuss simulated results of runoff process of debris flow in a flume.

Key Words : *correction factor, numerical simulation, debris flow, sediment concentration profile, erodible bed*

1. 緒言

山地部の溪流での任意断面を通過する土石流の流量、流速、粒子濃度、および流出土砂量といった流れの特性値を予測するために、通常、数値計算が行われる。扇状地に輸送される土砂量や流量に関する計算結果を用いて、土砂災害対策に有用な多くの有用な知見が得られている^{1)~4)}。

数値解析においては、砂礫と水の混合物に関する水深平均された質量および運動量保存則が用いられるが、それらの式において、河床の侵食速度や河床せん断力の評価が重要になる。ところが、混合物の流れの構造は非常に複雑であり、その構成則を合理的に導くことは非常に困難である。そのため、数多くの構成則が提案されている^{5)~11)}。いま、仮に粗粒子と水との混合物の流れを土石流と定義したとしても、我が国に限ってみても、幾つかの土石流の構成則が提案されている。著者ら¹²⁾は、ある統一的な基準のもとで、これらの構成則を比較し、等流のもとでの流速分布や粒子濃度分布等に関する流れの構造について比較検討を行っている。それによれば、江頭^{9)~11)}らの構成則を等流の運動量保存則に適用して得られる流速分布、粒子濃度分布、輸送濃度、および流れの抵抗に関する計算結果は、土石流から掃流砂を

伴う広い流れが連続的に遷移すると共に、実験データの傾向を非常によく説明している。さらに、移動床流れの砂礫の断面平均濃度と輸送濃度が異なることも示している。これは、砂礫の輸送において、流速・粒子濃度の分布形状の影響が非常に大きいことを示すものである。

しかしながら、土石流の数値解析の支配方程式における流速・粒子濃度の分布形状の影響は、殆ど議論されていない。このような状況において、著者らは現地を対象とした土石流の数値解析において、流出土砂量に及ぼす土石流の侵食可能深と流速・粒子濃度分布形状の影響が大きいことを示している¹³⁾。ここで、土砂輸送量に及ぼす流速と粒子濃度の分布形状の影響を表すパラメータを形状係数と呼ぶことにする。このとき、これを用いた計算結果と用いないものとを比べると、土石流による土砂輸送量の見積りに大きな違いが生まれることが容易に想像できる。

本研究においては、まず、流速・粒子濃度の分布形状に起因する形状係数を定義する。次いで、等流のもとで著者らの土石流の構成則を運動量保存則に適用して求められる粒子濃度・流速分布を用いて、形状係数を数値的に求め、その結果を示す。さらに、その結果を土石流の支配方程式に適用して1次元流れの数値計算を行い、得られた計算結果を用いて形状係数の重要性、および

その妥当性について検討する。

2. 土石流の構成則と流れの特性

(1) 構成則

砂礫と水との混合物の流れに関する非圧縮性連続体の2次元等流状態の運動量保存則は、図-1を参照すると、次のように表される。

$$0 = \int_z^{h_t} \rho_m g \sin \theta dz - \tau(z) \quad (1)$$

$$0 = \int_z^{h_t} \rho_m g \cos \theta dz - p(z) \quad (2)$$

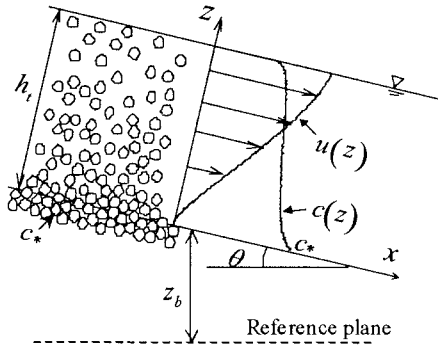


図-1 移動床における等流状態の土石流の模式図

ここに、 h_t は流動深、 g は重力加速度、 p は応力の等方圧成分(圧力)、 z は河床に垂直な座標系、 θ は x 軸と水平とのなす角度、 τ はせん断応力、 ρ_m は混合物の質量密度であり、 $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ のように表される。ここに、 ρ は水の質量密度、 σ は砂礫の質量密度、 c は混合物中の粒子の体積濃度である。

江頭ら^{9), 10)}、および宮本⁸⁾は、エネルギー散逸関数に着目して、せん断応力と圧力がそれぞれ次のように求めている。

$$\tau = \tau_y + \tau_d + \tau_f \quad (3)$$

$$p = p_s + p_d + p_w \quad (4)$$

ここに、 τ_y は降伏応力、 τ_f は粒子間隙流体の乱れによる応力、 τ_d は粒子の非弾性衝突に伴う応力、 p_s は粒子の接触圧力、 p_d は粒子の非弾性衝突の前後で保存されるエネルギーに対応する圧力、 p_w は間隙水圧である。これらのせん断応力、および圧力はそれぞれ次式のようにである¹⁰⁾。

$$\tau_y = p_s \tan \phi_s \quad (5)$$

$$\tau_d = \sigma k_d (1 - e^2) c^{1/3} d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\tau_f = \rho k_f (1 - c)^{5/3} c^{-2/3} d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$p_d = \sigma k_d e^2 c^{1/3} d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (8)$$

$$p_w = \rho g (h_t - z) \cos \theta \quad (9)$$

$$p_s / (p_d + p_s) = (c / c_*)^{1/5} \quad (10)$$

ここに、 ϕ_s は砂礫の内部摩擦角、 e は砂礫の反発係数、 d は砂礫の粒子径、 u は流速、 c_* は砂礫の静止堆積層における体積濃度、 k_f は実験定数で0.16、 k_d は0.0828である。

(2) 流速分布および粒子濃度分布

式(1)と式(2)に式(5)～式(9)を代入すると、運動方程式の x 、 z 成分はそれぞれ次式で与えられる¹⁰⁾。

$$p_s \tan \phi_s + \rho (f_f + f_d) d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = \int_z^{h_t} \rho \{ (\sigma / \rho - 1) c + 1 \} g \sin \theta dz \quad (11)$$

$$p_s + \rho f_{pd} d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = \int_z^{h_t} \rho (\sigma / \rho - 1) c g \cos \theta dz \quad (12)$$

ここに、

$$f_d = k_d (1 - e^2) (\sigma / \rho) c^{1/3}, \quad f_f = k_f (1 - c)^{5/3} c^{-2/3}$$

$$f_{pd} = k_d e^2 (\sigma / \rho) c^{1/3}$$

式(10)、式(11)、および式(12)を用いると、流速と粒子濃度に関する微分方程式がそれぞれ次式のように導かれる。

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = \frac{h_t}{d} \left[\frac{G - Y}{f_d + f_f} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$(1 - z') \frac{\partial F}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial z'} = F - c \quad (14)$$

ここに、

$$z' = z / h_t, \quad u' = u / \sqrt{g h_t},$$

$$G = \sin \theta \int_z^1 \{ (\sigma / \rho - 1) c + 1 \} dz',$$

$$Y = (c / c_*)^{1/5} \cos \theta \tan \phi_s \int_z^1 (\sigma / \rho - 1) c dz',$$

$$F = f_{pd} \tan \theta / [(\sigma / \rho - 1) (F_1 - F_2)],$$

$$F_1 = f_f + f_d - f_{pd} \tan \theta,$$

$$F_2 = (c / c_*)^{1/5} (f_f + f_d - f_{pd} \tan \phi_s)$$

移動床および固定床上の土石流の流速・粒子濃度は、式(10)、式(13)および式(14)を連立して、数値的に求められる(これを、以後、「厳密解」と呼ぶ)。なお、ここで対象とする固定床流れは、土石流本体に含まれる粒子同士の摩擦係数と粒子と河床の摩擦係数が等しい粗面流れである。図-2 (a)および(b)は、固定床および移動床上における土石流の流速、粒子濃度、および応力分布に関する厳密解の一例である。図において、流速、粒子濃度、および応力分布はそれぞれ、表面流速 u_s 、静止堆積濃度 c_* 、および底面せん断力 τ_0 を用いて基準化している。計算においては、それぞれ次のようなパラメー

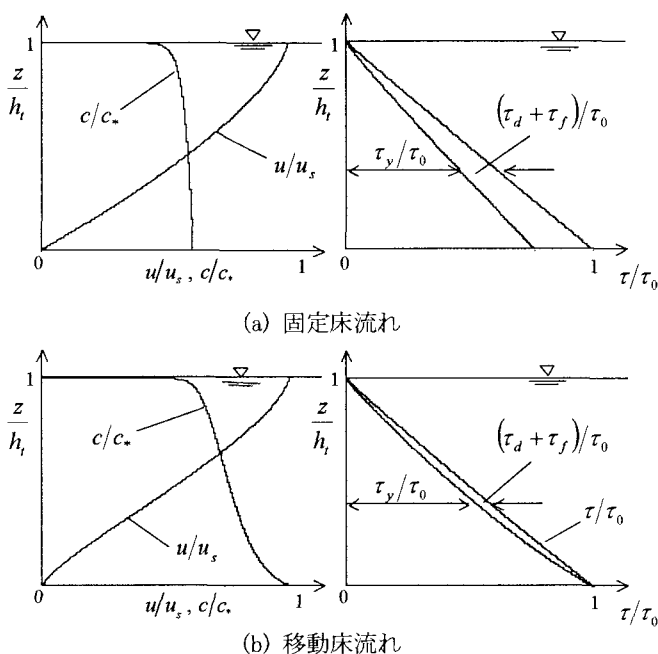


図-2 流速、粒子濃度および応力分布(厳密解)

タを用いている。移動床： $\theta = 15^\circ$ ， $\phi_s = 34^\circ$ ， $e = 0.85$ ， $c_* = 0.524$ ， $\sigma/\rho = 2.65$ ，固定床： $c_f = 0.3$ ，その他のパラメータは移動床のものと同一である。ここに、 c_f は砂礫の輸送濃度で、 $c_f \equiv \int_0^h c u dz / \int_0^h u dz$ である。なお、計算の境界条件は、移動床においては、 $z=0$ で、 $u=0$ ， $c=c_*$ である。固定床においては、先に述べたように、河床におけるスリップが生じない粗面流れを想定し、流速については $z=0$ で $u=0$ とする。一方、河床の底面濃度は、粒子濃度や勾配の関数であるが、これを陽に決定することが困難であるため、与えられる粒子濃度や勾配に対して、固定床における応力分布を満たすように陰的に決定する^{11), 15)}。

図-3は、流速・粒子濃度の厳密解を輸送濃度の定義式に代入して求められた移動床における勾配と輸送濃度の関係である。物理パラメータは、図-2の計算において用いたものと同一のものを用いている。図には、比較のため、著者らによって得られた輸送濃度に関する実験データ^{11), 14)}と次式に示す移動床における断面平均濃度 $\bar{c}$ に関する表示式^{10), 11)}を示している。

$$\bar{c} \equiv \int_0^h c dz / h_t = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (15)$$

図-2にみられるように、移動床流れにおいては、河床において外力と降伏応力が釣り合う必要がある。これに対して固定床流れにおいては、河床において外力と降伏応力が釣り合わないため、両者の応力分布形には明瞭な違いがみられる^{11), 15)}。このような河床近傍における応力分布の違いが、流速・粒子濃度分布形に反映される。特に、移動床流れにおいては、図-2および図-3に示すように、輸送濃度と断面平均濃度の違いは大きく、土砂輸送に及ぼす流速・粒子濃度の分布形状の影響は大きいことが分かる。このような傾向は勾配 θ が小さく

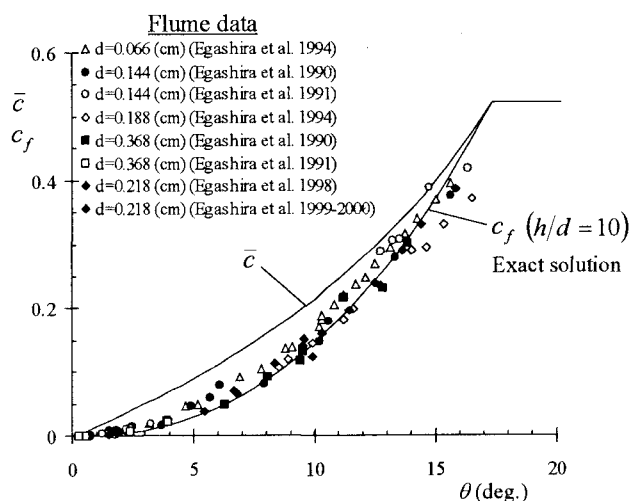


図-3 勾配と輸送濃度・断面平均濃度の関係

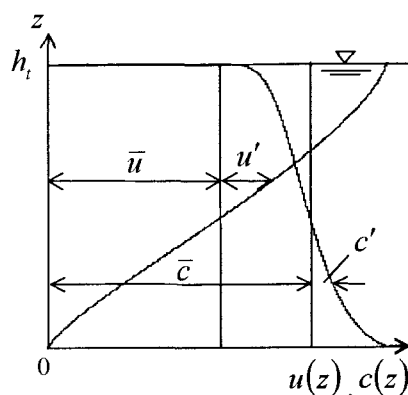


図-4 流速・粒子濃度の断面平均値と偏差成分

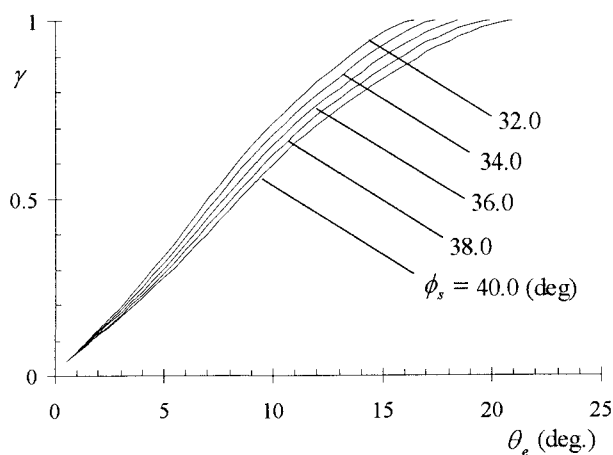


図-5 平衡勾配と形状係数の関係

なるほど顕著になる。

(3) 形状係数

輸送濃度と断面平均濃度の違いを表すパラメータを次のように定義しよう。図-4に示すように、局所流速と局所平均濃度を、それぞれ次式のように、断面平均値と平均値からの偏差成分を用いて表す。

$$u(z) = \bar{u} + u'(z) \quad (16), \quad c(z) = \bar{c} + c'(z) \quad (17)$$

ここに、 $\bar{u}$ および $\bar{c}$ は、断面平均流速、および断面平均

濃度, u' および c' は, 流速および粒子濃度の断面平均値からの偏差成分であり, それぞれ, $\int_0^h u' dz = 0$, $\int_0^h c' dz = 0$ である. 式(16)および式(17)を単位幅流砂量 q_b の定義式に代入すると, 次式のようなである.

$$q_b = \int_0^h c u dz = \int_0^h (\bar{c} + c')(\bar{u} + u') dz = \bar{c} \bar{u} h_t \int_0^h \left(1 + \frac{c' u'}{\bar{c} \bar{u}}\right) dz \quad (18)$$

一方, 単位幅流砂量 q_b は, 単位幅流量 q_m と輸送濃度 c_f を用いて次式のようにも表される.

$$q_b = c_f q_m = c_f \bar{u} h_t \quad (19)$$

式(18)と式(19)より, c_f は次式のようになる.

$$c_f = \left\{ \frac{1}{h_t} \int_0^h \left(1 + \frac{c' u'}{\bar{c} \bar{u}}\right) dz \right\} \bar{c} = \gamma \bar{c} \quad (20)$$

ここに,

$$\gamma = \frac{1}{h_t} \int_0^h \left(1 + \frac{c' u'}{\bar{c} \bar{u}}\right) dz \quad (21)$$

ここで, γ を濃度に関する形状係数と定義する. これは, 浮遊砂流の議論に見られるように流速・粒子濃度分布の断面平均値に対するズレを表すと共に, 断面平均濃度に対する輸送濃度の比を表している.

図-5は, 流速・粒子濃度に関する厳密解を式(21)に代入して求めた移動床流れにおける平衡勾配と形状係数の関係である. 図には, γ に対する砂礫の内部摩擦角の影響も示している. 計算においては, 図-2および図-3に用いた物理パラメータと同一のものを用いている. 同図によると, 形状係数 γ は勾配に対して単調に増加すると共に, 内部摩擦角に大きく依存することが分かる.

3. 流出土砂量に対する形状係数の影響

(1) 支配方程式

砂礫と水との混合物の流れに対して, 図-1を参照して水深平均された支配方程式を用いる. 砂礫の輸送方程式には, 前章で定義した濃度に関する形状係数を導入して, 砂礫の質量保存則を求める. このとき, 混合物および砂礫の質量保存則, 混合物の運動量保存則, および河床位方程式は, それぞれ次式のように表される^{16), 17)}.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{E}{c_*} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \bar{c} h}{\partial t} + \frac{\partial \gamma \bar{c} M}{\partial x} = E \quad (23)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta \bar{u} M}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\bar{\rho}_m} \quad (24)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_* \cos \theta}, \quad \sin \theta = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (25)$$

ここに, h は流動深 ($=h_t$), E は侵食速度, $\bar{c}$ は断面平均濃度, γ は濃度に関する形状係数, M は混合物のフラックスの流れ方向の成分, $\bar{u}$ は断面平均流速, β は運動量補正係数 ($=1.1 \sim 1.4^{17)}$, H は水位 ($H = h + z_b$), z_b は河床位, τ_0 は河床せん断力, $\bar{\rho}_m$ は混合物の断面平均質量密度である.

侵食速度 E と河床せん断力に τ_0 については, 江頭らのものを用いると, それぞれ, 次式のようなである^{13), 16)}.

$$\frac{E}{\bar{u}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (26)$$

$$\tau_0 = \tau_{y0} + \rho f_b |\bar{u}| \bar{u} \quad (27)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1) \bar{c}}{(\sigma/\rho - 1) \bar{c} + 1} \tan \phi_s \quad (28)$$

$$\tau_{y0} = (\bar{c}/c_*)^{1/5} \rho (\sigma/\rho - 1) \bar{c} g h \cos \theta \tan \phi_s \quad (29)$$

$$f_b = \frac{25}{4} (f_d + f_f) (h/d)^{-2} \quad (30)$$

ここに,

$$f_d = k_d (1 - e^2) (\sigma/\rho) \bar{c}^{1/3}, \quad f_f = k_f (1 - \bar{c})^{5/3} \bar{c}^{-2/3}$$

ここに, τ_{y0} は河床における降伏応力, f_b は抵抗係数である.

等流状態の土石流から掃流砂流にまたがる広い流れの領域において, 勾配が減少する方向にみると, 流れの抵抗は式(30)を上限として連続的に減少することが判明している^{10), 11)}. 特に, 河床勾配が $12^\circ \sim 14^\circ$ よりも小さくなると, 自由水面近傍に清水の流れが生じ, 砂礫粒子と水との混合物の流れが河床近傍に形成されるため, 2層の流れ(これを, 以後, 「2層流」と呼ぶ)になる¹¹⁾. このような流れの抵抗則を評価するためには, 流れを2層に分割して抵抗則に関する解析解を求める方法や式(10), 式(13)および式(14)を連立して流速・粒子濃度の厳密解を求め, 数値的に得られた解に基づいて抵抗係数を評価する方法など幾つかの研究^{4), 18)}があり, 今後の検討が残されている. ここでは, 2層流の流れにおいては, 河床勾配と流速係数に関する厳密解の計算結果を用いて得られた対数型の簡便な経験則^{13), 17)}を用いることにする.

(2) 土石流による流出土砂量

形状係数の重要性を検討するために, 流出土砂量の時間変化に着目し実験データ¹⁶⁾と計算結果を比較する.

実験に用いた水路は, 図-6に示すように, 幅10 cm, 水路深さ0.2 m, 長さ12 mの片面がガラス張りの矩形水路で, 水路勾配は 12° に設定している. 水路上流端には, 定水頭タンクが設置され, 水路下流端より8 mの位置には給砂のためのホッパーが設置されている. これにより水と砂礫が定常的に供給される. 下流端から2 mの区間には, 給砂材料を河床に10 cmの厚さに敷き詰めて

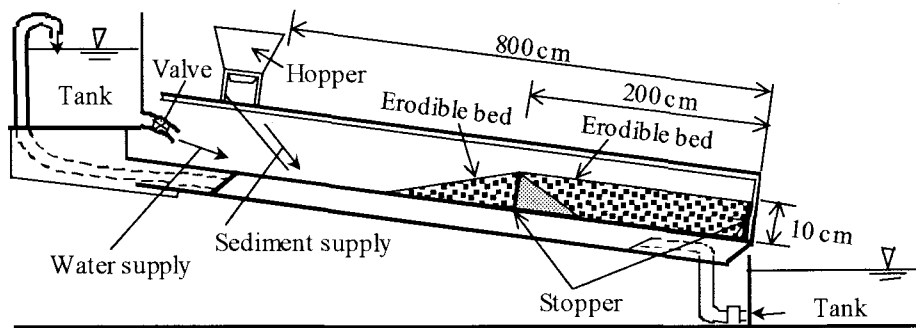


図-6 実験水路の模式図

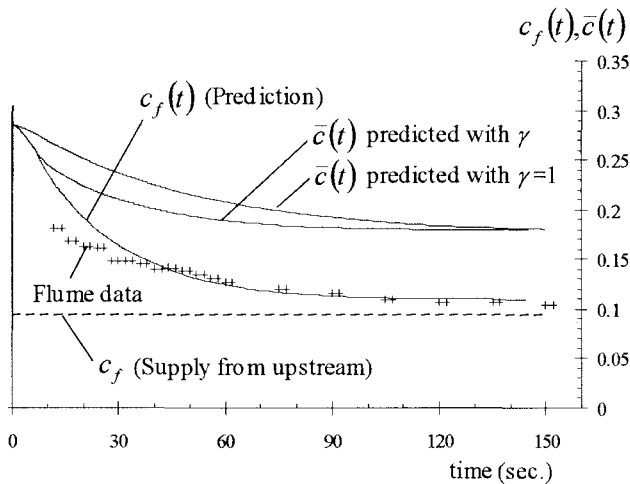


図-7 水路下流端における輸送濃度の
実験データと計算値の比較

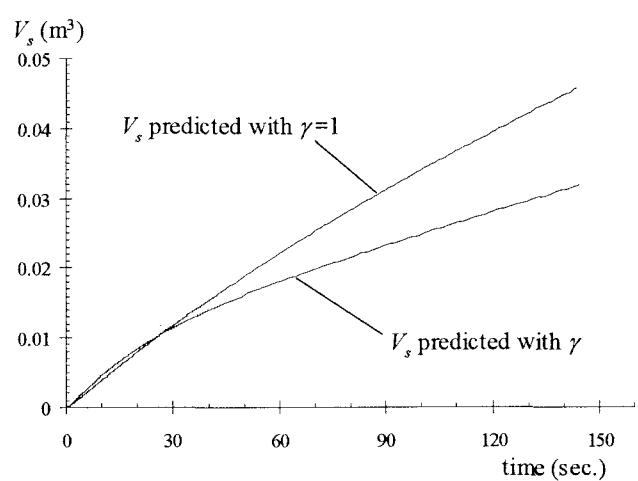


図-8 水路下流端における流出土砂量の比較

飽和状態にし、上流から流下する土石流によって河床材料を取り込めるような侵食区間を設置している。なお、侵食区間の上流端に設けたストッパーによる局所洗掘とそれに伴う河床擾乱を避けるために、上流側のストッパーの下流部には図に示すような整流部分を設けている。なお、侵食区間の河床勾配は上流から供給される土石流の平衡勾配よりも急になるように設定している。

実験に用いた砂礫は、50%粒径 $d_{50} = 0.218$ cm の一様な砂で、比重 $\sigma/\rho = 2.62$ 、静止堆積濃度 $c_* = 0.512$ 、内部摩擦角 $\phi_s = 38.7^\circ$ である。上流から供給する土石流は単位幅流量 $q_m = 86.8$ cm²/s、輸送濃度 $c_f = 0.094$ に設定している。このとき、侵食区間の上流側の河床勾配は、上流から供給する土石流に対応した平衡勾配になっている。このような土石流が侵食区間を流下することによる変化を計測するため、下流端において単位幅流量 q_m 、単位幅流砂量 q_s 、輸送濃度 c_f を 2.0 sec. 間隔で測定している。

数値計算は、式(22)～式(25)を連立して、差分法によって計算を行っている。数値解析に用いた物理パラメータは、実験に使用した材料と同一のものを、差分間隔は $\Delta x = 0.01$ m、 $\Delta t = 0.0001$ sec. として、計算スキームにはリープ・フロッグ法を用いている。上流からの給水・給砂は、実験のものと同一の量に設定され、定常的に与えている。また、下流端および下流端から 2 m の

位置に設置された高さ 10 cm のストッパーの位置で河床位は固定されている。なお、式(23)中の形状係数 γ には、図-5に示す計算結果を用いている。

図-7は、水路下流端での輸送濃度の時間変化に関する計算値と実験データとの比較である。計算値においては、式(23)中の形状係数を用いたものと用いないもの ($\gamma = 1$) を併記している。なお、形状係数を用いた時には、断面平均濃度と輸送濃度が計算され、形状係数を用いない時には、断面平均濃度のみ計算される。図-8は、形状係数を用いたケースと用いないケースにおいて、水路下流端における流砂量の積算値を比較したものである。

図-7によると、形状係数を用いて求められる輸送濃度は、実験データと非常によく一致している。これに対して、形状係数を用いたときの断面平均濃度、および形状係数を用いずに求められた断面平均濃度に関する計算値は、実験データと比べて過大に評価されている。これはまた、輸送濃度 c_f と断面平均濃度 $\bar{c}$ の違いは極めて重要であることの裏付けである。

下流端における流出土砂量について、150 sec. 後の積算値を比較すると、形状係数を用いないケースの計算値は、形状係数を用いた計算値の約 1.4 倍大きい。計算時間を更に長くすると、両者の違いは非常に大きくなることが容易に推測できる。なお、0～40 sec. の間、形状係数を用いた計算値がそれを用いないものよりも大きく

なっている。これについては、次のように考えている。図-5に示すように、水路勾配が 12° のときには形状係数が1より小さい。図-7、式(23)および式(26)を参照すると、侵食区間を流下し始める間は、砂礫の断面平均濃度の時間的な減少率は、形状係数の影響を受けて大きくなるため、断面平均濃度は形状係数を用いないものよりも小さくなる。このとき、河床勾配は 12° 程度に急なため侵食速度が大きく、土石流の土砂輸送能力が大きくなる。このように、土石流が下流端に到達してから暫くの間は、土砂輸送に及ぼす形状係数と土石流の侵食の影響が大きい。その後、河床勾配が上流からの供給土石流に対応する平衡勾配に近づくにつれ、土砂輸送量に及ぼす形状係数の影響が卓越するものと予想される。このメカニズムの詳細については、更に検討が必要であると考えている。

これらの結果は、ある断面を通過する土石流による流出土砂量を数値シミュレーションによって予測する際に、形状係数の果たす役割が顕著であることを示している。これは、著者らの以前の研究¹³⁾において、土石流の規模は、溪床に堆積する土砂の侵食可能深さに大きく依存することが判明しているが、それと共に、土石流の支配方程式においても、流速・粒子濃度の分布形状の影響、すなわち、形状係数を考慮する必要があることを示している。

4. 結語

本研究においては、土石流の数値解析における形状係数の重要性について議論した。本研究で得られた知見を整理すると次のようである。

- (1) 著者らの土石流の構成則を等流状態の運動量保存則に適用して求められる流速、粒子濃度分布に関する厳密解を用いて、等流状態の移動床における土石流の濃度に関する形状係数を定義し、それを評価した。
 - (2) 求められた形状係数を1次元の土石流の支配方程式に適用し、移動床上における土石流の侵食に関する数値計算を行った。数値計算によって求められた輸送濃度に関する計算値は、実験データと非常に良く一致し、砂礫の輸送方程式に対して形状係数を導入することの重要性が示された。
 - (3) 数値解析によって任意断面を通過する土石流の土砂輸送量を把握する際には、流出土砂量に及ぼす形状係数の影響が非常に大きい。仮に、形状係数を用いずに流出土砂量を求めた場合には、それは過大評価される。これは、勾配の小さい領域において特に顕著になる。
- 以上、本研究においては、形状係数の重要性を検討した。今後、掃流砂流から土石流にまたがる広い流れの領域を対象とした数値解析において、河床せん断力のより一般的な表示式の導入法や支配方程式の一般的な計算法に関連する課題について検討を行う必要がある。

謝辞： 本研究を推進するに当たって、実験およびデー

タ解析において、立命館大学大学院 博士前期課程 黒田尚吾君、衛藤裕介君、および吉田圭祐君に尽力頂いた。記して謝意を示したい。

参考文献

- 1) 水山高久・阿部宗平・下東久巳：土石流氾濫シミュレーションと模型実験による土石流の再現，新砂防，Vol. 42，No. 3，pp. 17-22，1987。
- 2) 高橋 保・中川 一・佐藤広章：扇状地における土砂氾濫災害危険度の評価，京大防災研年報，31B-2，pp. 655-676，1988。
- 3) 高橋 保・井上素行・中川 一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集，第44巻，pp. 717-722，2000。
- 4) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：土石流から掃流状集合流動に遷移する流れの解析法に関する研究，水工学論文集，第44巻，pp. 683-688，2000。
- 5) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究，京大防災研年報，20B-2，pp. 405-435，1977。
- 6) 高橋 保・里深好文・千代啓三：土石流の慣性領域での流動則，京大防災研年報，39B-2，pp. 333-346，1996。
- 7) 椿 東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，317，pp. 79-91，1982。
- 8) 宮本邦明：Newton流体を含む粒子流の流動機構に関する基礎的研究，立命館大学学位論文，pp. 39-72，1985。
- 9) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究，京大防災研年報，32B-2，pp. 487-501，1989。
- 10) Egashira, S., K. Miyamoto and T. Itoh : Constitutive equations of debris flow and their applicability, 1st, Int. Conf. on Debris-Flow Hazard Mitigation, ASCE, pp. 340-349, 1997。
- 11) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，41巻，pp. 789-794，1997。
- 12) 伊藤隆郭・江頭進治：土石流に関する構成則の比較研究，水工学論文集，42巻，pp. 913-918，1998。
- 13) 江頭進治・水山高久・伊藤隆郭：サンフリアン流域における土砂流出とその対策，「ベネズエラにおける洪水・土砂災害に関する調査研究—1999年12月災害—」，第4章，(社)土木学会・水理委員会，pp. 47-63，2001。
- 14) 江頭進治・佐藤隆宏・千代啓三：砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響，京大防災研年報，37B-2，pp. 359-369，1994。
- 15) 伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明・竹内宏隆：土石流の固定床から移動床流れの遷移過程に関する研究，水工学論文集，43巻，pp. 635-640，1999。
- 16) Egashira, S., N. Honda and T. Itoh : Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow, Phys. Chem. Earth (C), Vol. 26, No. 9, Elsevier, pp. 645-650, 2001。
- 17) 伊藤隆郭：土石流の構成則およびその適用に関する研究，立命館大学学位論文，2000。
- 18) 宮本邦明・伊藤隆郭：支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法，砂防学会誌，Vo. 55, No. 2, pp. 24-35, 2002。

(2003.9.30 受付)