

土石流の流れに及ぼす固相・液相の材料特性の影響

INFLUENCE OF PHYSICAL PROPERTIES OF SOLID-LIQUID PHASE ON DEBRIS FLOWS

伊藤隆郭¹・江頭進治²・宮本邦明³

Takahiro ITOH, Shinji EGASHIRA and Kuniaki MIYAMOTO

² 学生会員 立命館大学大学院 総合理工学専攻(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

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

³ 正会員 工博 鳥取大学助教授 地域共同研究センター(〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101)

The velocity and sediment concentration of sediment-water mixture flow change by the physical properties; e.g., mass density of solid and liquid phase, viscosity of liquid, interparticle friction angle of solid particle, etc. The laminar viscous term is introduced into the constitutive relations developed formerly by Egashira et al. to solve those. The effects of physical properties of solid and liquid phase on debris flow are investigated by means of experimental data as well as of numerical solutions for velocity profile, sediment concentration profile, flux sediment concentration and flow resistance. The results suggest that the present constitutive relations evaluate any changes of debris flow caused by physical properties of solid-liquid phase.

Key Words : debris flow, constitutive equations, interparticle friction angle, solid-liquid phase

1. 緒言

土石流や泥流は、大小様々の砂礫粒子と水との混合物の流れであり、流れの特性は構成する材料、すなわち、固体(砂礫)および流体(水)の材料特性に依存する。これらの応力構造は Newton 流体とは本質的に異なるため、それらの構成則を合理的に評価するのは、かなり困難な状況にある。砂礫粒子が水面まで分散して層流的に流動するものを土石流と定義しても、砂礫粒子と清水との混合物の流れや泥水と砂礫粒子との混合物の流れがあり、これらの流れにおいては、卓越する物理パラメータが異なる。このように流れが複雑なため、多くの流動則が提案されている^{1)~5)}。これは、それぞれの現象を支配していると思われるパラメータに対する研究者間の解釈の相違に起因している。例えば、高橋ら^{3), 6)}は、中国の蒋家溝の土石流を「粘性土石流」と呼び、粗粒子と水との混合物に対する構成則とは異なる構成則を提案している。

著者らは、砂礫と水との混合物を対象にして構成則を導き、これは、土石流から掃流砂流にまたがる領域の流れをほぼ合理的に説明できることを示している^{7), 8), 9)}。本研究においては、著者らの構成則に層流粘性の項を導入して、理論解析を行うとともに、それらの結果と実験データに基づいて、土石流に及ぼす固相および液相の材料特性、特に、固体粒子の比重・粘性係数および固体摩擦といったパラメータの影響を検討する。

2. 土石流の構成則と流れの特性

定常等流を対象とし、流れ方向に x 軸をとり、流れに垂直方向に z 軸をとれば、運動量保存則は次式で表される。

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

$$0 = \int_z^{h_t} \rho(\sigma/\rho - 1)cg \cos \theta dz - p(z) \quad (2)$$

ここに、 h_t は流れの厚さ、 g は重力加速度、 θ は x 軸と水平とのなす角度、 τ は河床から任意の高さにおけるせん断応力、 p は等方圧力、 ρ_m は混合物の密度で、 $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ である。ここに、 σ は粒子の密度、 ρ は水の密度、 c は混合物中の粒子の体積濃度である。なお、式(2)の p に含まれる間隙水圧は静水圧で近似する。

(1) 構成則と流速・粒子濃度分布則

式(1), (2)に著者らの構成則^{7), 9)}を適用すれば、次式のようである。

$$\tau_y + \tau_d + \tau_f = \int_z^{h_t} \rho_m g \sin \theta dz \quad (3)$$

$$p_s + p_d = \int_z^{h_t} \rho(\sigma/\rho - 1)cg \cos \theta dz \quad (4)$$

ここに、

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

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

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

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

$$p_s / (p_s + p_d) = f(c) = (c/c_*)^{1/n} \quad (9)$$

ここに、 τ_y は降伏応力、 τ_f は間隙水のせん断に伴う応力、 τ_d は粒子衝突に伴うせん断応力、 p_d は粒子衝突に伴う動的圧力、 p_s は静的な骨格圧力、 ϕ_s は砂礫の内部摩擦角、 d は砂粒子径、 u は流速、 e は固体粒子の反発係数、 c_* は静止堆積濃度、 k_f 、 k_d および n は経験定数で、それぞれ 0.16~0.25、0.0828 および 5 である。ここで、 τ_f に流体粘性による応力を加えれば、これは次式のようになる。

$$\tau_f = \rho(1-c)l^2 \left| \partial u / \partial z \right| \left(\partial u / \partial z \right) + \rho(1-c)\nu_f \left(\partial u / \partial z \right) \quad (10)$$

ここに、 l は粒子間隙流体の運動量輸送の混合距離¹⁰⁾で $l = \sqrt{k_f} \{ (1-c)/c \}^{1/3} d$ である。 ν_f は液相の動粘性係数である。摩擦速度 $u_{\tau f}$ を $u_{\tau f} = \sqrt{(\tau - \tau_y)/\rho}$ と定義すると、 $|\partial u / \partial z| \propto u_{\tau f} / l$ とおけるので、式(10)は次式で表される。

$$\tau_f = \rho(1-c)l^2 \left| \partial u / \partial z \right| \left(\partial u / \partial z \right) (1 + R_{e*}^{-1}) \quad (11)$$

ここに、 $R_{e*} = u_{\tau f} l / \nu_f$ で、レイノルズ数である。

式(3)、(4)に式(5)、(6)、(8)、(9)および(10)を適用して流速・粒子濃度分布を求めると、それぞれ次式を得る。

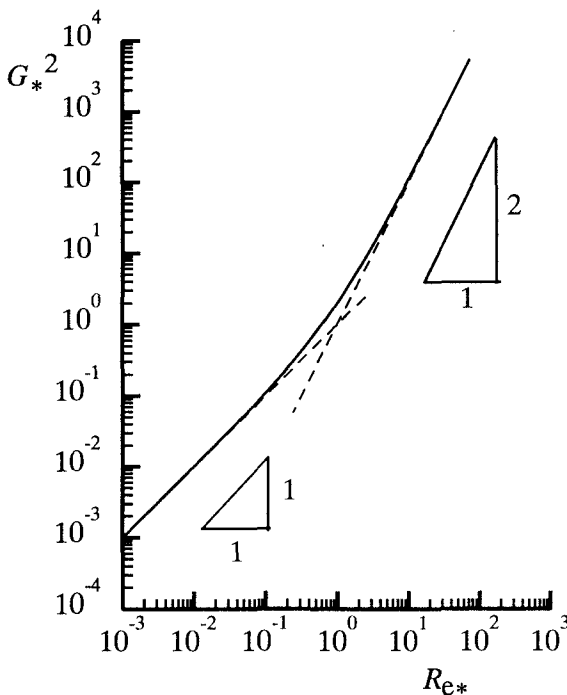


図-1 R_{e*} と G_*^2 の関係

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = -\frac{f_v}{F_1} + \sqrt{\left(\frac{f_v}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{h_t}{d} \right)^2 \frac{G-Y}{F_1}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z'} \left\{ \frac{\partial F}{\partial c} (1-z') - \frac{\partial F_3}{\partial c} \frac{\partial u'}{\partial z'} \right\} = F - c + F_3 \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \quad (13)$$

ここに、 $G = \sin \theta (1 - z')$

$$Y = f(c) \cos \theta (\tan \phi_s - \tan \theta) \int_z^1 (\sigma / \rho - 1) c dz'$$

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

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

$$F_2 = f(c) (f_d + f_f - f_{pd} \tan \phi_s)$$

$$F_3 = \frac{\nu_f (1-c) f_{pd}}{(\sigma / \rho - 1) \cos \theta (F_1 - F_2) \sqrt{g h_t h_t}}$$

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

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

$$f_v = (1/2) (1-c) \nu_f d^{-2} \sqrt{h_t / g}$$

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

式(12)、(13)を連立して解くことにより、流速および粒子濃度分布が求められる。なお、式(12)、(13)より層流粘性の影響を省略すれば、先の研究⁷⁾と同じ式になる。

図-1 は、固定床の河床面において、式(10)に示される間隙流体のせん断に伴う応力を R_{e*} と無次元応力 G_*^2 との関係で表したのものである。計算には、 $\theta = 15.0^\circ$ 、 $h_t/d = 10$ 、 $d = 0.200$ cm、粒子濃度には平衡濃度⁷⁾を用いている。ここに、 $G_*^2 = \tau_f / \{ \rho(1-c) (\nu_f / l)^2 \}$ であり、 G_* は、レイノルズ数で Bagnold の定義した無次元応力¹⁵⁾に類似してい

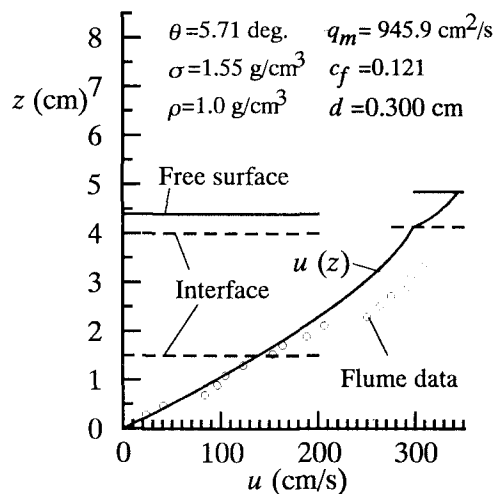


図-2 人工材料を用いた土石流の実験値と計算値の比較 (固定床)

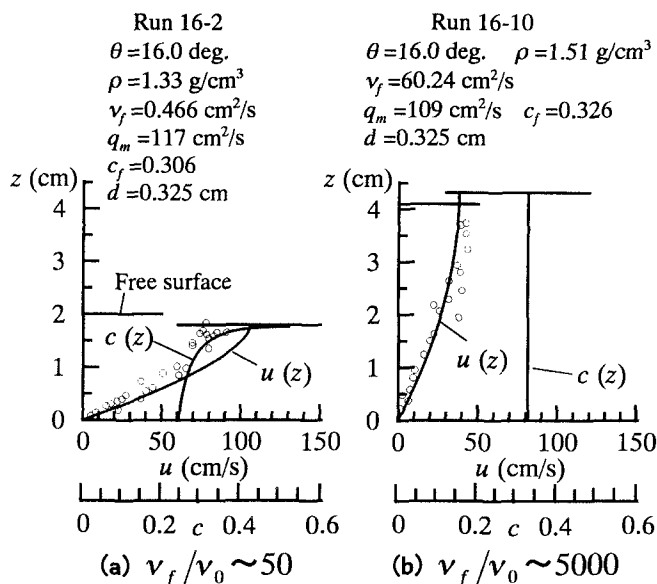


図-3 土石流の流れに及ぼす流体粘性および流体密度の影響 (固定床)

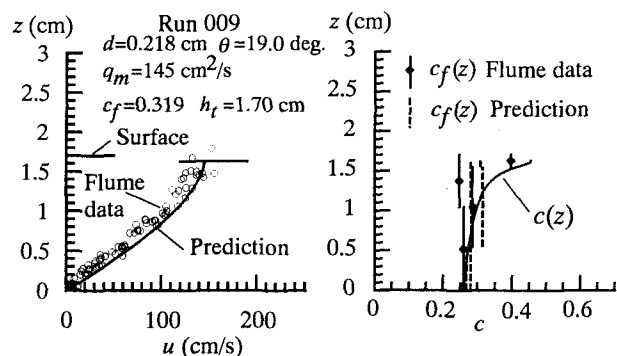


図-4 固定床上における土石流の流速および濃度分布 (Sand)

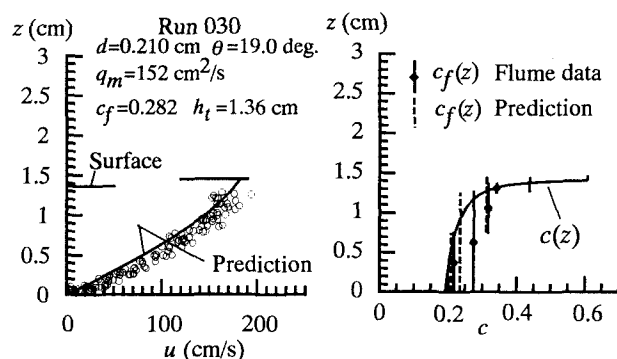
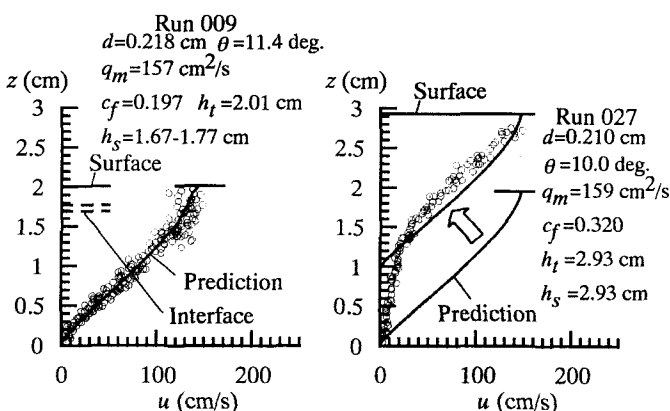


図-5 固定床上における土石流の流速および濃度分布 (Bead)

る。図によれば、 $R_{e*} \ll 1$ において層流粘性の卓越する領域 (G_*^2 が R_{e*} の 1 乗に比例する領域) が現れ、 $R_{e*} = 1$ 近傍で遷移領域が現れ、 $R_{e*} = 10$ を越えると乱流応力が卓越する領域 (2 乗に比例する領域) へ遷移することが分かる。

これらの結果は、流体粘性の卓越する領域から乱れの卓越する領域にまたがって、構成則が表現されていることを示している。



(a) Sand (b) Bead
 図-6 移動床上における土石流の流速分布

(2)構成則の適用

流速および粒子濃度分布は、2. に示された式(12)、(13)を連立して求められる。それらと実験データを比較する。ここでは、主に固定床上の土石流を対象とする。内部摩擦角、流体粘性および比重の違いに着目した実験データは、それぞれ伊藤ら¹¹⁾、今回得られたもの、高橋ら³⁾および石川ら¹²⁾のデータを用いることとする。

図-2 は、人工材料 (固体密度 $\sigma = 1.55 \text{ g/cm}^3$) と清水を用いた固定床上における土砂流の実験値¹²⁾と計算値の比較である。interface (液層と高濃度層との境界) の線が 2 本示されているが、これらはそれぞれ、実験値の interface の最大値と最小値を表す。これによれば、水面および interface の位置に若干の違いが見られ、計算値は若干大きく見積もられているが、概ね両者は一致している。

図-3 は、ベントナイトを高濃度に含む流体と砂礫粒子とを用いた固定床上における土石流の実験値³⁾と計算値との比較である。ここで、実験値は清水に比べて流体の密度と粘性の両方が増加している。そこで計算には、粘性係数および流体密度とも高橋らの実験で示されている値を用いている。実験値と計算値は、概ね一致している。

図-4, 5 は、それぞれ勾配が 19° の時の砂礫粒子およびビーズ粒子を用いた固定床上における土石流の流速分布、および局所輸送濃度 $c_f(z)$ の分布に関する結果である。ここに、 $c_f(z) = \int_z^{z+\Delta z} c u dz / \int_z^{z+\Delta z} u dz$ のように定義される。なお、図において、破線は $c_f(z)$ の計算値を表している。固定床上における流速分布および濃度分布は、実験値と概ね一致している。ただ、砂礫粒子においては、計算値の方が濃度の逆転現象¹¹⁾が強く現れている。

図-6 は、砂礫粒子およびビーズ粒子を用いた移動床上における土石流に関する比較である。流速分布の結果を見ると、砂礫粒子については、実験値と計算値は概ね一致しているが、ビーズ粒子の分布形については、特に河床近傍において違いが見られる。これは、河床近傍

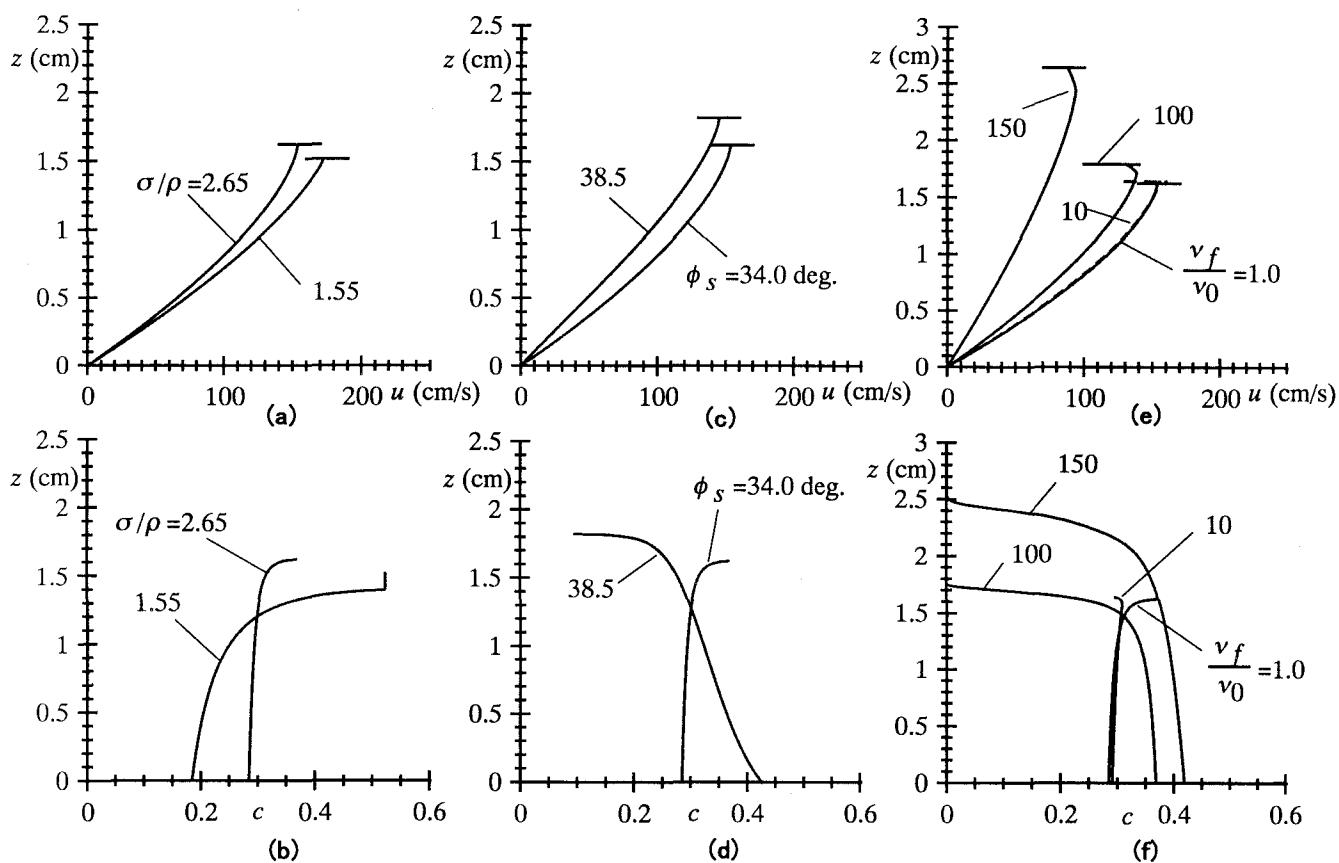


図-7 固定床上の土石流に及ぼす粒子比重, 内部摩擦角および流体粘性の影響

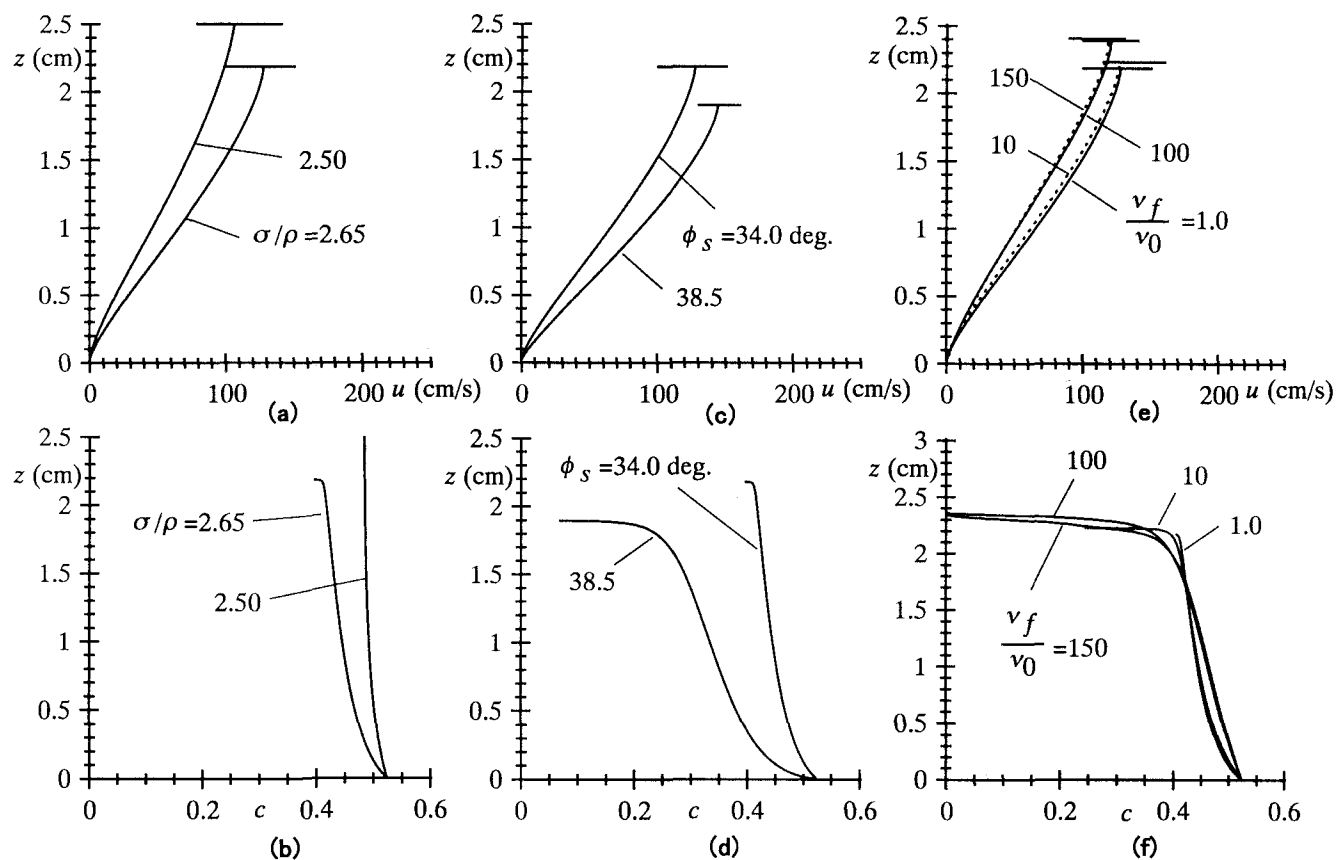


図-8 移動床上の土石流に及ぼす粒子比重, 内部摩擦角および流体粘性の影響

においてクリープによる影響を大きく受け、河床面が深めに判定されたためであると推察される。そこで、実験値と計算値の水面を一致させて流速分布を描いたものを図-6 に示している。図のように、クリープを除いた領域においては、両者はほぼ一致している。

以上の結果より、式(10)を考慮して、間隙流体のせん断による応力に流体粘性の影響を考慮して求められた流速および濃度分布は、実験値を説明できるようである。

3. 固相および液相の材料特性値の影響

図-7 (a)-(f)および図-8 (a)-(f)は、それぞれ固定床および移動床における土石流において、粒子比重(粒子密度/液相の密度)、内部摩擦角および流体粘性の値を変化させて、流速分布および粒子濃度分布がどのように変化するかを見たものである。移動床上の流れの計算においては、 $\theta = 16.0^\circ$, $q_m = 150 \text{ cm}^2/\text{s}$, $d = 0.200 \text{ cm}$, $c_s = 0.524$, 固定床上の流れの計算においては、移動床上の流れと同様の値を用い、 $c_f = 0.300$ を用いている。ここに、 c_f は輸送濃度で、 $c_f = \int_0^h c u dz / \int_0^h u dz$ である。以下、これらの結果を用いて検討する。

図-9 (a), (b)は、それぞれ固定床および移動床における流れの抵抗におよぼす粒子内部摩擦角の影響をみたもので、図には実験値^{13), 14)}と計算値が示されている。

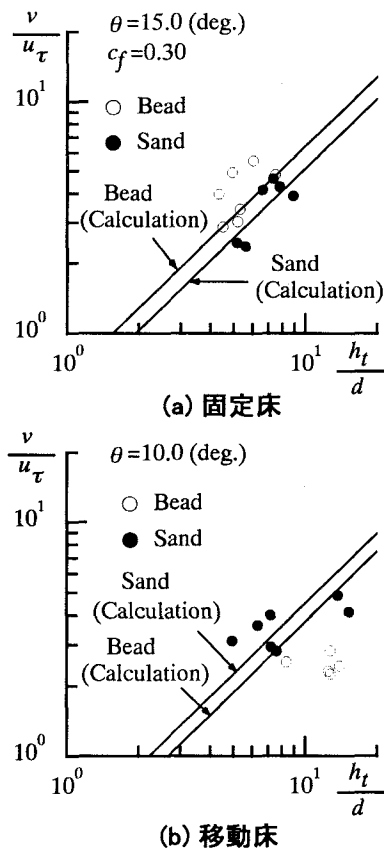


図-9 流れの抵抗に及ぼす内部摩擦角の影響

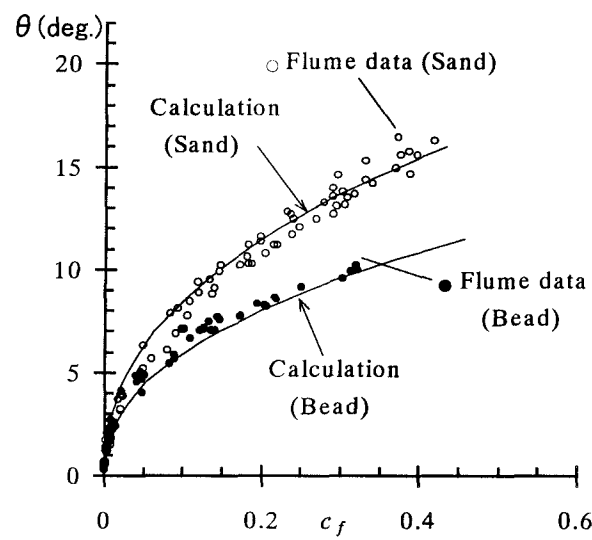


図-10 輸送濃度に及ぼす内部摩擦角の影響

図-10 は、輸送濃度に対する粒子内部摩擦角の影響をみたものであり、実験データ^{13), 14)}と計算結果が示されている。計算値は、式(12), (13)を連立して求められた流速および粒子濃度分布を輸送濃度の定義式に代入することによって求めている。

まず、粒子比重の影響について調べる。図-7 (a)-(b)および図-8 (a)-(b)をみると、固定床においては、2.65 よりも粒子比重が小さくなると濃度の逆転現象が顕著に現れるが、流速分布には有意な違いは生じていない。一方、移動床においては、粒子比重が小さくなると、濃度が一様化し、その結果降伏応力が卓越して抵抗が大きくなることが分かる。

次に、粒子摩擦角の影響を図-7 (c)-(d), 図-8 (c)-(d), 図-9 および図-10 の結果に基づいて調べる。固定床においては、摩擦角が減少すると、降伏応力が減少するため、流速は大きくなり、濃度分布も一様化する。一方、移動床においては、摩擦角が小さい場合には、降伏応力が減少して濃度が一様化するため、水面近傍においても有意な降伏応力が存在するようになる。その結果、摩擦角が減少すると、抵抗が増加する。このような特性は、図-8 (c)-(d)および図-9 に示されている。

さらに、移動床においては、摩擦角の減少に伴い、粒子濃度が一様化するため、図-10 に示されるように、同じ勾配に対する粒子輸送濃度は、砂粒子に比べてビーズの場合にはかなり大きくなる。

最後に、液相の粘性の影響について図-7 (e)-(f), 図-8 (e)-(f)の結果に基づいてみる。なお、図の v_0 は水の動粘性係数である。固定床の流れにおいては、 v_f/v_0 の増加に伴い、流速が減少するが、 v_f/v_0 が100 を越えたあたりから粘性の影響が強く現れて、流速がさらに遅くなって水深が急激に増加する。これは、粘性の増加に伴い抵抗が増加することに対応する。移動床においても、固定床のものと同様の傾向を示すが、固

定床のものほど、 v_f/v_0 の増加に伴う急激な水深の増加は見受けられないようである。

5. 結語

土石流の流れに及ぼす固相および液相の材料特性値の影響について、理論および実験の両面から検討した。本研究によって得られた知見は次のようである。

(1)先に提案した土石流の構成則に対して、間隙流体のせん断に伴う応力に流体粘性による応力を導入し、無次元せん断応力と無次元ひずみ速度の関係を調べた。その結果、これは、せん断応力がひずみ速度の 1 乗に比例する領域から 2 乗に比例する領域にまたがる流れを説明できることが示唆された。事実、この構成則は粘性土石流と呼ばれている実験値をかなりよく説明できる。

(2)固定床流れおよび移動床流れにおいて、流体粘性が増加すると、流れの抵抗は増加するという結果が示された。これについては、今後詳細な検討が必要である。

(3)移動床上の土石流においては、粒子比重が小さくなると、粒子濃度が一様化し、降伏応力 τ_y が卓越する結果、流れの抵抗が増加する。

(4)内部摩擦角の流れに及ぼす影響を評価した。それによれば、流速および濃度分布に及ぼす摩擦角の影響は大きい。固定床上における流れの抵抗は、摩擦角が大きくなると大きくなる。一方、移動床上流れにおいては、逆に小さくなることを理論解析によって示し、これを実験的に検証した。さらに、粒子輸送濃度は内部摩擦角が小さくなると、著しく増加することを理論解析と実験データを用いて検証した。

以上のように、著者らの先の研究に対して、流体粘性を導入すると、かなり広い領域の土石流の性状が説明できることが示されたが、今後に解明すべき点も少なくない。

謝辞:本研究は、一部、文部省科学研究費基盤研究 B (代表 江頭進治)、文部省学術フロンティア事業および文部省科学研究費特別研究員奨励費(伊藤隆郭)の補助を受けて進めているものである。また、立命館大学大学院 竹内宏隆君、有村真一君および同大学理工学部

平山清志君には、実験およびそのデータ整理等にご協力いただいた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 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, 405-435, 1977.
- 2) 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, 333-346, 1996.
- 3) 高橋 保・小林幸一郎:粘性土石流の流動機構に関する研究, 京大防災研年報, 36B-2, 433-449, 1993.
- 4) 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, 79-91, 1982.
- 5) 平野宗夫・橋本晴行・峯 敏雄・福富 章・パルー・ムハマド・サレー:高濃度の泥水によって発生する土石流の特性, 水工学論文集, 35 巻, 459-464, 1991.
- 6) 高橋 保・藤井由之:流下域における土石流の制御法に関する研究, 京大防災研年報, 31B-2, 633-654, 1988.
- 7) 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, 789-794, 1997.
- 8) 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, 913-918, 1998.
- 9) Egashira, S., K. Miyamoto and T. Itoh : Constitutive equations of debris flow and their applicability, 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, 340-349, 1997.
- 10) 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, 487-501, 1989.
- 11) 伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明:土石流の固定床から移動床流れへの遷移課程に関する研究, 水工学論文集, 43 巻, 635-640, 1999.
- 12) 石川芳治・前田昭浩・高濱淳一郎:掃流状集合流動に関する実験的考察(2), 平成 7 年度砂防学会研究発表会概要集, 319-322, 1995.
- 13) 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新:エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル, 京大防災研年報, 33B-2, 293-306, 1990.
- 14) 江頭進治・芦田和男・田野中新・高橋徹也:連続体手法による掃流砂量式に関する研究, 京大防災研年報, 34B-2, 261-274, 1991.
- 15) Bagnold, R. A.: Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a newtonian fluid under shear, Pro. Roy. Soc. A, 225, 49-63, 1954.

(1999.9.30 受付)