

細粒土砂の挙動に着目した 土石流の数値計算手法に関する一考察

A STUDY OF NUMERICAL SIMULATION FOR DEBRIS FLOW FOCUSED ON FINE SEDIMENTS BEHAVIORS

日名 純也¹・内田 太郎²・松本 直樹²・桜井 亘²・西口 幸希³・村上 正人³

Junya HINA, Taro UCHIDA, Naoki MATSUMOTO, Wataru SAKURAI,

Yuki NISHIGUCHI, Masato MURAKAMI

¹株式会社建設技術研究所 (〒541-0045 大阪市中央区道修町 1-6-7) E-mail: jny-hina@ctie.co.jp

²国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 つくば市旭 1 番地)

³株式会社建設技術研究所 (〒300-2651 つくば市鬼ヶ窪 1047-27)

Key Words: debris flow, simulation model, phase-shift, fine sediments

1. はじめに

土石流は水と土砂の高濃度混合体の流れであり、ひとたび発生すれば甚大な被害が生じることがある。土石流による被害の軽減のためには、土砂氾濫域を予測することが重要であり、その有効な手法の1つとして数値解析が挙げられる。土砂氾濫域を予測するには、土石流の流下過程を精度良く表現する必要がある。

本研究では石礫型の土石流を対象とし、高橋¹⁾で示されている、土砂は比較的整然とした層流状態で流下し、間隙流体は乱流状態となる流れを想定した。石礫型土石流を構成する土砂のうち、相対的に粒径の大きいもの(粗粒土砂)は層流状態で流下するが、粒径が小さい土砂を多量に含む場合には、一部の土砂(細粒土砂)は間隙流体と一体となり乱流的な挙動を示すことが知られている(例えば²⁾。

このような高濃度の細粒土砂が間隙流体と一体となり移動する現象は、これまで様々な表現で呼ばれるが(表-1)、本研究ではフェーズシフトと呼称する。本現象により土石流の流動性が増加することが明らかになってきており(例えば³⁾、土石流の流下過程を精度良く表現するためには、細粒土砂のフェーズシフトが生じる機構や条件を把握し、数値計算モデルへ反映させる必要がある。

これまでフェーズシフトを考慮した数値解析では、間隙流体密度を清水状態よりも大きいある一定値に設定する手法(例えば⁴⁾や、土石流中に含まれる土砂は粒径によりその振舞いが決まると仮定して、フェーズシフトが生じる細粒土砂の最大粒径以下の土砂の割合をもとに間隙流体密度を規定する手法⁵⁾が用いられてきた。

しかし、これらは計算結果が実績と整合するような間隙流体密度やフェーズシフトが生じる粒径を設定したものである。西口⁶⁾では大規模土石流を対象に再現計算を行い、フェーズシフトが生じる粒径の沈降速度に対する土石流の摩擦速度の比が3~21のとき再現性が高いことを示した。

また、細粒土砂のフェーズシフトに着目した水路実験により、粒度分布によって土石流の平衡濃度が異なること⁷⁾や細粒土砂の沈降速度に対して摩擦速度が大きいほどフェーズシフトが生じやすいことが示されている⁸⁾が、数値計算において、細粒土砂の

表-1 細粒土砂が間隙流体と一体となる現象の呼称

No.	呼称	文献
1	固相・液相間の相変化	江頭・伊藤(2004) ⁴⁾
2	液相化	中谷ら(2018) ⁸⁾
3	mud suspension	Iverson and George (2014) ⁹⁾

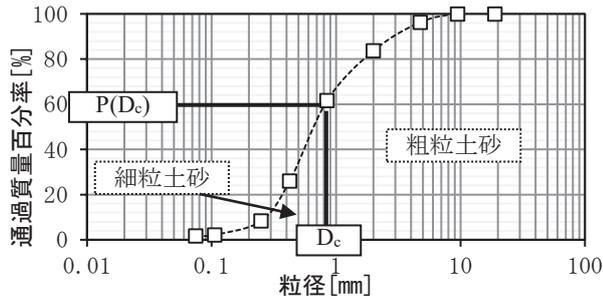


図-1 フェーズシフトの限界粒径 D_c の概念図

フェーズシフトが生じる水理条件を内在させた計算事例^{10) 11)}は少なく、水理条件の検証はこれまで十分に行われていない。

そこで本研究では、細粒土砂を用いた直線矩形水路の実験からフェーズシフトが生じる水理条件を推定し、数値計算モデルに導入することを目的とした。その上で、水路実験の再現計算を行い、設定したフェーズシフトが生じる条件の妥当性を検証した。

2. 数値計算モデル

(1) フェーズシフトが生じる条件に関する仮説

石礫型土石流の流動を規定する応力は、粒子間摩擦による応力、粒子間衝突による応力および間隙流体の乱れによる応力の和で表される¹²⁾。細粒土砂のフェーズシフトは、間隙流体の乱れによる応力によって、土砂の一部が間隙流体に取り込まれて乱流状態となるために生じる。

本研究では、フェーズシフトの限界粒径を D_c とし、 D_c より粒径が小さい土砂はすべて細粒土砂として流下すると仮定した。以降は、 D_c より粒径が小さい土砂を細粒土砂、 D_c より粒径が大きい土砂を粗粒土砂と定義する (図-1)。

このとき、土石流の間隙流体密度 ρ_m と細粒土砂濃度 C_f および粗粒土砂濃度 C_c の関係は式(1)により表される。

$$\rho_m = \sigma \frac{C_f}{1-C_c} + \rho_w \left(1 - \frac{C_f}{1-C_c} \right) \quad (1)$$

ここで、 σ : 土粒子の密度、 ρ_w : 水の密度である。さらに、土石流の全体の濃度 C と、細粒土砂の割合 $P(D_c)$ はそれぞれ式(2)、式(3)となる。

$$C = C_f + C_c \quad (2)$$

$$P(D_c) = C_f / C \quad (3)$$

そのうえで、本研究ではフェーズシフトの条件が異なる a) ~ c) の3つのモデルを作成した。

a) 土石流の間隙流体密度を一定とするモデル(モデル①)

モデル①は、土石流の流下過程において細粒土砂濃度は粒度分布によらず一定であると仮定した。

b) D_c を一定とするモデル (モデル②)

モデル②では、西口ら⁵⁾の手法に基づき、土石流に含まれる土砂は粒径によりその振舞いが決まると仮定して、細粒土砂の限界粒径 D_c は粒度分布によらず一定とした。

c) 摩擦速度/沈降速度の比により D_c が設定されるモデル (モデル③)

粗面では河床付近の鉛直方向の乱れ強度が摩擦速度にほぼ等しいという知見から、一般的に土粒子の浮遊限界には式(4)の関係が良く用いられる。

$$u_* = w_s \quad (4)$$

ここで、 u_* : 摩擦速度、 w_s : 土粒子の沈降速度である。

中谷ら⁸⁾によれば、沈降速度に対する摩擦速度が大きいほどフェーズシフトが生じる細粒土砂の限界粒径が大きくなることから、モデル③では、フェーズシフトの限界条件も浮遊限界と同様に記述できると考え、式(5)の関係を満たす粒径を D_c とした。 α_c は係数であり、値が小さいほどフェーズシフトが生じる細粒土砂の限界粒径が大きくなる条件となる。

$$u_* = \alpha_c w_s \quad (5)$$

なお、 u_* は式(6)により、 $w_s(D_c)$ は、Rubey¹³⁾により示された式(7)により求める。

$$u_* = \sqrt{ghI} \quad (6)$$

$$w_s(D_c) = \left(\begin{array}{l} \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2\rho}{sgD_c^3(\sigma-\rho)}} \\ -\sqrt{\frac{36\nu^2\rho}{sgD_c^3(\sigma-\rho)}} \end{array} \right) \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) gD_c} \quad (7)$$

ここで、 g : 重力加速度、 h : 水深、 I : 堆砂勾配、 s : 土粒子の水中比重、 ν : 動粘性係数 (水温 20° とし て 0.01cm²/s) である。

(2) 数値計算プログラム

本研究では、Uchida et al.¹⁴⁾ が作成した、土石流から掃流までの土砂移動を連続的に解析可能なモデル (Kanako-LS) を用いた。

本モデルの土石流および掃流状集合流動の流れ全体の平衡濃度は、それぞれ式(8)、式(9)により算出している。

$$C_\infty = \frac{\rho \tan \theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \quad (8)$$

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \right\}^2 \quad (9)$$

ここで、 $\tan \theta_w$: 水面勾配、 ϕ : 土砂の内部摩擦角で

ある。ただし、堆積時には粗粒・細粒土砂の区別なく堆積層の骨格を形成すると考えた。河床せん断応力は粗粒土砂の平均粒径を用いて算定し、粒径別の侵食・堆積速度は、粗粒土砂の全体の侵食・堆積速度に対して侵食時は河床材料の粒径の存在割合、堆積時は流砂の粒径の存在割合で割り振った。流れの連続式や運動方程式、土砂の連続式などの基礎式については Uchida et al.¹⁴⁾ を参照されたい。

Kanako-LS では、土石流の間隙流体密度を一定とするモデル①およびフェーズシフトの限界粒径を時空間的に一定と扱うモデル②の計算が可能である。そこで本研究では、フェーズシフトの粒径が水量に応じて時空間的に変化するモデル③の計算が可能なモデルを Kanako-LS に導入した。

3. 検証に用いた水路実験

(1) 実験方法と解析方法

本研究の検証対象は、既往の水路実験¹⁵⁾で対象とした土石流および掃流状集合流動とした。

嶋ら¹⁵⁾が用いた実験水路は、幅 10cm、長さ 8m の直線矩形水路で、水路勾配を 5 度から 15 度まで調整することができる水路である (図-2)。水路の上流 1m 区間においてホッパーから粗粒土砂を供給し、循環用のポンプによって水路下流に設置したタンクから水路上流まで水と細粒土砂を循環させて、水と土砂を定常的に供給している。水路下流端には高さ 20cm の仕切り板を設置し、供給した土砂が堆積するようになっており、水路に取り付けた超音波センサーによって、堆砂形状の時間変化がほぼなくなった状態を平衡状態とみなして、このときの堆砂勾配を計測している。

実験では、図-3 に示す粒度分布の異なる 4 種類の混合粒径実験砂を用いて、実験砂ごとに勾配、流量、土砂濃度の異なる 14 ケースの計 56 ケースを実施した。実験砂のうち 0.425mm 以下の土砂の割合は、実験砂 a, b, c, d でそれぞれ 4.7%, 26%, 30%, 53% で、実験の水路勾配は 5~15 度、流量は 0.75~2.50/sec、土砂濃度は 6.2%~29.8% である。また、摩擦速度は、実験条件により 0.11~0.19m/s の値を示す。

本研究では、実験で計測された堆砂勾配から平衡濃度式 (8), (9) を用いて算定した平衡濃度を C_c とし、既知の C から式 (2) より C_c と C_f を求め、さらに式 (1) より ρ_m を求めた。式 (1) と式 (8), (9) で求めた ρ_m が一致するときの C_f から式 (3) より細粒土砂の割合を求め、実験砂の粒度分布から D_c を決定した。ここで、式 (9) は実験結果を参考に理論結果を簡素化して

求められた半理論式であり、間隙流体密度の上昇が考慮されていない可能性があるが、本研究で対象とした実験の勾配や相対水深は式 (9) を導出する実験と同様な条件であることから、式 (9) を用いるとした。

(2) 実験結果の解析

実験結果から得られた平衡状態の全土砂濃度と堆砂勾配の関係を図-4 に示す。粒径の小さい土砂を多く含む実験砂ほど、同程度の勾配に対する全土砂濃度は大きい傾向がみられることから、相対的に粒径の小さい土砂が間隙流体密度に影響し、土石流の平衡濃度に関係する可能性を示唆している。

次に本研究で推定した ρ_m と D_c について述べる。推定した土石流の ρ_m は 1.0 から 1.25t/m³ で実験砂 a から d の順で大きくなった (図-5)。また、 D_c は 0.1 から 1.2mm であり、同じ実験砂であっても、勾配によって大きくばらついた。実験砂による違いは比較的小さく、分布範囲は概ね重なっていた。詳しく見ると、実験砂 a, b の D_c は実験砂 c, d と比べてやや

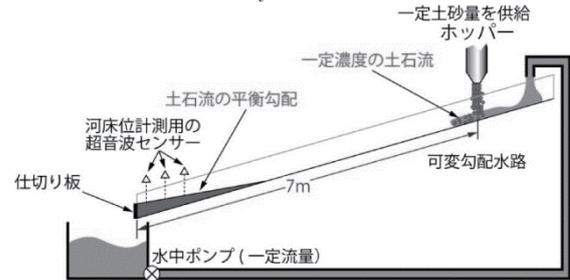


図-2 水路実験の模式図

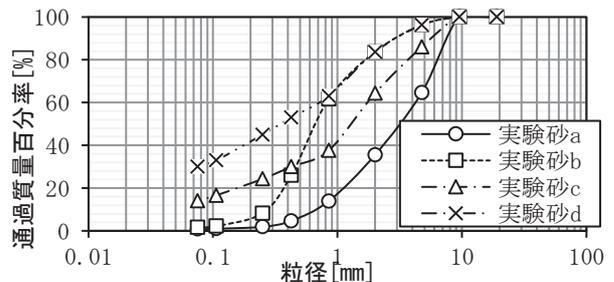


図-3 実験砂の粒度分布

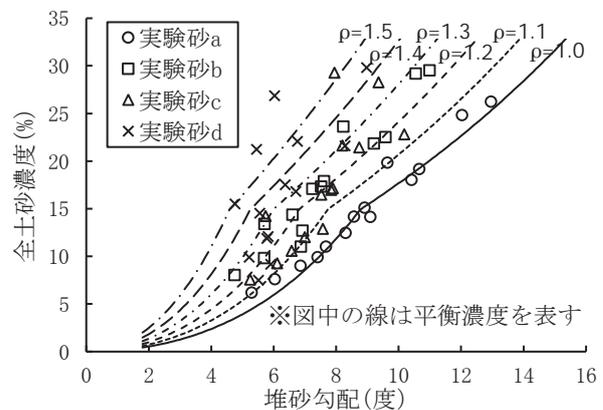


図-4 土砂濃度と平衡状態の堆砂勾配の関係

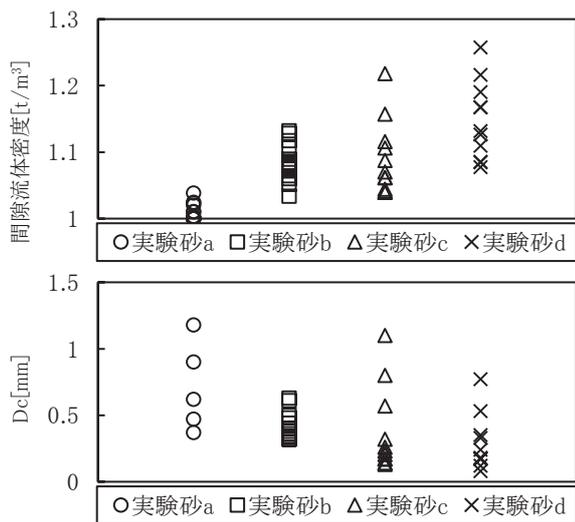


図-5 実験結果から推定した土石流の間隙流体密度と D_c .

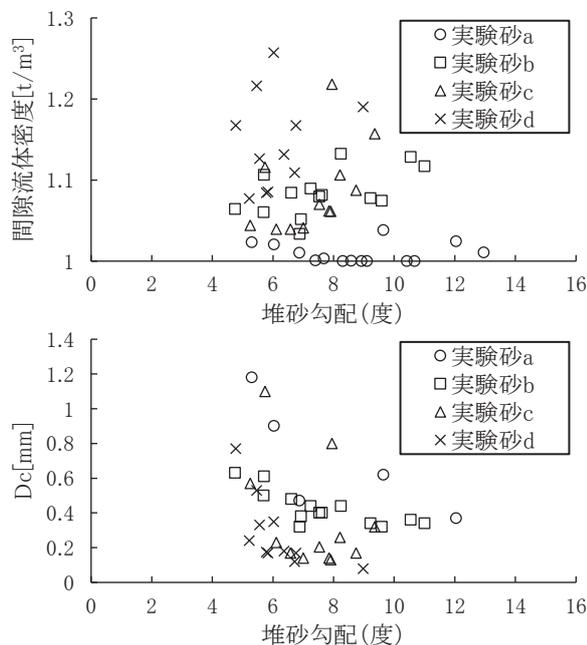


図-6 間隙流体密度, D_c と堆砂勾配の関係

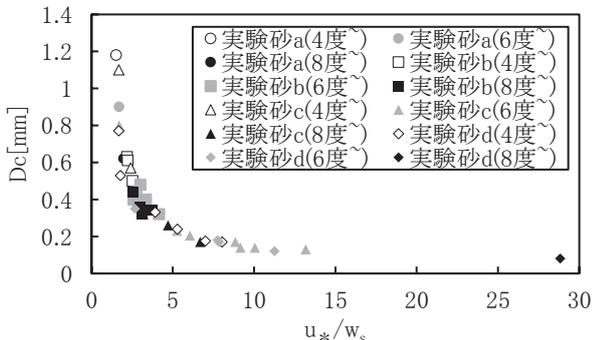


図-7 D_c と摩擦速度／沈降速度の関係

大きい傾向が見られた (図-5)。

また、間隙流体密度、 D_c と堆砂勾配との間に明瞭な関係はみられなかった (図-6)。

さらに、 D_c と実験時の摩擦速度／ D_c の沈降速度の比の関係を図-7 に示す。摩擦速度／沈降速度の比が

大きいほど、 D_c は小さくなる傾向にあり、摩擦速度／沈降速度はおおむね 2～15 の範囲に分布し、堆砂勾配の違いによる系統的な差がないことが分かる。また、 D_c が 0.3mm より大きい領域では、実験砂によらず摩擦速度／沈降速度は 2～4 の値を示している。

4. 数値計算

(1) 計算条件

検証計算における供給流量、粒径、土砂濃度、水路勾配等の計算条件は、嶋ら¹⁵⁾の実験条件と同様の値を設定した。計算は、下流端に設置した仕切り板が満砂し、上流の堆砂が安定するまで行った。さらに、計算終了時の堆砂勾配、実験で計測された平衡状態における堆砂を比較し、モデルごとに再現性を評価した。

フェーズシフトが生じる条件については、水路実験の結果を踏まえ、モデルごとに計算条件を次のように設定した。モデル①とモデル②は、それぞれ間隙流体密度と D_c を一定としたモデルであるが、実験結果から推定された間隙流体密度および D_c は実験ケースごとにばらつきが大きく、堆砂勾配との関係も明瞭でない。そこでモデル①では、実験結果より推定された間隙流体密度が 1.0～1.25t/m³ 程度であることから、計算の間隙流体密度は 1.05, 1.1, 1.15 の 3 ケースを設定した。モデル②では、実験結果より推定された D_c が 0.1～1.2mm 程度であることから、計算の D_c は 0.2, 0.425, 0.9mm の 3 ケースを設定した。

摩擦速度と沈降速度の比は一律に与えられえるものではないが (図-7)、実験の解析結果から D_c が 0.3mm より大きい領域では、実験砂によらず摩擦速度／沈降速度は 2～4 の値を示していることから、モデル③では $\alpha_c = 3$ に設定した。

(2) 計算結果

土石流の間隙流体密度を一定とするモデル (モデル①) で計算した結果、平衡状態の堆砂勾配は、 $\rho_m = 1.05\text{t/m}^3$ の場合には実験結果の 0.8～1.6 倍 (相関係数 0.29), 1.1t/m³ の場合には 0.7～1.5 倍 (同 0.61), 1.15t/m³ の場合には 0.6～1.3 倍程度 (同 0.54) となった (図-8)。 $\rho_m = 1.05\text{t/m}^3$ の場合、実験砂のうち実験砂 a を用いたケースでは、計算結果の堆砂勾配は実験結果の 0.8 倍程度となった。実験砂 a の実験結果から推定された間隙流体密度は 1.0～1.04t/m³ であり、間隙流体は清水に近い状態であると考えら

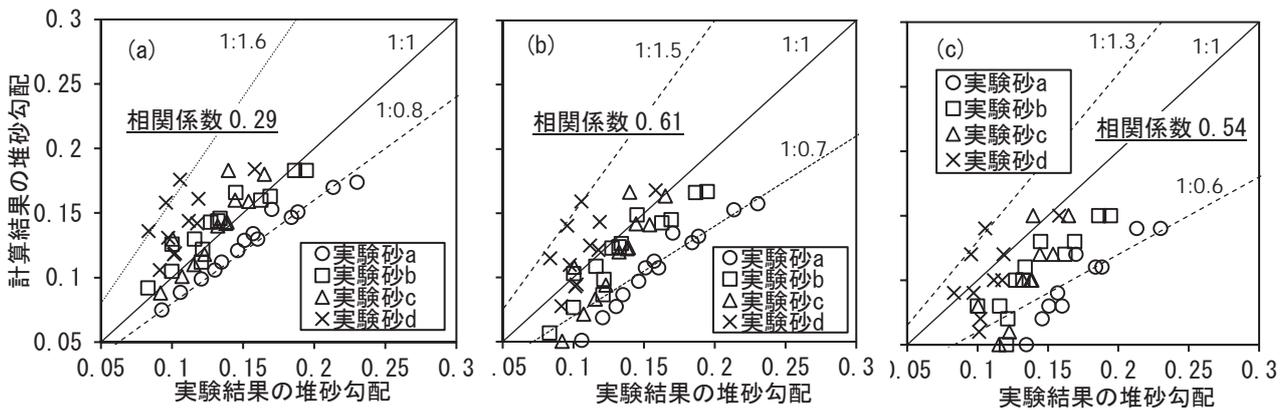


図-8 実験結果と計算結果の堆砂勾配の比較 (モデル①) (a) $\rho_m=1.05t/m^3$, (b) $1.1t/m^3$, (c) $1.15t/m^3$

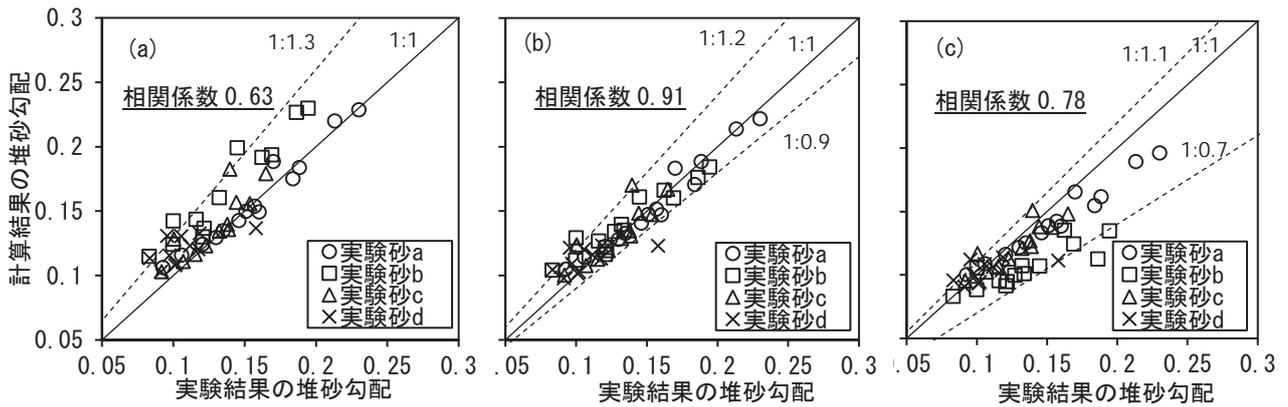


図-9 実験結果と計算結果の堆砂勾配の比較 (モデル②) (a) $D_c=0.2mm$, (b) $0.425mm$, (c) $0.95mm$

れるが、計算上 1.05 に設定している。このため、フェーズシフトが実際よりも過大に生じたため、平衡状態の堆砂勾配が実験結果に対して小さい傾向を示したと考えられる。実験砂 b, c を用いたケースでは、計算結果の堆砂勾配は実験結果の 0.9~1.2 倍程度であり、比較的实验結果を良好に再現できた。一方、実験砂 d では、計算結果の堆砂勾配は実験結果の 1.1~1.6 倍程度であり、実験結果よりも堆砂勾配が過大に計算された。これは、計算上設定した間隙流体密度が実際よりも小さいために、式(7)、式(8)より計算される粗粒土砂の平衡濃度が小さくなるためである可能性が考えられる。一方、 $\rho_m=1.15t/m^3$ の場合には、実験砂 b, c では堆砂勾配の計算結果は実験結果の 0.7~0.9 倍程度となった。これは実際よりも多量の細粒土砂のフェーズシフトが生じる計算条件となっていたためであると考えられる。

D_c を一定とするモデル (モデル②) のうち $D_c=0.2mm$ の場合は、平衡状態の堆砂勾配の計算結果は実験結果の 1.0~1.3 倍 (相関係数 0.63)、 $0.425mm$ の場合には 0.9~1.2 倍 (同 0.91)、 $0.95mm$ の場合には 0.7~1.1 倍程度 (同 0.78) となった (図-9)。 $D_c=0.2mm$ として計算した場合、実験砂 a を用いたケースは実験結果を再現することができたが、実験砂 b,

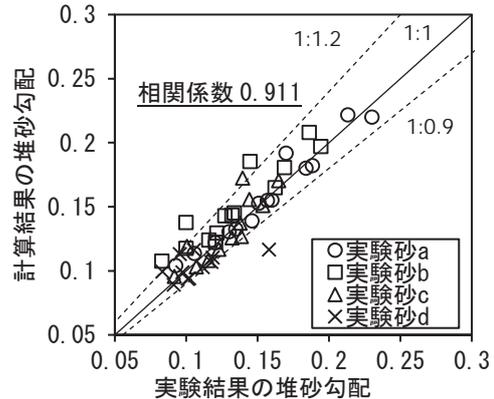


図-10 実験結果と計算結果の比較 (モデル③)

c, d では計算結果の堆砂勾配は実験結果の 1.0~1.3 倍であった。これは、計算上設定した D_c が実際よりも小さく、フェーズシフトする土砂量が過小評価となった可能性が考えられる。 $D_c=0.425mm$ として計算した場合、実験砂によらず概ね実験結果を再現することができた。 $D_c=0.95mm$ として計算した場合、平衡状態の堆砂勾配の計算結果は実験結果の 0.7~1.1 倍であり、計算上設定した D_c から算出されるフェーズシフトする土砂量が大きいため、堆砂勾配が小さい傾向がみられた可能性が考えられる。

摩擦速度/沈降速度の比により D_c が設定されるモデル (モデル③) で計算した結果、平衡状態の堆

砂勾配の実験結果に対する誤差は、0.9~1.2倍程度（相関係数0.91）であった（図-10）。この誤差に実験砂による系統的な違いはみられない。

以上の水路実験の再現計算による検証結果から、モデル②の $D_c=0.425\text{mm}$ のときおよびモデル③の $\alpha_c=3$ のときに細粒土砂のフェーズシフトの挙動を最も表現できているといえる。

5. おわりに

本研究では、フェーズシフトが生じる条件に関する仮説をもとに、土石流の間隙流体密度を一定とする計算モデル、 D_c を一定とする計算モデル、土石流の摩擦速度／細粒土砂の沈降速度から D_c を設定する計算モデルを用いて、細粒土砂の流下に関する水路実験の再現計算を行い、フェーズシフトが生じる条件の設定方法について検討した。その結果から、 D_c を一定とする手法と摩擦速度／沈降速度の比により D_c を設定するモデルにおいて、比較的良好な再現性が得られた。

すなわち、 D_c を一定とする計算モデルでは、実際の細粒土砂の割合に整合する D_c を設定することができれば、ある程度精度良く細粒土砂のフェーズシフトの挙動を表現できる。しかし、 D_c は再現対象の規模や粒径によって変化すると考えられる。

一方、摩擦速度／沈降速度の比により D_c が設定されるモデルでは、摩擦速度／沈降速度の比が3以上の際にフェーズシフトすると仮定した場合で、再現性が良かった。この手法は土石流の規模（水深）や細粒土砂の粒径に応じて、 D_c が変化すること考慮しており、汎用性が高い計算モデルである可能性が期待されるが、摩擦速度／沈降速度の比について幅広い摩擦速度の条件での検討など、更なる検討をする必要がある。

また、実験結果から推定された摩擦速度／ D_c の沈降速度の比から明らかなように、 D_c が0.2mm以下の小さい範囲では、摩擦速度／ D_c の沈降速度が5以上となる領域が存在する。この原因についても、さらに検討する必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省関東地方整備局富士川砂防事務所には水路実験に関する貴重なデータを提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋保：土石流の機構と対策，近未来社，pp. 40, 2004.
- 2) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学

防災研究所年報，第20号B-2，1977.

- 3) 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，pp. 459-464, 1991.
- 4) 江頭進治，伊藤隆郭：土石流の数値シミュレーション，日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌，12巻，2号，pp. 33-43, 2004.
- 5) 西口幸希，内田太郎，石塚忠範，里深好文，中谷加奈：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション—深層崩壊に起因する土石流への適用—，砂防学会誌，64巻，3号，pp. 11-20, 2011.
- 6) 西口幸希：深層崩壊に起因する土石流の数値シミュレーション手法に関する研究，学位論文，2014.
- 7) 長谷川祐治，杉浦信男，岡本敦，内田太郎，林真一郎，丹羽諭，鈴木拓郎：細粒土砂が土石流の平衡濃度に及ぼす影響に関する実験，第62回平成25年度砂防学会研究発表会概要集B，pp. 118-119, 2013.
- 8) 中谷加奈，古谷智彦，長谷川祐治，小杉賢一郎，里深好文：細粒土砂の液相化が土石流挙動に及ぼす影響とその要因に関する検討，砂防学会誌，70巻，6号，pp. 3-11, 2018.
- 9) Iverson RM, George DL.: A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy., I. Physical basis, Proc. R. Soc. A470, 2014.
- 10) 鈴木拓郎：細粒成分を間隙流体として取り扱う土石流のシミュレーションモデルに関する研究，平成25年度砂防技術研究所報（砂防・地すべり技術センター），pp. 22-25, 2014.
- 11) 一般財団法人砂防・地すべり技術センター：土石流の移動の解析方法，特許第6313584号，2018.
- 12) 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，第317号，pp. 79-91, 1982.
- 13) Rubey W.W: Settling velocities of gravel, sand and silt particles, American Journal of Science, Vol.25, pp.325-338, 1933.
- 14) T. Uchida, Y. Nisiguchi, K. Nakatani, Y. Satofuka, T. Yamakoshi, A. Okamoto, and T. Mizuyama: New numerical simulation procedure for large-scale debris flows (Kanako-LS), International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.6, No.2, pp.58-67, 2013.
- 15) 嶋大尚，光永健男，守谷武史，大浦二郎，内田太郎，鈴木拓郎，黒田章雄，長谷川祐治：細粒土砂を含む土石流平衡濃度の算出方法，第63回平成26年度砂防学会研究発表会概要集A，pp. 118-119, 2014.

(2018. 5. 18 受付)