

底泥の降伏値・移動限界に及ぼす細砂混入の影響

Influence of Fine Sand Mixture on Yield Value and Critical Shear Stress of Cohesive Sediment

中野 晋*・喜田 将司**

By Susumu NAKANO and Masashi KIDA

Water content is the most important parameter for rheological property of cohesive sediment. Mud in estuary often contain 10-70% fine sand and mixture of sand considerably influences rheology of mud. Vane tests were conducted for measuring the yield stress of mud and it was found that the yield stress decrease by mixture of fine sand. In flume experiments for initial movement of mud bed, it was found that the increase of sand content causes the decrease of critical shear stress.

Keywords; cohesive sediment, sand content, vane test, critical shear stress

1. はじめに

粘着性を有する底泥の流れ作用下での移動現象は大坪の研究^{1),2)}をはじめ,多くの研究者(たとえば海田ら³⁾,村上ら⁴⁾,瀧⁵⁾,神田ら⁶⁾)により調べられている。これらの研究では現地泥を用いた実験も行われているが,材料の不均質性を回避するため,カオリナイトなどの粘土を用いた実験の方が多い。一般に底泥の移動現象はそのせん断強度や流動特性に支配されており,これらの量が回転粘度計やベーン試験装置で測定されている。この場合も移動床実験と同様,粘土を用いた試験が中心となっている。ところがエスチャリで採取される底泥は,ほとんどの場合,粘土やシルト分に加えて細砂がかなり含まれており,粘土だけでの測定結果を現地泥に適用するには大きな問題がある。実験泥と現地泥の間には粒度構成の違いの他にも有機物質の存在や圧密など数多くの相違が見られるが,ここでは細砂の混合程度による移動限界の変化について焦点を絞り,細砂・粘土混合時のベーン試験によるせん断強度測定,移動限界実験を行った。

2. 底泥のせん断強度に及ぼす細砂混合の影響

2. 1 見かけの含水比

芦田ら⁷⁾も砂と粘土が混合した底質を対象にした流砂問題を扱っている。彼らの研究では砂礫の移動現象の延長上としてとらえるため,粘土含有率は最大でも20%のものを対象とし,粘着抵抗力は重力起因の抵抗力に

* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科

** 学生会員 徳島大学大学院 工学研究科博士前期課程

(〒770 徳島市南常三島町 2-1)

付加された力として導入されている。その際、粘土の流動特性は仮定された値が用いられた。一方、本研究では砂の成分は全体の半分以下で粘着土の中に細砂が混入している状況を対象とする。この場合、各砂粒子の周囲は完全に微細土粒子に覆われ、砂の持つ摩擦抵抗力はほとんど寄与しないと考えられる。したがって砂分の含有率が低い底質の流送抵抗力は粘着力だけを考慮するとよい。

降伏値などの流動特性値は含水比の関数として表される。微細土粒子の中に粘着力に寄与しない砂粒子が含まれる場合、砂分を含んだ形で測定された含水比 W （以下では単に含水比と呼ぶ）と微細土粒子だけの含水比 W_c （以下では粘土含水比と呼ぶ）は異なっている。両者はそれぞれ

$$W = \frac{w_w}{w_s} = \frac{w_{ws} + w_{wc}}{w_{ss} + w_{sc}}, \quad W_c = \frac{w_{wc}}{w_{sc}} \quad (1)$$

で表される。ここで w は底泥内の固体または液体の質量を表し、添字 w, s, c はそれぞれ間隙水、砂、粘土の各成分を表す。底泥の中で図-1に示すように球状の砂（直径 d_s ）と粘土（直径 d_c ）の周りに厚さ t の水が付着しているとする。砂および粘土に付着する総水量 V_{ws}, V_{wc} は

$$V_{ws} = n_s A_3 \left[(d_s + 2t)^3 - d_s^3 \right] \cong 6n_s A_3 d_s^2 t, \quad V_{wc} \cong 6n_c A_3 d_c^2 t \quad (2)$$

である。なお、 n_s, n_c は砂粒子、粘土粒子の個数、 A_3 は体積形状係数である。また固体に占める砂分の重量割合を m 、砂粒子と粘土粒子の密度を ρ_s, ρ_c とすると、両者の比は

$$\frac{V_{ws}}{V_{wc}} = \frac{V_{ss} / A_3 d_s^3 d_s^2}{V_{sc} / A_3 d_c^3 d_c^2} = \frac{m}{1-m} \frac{\rho_c d_c}{\rho_s d_s} \quad (3)$$

で表される。ここに V_{ss}, V_{sc} は砂分と粘土分の体積である。最終的には粘土含水比と含水比の関係が、

$$W_c = W / \{1 - m(1 - K)\} \cong W / (1 - m), \quad K = \rho_c d_c / \rho_s d_s \quad (4)$$

のように簡単な式で表される。これより、 m が増加すると粘着力に最も寄与する W_c が高くなり、その結果、細砂混合底泥の粘着抵抗力、すなわちせん断強度が低下することが推測される。

2. 2 外筒回転型ベーン試験

降伏値も含め、底泥の流動特性の測定にはずり速度可変の回転粘度計を用いることが多い。しかし、回転粘度計は流動状態の粘性を調べるものであり、底泥の構造の破壊限界を示す降伏値の測定は原理上不可能である。一方、ベーン試験は試料の中に挿入したベーンを回転させる際の最大トルクからせん断強度を求めるもので降伏値は正確に測定できる。これまでも矢内ら⁸⁾や鶴谷ら⁹⁾がベーン試験による降伏値の測定を行っている。

本研究では図-2に示すベーン試験装置を用いた。この装置の特徴はステンレス製の試料容器が回転する外筒回転式となっていることである。装置の中央のベーンにはトルク計が接続され、底泥試料の回転に抵抗しながらトルク量に応じて回転するようになっている。またトルク計の回転量はエンコーダによって検出され、トルク量に変換される。試験容器の回転制御とトルク量の収録はともにパソコンで行われる。試験容器は直径13cm、高さ19cmで、ベーンは図に示すように3×12cmで最も標準的な4枚羽である。羽の枚数やサイズは試験結果に強く影響すると考えられるが、ベーン形状に関する詳細な検討は行っていない。鶴谷らが用いたベーンの回転角を制御する方式とは異なり、試料が流動していない状態では外筒の回転角 θ_0 とベーンの回転量 θ_v は同一である。局所的にでも破壊が生じ始めると回転角の差 $\theta_0 - \theta_v$ が生

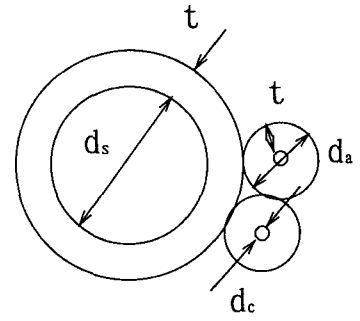


図-1 底泥の付着水の概念図

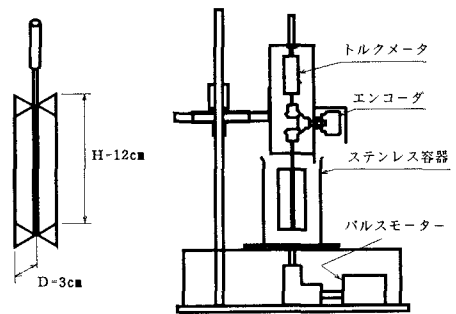


図-2 ベーン試験装置

じ始め、降伏するとその差が急増する。なお、試験容器と試料との間のスリップをできるだけ小さくするため、試験容器の内側には等間隔に 12 本の塩ビ棒（径 3mm）を取り付けた。試験は従来からよく用いられているカオリナイト粘土（ASP600、中央粒径 $0.8 \mu\text{m}$ 、比重 2.67）を用いた。細砂粘土混合試料を作成するために、擬似的に細砂を代表させて塩化ビニル樹脂微粉末（TS-800、中央粒径 0.1mm、比重 1.25）を用いた。これは次のような理由による。水路での移動限界実験で作用できるせん断応力レベルは現地の高々 1/10 程度である。これに合わせて移動限界実験ではせん断強度の小さい、つまり高含水比の底泥も用いる必要がある。その場合にはしばしば沈降分離が問題になるため、この影響を少なくするため、塩化ビニル樹脂を細砂の代わりに用いた。両者を所定の含水比、砂混合率になるように水道水を用いて調整した。

本試験に先立ち、外筒の最大回転角や角速度を数段階変化させて影響を調べているが、ここでは本試験で用いた最大回転角 180(deg)、角速度を 0.1(deg/s)の結果について次節で考察する。

2. 3 試験結果

図-3 に回転角度差 $\theta_0 - \theta_v$ に伴うせん断応力 τ の変化（カオリナイトのみの場合と 20%細砂を混合した場合）を示す。

$\theta_0 - \theta_v = 0 \text{ deg.}$ から離れる時の τ が降伏値に相当する。しかし、制御、検出系の分解能（たとえば、円筒回転制御精度：約 0.07deg）による影響、ペーンの端部の局所的な破壊が先行することなど、 $\theta_0 - \theta_v = 0 \text{ deg.}$ 付近のデータはばらつきが大きい。そこで、比較的せん断応力の増加が小さくなる $\theta_0 - \theta_v = 10 \text{ deg.}$ の時のせん断応力値をペーン降伏値とみなすことにした。高含水比泥では $\theta_0 - \theta_v = 10 \text{ deg.}$ 付近でせん断応力がほぼ一定に達している場合もある。この時には降伏応力より、流動によって生じる粘性抵抗力が支配的になり、少し大きめの値となっている可能性は否定できず、さらに検討する必要がある。

このようにして得られた τ_{yv} と含水比 W との関係を示したのが図-4 である。図中には鶴谷ら^{9),10)}のペーンと回転粘度計によるカオリナイトに対する試験結果も示している。粘土のみの測定結果では、ペーン試験に関しては鶴谷らの結果とほぼ一致している。一方、回転粘度計の測定結果はペーンによる測定値に比べ、低含水比では大きく、高含水比ではかなり小さな値を示すことがわかる。回転粘度計では低含水比にシリンダーと試料とのスリップが顕著になること、高含水比では流動に伴う粘性抵抗が降伏値の中に含まれるため、こうした結果になると考えられる。底泥の移動限界についての研究の多くで抵抗力を代表する指標として降伏値を用いており、測定法による降伏値の相違は重要な問題となる。カオリナイト粘土についての本試験の結果を最小二乗法で近似すると、降伏値 τ_{yv} と含水比 W との実験式として

$$\tau_{yv} = aW^b \quad (\text{Pa. ただし, } W \text{ の単位は}\%) \quad a = 1.85 \times 10^{11}, b = -4.44 \quad (5)$$

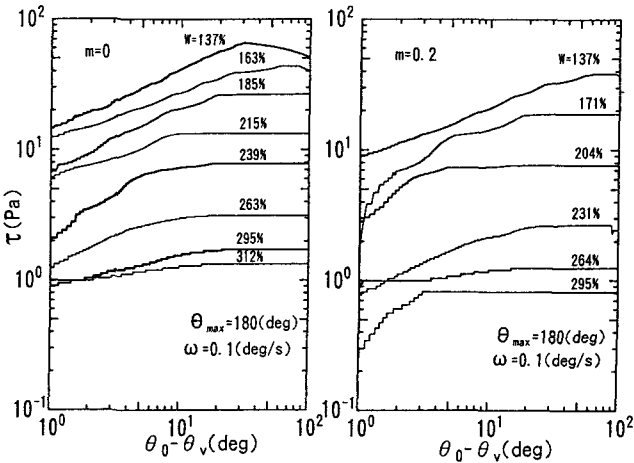


図-3 ペーン試験における変形-応力関係

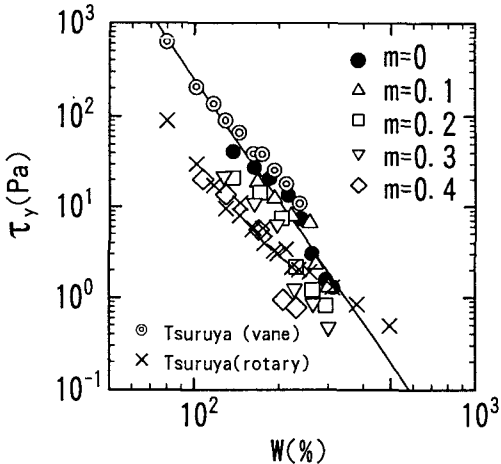
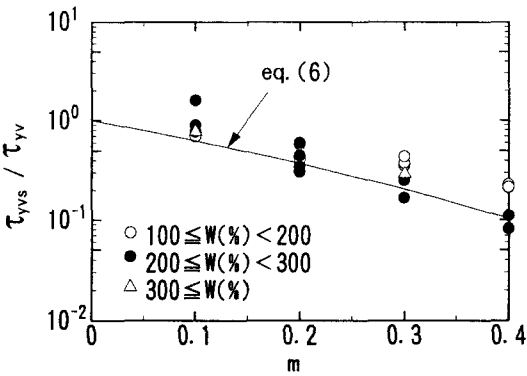


図-4 降伏値の含水比による変化

の関係が得られる。一方、砂混合率 m の増加に伴い、降伏値 τ_{yv} の減少がみられる。細砂混合泥でのせん断強度が粘土などの微細粒子分の含水比、つまり粘土含水比 W_c に依存すると考えると、式(4)および式(5)を用いて、降伏値に及ぼす砂混合率の影響が次のように評価できる。なお、 τ_{yvs} は細砂混合泥の降伏値を示す。

$$\frac{\tau_{yvs}}{\tau_{yv}} = \left(\frac{W_c}{W}\right)^b \cong (1-m)^{-b} \tag{6}$$

τ_{yvs} の測定値と式(5)で評価される粘土のみの降伏値の比を求めて、式(6)と比較したのが図－5である。細砂混合率が増加するに伴い、降伏値が減少する状況がよくわかる。含水比によって少しばらついているが、式(6)により 細砂の混合による降伏値の低下を表現できることがわかる。



図－5 細砂混合による降伏値の低下

3. 底泥の移動限界に及ぼす細砂混合の影響

3. 1 実験の概要

底泥の移動限界掃流力を求めるために開水路流送実験を行った。

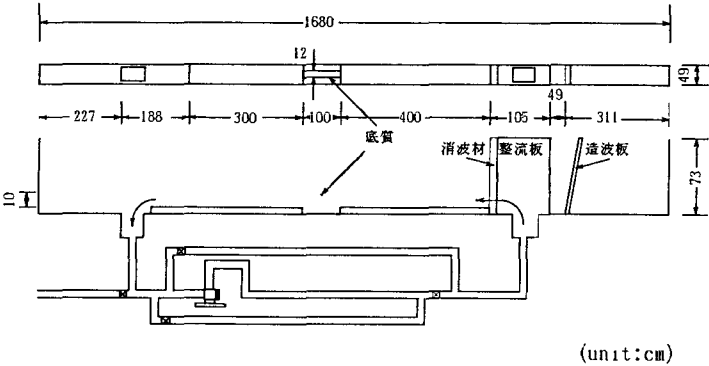
対象とした底泥試料はベーン試験と同一で、カオリナイト粘土と塩化ビニル粉末が10～40％混合した細砂混合泥である。実験に用いた水路の概略図を図－6に示す。

4mの助走区間の下流1mにわたり、幅12cm、深さ15mmの移動床区間を設けた。大坪ら¹⁾と同様、試料の設置を容易にするため、試料はアクリル製の受皿に入れて移動床部にセットした。巻き上げ量の測定に際しては流量を段階的に増加させ、流量変更5分後に、

上流端のポンプ吹き出し口で採水した。採水した試料のSS濃度は自動分光光度計（ハック DR/2000）により、分析し、カオリン濃度に変換して求めた。流量はWaltman 式積算流量計により調整し、あらかじめ固定床流速測定実験から求めておいた流量と摩擦速度の関係を用いて、移動床実験時の各流量に対するせん断応力を評価した。限界掃流力 τ_c は村上ら⁵⁾と同様、巻き上げ率（単位時間、単位面積当たりの浮上底泥重量）が急激に増加する時のせん断応力として定義した。この水路では100％前後の低含水比の底泥の巻き上げは見られなかったため、ベーン試験よりは少し高含水比の底泥が対象となっている。

3. 2 細砂混入による限界掃流力の変化

カオリナイト粘土についての限界掃流力と降伏値の関係を大坪ら¹⁾、海田ら³⁾、村上ら⁴⁾、藤平ら¹¹⁾の実験データとともに図－7に示す。降伏値は各論文に示された含水比を元に式(5)から算出したものである。実験方法、移動限界の定義、試料の特性の違いなどがあり、今回の測定結果は他の研究成果とはあまり一致していない。今回の実験結果を最小自乗法により近似すると、



図－6 移動限界実験に用いた水路概略図

$$\tau_c = \alpha \tau_{yv}^\beta \text{ (Pa)}$$

$$\alpha = 0.28, \beta = 0.39 \quad (7)$$

の関係が得られる。細砂混合泥においても上式の関係は概ね満足されており、微細粘土に起因する粘着力(降伏値)が移動限界と最も関係の深い代表量であることがわかる。

一方、これまでの研究では底泥の移動限界が回転粘度計で測定された降伏値の 0.5～1.5 乗に比例するような結果が多かったが、今回のようにベーン降伏値で整理すると τ_c の降伏値に対する変化は小さくなっている。先に述べたように、回転粘度計の測定値が式(5)に比べると高含水比で小さく、低含水比で大きくなるのが影響している。この図でも明らかにように同じカオリナイトを用いても、移動限界掃流力は研究者により大きく異なり、現地データも含めたデータの集積と計測方法の統一によるばらつきの低減について真剣に検討する必要がある。

図-8は細砂混合泥における限界掃流力の見かけの含水比に対する変化を示す。混合割合が10%の場合には混合なしの場合とほとんど変わらないが、20%以上になると細砂の混入により、限界掃流力が顕著に低下することがわかる。式(6)と式(7)の関係をを用いると、細砂混合による移動限界の変化が

$$\frac{\tau_{cs}}{\tau_c} \cong (1-m)^{-b\beta} \quad (8)$$

で推定できる。ここに、 τ_{cs} は細砂混合時の限界掃流力を表す。この式と実験値を比較したものが図-9である。この図で示した W が 200, 300, 400% に対する実験値は図-8より、各 m に対する τ_c と W の関係を求めた後、それぞれの含水比に対応する τ_c または τ_{cs} を求め、両者の比をとったものである。式(8)によると砂混合底泥の限界掃流力が細砂混合率のみの関数で表されることになるが、実験結果も概ね、これに対応している。

4. おわりに

現在、吉野川河口干潟の地形変化の調査を実施しているが、その中で砂分を多く含む底泥の移動量の計算に苦慮している。そうした背景の下に底

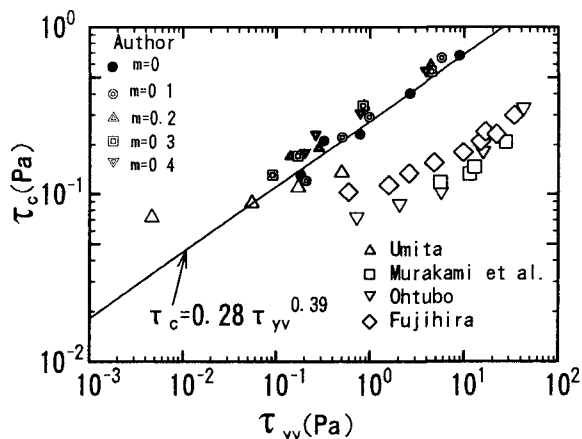


図-7 限界掃流力とベーン降伏値の関係

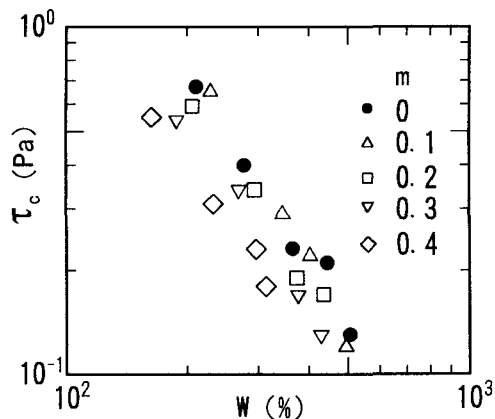


図-8 細砂混入による限界掃流力の変化

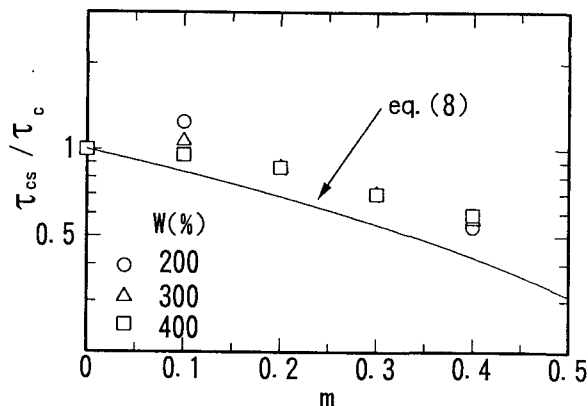


図-9 細砂混合率と限界掃流力低下率

泥の移動限界に及ぼす砂成分混合の影響について、主として降伏値の変化の点に着目して検討を行ったものである。細砂の混入の影響を見かけの含水比の変化として扱っただけの実に簡単なモデル化を行ったが、含水比が200%以上という高含水比のカオリナイト粘土を基本とした底泥については、細砂混合による降伏値と移動限界の変化について、ある程度説明することができた。しかし、初期移動状態の力学モデルに関する情報は得られていない。またこの成果を現地の底泥に適用するためには、相似則の検討、現地泥に対するデータの集積など、数多くの問題がそのままになっている。

謝辞．最後に、科学研究費・総合研究(A)（代表：東北大学教授・澤本正樹）、一般研究(C)（代表：徳島大学助教授・岡部健士）および徳島大学教育研究学内特別経費の補助を受けて実施したものである。ここに付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1)大坪國順・村岡浩爾：底泥の物性と限界掃流力に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol 363/II-4，pp.225-234，1985.
- 2)大坪國順・村岡浩爾：流れによる底泥の飛び出し率，土木学会論文集，Vol.375/II-6，pp 43-52，1986.
- 3)海田輝之・楠田哲也・二渡 了・栗谷陽一：柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究，土木学会論文集，Vol.393/II-9，pp.33-42，1988
- 4)村上和男・菅沼史典・佐々木均：円形回転水路による底泥の巻き上がりと沈降に関する研究，港研報告，Vol 28-1，pp.43-76，1989.
- 5)瀧 和夫：水流による底泥の巻き上げ量に関する水理学的研究，中央大学学位論文，180p，1990
- 6)神田徹・笹 真：レオロジー特性を考慮した底泥の流動モデル，水工学論文集，Vol.38，pp.641-646，1995.
- 7)芦田和男・江頭進治・加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1)，京大防災研年報，25B-2，pp.349-360，1982.
- 8)矢内栄二・五明美智男：軟らかい底泥のせん断強度特性について，第43回年講，pp.768-769，1988.
- 9)鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤：ベーン試験とスランプ試験による軟らかい粘土の流動限界の検討，港湾技研資料，No.655，pp 1-21，1989.
- 10)鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤：回転粘度計による底泥の流動特性の検討，港湾技研資料，No.566，pp 1-29，1986.
- 11)藤平依彦：底泥床上の乱れ特性と移動限界掃流力，徳島大学修士論文，1991