

噴流による細砂混合底泥の洗掘限界

CRITICAL SCOUR CONDITION OF MUD BED MIXED WITH SILT AND FINE SAND DUE TO SUBMERGED IMPINGED JET

中野 晋¹・大川晃由²

Susumu NAKANO and Teruyoshi OHKAWA

¹正会員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 修(工) (株)日本港湾コンサルタント 首都圏事務所(〒150-0022 東京都渋谷区恵比寿南1-15-1)

Cohesive sediment accumulated in an estuary contains fine sand and clay. To investigate the influence of the percentage of fine sand content on the erosion process of cohesive sediment, not only the erosion tests with vertical jets but also vane tests to measure yield stress were conducted. The percentage of fine sand content was varied between 0 and 80%. Both the yield stress of cohesive sediment and the critical condition of erosion are closely related with the adhesive water thickness of soil particles. The former is in proportion to the 5th power of the adhesive water thickness. The latter is in proportion to the 3/5 power of that thickness.

Key Words: cohesive sediment, fine sand content, submerged impinged jet, vane test, critical condition of erosion

1. はじめに

ヨシ原が広がる河口干潟などではシルト以下の微細粒子から砂やレキが混合する粘着性底質が堆積している。このような泥質の河口干潟の浸食・変形過程を調べる上で、粘着性底質の移動に関する基礎的な理解は欠かせない。粘着性底質に関する研究を底質の含水比に基づいて分類すると、含水比の高いいわゆる“底泥”を対象とした研究(たとえば、大坪¹⁾など)と側岸浸食などで重要となる比較的低含水比な粘性土を対象とした研究に分かれる。

前者の場合には底泥内に間隙水の占める割合が大きく、土粒子同士の接触が少ないため、粒子の噛み合せによる摩擦抵抗力は無視できる。したがって流水に対する抵抗力の大半は粘着力であり、底泥をシルトと間隙水で構成される連続体として取り扱うことができる。そのため、底泥の強度や変形に粒度構成はあまり影響を与えないものと考えられ、粒度構成を考慮した解析はあまり行われなかった。底泥の粘着力は構成する土粒子間の相互干渉作用に起因しており、土粒子表面や間隙水のイオン活性度、表面積、土粒子間距離、含水量などに関係する。この内、粒度分布は表面積、土粒子間距離などに関係する。また、河口の泥干潟など現地底泥では時空間的に粒度構成等の物理諸量は絶えず変化しており、こうした場での地形や

底質変化をシミュレートする上では比較的測定の容易な粒度分布と底泥の強度特性や移動限界の関係を把握しておくことが必要となっている。そうした観点から著者ら²⁾は底泥内の粒子相互作用力と粒度分布の関係について検討し、細砂混合率が底泥の降伏値に及ぼす影響を半理論的に示すとともに同一含水比でも細砂の混入(重量割合で40%以下)は移動限界の低下をもたらすことを明らかにしている。また関根ら³⁾は粘土と砂の混合底質を用いた浸食実験を行い、粘土含有率60%前後で浸食速度が最小となることを見出している。

一方、後者では間隙水が少ないために土粒子や砂粒子が接触する割合が高く、粒子の噛み合せ効果による摩擦抵抗力が卓越する。芦田ら⁴⁾は砂にパルクレイなどの粘土を混合した粘着性底質を用いた浸食実験を行い、砂にシルトが加わった時の流砂量の定式化を行っている。砂の摩擦抵抗力に付加的な粘着抵抗力を考慮することにより、流砂理論が粘着性底質にも拡張されたが、粘着力自体は実験定数として与えるもので、未知量のままとっている。

前報の研究²⁾では細砂含有率が40%以下の試料を対象としてせん断強度測定を実施したが、今回は対象範囲を細砂混合率0~80%と広げてせん断強度を測定した。これは関根³⁾の実験でも示された浸食速度が最小となる細砂混合率についてせん断強度の点から考察することと平

均付着水厚さを利用した解析方法が適用できる細砂混合率の範囲などを検討するためである。また、前報では非粘着性試料として、高含水比の時に生じやすい沈降分離を防ぐため、比重の小さい塩化ビニル粉末を用いたが、これに加えて自然砂に近い人工砂（石川ライト）を用いた測定を行い、細砂の粒径、比重などの違いの影響が考慮できるように配慮した。

底泥の浸食現象は流水中で一定のせん断応力が作用している場を対象に測定が行われることが多い。しかし、本研究では次の目的のため、鉛直噴流を用いて洗掘限界測定を行った。河口干潟の底質は河川流・潮流の流れによる浸食作用と海から侵入してくる波浪による浸食作用を受ける。ヨシなどが繁茂した泥質干潟では植物の蒸散作用などにより、底質の含水比が低下し、せん断強度の大きい底質が形成されていることが多い。こうした所では流れよりも碎波が干潟側面に繰り返し作用することにより浸食される。山西⁴⁾は佐賀県六角川で採取したガタ土を用いて波による傾斜底泥面の洗掘実験を行っており、洗掘限界時の最大衝撃碎波圧と底泥のせん断強度の関係を求めている。しかし、周期、波高、斜面勾配により碎波圧の特性は異なるため、多くの種類の底質を対象に碎波による洗掘限界の特性を把握することは困難である。そこで干潟底質の波浪による浸食を検討する前段階として噴流状に斜面に衝突する碎波を単純化したものとして、鉛直噴流を用いることとした。

2. 細砂混合底泥のせん断強度

(1) 平均付着水厚さと粒子間応力

底泥を構成する土粒子がすべて球形であり、間隙水が粒子の大きさに無関係に各粒子の表面に均質な厚さに付着すると仮定する。この水膜の厚さを平均付着水厚さと定義する。前報²⁾では平均付着水厚さと粒度分布の関係、これと底泥の降伏値の関係について理論的に検討し、次の結果を得ている。

空隙が間隙水で満たされている飽和状態を考える。粒径 d の重量確率密度が $p(d)$ で表される時、平均付着水厚さ t は

$$\left[4 \int_a^b \frac{p(\eta)}{\eta^3} \delta\eta \right] t^3 + \left[6 \int_a^b \frac{p(\eta)}{\eta^2} \delta\eta \right] t^2 + \left[3 \int_a^b \frac{p(\eta)}{\eta} \delta\eta \right] t - \frac{\lambda}{2(1-\lambda)} = 0 \quad (1)$$

で表現される。ここで、 λ は空隙率、積分範囲の a, b は最小粒径、最大粒径である。また粒子間応力として粒子間引力である van der Waals 力が卓越する場合には粘着性底質の降伏値 τ_y と平均付着水厚さ t の関係は

$$\tau_y = C_A (S_1 / S_2) t^{-5} \quad (2)$$

で表される。ここで S_1, S_2 は粒度分布に関する量で式(3)で表現される。また C_A （単位は Nm^2 ）は底泥の種類によって異なる定数である。

$$S_1 = \int_a^b \{p(\eta) / \eta\} \delta\eta, \quad S_2 = \int_a^b \{p(\eta) / \eta^2\} \delta\eta \quad (3)$$

(2) 細砂混合による液性限界変化

実験試料には粘土としてカオリナイト（Engelhard, ASP600, 中央粒径 $4.2\mu\text{m}$, 比重2.67）を用い、細砂として塩化ビニル粉末（日本ビニール, TS-800, 中央粒径 $100\mu\text{m}$, 比重1.25）および石川ライト6号（中央粒径 $218\mu\text{m}$, 比重2.08）を用いた。粘土と細砂を所定の混合率で混ぜ合わせた後、水道水を加えて攪拌し、試料を作成した。細砂混合率 m は0から80%まで10%刻みで9段階に変化させ、JIS A 1205-1980に基づいて液性限界 W_{LL} を測定した。

図-1に液性限界と細砂混合率の関係を示す。また図中に折れ線で平均付着水厚さ t の細砂混合率 m による変化も示している。 d_1, d_2 の2粒径の混合泥の場合には式(1)より、平均付着水厚さ t は次式を用いて含水比 W から計算される。

$$4 \left(\frac{m}{d_1^3 \gamma_{s1}} + \frac{1-m}{d_2^3 \gamma_{s2}} \right) t^3 + 6 \left(\frac{m}{d_1^2 \gamma_{s1}} + \frac{1-m}{d_2^2 \gamma_{s2}} \right) t^2 + 3 \left(\frac{m}{d_1 \gamma_{s1}} + \frac{1-m}{d_2 \gamma_{s2}} \right) t - \frac{W}{2\gamma_w} = 0 \quad (5)$$

なお、ここで $\gamma_{s1}, \gamma_{s2}, \gamma_w$ はそれぞれ土粒子と水の単位体積重量である。式(1)では粒径ごとの比重変化はないとして計算しているが、実験で用いた底質の場合には粒径により比重が異なり、比重の違いの影響を考慮する必要がある。

液性限界は粘土のコンシステンシーを表すものとして粒度分布と同様しばしば測定される量で、一定外力に対

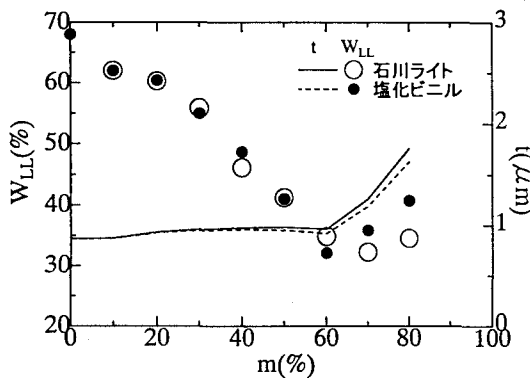


図-1 細砂混合率による液性限界・平均付着水厚さ変化

する粘着性底質の抵抗強さを示す。後述するように液性限界付近の底泥のベーンせん断強度は1~2 kPaである。

図-1を見ると、 m が60%か70%で液性限界が最小となること、 $m < 60\%$ では液性限界時の平均付着水厚さがほぼ一定であることがわかる。 $m > 60\%$ では粒状体としての影響が大きくなり、底泥の力学特性に大きな変化が生じるものと考えられる。

(3)ベーンせん断強度

ベーンは固定され、ステンレスの試料容器が回転する外筒回転型のベーン試験装置⁹⁾を用いた。図-2に粘土と石川ライトの混合泥でのベーンせん断試験結果を示す。図に示すように同一含水比でも細砂混合率が増加するにともない、せん断強度が低下することがわかる。図には鶴谷⁷⁾がASP600についてベーンが回転するタイプの試験装置で測定したせん断強度値を示しているが、今回の測定値とはほぼ一致しており、測定結果の妥当性が確認できる。なお、ベーン試験により測定されたせん断強度は変形運動による粘性抵抗を若干含むため、厳密には底泥の降伏値 τ_y と異なる。そこでこれと区別する意味で τ_{yv} と表す。

塩化ビニル粒子と ASP600 の混合泥では $m < 50\%$ の場合に式(2)で S_1/S_2 の値は1.0~1.1であり、ほぼ一定である。 C_A は底泥の種類によって決まる量であるため、式(2)よりベーンせん断強度 τ_{yv} と平均付着水厚さ t の間に

$$\tau_{yv} = \tau_{yvLL} \left(t / t_{LL} \right)^{-5} \quad (6)$$

の関係が予想される。ここで、 τ_{yvLL} 、 t_{LL} は液性限界時のベーンせん断強度と平均付着水厚さである。

図-3にベーンせん断強度と平均付着水厚さの関係を示す。図中の直線は式(6)で $m = 0$ に対する τ_{yvLL} 、 t_{LL} の値(1100Pa, 0.82 μ m)を用いて描いている。石川ライトの場合は細砂混合率が50%以下で、塩化ビニルの場合はこれが40%以下でほぼ図中の直線と一致しており、この範囲では底泥の力学的特性に変化がないことを示して

いる。一方、細砂混合率が高い場合には図-1で示したように $m = 0\%$ に比べて、 t_{LL} が大きいため、一致していない。しかし、この場合にも τ_{yv} は t の-5乗に比例しており、式(2)が成立することがわかる。

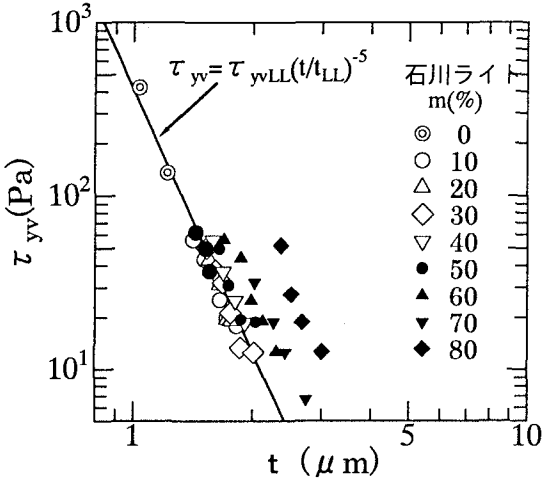


図-3(a) 平均付着水厚さとベーンせん断強度
(石川ライト混合泥)

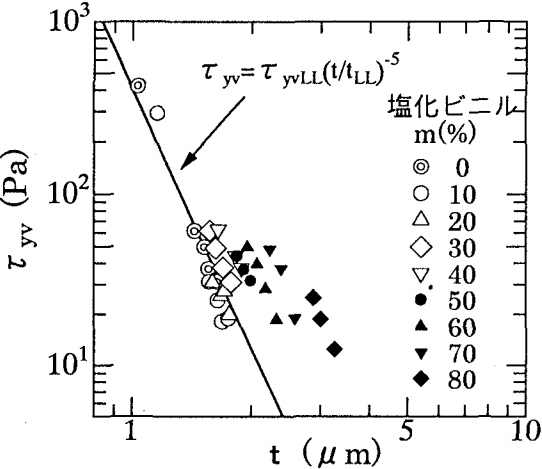


図-3(b) 平均付着水厚さとベーンせん断強度
(塩化ビニル混合泥)

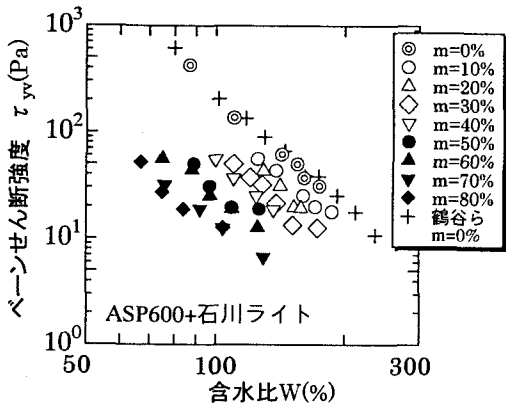


図-2 混合底泥のベーンせん断強度

3.鉛直噴流による混合底泥の洗掘限界

(1)実験装置と実験方法

洗掘実験は図-4に示す縦横120x45cm、幅が10cmの両面ガラス張り鉛直噴流水槽を用いた。底面中央に深さ3cm、長さ40cmの底質層を設け、細砂含有率が重量割合で0~80%の粘着性底質を敷設した。底質表面から13.5cmの高さに設置したノズル(幅10mm)から2次元鉛直噴流を下方に噴出させた。噴出流速を段階的に変化させ、底質表面のひび割れが急激に拡大し始める洗掘限界を測定した。

底面に作用する流体力を測定するため、ノズル直下

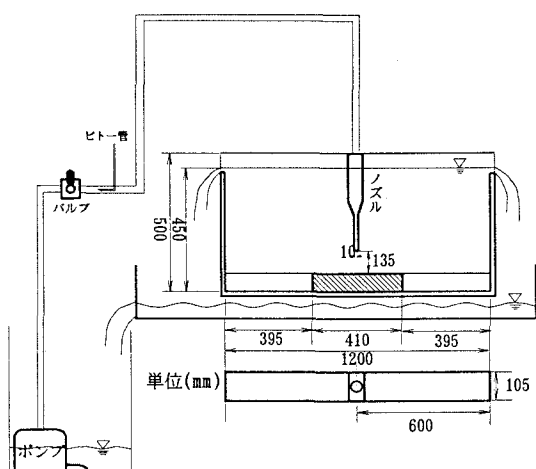


図-4 鉛直噴流による洗掘実験装置



図-5 非粘性底質の洗掘状況



図-6 粘性底質の洗掘状況

($x = 0$ cm)からその左 6.0 cm の位置まで 0.5 cm 間隔で圧力計 (直径 1 cm, 三計エンジニアリング P310-01) を設置し、圧力分布の測定を行った。

(2) 混合底泥の洗掘状況

鉛直 2 次元噴流による砂礫床の洗掘現象に関しては 1970 年代後半から 1980 年にかけて、斎藤ら^{8,9)}の研究が行われている。

非粘性底質では図-5 に示すように洗掘孔に支配される左右対象の渦によって斜面に沿った掃流現象が生じ、洗掘孔が相似的に拡大する。洗掘現象の進行には噴流が砂面に衝突した後に発達する境界層内での底面せん断応力が重要な役割を果たす。

一方、細砂混合泥のような粘性底質の場合には図-6 に示すように、はじめのうちは噴流の衝突点付近に小さなひび割れが複数発生する。さらに流量を上げるとひび割れが徐々に拡大し、ある段階を過ぎるとすべり破壊のように急激に底泥床の破壊が生じ、洗掘孔が形成される。洗掘現象は表面に作用する圧力が空間的に異なるために底質内部でせん断応力が生じ、これが底泥のせん断強度を上回った時に急激に生じるようである。したがって床面に水平に作用する底面せん断応力以上に表面に作用する圧力が重要である。

(3) 床面に作用する圧力分布

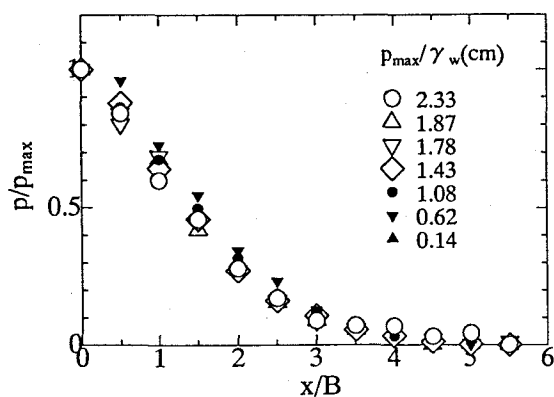


図-7 床面に作用する圧力分布

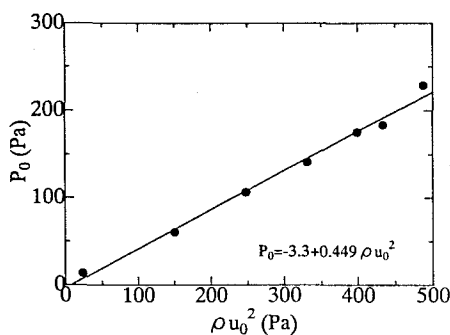


図-8 最大圧力と噴出流速の関係

図-7 に床面に作用する圧力分布を示す。圧力 p は流量ごとに最大圧力 P_0 で無次元化して表した。実験に用いた流量の範囲で圧力分布は相似形を保っており、最大圧力 P_0 とノズル幅 B で基準化して表される。したがって、次項以下での検討では床面に作用する圧力の代表量として最大圧力 P_0 を用いることとした。圧力は噴流の衝突位置から単調に減少し、 $x/B = 2.5$ で最大圧力の 20% 程度となる。最大圧力 P_0 はノズルからの噴出流速 u_0 と図-8 のように関係づけられる。

(4) 細砂混合泥の洗掘限界

亀裂の急激な拡大が生じた時の流量から洗掘限界噴出流速 u_{0c} を求め、図-8 の関係から洗掘限界の最大圧力 P_{0c} を評価した。

図-9 および図-10 に石川ライト混合泥、塩化ビニル混合泥の P_{0c} と含水比 W の関係を示す。含水比の低下または細砂含有率の減少に伴い、底質のせん断強度が増し、洗掘限界圧力 P_{0c} が大きくなる。

次に平均付着水厚さ t と洗掘限界圧力 P_{0c} との関係を図-11 に示す。この図にはカオリナイト粘土、石川ライト混合泥 ($m = 10 \sim 80\%$)、塩化ビニル混合泥 ($m = 20 \sim 80\%$) の 3 種類をプロットしているが、概ね

$$P_{0c} = 600t^{-3} \quad (P_{0c}; \text{Pa}, t; \mu\text{m}) \quad (7)$$

の関係が認められる。この関係が液性限界の底質にも適用できるならば、

$$P_{0c} = P_{0cLL} (\tau_{yv} / \tau_{yvLL})^{0.6} \quad (8)$$

の関係が得られる。ここで、 P_{0cLL} ($\approx 600t_{LL}^{-3}$) は液性限界の底質に対する洗掘限界圧力で粒度構成や有機物量などによって異なる値となる。図-12および図-13に石川ライト混合泥、塩化ビニル混合泥それぞれについて式(8)に対応する実験結果を示す。データはばらついているが、細砂含有率が同じデータを見ると $P_{0c} \propto \tau_{yv}^{0.6}$ の関係がほぼ成立していることがわかる。また式(8)に示されるように粒度構成の違いにより洗掘限界が異なっている状況が理解できる。

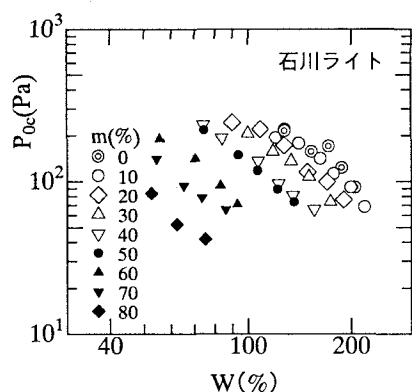


図-9 洗掘限界圧力と含水比の関係 (石川ライト)

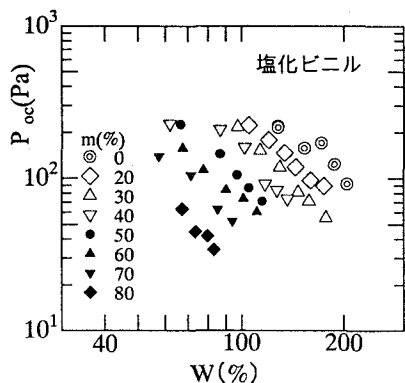


図-10 洗掘限界圧力と含水比の関係 (塩化ビニル)

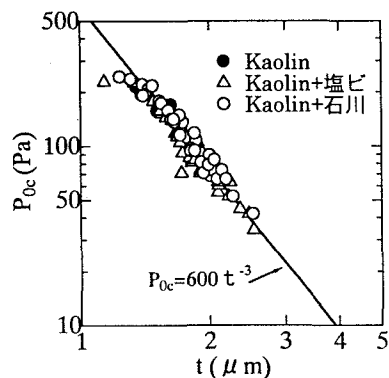


図-11 洗掘限界圧力と平均付着水厚さの関係

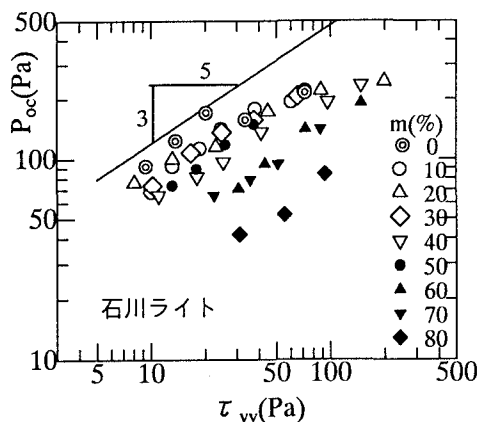


図-12 洗掘限界圧力とベーンせん断強度 (石川ライト)

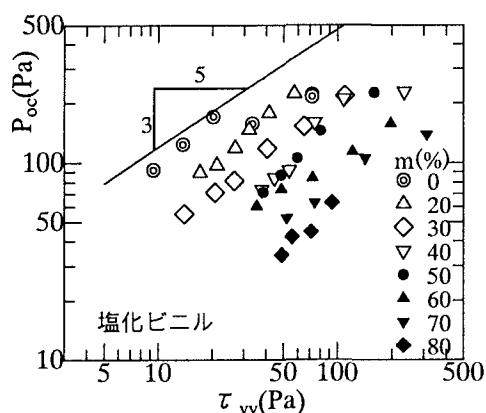


図-13 洗掘限界圧力とベーンせん断強度 (塩化ビニル)

4.まとめ

関根ら³⁾の浸食実験では粘土含有率が40~60%で浸食速度が最小となっている。本研究は鉛直噴流による洗掘現象を取り扱っており、流水中での浸食現象を取り扱った関根らの状況とは異なっている。本研究のまとめとして、得られた結果を総合して、浸食速度が最小となる混合率が存在することの要因について考察する。

1) 底泥の力学的機構の変化

1つの要因は底泥の力学的な機構が粘土含有率または細砂含有率が50%程度で変化することが大きな要因である。液性限界試験では細砂含有率が50%を超えるあたりから液性限界が上昇し、平均付着水厚さの増加が顕著になった。これは砂分の増加により、粒子同士が直接接触する機会が増え、粒子間の摩擦力が卓越し始めるため、底泥のせん断抵抗機構が変化したと考えられる。

2) 細砂混合による平均付着水厚さの変化

本研究では細砂混合時も正確に含水比の測定を行い、付着水厚さの推定を行っている。関根らの実験では含水

比 100%の粘土底泥を作成した後に、所定の細砂混合率になるよう砂を加えている。したがって細砂混合率が増加する（粘土含有率が低下する）ほど実質的な含水比は低下し、平均付着水厚さは減少する。したがって細砂混合率が増加するとせん断抵抗力は大きくなるため、浸食速度は小さくなる。図-9や図-10で示されるように同一含水比の場合は細砂混合率が上昇するほど洗掘限界は単調に低下している。これは関根らの結果と異なっているように見られるが、細砂を混合することによる含水比の変化が考慮に入れられていないためである。

以上のように底泥の浸食抵抗力を正しく評価するためにも粒子間の相互作用力に着目した検討が重要である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費基盤研究(C)（代表・中野晋，課題番号 10650509）の補助を受けて実施された。また図面の作成や実験などで本学大学院生宮本邦茂君の協力を得ている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1)大坪國順：底泥の再浮上機構に関する基礎的研究，138p.，京

都大学学位論文，1984.

2)中野晋・喜田将司：底泥の降伏値・移動限界に及ぼす粒度分布の影響，水工学論文集，41，pp.807-812，1997.

3)関根正人・熊谷利彦・尾藤文人：粘着性土の浸食機構に関する基礎的研究，水工学論文集，43，pp.659-664.，1999.

4)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，25，B-2，pp.349-360,1982.

5)山西博幸・東修・楠田哲也・渡辺亮一，波による傾斜底泥面の洗掘に感ずる研究，土木学会論文集，No.607/II-45，pp.55-68,1998.

6)中野晋・喜田将司：底泥の降伏値・移動限界に及ぼす細砂混入の影響，水工学論文集，40，pp.959-964，1996.

7)鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤：ペ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ー回転粘度計との比較ー，港湾技研究資料，No.665，pp.1-21，1989.

8)斎藤 隆・赤司信義・亀田芳満：衝突および再接触噴流による壁面噴流，山口大学工学部研究報告，28-1，pp.31-42，1977.

9)赤司信義・斎藤 隆：鉛直噴流による洗掘に関する研究，土木学会論文報告集，298，pp.53-62，1980.

(1999.9.30 受付)