

# 貯水池に堆積した微細粒土砂の 浸食特性に関する研究

PHYSICAL AND EROSION PROPERTIES OF  
FINE COHESIVE SEDIMENT SILTED IN RESERVOIRS

角 哲也<sup>1</sup>・井口真生子<sup>2</sup>

Tetsuya SUMI and Makiko IGUCHI

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 京都大学助教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4)

<sup>2</sup>学生会員 工修 博士後期課程 京都大学大学院工学研究科(株式会社ハイドロソフト技術研究所)  
(〒550-0015 大阪市西区南堀江1-7-4)

The physical properties of fine cohesive sediment silted in reservoirs, such as organic matter content and particle diameter, vary among reservoirs. It causes the differences in their erosion processes. The main purposes of this study are to investigate which factor has a great influence on the erosion characteristic and to establish an index that describes the erosion property, which can be easily obtained by laboratory test.

Physical properties of fine cohesive sediments in several reservoirs have been measured, and it was found that humus content dominates their shear strengths. The measurement results on the critical shear strength and the erosion rate shows that liquid limit can be an important index of erosion property.

**Key Words :** *Reservoir sediment management, sediment flushing, erosion of cohesive sediment, critical shear stress, erosion rate, liquid limit, water content, ignition loss*

## 1. はじめに

貯水池内に流入した土砂は分級され、上流部には礫・砂主体の土砂が堆積し、デルタを成形する。デルタより下流には、シルト・粘土主体の微細粒土砂が堆積し、底部堆積層及び密度流堆積層を形成する<sup>1)</sup>。この密度流堆積層の土砂管理方法の一つとして、著者らは後続の洪水放流時に底面付近に流速を発生させて堆積した微細粒土砂を排出する再浮上放流<sup>2)</sup>の検討を進めている。このような土砂管理対策やフラッシング排砂時の土砂浸食過程などを検討するには、どのような特性の土砂が堆積しているかを把握し、その微細粒土砂の巻き上げ特性や浸食速度の予測が重要となる。

粘着性土の浸食速度に関しては、古くから多くの実験的研究がなされており、底面せん断応力(もしくは摩擦速度)の関数として式(1)で表現されることが知られている<sup>3)</sup>。

$$E = A(\tau - B)^c \quad (1)$$

ここに、 $E$ は浸食速度、 $A$ は粘着性土の土質力学的性質による変数、 $B$ は限界せん断応力に相当する値、 $C$ は

巾乗の変数あるいは定数である。式(1)の関係式が得られているものの、研究グループによって $C$ の値が異なり、統一された評価方法がない。傾向としては、粘着性土河床など有機物含有量が小さく含水比の低い粘着性土を対象にした研究<sup>(例えば3), 4), 5)</sup>では、 $C$ は1.5として取り扱われ、湖沼や河口などの有機物含有量が多く含水比の高い浮泥を対象とした研究<sup>(例えば6), 7), 8)</sup>では、 $C$ は1.0として取り扱われている。 $B$ に関しては限界せん断応力の有無も研究グループによって異なる。限界値が有るとする場合は、せん断試験によって得られた降伏値と強い相関があるという結果が得られている<sup>(例えば9), 10)</sup>。 $A$ の粘着性土の土質力学的性質による変数は、含水比、泥温、有機物含有量によって変化することは明らかにされているものの、粘土の種類によって異なり、水理実験結果や数値解析検証計算により定めているのが現状である。

貯水池の密度流堆積層における底泥は、粒度分布や強熱減量(有機物含有量の指標となる)を比較しても、貯水池により違いがあり、圧密状態や巻き上げ特性も異なってくる<sup>2)</sup>。そこで、このような幅広い特性をもつ貯水池底泥について、水路実験を行わなくとも、おおよその巻き上げ特性が推定できる指標を提案することを研究

の目的としている。本研究では、有機物含有量が堆積状態や巻き上げ特性に大きく関わっている、液性限界が巻き上げ特性の指標となる可能性があるとの検討結果<sup>2)</sup>を踏まえ、強熱減量の小さい底泥と大きい底泥を採取し、液性限界を含む基礎的物性を調べた。さらに、水理実験を行い、浸食形態の観察、限界掃流力および浸食速度の測定を行い、それぞれの予測式について検討を加えた。

## 2. 貯水池の底泥の基礎的物性

前回の実験<sup>2)</sup>に使用した底泥(A,B,C1,D)と今回の実験で使用した底泥(E,C2,C3)の中央粒径、強熱減量、自然含水比、液性限界を表-1に示す。ここでの自然含水比とは、エクマンバージ採泥器を用いて湖底から採取された状態の含水比を指している。C1,C2,C3は同じ貯水池の底泥であるが、C1は2005年、C2,C3は2006年に採取・実験したものである。2006年は多量の底泥を採取したため、試料の一部は他のものより粒径が粗いようであったので、それをC3として区別して取り扱った。

本研究で、液性限界を底泥の特性の指標とした理由は、これまでの研究<sup>2)</sup>より、液性限界は限界掃流力と関係があることが明らかとなった、比較的手軽に測定できる、測定者が少し慣れると、測定者や測定機器による値のばらつきが少ない、ことである。なお、液性限界状態にある粘土はおおよそ1.5 kPaのせん断強度を持つことが知られている<sup>11)</sup>。

図-1は中央粒径と液性限界の関係、図-2は強熱減量と液性限界の関係を示している。これらの図には、大坪<sup>9)</sup>の実験結果も併示している(これらの試料の種類と数値は、参考文献<sup>2)</sup>に記載)。図-1より同じ貯水池内の底泥C1,C2,C3は、粒径が粗くなるほど液性限界が小さくなっている、一方、強熱減量の小さいA,Eおよび市販粘土は異なる傾向を示すことが分かる。図-2より市販粘土(モンモリロナイト)以外は、強熱減量が大きいくほど、液性限界が大きくなること分かる。これらの傾向を示した要因を考察する。

まず、粒径が小さくなるほど液性限界が大きくなるのは、比表面積が大きくなることによる<sup>12)</sup>。比表面積が大きくなると、吸着水の割合が大きくなる。吸着水はその周囲の間隙水より粘性が非常に大きいなどの特性を持つので、比表面積が大きくなるほど液性限界は大きくなる。

次に、粘土のせん断強度に強熱減量が大きく影響するのは、腐植酸(フミン酸)が関係する。図-3はため池底泥の強熱減量とフミン酸含有量の関係を示しているが、強熱減量が増えるほど、フミン酸含有量が増えることが分かる。これはため池底泥であるが、貯水池底泥においても同じ傾向があることが予想される。腐植(フミン酸の他、ヒューミンやカルボ酸もあわせての総称)は、比表面積が非常に大きい<sup>12)</sup>、CEC(陽イオン交換容量)が非常に高い<sup>14),15)</sup>特性をもつ為、腐植の存在が底泥

表-1 対象ダムの底泥の基礎的物性値

底泥	中央粒径 μm	強熱減量 %	自然含水比 %	液性限界 %
A	6.7	4.0	85	49.1
B	29.9	11.4	338	142.3
C1	15.2	13.8	364	175.3
D	26.1	15.8	424	177.7
E	5.8	6.3	175	80.0
C2	13.0	13.6	410	195.7
C3	16.3	12.8	397	161.0

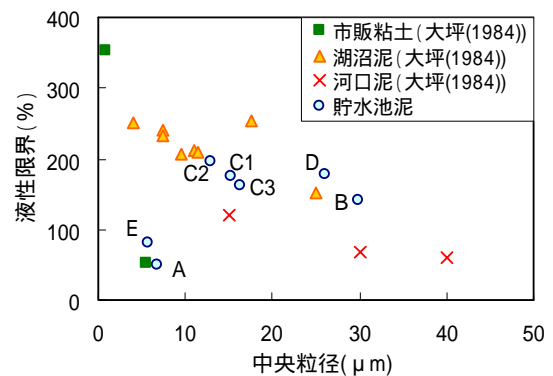


図-1 中央粒径と液性限界の関係

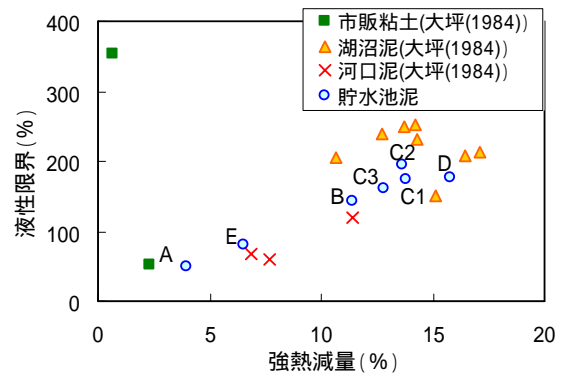


図-2 強熱減量と液性限界の関係

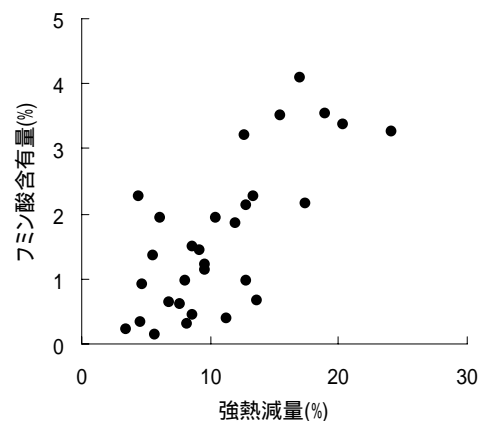


図-3 ため池底泥の強熱減量とフミン酸含有量の関係<sup>13)</sup>

の粘性を大きくし、液性限界を大きくしているなお、CECが高いと液性限界が大きくなるのは、CECが高いほどその粒子周囲に厚い電気二重層中に拘束された水を多量

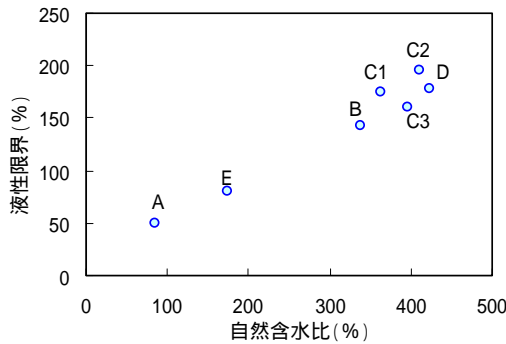


図-4 自然含水比と液性限界の関係

にもち得る,すなわち吸着水層が発達するためである<sup>16)</sup>。さらに,モンモリロナイトが強熱減量は非常に小さいにも関わらず液性限界が非常に大きい要因は,粒径が非常に小さく比表面積が大きいことに加え,粘土鉱物の構造が特殊なためCECが非常に高いことである<sup>9)</sup>。CECは腐植の含有の他,粘土鉱物の種類によっても異なる。モンモリロナイトのCECは100~150,底泥Aと特性の類似する市販粘土であるカオリナイトのCECは3~15 (me/100g)である。また,腐植物質のCECは100~1000 (me/100g)<sup>15)</sup>と大きいので,数%の腐植の混合でも,底泥の性質は大きく変化する。

図-4は自然含水比と液性限界の関係を示す。液性限界の大きい底泥ほど,自然含水比は大きくなる傾向となった。CECが高いことも,比表面積が大きいことも保水性を高め,排水性を悪くする要因となることより,底泥が安定して堆積している状態と液性限界には関係が認められた。

### 3. 水理実験

#### (1) 実験手法

実験水路は,高さ60cm,幅30cm,全長750cmの開水路で,1/200の勾配がついている。この水路は,側面が透明アクリル製,河床面が木板で,上端部から450cmのところから長さ150cm×幅15cm×高さ5cmの移動床区間が設けられてある。流量は放流量調整用バルブを操作して変化させ,水位は下流端の板の高さで調整した。

所定の含水比の底泥を水路床に設置し,試料を乱さないようゆっくりと下流から湛水した後,上流から水を流し始める。徐々に流量を上げながら,底泥の様子を観察し,各段階の水理量を測定する。流量は電磁流速計で測定されているものを記録した。水位は試料設置位置上流で2点,設置位置区間で3点,設置区間下流で1点,計7点をポイントゲージで計測した。

浸食速度測定実験は,限界掃流力およびそれを上回る掃流力で数分~10分程度通水し,排水後ポイントゲージで河床高を測定した。通水時間は,時間的に平均的な値を得るために10分程度を想定していたが,急激に掘り下げられるような浸食では,その場の水理量が変わることを

表-2 流送実験条件(含水比)

	低含水比	自然含水比	高含水比
E	120%	180%	210%
C2	350%	420%	450%
C3		400%	

懸念して,数分間で終了した。

実験に用いた試料を表-2に示す。ダムC,Eの底泥の含水比を自然含水比を含めて3段階に調節したものを用意した。C2およびC3については,当初は同じサンプルとして実験していたので,C3については自然含水比のみ実験している。試料の総量が限られていたため,その分C2の自然含水比の実験ケースが少なくなっている。

各試料について,限界掃流力測定実験を2回と浸食速度測定実験を3回行った。実験は夏期に室内でおこなわれたので,水温・泥温とも25 前後である。

測定した水理量から,底面せん断応力は,式(2)により算出した。

$$\tau_b = \rho g R I \quad (2)$$

ここに,  $\tau_b$  は底面せん断応力(N/m<sup>2</sup>),  $\rho$  は水の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $R$  は径深(m),  $I$  はエネルギー勾配である。なお,本実験において式(2)で算出された底面せん断応力は約10%の誤差が含まれると推定される。

#### (2) 実験結果

##### a) 底泥の浸食形態

流速を上げていくと,底泥C2, C3は底泥C1の実験と同じく,膜状剥離が生じ(この限界を流送限界と定めた),その後,塊状に浸食する破壊限界がみられた。含水比が低くなるほど,この剥離される塊が大きくなり,剥ぎ取られるように捲れ上がって浸食が進む。

一方,底泥Eは所々で小さな穴があく変化がまず観察される。膜状剥離は見られなかったため,この限界値を流送限界とした。さらに流速を上げると,破壊限界に達する。底泥Eも含水比が小さくなるほど,削られる塊は大きくなるが,底泥Cに比べると小さい。また,底泥Eの浸食の方が,時空間的に偶発性が高かった。

図-5は,底泥E, C2の各含水比に対する代表的な浸食形状(浸食深の平面分布)を示しており,これらの特徴について考察する。まず,含水比による違いを比較すると,含水比が高くなるほど,平面的に浸食が広がり,局所的な浸食高は小さくなる。局所的な浸食高の差は,含水比が小さくなるほど大きな塊で浸食されることに関係している。次に,底泥の種類による違いを比較すると,粘性の高い底泥C2では,捲れ上がった底泥が,まだ残っている河床の底泥を引っ張りはがすように縦断方向に浸食が進む傾向が強くなり,その結果,浸食がより流下方向に連続する。

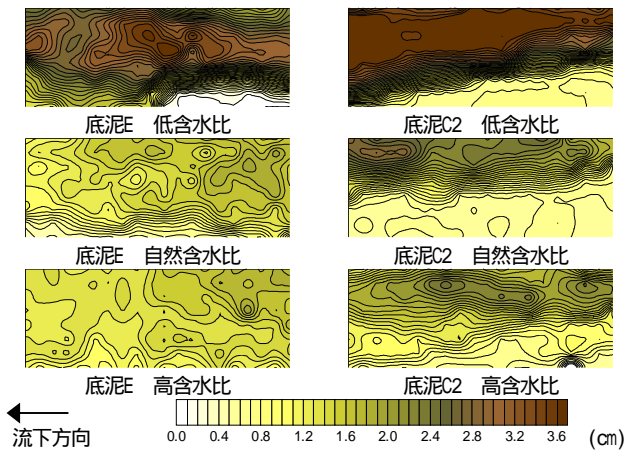


図-5 各試料に対する代表的な浸食深平面分布図

b) 限界掃流力

含水比と流送限界掃流力  $c_1$  の関係を図-6に、含水比と破壊限界掃流力  $c_2$  の関係を図-7に示す。これらの図には、前回の実験結果（底泥A,B,C1,D）および、大坪<sup>9)</sup>の実験結果も併示している。それぞれの限界掃流力と含水比の間には、次式の関係がみられる。

$$\tau_{c1} = \gamma'_1 \cdot W^{-2.5} = \gamma'_1 \cdot R_w^{-2.5} \quad (3a)$$

$$\tau_{c2} = \gamma'_2 \cdot W^{-2.5} = \gamma'_2 \cdot R_w^{-2.5} \quad (3b)$$

ここに、 $\gamma'_1$ ,  $\gamma'_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ は粘土によって異なる定数、 $W$ は含水比(%),  $R_w = W/100$ である。

関根ら<sup>4)</sup>は、2種類の粘土を用いて実験を行い、供試体の耐浸食性と強い正の相関性を持つと考えられる粘着力は次のような関数で共通で表されたと述べている。

$$C_s = K_c \cdot R_{wc}^{-2.5} \quad (4)$$

ここに、 $C_s$ は粘着力、 $K_c$ は定数、 $R_{wc}$ は水含有率である。粘着力も水含有率（粘土100%のときは[含水比/100]となる）の-2.5乗の関数となる事実は興味深い。

液性限界 $W_L$ の水含有率表示 $R_{WL}$ と  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ の関係を図-8に示す。ここでは、全ての試料で粗粒分は殆ど含まれないとして、 $R_{WL} = W_L/100$ とした。

図-8より、 $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ は $R_{WL}$ の関数で表される。

$$\gamma_1 = 0.4 \cdot \exp(1.6 \cdot R_{WL}) \quad (5a)$$

$$\gamma_2 = 0.8 \cdot \exp(1.6 \cdot R_{WL}) \quad (5b)$$

ただし、前回の実験で行った底泥A, B, C1, Dの限界掃流力は全体的に小さな傾向を示しているため、式(5b)の比例定数を求める時は、これらのデータを除外している。これらの破壊限界が小さくなった理由として、水路長が短いために、流速を大きくした時、試料設置位置までに流れが安定せず波による揚力が生じたなど水路装置上の性質が出た可能性がある。式(3a), (3b)に式(5a), (5b)を代入すると、式(6a), (6b)が得られる。

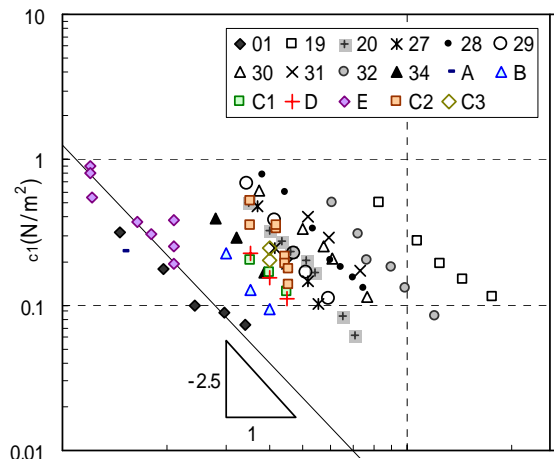


図-6 含水比と流送限界掃流力  $c_1$  の関係

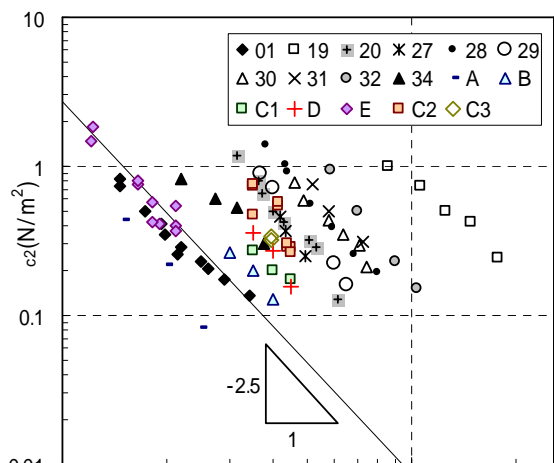


図-7 含水比と破壊限界掃流力  $c_2$  の関係

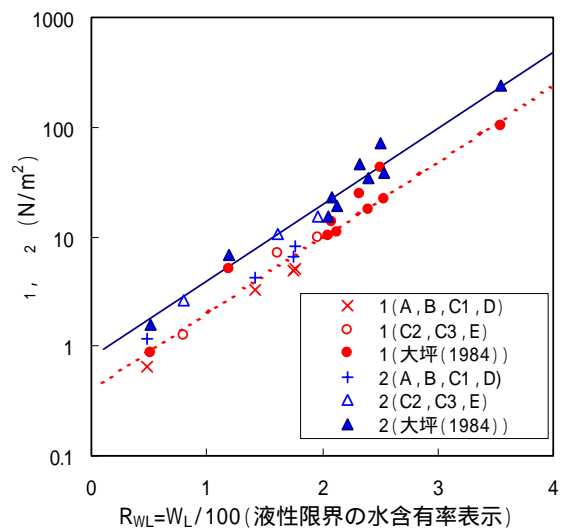


図-8 液性限界と  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  の関係

$$\tau_{c1} = 0.4 \cdot \{ \exp(1.6 \cdot R_{WL}) \} \cdot R_w^{-2.5} \quad (6a)$$

$$\tau_{c2} = 0.8 \cdot \{ \exp(1.6 \cdot R_{WL}) \} \cdot R_w^{-2.5} \quad (6b)$$



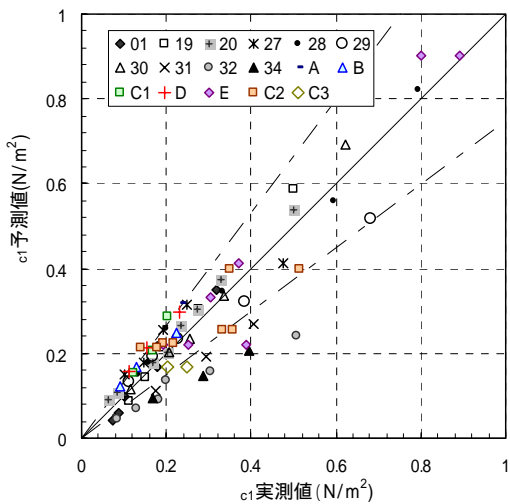


図-9  $c_1$ の実測値と予測値の比較

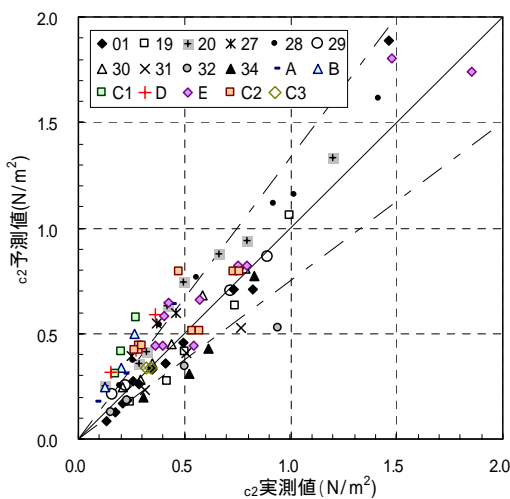


図-10  $c_2$ の実測値と予測値の比較

図-9, 図-10はそれぞれ,  $c_1$ と  $c_2$ の実測値と式(6a), (6b)より算出した予測値とを比較したものである. 併示している破線に挟まれた領域は, 誤差が25%以内の領域を示す.  $c_1$ は底泥32,34を除いて76%,  $c_2$ は底泥32,34および先述した底泥A, B, C1, Dを除いて70%がこの領域内にプロットされた. 多少のばらつきは実験で生じた誤差も含まれていると考えられるが, 底泥32, 34のように一定の傾向を示す底泥については, 式(6a), (6b)の適用範囲外にある可能性がある. これらの底泥の特徴としては, 底泥32は湖沼泥で強熱減量は13.7%と標準的であるが比重は2.08と非常に小さい, 底泥34は河口泥で他の湖沼泥に比べると粗い粒径が含まれることがあげられる. このようにまだ不明な点も残り, 実験データの無い限界掃流力が約 $2\text{N/m}^2$ 以上の式(6a) (6b)の適用性は確認されていないが, 粘土の液性限界が分かれば, 任意の含水比の限界掃流力が簡易に予測できる可能性が見出された.

### c) 浸食速度

摩擦速度と浸食速度の関係を図-11に示す. 下図は

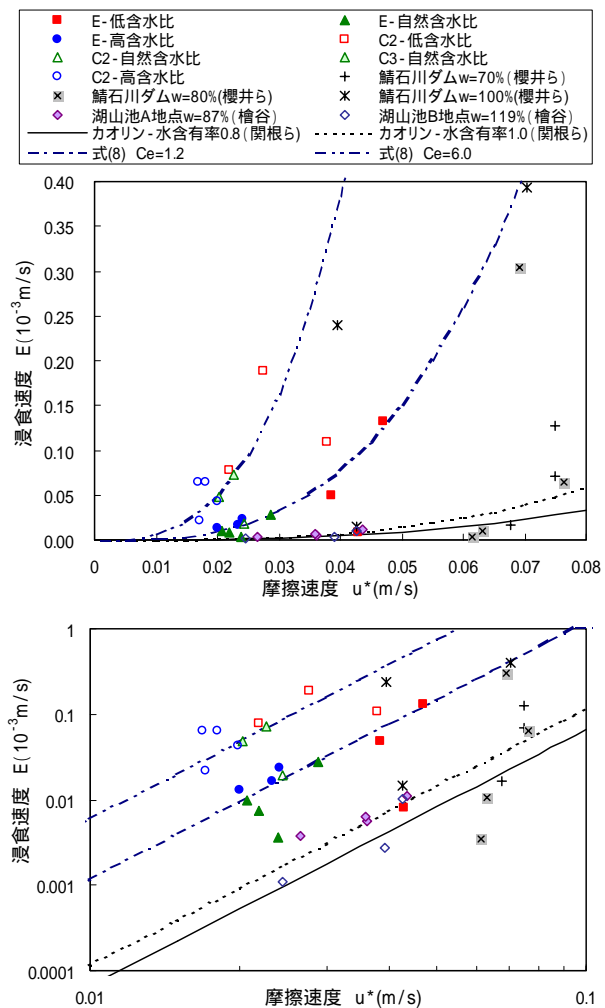


図-11 摩擦速度と浸食速度の関係(下図は対数軸表示)

上図を対数軸で表示したものである. 図には, 櫻井ら<sup>5)</sup>, 檜谷<sup>7)</sup>の実験値および関根ら<sup>4)</sup>の浸食速度予測式にT.Aカオリン(水温高)の係数を代入した値を併示している. なお, 関根らが提示した浸食速度と摩擦速度の関係式は次式に表される.

$$E = \alpha \cdot R_w^{2.5} \cdot u_*^3 \quad (7)$$

ここに,  $\alpha$ は粘土の種類と水温によって決まる定数で, T.Aカオリン( $W_L=53.6\%$ )で水温高の場合は,  $1.15 \times 10^{-5} (\text{cm/s})^{-2}$ となる. なお, この係数は水含有率が0.8~1.0の試料を用いて, 摩擦速度が $5\text{cm/s} \sim 10\text{cm/s}$ の範囲内で行われた実験データから求められている.

貯水池の底泥を使用した浸食実験では, 底泥の種類によって浸食傾向は異なったが, 式(7)に示されるような水含有率による明確な区別が見られなかった. 水含有率が小さいほど浸食速度が小さくならなかったのは, 観察された浸食形態から次の理由が考えられる. 粘性が大きい底泥ほど, 塊状として浸食される一塊が大きくなる, 削られた塊が河床の底泥を引っ張り, 次の浸食を促しやすくなる. この現象は, 山本ら<sup>17)</sup>の連結礫工の実験でみられたように, 礫をチェーンで連結すると集合体とし

での限界掃流力は大きくなるが、限界を超えると全体がめくられて群体として一気に流される現象と類似している。ただし、連結礫と底泥の違いは、礫は流されても連結され、礫もその形状を留めるが、底泥は分解されて沈降することなく流下することである。

この結果を考慮すると、今回の貯水池の底泥を用いた実験結果は次式で示される関係があると推定される。

$$E = C_E \cdot u_*^3 \quad (\tau_{c2} \leq \tau < 2\tau_{c2}) \quad (8)$$

ここに、 $C_E$ は含水比には関係しないが、粘土の種類によって決まる定数である。適用範囲を定めたのは、今回の実験では、破壊限界から破壊限界の2倍を超えないような掃流力の範囲で行われたこと、また、破壊限界前後で浸食形態が異なるからである。データ数が少なくばらつきがあるので推定の範囲に留まるが、底泥E、底泥C2でそれぞれ $C_E$ を1.2と6.0とした曲線を図-11に併示している。 $C_E$ は底泥の粘性、ひいては液性限界が大きいほど、大きくなると推測される。

櫻井らの実験結果からは、式(7)(8)のように浸食速度は摩擦速度の3乗と関係があるかは判断しがたいが、全体的に摩擦速度が大きくなるほど浸食速度が大きくなる傾向は見られる。このように粘性土の浸食実験は、時空間的な偶発性が高く、データにばらつきがみられるのも特徴の一つといえる。檜谷の実験結果は、浸食速度が小さい範囲にあり、檜谷が採用した に比例する式および式(7)とともに合っている。

#### 4. おわりに

本研究では、貯水池の底泥を採取して、その基礎的物性を調べ、水理実験により限界掃流力と浸食速度を測定した。その結果、以下のことが明らかとなった。

貯水池底泥の堆積状態・浸食特性には、腐植の混合が大きな影響を与えている

液性限界は、底泥の様々な要素（粒径、有機物含有量、粘土鉱物の種類など）を総合して、底泥の特性をあらわす指標に適している

限界掃流力は、液性限界の大きい底泥ほど、また、含水比が小さくなるほど、大きくなる

限界掃流力は、液性限界と含水比の関数で表される  
今回の実験条件範囲内では、浸食速度は摩擦速度の3乗に比例し、その比例係数は液性限界が大きい底泥ほど大きくなる

限界掃流力予測式については、既往の研究成果も含め、比較的広範囲の底泥・粘土に対して適応できることが確認できた。一方、浸食速度については、底泥の種類や水理条件が限られた範囲内での考察に留まった。今後、底泥の種類・掃流力の範囲を広げて浸食速度実験を行い、より一般的な議論に広めることが課題である。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省 近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所、(独)水資源機構関西支社の管理ダムより貯水池内の微細粒堆積土砂をご提供頂いた。また、水理実験においては榊ニュージェックおよび京都大学工学研究科中西義昭君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 芦田和男：ダム堆砂対策の展望，ダム技術 No.58，pp.64-73，1991.
- 2) 角哲也，井口真生子，藤井智康：貯水池下流部に堆積した微細粒土砂の巻き上げ特性に関する実験的研究，水工学論文集，第50巻，pp.925-930，2006.
- 3) 板倉忠興：粘着性土河床の洗掘，第2回粘着性土の浸食に関するシンポジウム論文集，pp.1-6，2004.
- 4) 関根正人，西森研一郎，藤尾健太，片桐康博：粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察，水工学論文集，第47巻，pp.541-546，2003.
- 5) 櫻井寿之，鎌田昌行，柏井条介，鈴木伴征：混合粒径河床変動モデルによる貯水池堆砂・排砂現象の再現，ダム工学16(1)，pp.30-40，2006.
- 6) Sheng Y.P., Lick W.: The transport and resuspension of sedimentation a shallow lake, Journal of Geophysical Reserch, pp.1809-1826, 1979.
- 7) 檜谷治：河川および浅水湖の3次元流れと平面2次元河床変動に関する研究，京都大学学位論文，1992.
- 8) 天野邦彦，安田佳哉，鈴木宏幸：浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング，水工学論文集，第46巻，pp.1085-1090，2002.
- 9) 大坪国順：底泥の再浮上機構に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1984.
- 10) 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，第40巻，pp.959-964，1996.
- 11) Atkinson, J.: An Introduction to the Mechanics of Soil and Foundations, McGraw-Hill, London, pp.76-77, 1993.
- 12) 前田隆，相馬尅之：土のコンシステンシーに影響をおよぼす因子について，土壌の物理性第30号，pp.15-22，1974.
- 13) 谷 茂 ほか：ため池底泥の物理的性質について，農業土木学会大会講演会講演要旨集，pp.5-36，1998.
- 14) 松尾新一郎，嘉門雅史：物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について，土木学会論文報告集 第209号，pp.103-113，1973.
- 15) 足立泰久，岩田進午：土のコロイド現象 - 土・水環境の物理化学と工学的基礎，学会出版センター，pp.37-39，2003.
- 16) 白山晴雄：粘土鉱物学 - 粘土科学の基礎 - ，朝倉書店，pp.38-51，1988.
- 17) 山本太郎，長谷川和義，浅利修一：河床に設置された連結礫工の安定性と破壊過程について，水工学論文集，第50巻，pp.955-960，2006.