

粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式 に関する考察

ON EROSION PROCESS OF COHESIVE SEDIMENT AND EROSION RATE FORMULA

関根正人¹・西森研一郎²・藤尾健太²・片桐康博²

Masato SEKINE, Ken-ichiro NISIMORI, Kenta FUJIO and Yasuhiro KATAGIRI

¹正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

²学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

Erosion process of soft cohesive material which deposited naturally on a river bed is the objective of the present paper. Extensive series of experiments, the condition of which were set systematically, were conducted to evaluate the erosion rate by running water in a closed conduit. The test sample was the mixture of silica sand, clay and water, the composition of which was set to be a variable. The main factors which govern this process were found to be the clay content ratio, the water content ratio, a frictional velocity of flow, a water temperature, and the size of silica sand. The effects of these parameters on the erosion rate were evaluated quantitatively. The correlation between the erosion rate and the adhesive strength of the sediment was also investigated by conducting the soil mechanical test. Erosion rate formula was also derived on the basis of experimental results.

Key Words : *cohesive sediment, erosion rate, erosion process, shear strength, clay and water content ratio, soil mechanical test*

1. 序論

著者らは、砂と粘土からなる粘着性土の浸食機構を力学的に理解し、その浸食速度の予測を目指した実験的検討を継続して進めてきている^{1)~4)}。これまでの検討により、この浸食機構に影響を及ぼす支配因子として、「作用せん断力(摩擦速度)」、「粘土含有率」、「水含有率」、「水温」、および「砂と粘土の粒径比」が重要であることを明らかにし、その影響についても定量的に明らかにしてきた。さらに、この結果を踏まえた浸食速度式の誘導も試みてきた。しかし、これまでの研究がS.Aクレーという特定の粘土のものに留まっていたため、より一般性をもった知見とするためには鉱物組成の異なる粘土を対象とした検討が必要である。こうしたことに鑑み、本研究では、新たにカオリンを対象とした一連の実験的検討を行い、少なくとも二つの異なる粘土に限定するならば、これまでの

成果が一般性を持つことを確かめた。さらに、浸食速度式についても、新たに行った「引張りせん断試験」により得られた「粘着力」との関係から、新たな式の誘導を試みている。

ところで、これまでの一連の研究による到達点について考えたとき、これまでに明らかになった知見が、実河川に堆積する粘着性土に対してどの程度普遍性をもって適用できるのかについては検討の余地を残しているものの、実用的に必要とされる浸食量の評価手法については、本研究を含むこれまでの研究によって概ねその道筋をつけることができたのではないかと考えている。しかし、例えば浸食速度式の背後に横たわる「浸食の素過程あるいはメカニズム」については現時点でも未解明の点が多い。今後現象の更なる理解と、浸食速度式の解釈とを進めていく上で、浸食過程を再現する数値モデルを構築していくことが望まれる。こうしたことを考えて、本研究では、浸食が進行する

プロセスに再度焦点を絞って、実測データの解析を行うこととした。その結果として、浸食が進行するプロセスにおいて、供試体表面に波状の凹凸が形成され、これが緩やかに伝播される過程で供試体の浸食が進行することが判明した。本論文では、未だ十分に解釈がなされたわけではないものの、この新たな知見について紹介し、浸食過程についての推論を試みることにする。

2. 実験の概要

本研究では、前報⁴⁾までに説明してきた装置ならびに実験手法を用いて、「粘着性土の浸食実験」ならびに「粘着力に関わる引張りせん断試験」を行った。ここでは、これまで用いてきたS.Aクレー(60% 粒径0.016 mm, 比重2.7, 関東ベントナイト鉱業(株))に加えて、鉱物組成の異なるT.Aカオリン(同0.005 mm, 同2.7, 同社)をも検討対象としている。非粘着性材料として硅砂3号を用いている点に変わりはない。図-1には、このS.AクレーとT.Aカオリン、さらには硅砂3号の粒度分布を示す。また、二つの粘土に関しては、常温の水を用いた場合の液性限界が、S.Aクレーでは23.0%, T.Aカオリンでは53.6%である。著者らが検討の対象としているのは、この液性限界を越える「やわらかい」粘土であり、支配要因のひとつである水含有率の下限値は、本研究の場合、S.Aクレーでは40%, T.Aカオリンでは60%程度であった。今後さらに多くの種類の粘土に対して同様の検討が必要であることは言うまでもないが、このように二種類の粘土を用いた実験結果を比較検討することにより、これまで明らかにしてきた粘着性土の浸食特性や浸食速度式が粘土の鉱物組成にどの程度依存するかを調べる第一歩となると位置づけている。

3. 浸食特性と浸食速度式の誘導

本論文では、前述した支配因子のうち、作用せん断力(具体的には摩擦速度 u)、水含有率 R_{wc} ならびに水温に注目し、これらが浸食速度に与える影響について検討する。これは、前報⁴⁾までの検討によれば、浸食速度を支配する他の要因である「粘土含有率」や「砂礫の粒径」は、浸食速度に大きな影響を与えないことが明らかになっていることによる。

まず、図-2には、横軸に水含有率 R_{wc} を、縦軸には浸食速度を摩擦速度の3乗で除した値 E_s/u^3 をそれぞれとり、また、図-3には、横軸に摩擦速度 u 、

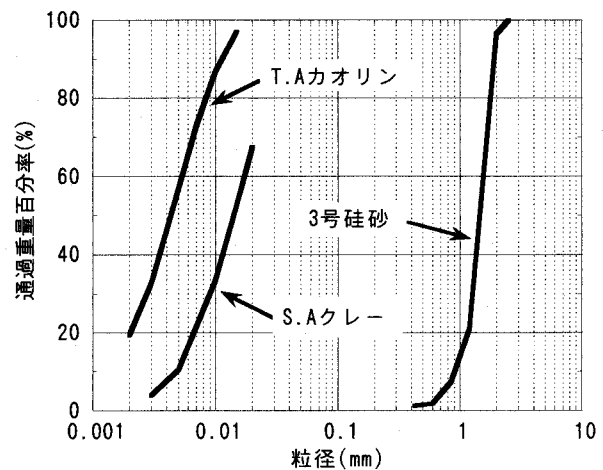


図-1 供試体に用いられた土砂の粒度分布

表-1 浸食速度式中の係数

粘土の種類		α (cm/sec) ⁻²	β
S.Aクレー	水温高	3.89×10^{-5}	9.35×10^{-4}
	水温低	2.44×10^{-5}	5.86×10^{-4}
T.Aカオリン	水温高	1.15×10^{-5}	2.76×10^{-4}
	水温低	0.778×10^{-5}	1.87×10^{-4}

を、縦軸には浸食速度を水含有率の2.5乗で除した値 $E_s/R_{wc}^{2.5}$ をそれぞれとって、両者の関係を両対数グラフの形で整理した結果を示してある。ここでは、前論文までの整理方針に則って、夏季のデータを水温高、冬季のデータを水温低としてそれぞれ分けて示してある。また、図中の実線および破線は、S.AクレーならびにT.Aカオリンに対して描いた、それぞれ傾き2.5および3の直線である。この図には、前述した異なる粘土含有率・砂礫の粒径に対するデータも区別することなく示されている。データにばらつきが見られるのはひとつにはこれらの影響による。以上の結果を踏まえて検討したところ、図-4に示す通り、浸食速度 E_s が次の関係を満足することが確かめられた。

$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} \cdot u^3 \quad (1)$$

この式中の係数 α は、主として粘土の種類に依存する係数であり、表-1に示すような値となる。なお、同じ表-1中に示されている β は後述する式(3)中の係数を表す。この表より、水温の影響を見ると、いずれの粘土についても夏季の値が冬季のものより50%程度大きくなっていることがわかる。

次に、引張りせん断試験から評価された粘着力 C と浸食速度との関係について考察を加える。粘

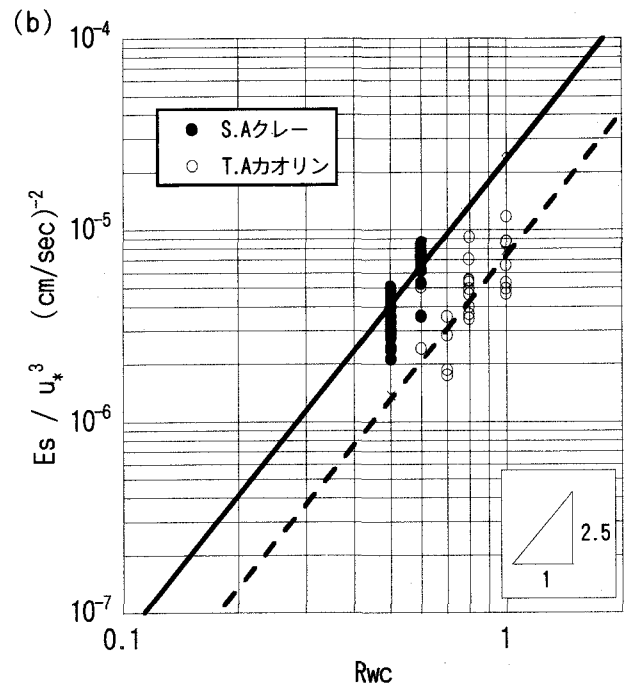
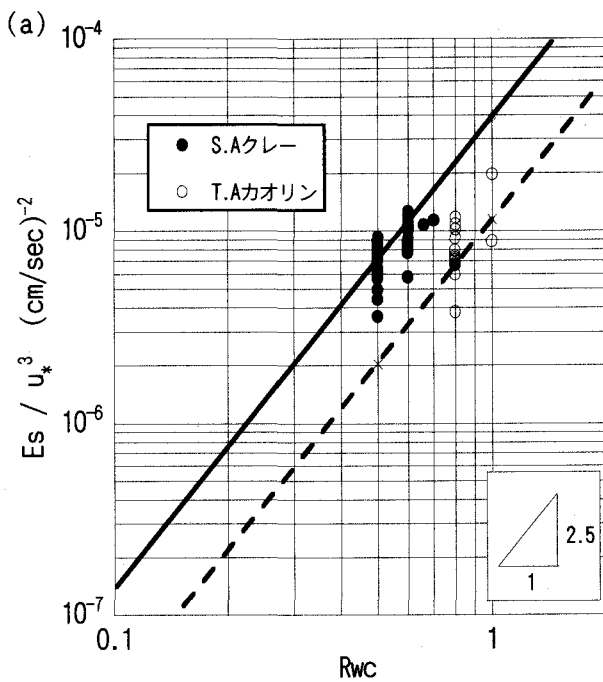


図-2 水含有率 R_{wc} と浸食速度 E_s との関係 : (a)水温高 , (b)水温低

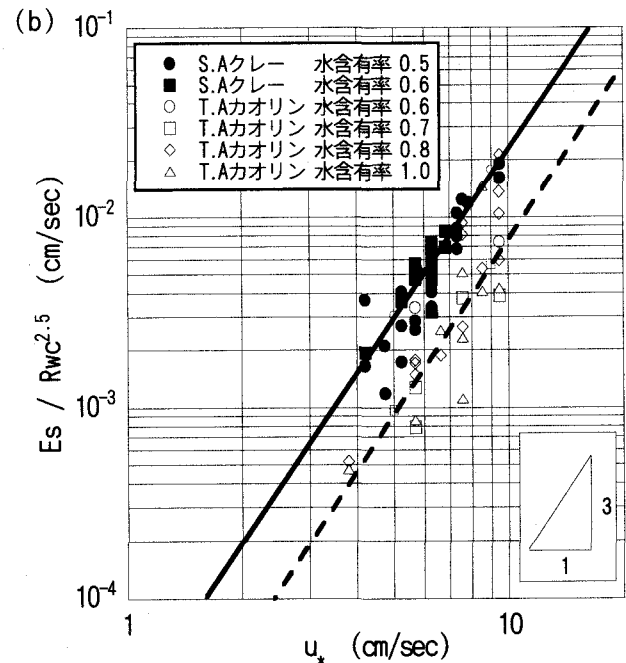
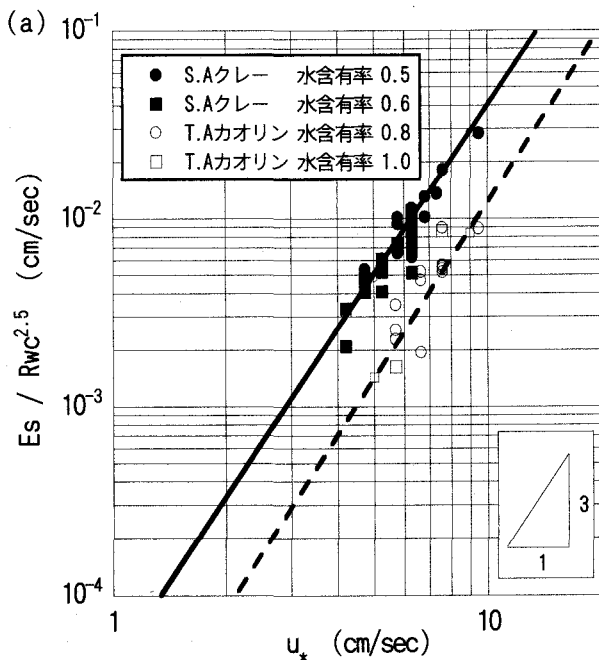


図-3 摩擦速度 u_* と浸食速度 E_s との関係 : (a)水温高 , (b)水温低

着力を評価するための実験結果については、たとえば図-5 のようになる。図中に実線で描いた直線と縦軸との交点(すなわち切片)の値が、ここでいう粘着力 C である。前報⁴⁾では、一連の実験結果を踏まえて、(1) 粘着力は粘土含有率にはよらず、ほぼ一定と判断される、(2) 水含有率 R_{wc} が増加するのに伴い、粘着力は低下する、との結論を示した。そこで、その後得られたT.A. カオリンについてのデータも含めて、後者の関係についての定量的

な評価を試みた。その結果をまとめると図-6 のようになる。実験条件の制約から必ずしも十分な数のデータが得られているわけではなく、また、二つの粘土材料に対して得られているデータのうち、それぞれ水含有率が最も大きな条件下で得られたデータに相対的に大きな誤差が含まれている恐れがある。そこで、この点に関する詳しい検証が必要であるが、いま粘着力と水含有率の関係を図中の実線で近似することにすれば、両者の関係は粘土

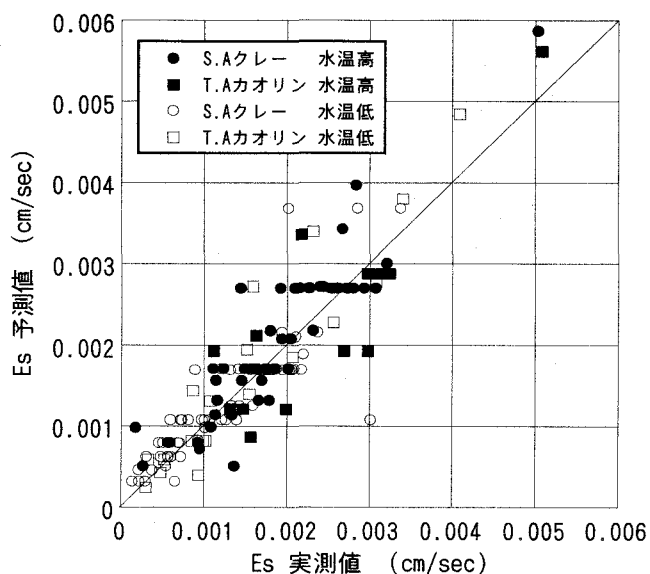


図-4 浸食速度式の妥当性の検証

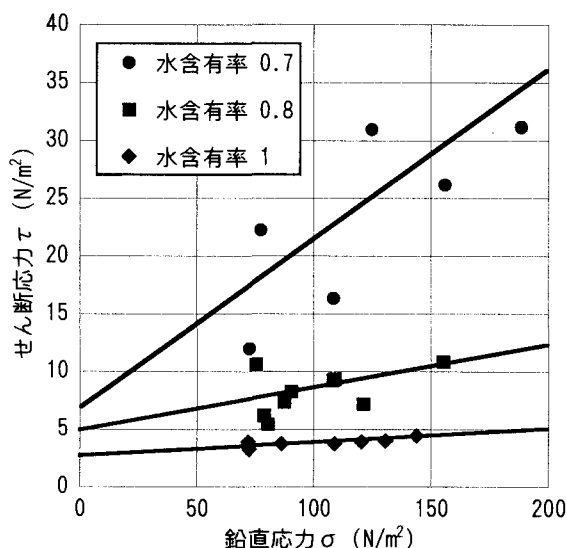


図-5 T.Aカオリンの引張り試験結果

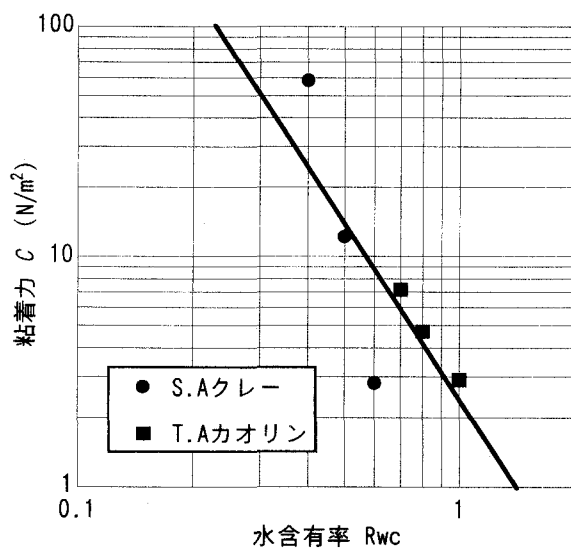


図-6 水含有率 R_{wc} と粘着力 C との関係

の種類によらず次のような関数で表される。

$$C = K_c \cdot R_{wc}^{-2.5} \quad (2)$$

ここに、 $K_c = 2.4 \text{ (N/m}^2\text{)}$ となる。そこで、この関係を式(1)に代入し、水含有率 R_{wc} を消去することで、次の式が導かれる。

$$\frac{E_s}{u_*} = \beta \frac{\rho u_*^2}{C} \quad (3)$$

ここに、 β は粘土の種類によって変化する無次元の係数であり、式(1)中の係数 α ならびに式(2)中の係数 K_c の積を水の密度 ρ で除することで評価できる。表-1中に本研究で対象とした二つの粘土に関する係数 β の値を併記した。

4. 浸食の進行過程に関する一考察

本章では、粘着性土の浸食の素過程ならびにそのメカニズムを探る上で重要と考えられる「浸食の進行過程」について、現時点で明らかになっている知見について説明する。なお、この浸食過程に関して、著者らは、これまでの検討を通じて、「煙状の溶出」か「塊状の剥離」かのいずれかの形式をとって進行し、作用せん断力が大きくなるにつれて後者が卓越し、浸食の規模が増す、と考えてきた。これは、実験時の観察あるいは撮影された画像を基に判断したものであるが、浸食速度が増大してくると実験時にこの浸食過程を詳細に観察することは容易ではなく、疑問の余地を残すものであった。こうした点に鑑み、以下のような検討を新たに行うことにした。すなわち、浸食速度の評価の際に、一定の時間おきに通水を止め、レーザー式変位センサーで供試体表面の高さを面的に計測しており、このデータを基に浸食が進行する過程をとらえる解析を試みた。著者らは、今後、この「塊状の剥離」形式の浸食過程を説明する数値モデルの構築を目指しているが、この場合に考えなければならない材料の最小単位は、砂礫のように粒径ではなく、その集合体としてのある大きさをもった塊であろうと考えているが、この規模を判断する上でもこうした解析が有益な知見をもたらしてくれるものとする。

さて、このような解析の結果の一例を、水路中心軸上の縦断面図を図-7(a)に、通水3分後の供試体表面を撮影した写真を図-7(b)に、供試体高さの等値線図を図-7(c)に、それぞれ示した。この図は、カオリンに対して、粘土含有率80%の条件

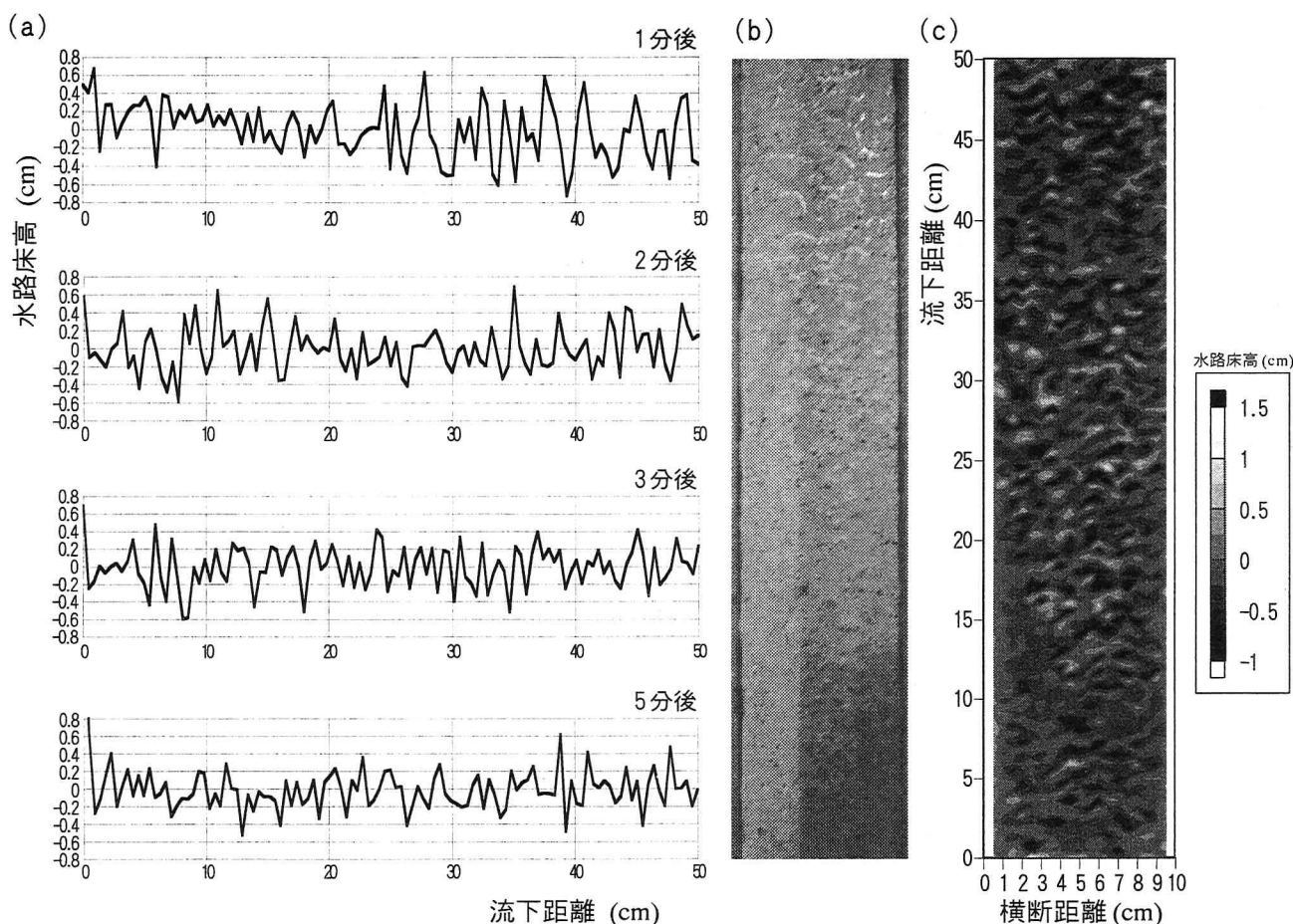


図-7 浸食を受けた供試体表面：カオリン， $R_{cc} = 0.8$ ， $R_{wc} = 0.8$ ， $u^* = 7.6$ (cm/sec)
 (a) 水路中心軸上の縦断面図，(b) 通水3分後の供試体表面写真，(c) 通水3分後の供試体高さの等値線図

下で計測されたデータを表したものである。この図-7に現れている供試体表面の波状形状は、著者らのカオリンあるいはS.Aクレーを用いたこれまでの実験のほとんどにおいて見られている。本研究により明らかになった特徴をまとめると次のようになる。すなわち、

- (1) 図-7からもわかる通り、供試体表面には波長が1.5～2.0 cm、波高が数 mm 程度(レーザー式変位センサーの分解能から判断してデータの信頼性に問題はない)の微小な波が概ね規則的に形成されており、これらが重畳するような形で1オーダー程度波長の大きな波が存在することがある。
- (2) この波は、時間の経過とともに緩やかに下流方向に伝播し、その伝播速度は浸食速度と同程度と推定される。
- (3) 微小な波のうち時間の経過とともに発達しその波高を増大させるものが見られるが、ある高さ以上に成長することはない。これは、波の谷の部分に亀裂が入り破壊へと到るほか、波高の大きくなった波の頭がカットされるためと考えられる。
- (4) 粘土に砂が混じると、波長の大きな波の発達

は抑制される傾向にあるが、微小な波については前述の状態と変わらない。

このような結果を踏まえると、少なくともここで対象としている粘着性土の浸食過程に関しては、次のような仮説を立てることができる。

- (1) 粘着性土は、表面に作用するせん断力のため表面下のある厚さにわたってクリープ状の流動をしている可能性があり、これに伴い表面に「しわ」のような波が連続的に形成される。
- (2) この「しわ」は緩やかに下流方向に移動するが、場の不均一性のため、その一部が成長を遂げ、その波高を大きくするものが出現する。
- (3) たとえ微小な波であっても周辺に比べて過度に波高の大きな波は、揚力の作用を受けて引きちぎられるように浸食される。これが塊状の剥離浸食に当たるのではないか。
- (4) この波が移動する速度は作用せん断力に対応して大きくなるため、せん断力が大きな条件ほど(3)で説明したような浸食が発生する頻度が増大する。これが供試体全体としての浸食速度の増大を引き起こす主たるメカニズムではないか。

(5) 砂を含有すると前述の通り波長の大きな波の発達が妨げられるが、粘土含有率100%と80%の結果を比較すると、後者は前者より10%程度小さくなるに過ぎないことから、この大きな波の影響よりも規則的に現れる小さな波の成長発達が重要である。

(6)このようなプロセスに加えて、局所的には煙状の浸食が並行的に生じていること、さらには、せん断力が例えば著者らがかつて定義したような限界値を大きく下回る場合には、上記のような波の形成が抑制されるか、あるいは剥離浸食を起こすほどの波高の増大は誘起されない可能性が高い。

大坪・村岡⁵⁾によれば、本研究で対象とする粘着性土よりも含水比が1オーダー以上大きな「底泥」の浸食においても、一部の粘土を除いて波状河床が観察されることが報告されている。そこで、ここで説明したような浸食の過程は含水比によらず見られると考えられる。しかし、現時点では、なぜこのように波長の揃った微小波が形成されるのか、こうした波の波長・波高といった規模はどのような要因に基づいて決まっているのか、などについては、ほとんど理解できていないのが現状である。そこで、本論文では、上記の実験的事実を報告した上で、現時点での仮説を説明することに止めるが、これについては、今後、計測方法を工夫した新たな実験を行うことで、上記の仮説がどの程度妥当なものであるかについて見極めていく予定である。これについては、改めて別の機会に詳しく論じることとする。

5. 結論と今後の展望

本研究では、著者らのこれまでの研究において明らかになった知見が、鉱物組成の異なる粘土に対してどの程度普遍性を持つかについて検証していく第一歩として、カオリンを用いた実験的検討を新たに行った。検討の結果として、これまで明らかにしてきた浸食特性や誘導した浸食速度式(式(1))が、カオリンについても成り立つことが確認された。さらに、材料の引張りせん断試験を行う

ことで、粘着力との関係を陽に表す浸食速度式(式(2))についても新たに誘導している。今後は、鉱物的に性質が大きく異なる粘土を対象とした検討を行うとともに、実河川に堆積する粘土についても調べていく予定である。

一方、これまで十分な検討の及ばなかった「浸食が進行していくプロセス」について、これまで計測された浸食深の面的なデータに基づき、これを統計解析し、粘着性土の浸食が進行する過程で、供試体表面に「しわ」のような微小な波が形成され、これが下流に伝播することがわかった。解析結果から、この微小な波のうち、場の不均一から波高を増大させるものがあり、その波頭がえぐり取られる形で塊状の剥離浸食が生じるのではないかと仮説を立てるに到った。未だ未解明の点が多く、今後は引き続き詳細な検討を行い、この仮説の是非について議論していくつもりである。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究C(研究代表者：関根正人, No.14550516)の助成を受けて行われた。また、実験の遂行にあたっては、坂本拓哉君、安藤史紘君（ともに早稲田大学理工学部）の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 第43巻, pp.659-664, 1999.
- 2) 関根正人, 飯塚暢明, 高部一彦: 粘着性土の浸食特性に関わる諸要因の影響, 水工学論文集, 第44巻, pp.747-752, 2000.
- 3) 関根正人, 飯塚暢明, 藤尾健太: 粘着性土の浸食速度予測に向けた実験的研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.667-672, 2001.
- 4) 関根正人, 藤尾健太, 片桐康博, 西森研一郎: 粘着性土の浸食速度に及ぼす粘着力の影響, 水工学論文集, 第46巻, pp.641-646, 2002.
- 5) 大坪国順, 村岡浩爾: 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第363号/II-4, pp.225-234, 1985.

(2002. 9. 30受付)