

粘着性土の浸食速度予測に向けた実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY TOWARD THE PREDICTION OF EROSION RATE OF COHESIVE SEDIMENT

関根正人¹・飯塚暢明²・藤尾健太³

Masato SEKINE, Nobuaki IIZUKA and Kenta FUJIO

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)

3 学生会員 早稲田大学理工学部 (同上)

Effects of several governing parameters on the erosion rate of cohesive sediment were investigated in the present study as a result of a series of systematically arranged experiments. The exerted velocity on the surface of test sample, a clay content ratio, a water content ratio, water temperature, the size of cohesionless sediment and the compactness of the sample are the important parameters to be considered. The relations between the erosion rate and each parameter were evaluated respectively. Based on these fundamental information, an erosion rate formula was roughly derived even though it was effective under the restricted condition.

Key Words: cohesive sediment, erosion rate, effects of the governing parameters, erosion rate formula

1. 序論

砂と粘土からなる粘着性を有する土砂を「粘着性土」と定義して、著者らはその浸食機構の力学的理解を目指して一連の実験的検討^{1)~5)}を進めてきている。この研究では、最終的には自然状態で堆積した粘着性土がどのような条件の下でどの程度の浸食を受けるかを力学的に評価することを目的としている。ところで、これに関連する従来研究について振り返ってみると、未だ十分な情報が得られていないのが現状であり、これは、メカニズムの複雑さなどに起因してか、これまで粘着性土の流砂研究が立ち遅れてきたことの結果であるといえよう。もちろん、こうした研究が皆無というわけではなく、特に1980年代前後にその後の礎となる研究^{6)~11)}が断続的にではあるが行われてきており、著者らの研究はこれらを出発点として進められてきている。この点に関しては、前報⁴⁾において説明した通りである。

さて、本研究での位置づけを明確にしておく上で、前報⁴⁾までの研究について簡単に触れておくことにしよう。著者らの実験的検討は、シルトと粘土の境界を

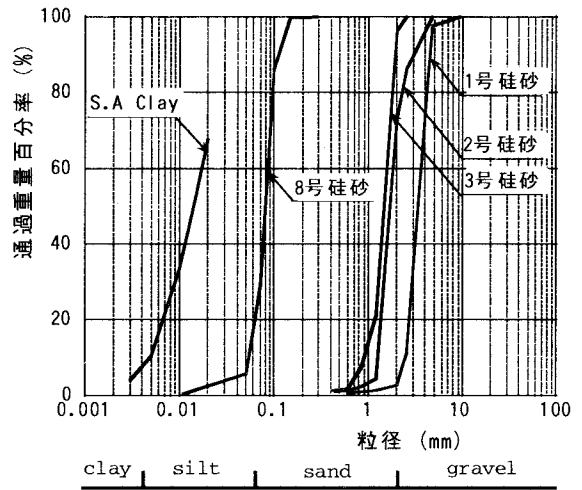
跨ぐような粒度分布をもつ S.A クレーという粘土を対象とし、これと珪砂ならびに水を所定の比率に配合した混合材料(これを粘着性土と呼ぶ)を供試体として、その浸食特性を調べるものである。現象を支配する要因は、後述する通り「断面平均流速」、「粘土含有率(土砂粒子全体に占める粘土の重量比)」、「水含有率(材料に含まれる水の粘土に対する重量比)」、「水温などの性状」ならびに「供試体の圧密の程度」などが考えられる。このうち、前報では最初の3つの要因について、その各々が浸食速度に及ぼす影響について定量的検討を行なった。本研究では、これらの支配要因のうち未検討であった「水温」ならびに「供試体内に含有される非粘着性材料の粒径」の影響について、一連の実験結果を基に考察している。まず、「水温」に関しては、これまでその影響を十分に考慮することなく解析してきたが、データの蓄積が進むにつれて、計測結果の単なるばらつきと見なしていたものが実は系統的な偏りであることが理解された。そこで、これまで報告してきた関係を再検討し、水温の影響を分離した合理的な結果をここに改めて報告することとした。なお、水温の影響については、かつて Ariathurai and

Arulanandan⁶⁾が簡単に報告しており、ここで説明する結果と定性的には同様なものとなった。また、水含有率に関しても、さらに広範囲にわたる検討と水温の影響の分離が必要であると判断されたため、これを行い、その結果をまとめている。さらに、粘着性土を構成する砂礫としてこれまで特定の粒径の珪砂を対象に検討を進めてきたが、本研究では、微細砂から細礫の範囲までを網羅するように4種類の珪砂を選び、これらを対象とした同様の浸食実験を行っており、その結果を報告する。

さらに、未だ十分とはいえない点がいくつか残されてはいるものの、現時点の知見を総合することで、浸食速度の予測式がどのように誘導されるかについても検討している。

2. 実験概要

ここでの浸食実験は、前報^{1)~5)}までに用いてきた長さ4 m×幅10 cm×高さ10 cmの正方形断面を持つ透明アクリル製の循環式矩形断面閉水路において行われた。供試体としては、粘土としてS.A クレー(関東ベントナイト鉱業(株))を、非粘着性材料として珪砂をそれぞれ用い、粘土、砂ならびに水を所定の重量比になるように配合し、これを攪拌器の中で予め人工的に練り混ぜることで作成した。そして、この供試体は、水路内の測定対象区間底部に設けられた深さ3 cmの凹部に空隙が生じず、しかもその上面が上下流の水路底面と同じ高さとなるように留意しながら設置された。その後、水路内を水で満たすことで、この供試体は一昼夜静置され、その結果、自然圧密を受けさせることにした。このように準備された供試体は、流量を制御しつつ行われる通水実験に供され、その表面に作用するせん断力によって時間とともに浸食を受けることになる。なお、このせん断力 τ_0 は、二成分のレーザー・ドップラー流速計(ダンテック社製)を用いて行った予備的な乱流計測の結果から、断面平均流速 U との関係は $\tau_0 = \rho C_f U^2$ と表され、しかも本研究で対象とする条件の範囲内では $C_f = 0.011$ (=一定)であることが理解された⁴⁾。そこで、ここでは流れを表す指標として断面平均流速を用いるが、これをせん断力に換算することは可能である。供試体表面の浸食深の計測は、原則として、通水開始から5, 10, 20, 30, 60 分後の各時刻において一時通水を止め、レーザー式変位センサーを用いて行われた。計測点は供試体表面上の合計1080点とし、各地点での高さとの差をとることで各位置での浸食深を求めた上で、その平均値を算出した。ただし、ここで用いる実験装置には、供試体表面の高さを一定に保つ機構が備わっていないため、時間の経過とともに

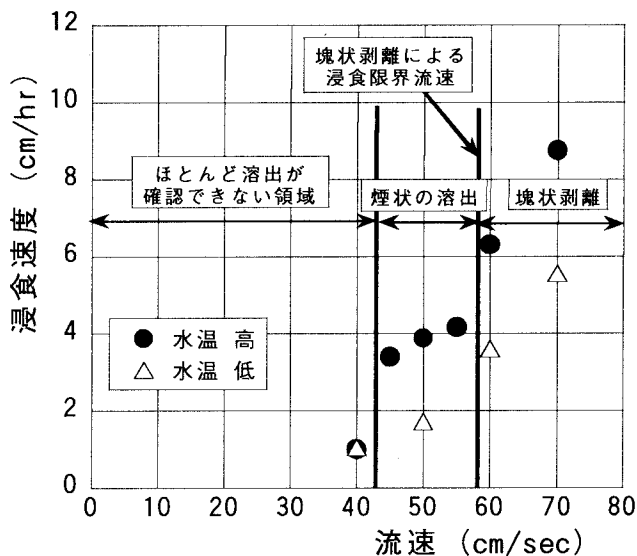


図一 1 供試体に用いられた土砂の粒度分布

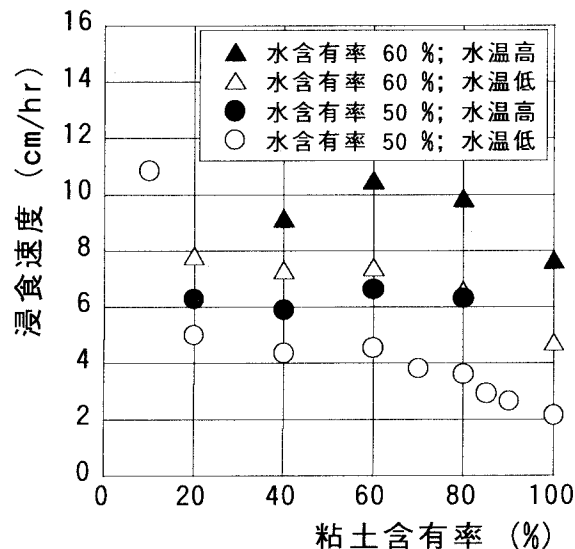
その表面に作用する流速あるいはせん断力が低下してしまう。そこで、ここでは通水開始後10分間で生じる浸食を主な検討の対象とすることにし、この間の浸食速度である「初期浸食速度」(以下、これを「浸食速度」と呼ぶ)をもって浸食特性を議論することになっている。

本研究では、主として、「水温」あるいは供試体を形作る「砂の粒径」の違いが浸食速度に及ぼす影響を明らかにするための一連の実験を系統的に行った。水温については、装置の関係からこれを制御することが容易でないため、水温が18~22℃の範囲に保たれている夏場の6月から9月までの期間と、9~12℃の範囲にある11月から3月までの期間に分けて実験を行うこととし、その結果を比較検討することによって水温の影響を明らかにすることを試みた。なお、以下、前者の結果を「水温高」、後者を「水温低」と呼ぶことにする。一方、砂礫の粒径に関しては、これまで図一1に粒度分布を示した珪砂3号(平均粒径 1.5 mm)のみ用いて一連の検討を重ねてきたが、この粒径の違いが浸食速度に与える影響を調べるために、これに代わって、図一1に示した珪砂1号(同3.6 mm)、2号(同1.8 mm)ならびに8号(同0.085 mm)をそれぞれ用い、これを混ぜ合わせた供試体を作成し、これを対象として浸食実験を行っている。

従って、本研究で行う実験では、断面平均流速・粘土含有率・水含有率に加えて、水温ならびに砂礫の粒径が制御すべきパラメータとなる。なお、粘土と反応を起こす水分量を表すパラメータに関して簡単に触れておくことにする。これについては、従来より「含水比」を用いるのが一般的であるが、ここでは水含有率を用いている。これは、水と反応を起こした粘土が、砂礫の表面に付着し皮膜を作るとともに、これがこのような砂礫の間を埋めるように存在していると考えて



図一 2 断面平均流速と浸食速度の関係：
粘土含有率 80 %，水含有率 50 %



図一 3 水温が粘土含有率と浸食速度の関係に及ぼす
影響：断面平均流速 60 cm/sec.

いるため、混合材料が発揮する耐浸食性を考える上で重要なパラメータは、粘土に対する水の重量比ではないかと推察される。なお、参考までに、含水比と水含有率との関係を示すと、 $(\text{含水比}) = (\text{粘土含有率}) \times (\text{水含有率})$ となり、粘土 100 % の場合には両者は同一のものとなる。

3. 結果及び考察

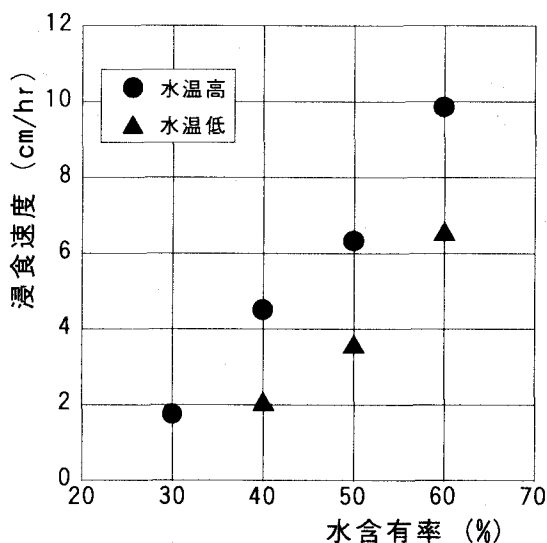
(1) 粘着性土の浸食機構を支配する主要因

粘着性土の浸食特性が、粘土の種類によって傾向を異にすることは容易に想像がつくが、ここでは本研究で用いてきた S.A クレーを含む粘着性土を対象として、これまで明らかになった浸食速度と支配要因との関係について簡単にまとめておくことにする。なお、これまでの研究から重要と考えられる要因は前述の通り、断面平均流速(あるいはせん断力)、粘土含有率、水含有率、水温、水中のイオン濃度、ならびに供試体の圧密の程度などである。

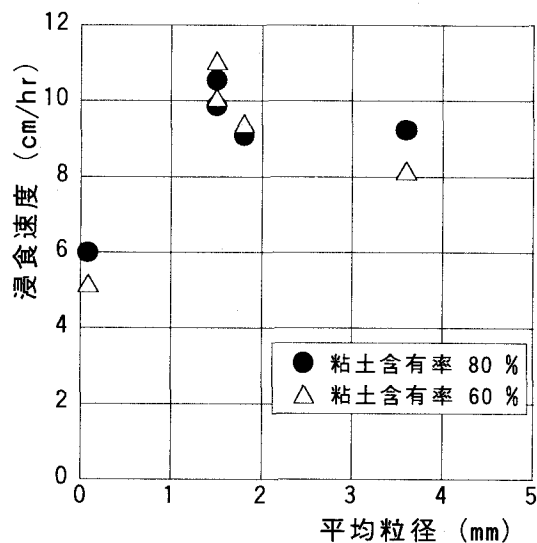
まず、浸食速度と断面平均流速の関係については図一 2 に示す通りである。図一 2 は、前報で示した結果に新たに得られたデータを加え、次節で説明する水温の影響が明確になるように整理し直したものである。さて、この図より、主に、次のことが理解される。すなわち、(1) 断面平均流速の増大に伴い、流速が 40 cm/sec. 程度までであれば浸食は起こらない、(2) これを越えると溶出形式の浸食が起こるようになる、(3) 流速が 55～60 cm/sec. の間の値(浸食限界流速)を越えると塊状の剥離形式の浸食が卓越するようになり、浸食速

度は急増する。前報ならびに本論文では、この限界流速以上の流れ場における浸食現象を主対象としている。なお、浸食限界流速に関しては、後述する水温、水含有率によらず、概ね一定値となることを確認している。

次に、粘土含有率、水含有率ならびに水温の影響については次節以降で説明することにして、ここでは、これ以外の支配要因である含有される「水中のイオン濃度」と「供試体の圧密の程度」などについて触れておくことにする。まず、水中のイオン濃度に関しては、水道水を用い、現在の装置および手法によって実験を行う限り、これを制御することは容易でない。そこで、これについての検討はここでは行わない。また、圧密の程度に関しては、前述の通り、予め練り混ぜた供試体を水路内に設置し、これを水中で静置することで自然圧密を加えた後に浸食実験に供している。ここでは、この静置時間を原則として 1 昼夜としているが、これを最大 7 日まで変化させた検討も行っている。その結果、本研究の範囲内では、この静置時間の違いによる結果への影響は無視できる程度であることがわかっている。ただし、予備的な実験として、次のような「ポットテスト」と名付けた検討を試みており、圧密の程度と関連して興味深いことから、その結果の一例を簡単に紹介する。ここでは、粘土含有率 100 %，水含有率 100 %，直径 9.6 cm，高さ 12 cm の円筒状の供試体を用意し、これを水槽底部に設置し、水深 10 cm の静水により一昼夜圧密を加えるものとした。この結果、供試体はおよそ 9 cm にまで圧密され、その水含有率は、表面から 3 cm 毎に 3 層に分けて求めた平均値として、それぞれ 78 %，64 % および 60 % となっ



図一 4 水含有率と浸食速度との関係に及ぼす水温の影響：断面平均流速 60 cm/sec., 粘土含有率 80 %



図一 5 砂の粒径が浸食速度に及ぼす影響：断面平均流速 60 cm/sec., 水含有率 60 %, 水温高

た.初期の水含有率をさらに大きくして行った別の実験からも同様の結果が得られており,水含有率が70 %程度より大きな供試体を準備しても,十分な圧密を受けるとその水含有率は70 %程度にまで低下して落ちてくものと推定される.このことから,ここで用いている浸食実験方法によってS.A クレーに関する検討を行う限り,対象となる水含有率の上限は70 %程度になると推察される.なお,浸食実験で用いる供試体の厚さは3 cmと比較的小さいため,供試体内で水含有率が鉛直方向に変化することはないという結果も得ている.

(2) 水温の影響評価

図一 3は,断面平均流速を60 cm/sec.とし,水含有率を50 %あるいは60 %とした場合の一連の実験から得られた粘土含有率と浸食速度の関係を表している.図の作成に当たり,水含有率の違いに加えて,測定時の水温が相対的に高い場合と低い場合とに分けて結果を整理することにし,記号を変えて示してある.なお,前報⁴⁾までは,測定データの数の問題もあって,このような差異を明確にするには到っておらず,水温の影響を分離することなく一括して平均化し,その結果を整理するに止まっていた.

さて,図一 3を見ると,重要な知見として,(1)粘土含有率が20 ~ 80 %の範囲内では,粘土含有率に依らず浸食速度がほぼ一定となること,(2)水温が高いほど,また,水含有率が高いほど浸食速度が大きくなること,などがわかる.

さらに,水含有率と浸食速度との関係から水温の影

響を調べると,図一 4のようになる.この図は,断面平均流速を60 cm/sec.とし,粘土含有率を80 %とした測定結果をまとめたものである.これより,浸食速度は,(1)この実験の範囲内では,水含有率にほぼ比例するように変化すること,(2)同一条件下では高温時には低温時に比べて60 %程度大きくなること,などがわかった.

(3) 含有する砂礫の粒径の影響評価

前報までの検討においては,平均粒径1.5 mmの硅砂3号と S.A クレーとからなる粘性土を対象としてきたが,同一の粘土であっても一方の砂の粒径が異なる場合には浸食速度が異なってくることが予想される.そこで,ここでは同一の材質でありながら粒径のみ異なる硅砂1号,2号ならびに8号についても同様の検討を行っており,その結果について説明する.図一 5には,砂礫の平均粒径と浸食速度との関係を示してある.実験条件としては断面平均流速を60 cm/sec.,水含有率を60 %としている.この図より,(1)微細砂に相当する硅砂8号の場合には,それ以外の場合に比べて浸食速度が小さいこと,(2)それ以外の粒径の場合には,極値をとるような傾向も見られるが,ほぼ同一の値となること,などがわかる.上記の(1)に関連して参考までに粘土含有率100 %,水含有率が50 %あるいは60 %の純粘土供試体に対して得られた結果を示すと,それぞれ4.0 cm/hr.あるいは7.7 cm/hr.となり,直接の比較はできないものの,硅砂8号の場合と近い値となった,これは,硅砂8号の場合には,その粒径が S.A クレーのそれに近いため,砂の混入に

よって粘着力の発現が大きく阻害されることがないことを意味する。一方、これより大きな砂礫の場合には、砂礫の周辺が弱点となって浸食が促進されることになるが、粒径が異なっても粘土から砂に置き換えられている比率が等しい場合には、その浸食速度に大きな差異が生じないことを意味する。このことは、砂が粘土を遮蔽することで浸食を抑制する効果(いわゆる遮蔽効果)はそれほど重要ではないことを示唆している。ただし、上記の浸食速度が一定となる粒径範囲については、未だ特定できておらず、今後の課題とする。

4. 浸食速度式の誘導に向けて

本章では、これまでの検討を通じて得られてきた情報を基に、S.Aクレーに関する浸食速度式がどのような関数として定式化され得るのかについて考えてみたい。ただし、現時点では後述する通り未だ検討の余地を残している部分があるため、厳密には今後の検討を待って式を確定することになることは言うまでもない。ここでは、前章の結果から判断して、浸食速度が一定となる粘土含有率が20～80 %の範囲に限定して検討することにしよう。これは、この範囲を下回る量の粘土しか含有されない場合には、浸食速度がかなり大きくなり、本実験装置において十分な精度を維持しつつ浸食速度を測定することが容易でないこと、などいくつかの問題があるためである。一方、粘土含有率が80%以上の供試体の場合には、20～80 %の範囲における値に比べて20 %程度浸食速度が低下する傾向にあることがわかっており、上記の範囲の浸食速度がわかれば、これを基にしてその概略値の推測が可能であると期待されるためである。

さて、S.Aクレーを含む粘着性土の浸食速度 E_s は、前章までの検討から、断面平均流速 U (せん断力 τ_c をパラメータとすることも考えられる)、粘土含有率 R_{cc} 、水含有率 R_{wc} 、水温 T 、砂礫の粒径 D などの関数となる。

$$E_s = \text{function}(U, R_{cc}, R_{wc}, T, D, \dots) \quad (1)$$

ここでは、この関数のうち、図-3および図-5において確認されている「浸食速度が粘土含有率にも砂礫の粒径にも依存しない範囲」内における関数形の同定を試みることにする。いま、各々の要因が相互に強く影響しあうことなく、それぞれの影響の重ね合わせとしてこの関数が定まると仮定できるならば、次のように書くことができる。

$$E_s = \alpha \cdot f_1(U, T) \cdot f_2(R_{wc}, T) \quad (2)$$

ここに、 α は比例係数であり、 $f_1(U, T)$ および $f_2(R_{wc}, T)$ は、図-2あるいは図-4に示した断面平均流速 U あるいは水含有率 R_{wc} と浸食速度 E_s との関係を表す。水

温 T に関しては、前述の通り、これを連続的に変化させながら系統的な実験を行うことが容易でないため、ここでは、上記の関数に現れる水温依存性については、水温の高い夏季と低い冬季とに分けて評価するに止める。

以下、試みに上記の2つの関数を同定してみる。ここでは、第一次近似としてこれらを線形関数として定式化すると、 $f_1(U, T) = \alpha_1 \cdot (U - U_0)$ および $f_2(R_{wc}, T) = \alpha_2 \cdot (R_{wc} - R'_{wc})$ のように表される。ここに、 α_1 は T と R_{wc} にのみ依存する係数、 α_2 は T と U にのみ依存する係数であり、 R'_{wc} は T にのみ依存する係数、 U_0 は定数であり、これらの値は図-2および図-4を基にして実測値に合うように定めるものとする。この結果として、浸食速度 E_s は、

$$E_s = \alpha \cdot (U - U_0) \cdot (R_{wc} - R'_{wc}) \quad (3)$$

のように表される。さらに各係数を求めると、 α は水温に依らず1.1程度となる。また、 R'_{wc} は夏季には0.22程度、冬季には0.32程度となる。 U_0 については溶出形式の浸食すら起こらない限界付近の流速として40 cm/sec. と定めることにする。 α ならびに R'_{wc} の持つ物理的な意味については現在検討中であり、別の機会に報告することにした。断面平均流速に関しては、さらに大きな範囲についての検討が残されており、最終的にはこの結果を待って $f_1(U, T)$ の関数形さらには E_s の関数形を定めるべきであろう。こうした点を含めて今後さらに検討を行う必要がある。しかし、本研究の範囲内では概ね妥当な浸食速度式が得られ、あわせてこのような予測式の誘導に向けて一つのアプローチ方法を提示できたのではないかと考えている。

5. 結論

本研究では、継続して進められている一連の浸食実験を通じて得られた結果を基に、著者らのこれまでの検討結果を見直すとともに、前報までは未解明であった支配要因の影響評価を行った。

本研究において明らかになった成果は以下に列举する通りである。

- (1) 粘土含有率が20～80 %程度の範囲では、浸食速度はほぼ一定となり、断面平均流速、水含有率ならびに水温にのみ依存する。
- (2) 浸食速度と水含有率とは、近似的に比例関係にあることが示唆された。
- (3) 粘着性土を構成する一方の材料である非粘着性材料の粒径に関して、これがある程度の範囲にある限り、その大小が浸食速度に与える影響は無視できる。ただし、厳密な粒径範囲については引き続き検討する必要がある。

これとあわせて、浸食速度式の誘導を試みるとともに、この誘導に向けての考え方、アプローチ方法を提示した。

今後に残された課題としては、(1)本研究では、装置の制約から浸食速度についてのみ検討してきたが、浸食が時間とともに進行するプロセスについても明らかにしていくこと、(2)さらに大きな断面平均流速の範囲における浸食速度について検討すること、(3)水中に含まれる諸イオンの濃度の影響についての考察を加えること、さらには、(4)他の鉱物からなる粘土、たとえば S.A クレーよりも遙かに多くの水分を吸収するベントナイトあるいはカオリナイトについて、同様の検討を行うこと、最終的には、(5) 実河川に堆積している粘着性土を対象とした浸食実験手法ならびに浸食速度式の誘導方法を考案すること、などがある。現時点では、未だにその緒についたに過ぎず、今後も引き続き検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究の取りまとめに先立って、第一著者は早稲田大学特別研究期間をミネソタ大学で過ごした。その際に、同大学 St. Anthony Falls Laboratory の Gary Parker 教授ならびに Jeff Marr 研究員をはじめとした研究グループのメンバーと意見交換をする機会に恵まれた。この折の議論が極めて有益であり、示唆に富んだものであった。Parker 教授をはじめとした関係者に深甚の謝意を表します。本論文で説明した実験の遂行に当たっては、高部一彦君(早稲田大学大学院学生)と白瀬光泰君(当時、早稲田大学理工学部学生、現在、大成建設(株))の協力を得た。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)一般ならびに河川環境管理財団河川整備基金(ともに、研究代表者：関根正人)の助成を受けて行われた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 関根正人, 尾藤文人, 熊谷利彦, 宇野哲平: 粘着性土の侵食とウォッシュロードとしての土砂の輸送に関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会, pp.488-489, 1997.
- 2) 関根正人, 熊谷利彦, 尾藤文人: 粘着性土の侵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.
- 3) 関根正人, 高部一彦, 飯塚暢明, 熊谷利彦: 粘着性土塊の侵食特性に及ぼす粘土含有率の影響について, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.422-423, 1999.
- 4) 関根正人, 飯塚暢明, 高部一彦: 粘着性土の侵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.
- 5) 関根正人, 飯塚暢明, 高部一彦, 白瀬光泰: 粘着性土の侵食速度に及ぼす含有水量の影響, 土木学会第55回年次学術講演会, pp.462-463, 2000.
- 6) Partheniades, E.: Erosion and Deposition of Cohesive Soils, Journal of Hydraulic Division, Proc. of ASCE, Vol.91, HY1, pp.105-138, 1965.
- 7) 芦田和男・澤井健二: 粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究, 京都大学防災研究所年報第17号B, pp.571-584, 1974.
- 8) Murray, W. A. : Erodibility of Coarse Sand-Clayey Silt Mixtures, Journal of Hydraulic Division, Proc. of ASCE, Vol.103, HY10, pp.12-1227, 1977.
- 9) Ariathurai, R. and Arulanandan, K. : Erosion Rates of Cohesive Soils, Journal of Hydraulic Division, Proc. of ASCE, Vol.104, HY2, pp.279-283, 1978.
- 10) 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), 京都大学防災研究所年報, 第25号B-2, pp.349-361, 1982.
- 11) 青木美樹・首藤信夫: 粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究, 第26回水理講演会論文集, pp.87-92, 1982.
- 11) 大坪国順: 底泥の飛び出し率の推定, 第28回水理講演会論文集, pp.671-677, 1984.

(2000. 10. 2受付)