

# 粘着性土の浸食機構に関する基礎的研究

## FUNDAMENTAL STUDY ON THE EROSION MECHANISM OF COHESIVE SEDIMENT

関根正人<sup>1</sup>・熊谷利彦<sup>2</sup>・尾藤文人<sup>3</sup>

Masato SEKINE, Toshihoko KUMAGAI and Fumito BITO

1 正会員 工博 早稲田大学助教授 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

3 正会員 工修 建設省四国地方建設局大洲工事事務所 (当時, 早稲田大学大学院理工学研究科)

Erosion process of cohesive sediment was investigated experimentally in the present paper. Flow velocity and the containing percentage of clay are the control parameters depending on which the erosion rate and the eroded thickness change considerably. The characteristics of this process were made clear quantitatively through a series of systematically arranged experiments, though the range of the experiments were restricted. The results of this study are purely fundamental but will be important in future understanding of both a bank erosion and a topographic change in delta formed around a river mouth.

**Key Words:** cohesive sediment, erosion rate, containing percentage of clay

### 1. 序論

沖積地河川は, 太古の昔から河川によって運ばれてきた土砂によって形成されてきた歴史から, その河道を構成する材料の中に粘着性を有する微細土砂が存在するのが一般的である。とりわけ, 山本<sup>1)</sup>によってセグメント3と定義された河川下流部ではこの粘着性土の含有率が高くなる。ところで, 粘着性土の流砂としての輸送に関して考えると, その輸送速度は流速に等しいと見なせるために, その浸食特性こそが重要である。これについての従来研究は, 1970年代前半に芦田・澤井<sup>2)</sup>らにより, また1980年あたりに首藤<sup>3)</sup>らによってそれぞれ精力的に行われ, 急速に進展したものの, その後, 近年まで際だった進歩が見られなかった。これは, この間に非粘着性土砂の流砂機構がかなりのところまで解明されていった事情と対照的であり, このことは逆に粘着性材料の流砂機構の複雑さ

を如実に反映していると言えよう。ところが, 1990年代後半に入って, 河岸浸食の予測が河川工学上重要な問題として位置づけられるようになり, セグメント3の区域において粘着性河岸の浸食が注目されるに至り, その流砂機構の理解が求められるようになってきた。福岡らによる現地実験<sup>4)</sup>や建設省土木研究所河川研究室のグループによる大型水路実験<sup>5)</sup>がその代表であり, 現地の不攪乱粘土の浸食過程についての理解が急速に深まってきている。

こうした流れの中で, 著者らは, 自然堆積状態にある粘着性土の浸食特性を理解することを目的とした基礎的な研究が今後必要となると認識し, その第一歩となる成果を別論文の形で報告した<sup>6)</sup>。本研究では, 浸食を受ける土塊が砂と粘土との混合材料であるとして, そこに占める粘土の比率を変化させた一連の実験を行い, その含有率の違いによって浸食過程および特性にいかなる変化が現れるかを理解することを目的とする。なお, こうした研究の成果は, 最近環境問題の一つとして注目され, 著者自身も興味

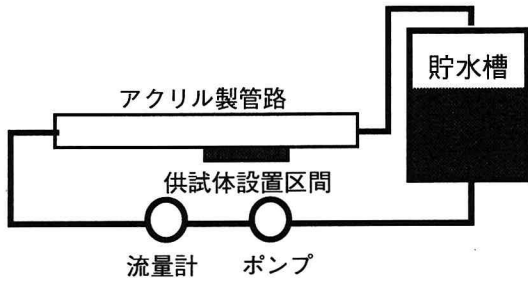


図-1 実験装置概略

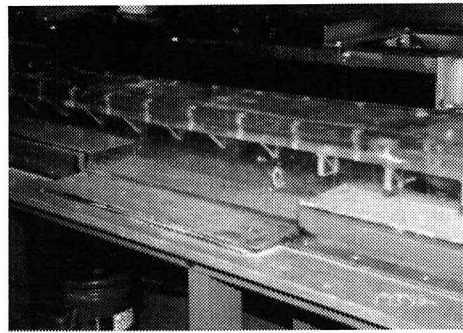


写真-1 実験装置テストセクション部

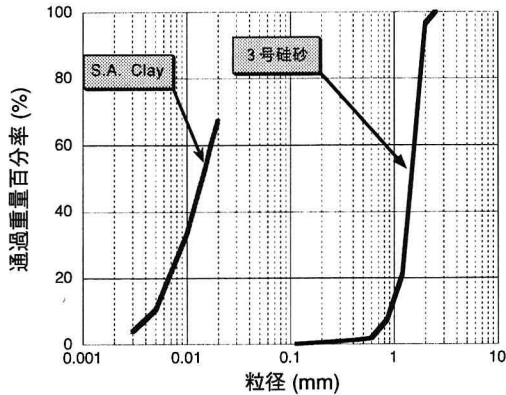


図-2 土質材料の粒土分布

を持って調べてきている干潟の浸食・変形の過程を理解する上でも意味ある基礎情報となると考えている。

## 2. 実験概要

実験は、図-1に示したような長さ4 m、幅10 cm、高さ10 cmの正方形断面をもつアクリル製閉水路を中心とした循環式のシステムにおいて行った。水路の上流端から2 mの位置から下流側に長さ50 cm、幅10 cm、深さ3 cmにわたる凹部が設けられており、ここをテストセクションとして浸食実験に供する粘着性材料をセットするような構造になっている。写真-1に撮影されている水路の中ほどがこのテストセクションである。また、閉水路の底面および上面にはピラミッド型の粗度が密に付いたゴム板が貼られており、上下面からの境界層の発達を促進している。

水路内の水理条件はバルブの調整による流量の制御のみによって変化させ、後述するような系統的な一連の実験を行った。流れ場の特性については、テストセクションである凹部を塞いだ状態で2成分レーザー流速計を用いた予備実験を行ってある。流速分布から判断する限り、テストセクションのあたりで境界層はかなり発達した状態にあることを確認する

とともに、乱流特性についても一般に言われている矩形管路乱流の結果と概ね一致する結果が得られている。たとえば、主流速の時間平均値の鉛直分布についてみると、これは底面から対数分布則に従うことが確かめられており、この分布形から摩擦速度を求めることができる。そこで、後述する浸食実験で対象としている範囲内の流れに対して流速測定を行ったところ、断面平均流速 $U$ と底面せん断力 $\tau_0$ の間には $\tau_0 = \rho C_f U^2$ の関係が成り立ち、式中の抵抗係数 $C_f$ はほぼ0.011で一定となることを確かめている。もちろん砂と粘土からなる供試体を用いた浸食実験の場合には、表面の粗度が異なるためにこの関係がそのまま適用できるわけではない。しかし、浸食実験の際に流速を測定することは容易なことではないことと、たとえ厳密でなくとも得られた関係を適用することで底面せん断力の概略値を知ることはできるであろうとの判断から、浸食実験時に平均流速のみを測定し、敢えて流速分布あるいは底面せん断力を計測することはしなかった。なお、次章以降に示す結果の整理にあたって、流れを特徴づけるパラメータとして底面せん断力を用いるべきであるとの考えもあろうが、必ずしも厳密な意味での底面せん断力が得られているわけではない現状から、ここでは断面平均流速で流れを代表させることとした。

ここで測定対象とした粘着性材料は、図-1に粒度分布を示した通り非粘着性材料である3号硅砂と粘土であるSAクレーの混合材料である(本論では粘土が含まれる材料全般を粘着性材料と呼び、粘土とは区別する)。SAクレーはその粒径からして粘土とシルトの境界に位置する材料であり、粘土として実験に用いられることの多いベントナイトやカオリンなどに比べて粘着力は小さい。従って、僅かな粘着力の増加に伴い浸食過程にいかなる変化が現れるかを理解するには都合の良い材料である。さて、本研究で測定に用いる材料の粒度組成としては、このSAクレーの含有率がそれぞれ100, 80, 60, 40, 20%であるも

のを対象とした。供試体の作成は次のように行った。まず粘土 100 % の場合には、閉管路を水で満たした状態で供試体上部のふたを開け、静水中にこの材料を自然沈降させ堆積させた。これはいわゆる自然堆積土を想定したものである。一方、砂と粘土の混合材料の場合には、SA クレーに水を加えて重量比が 1:1 となるようにしたものゝに所定の量の砂を加え、十分攪拌した混合材料を予め用意しておき、これをテストセクションに設置した後、水路に水を満たすことにした。こうして設置された供試体は一昼夜静水中に放置され、圧密を受けた後に流水に曝されることにした。なお、この静置時間の決定に当っては、これを 1 日 (1 昼夜)、3 日、6 日とした予備実験を行った。その結果、これらの範囲内では以下に説明する浸食特性に大きな差異が見いだされなかった。そこで、実験の制約上、ここでは静置時間を一昼夜とした。また、粘土 100 % の場合とそれ以外とで設置の仕方が異なるため、その影響評価を行う必要があるが、これについては供試体の粘土分の含水率に大きな違いはないこと以外、ほとんど調べられていない現状にある。これについては今後の課題である。

浸食実験では、設定された条件の下で、一定時間通水の後、写真撮影と浸食深さの測定を行い、再び通水しつつ同様の計測を繰り返すことで浸食が進行する過程を定量的に把握することに努めた。浸食深の計測にはレーザー変位センサーを用い、テストセクション全域にわたる詳細な測定を行っている。

### 3. 粘土塊の浸食過程

まず、最初に、粘土のみからなる供試体の浸食過程について見ていくことにする。写真-2には平均流速を 40, 45, 50 cm/sec としたケースの通水後 10, 30, 60 分後の供試体表面の状態を撮影したものを示している。実験時の観察から、流速が 40 cm/sec 以下の場合に生じる浸食は土塊表面から溶け出るように進む「溶出」形式をとり、その浸食量はわずかであるのに対し、50 cm/sec 以上では表面から小土塊が剥ぎ取られるように進む「剥離」形式であり、その浸食量は前者に比べてかなり大きなものとなることが確認された (図-4 参照)。写真-2を見ると、浸食を受けた土塊表面の凹凸が流速の増大とともに顕著になっていることがわかり、このことから浸食形式が両者の中間にあたる 45 cm/sec 付近の流速において遷移していると推察される。そこで、この中間の流速が近似的に限界状態に対応しているものと見なすことにした。なお、この限界状態の流速を掃流力に換算した物理量

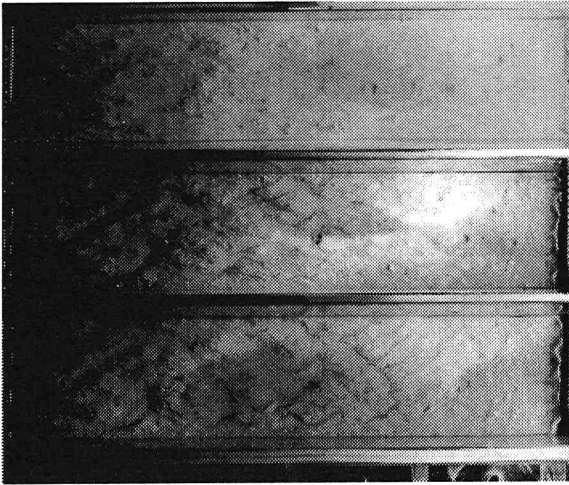
が、非粘着性材料の場合の限界掃流力に対応する意味を持つと考えられる。

次に、図-3に示した浸食深の経時変化について見てみよう。図中の縦軸にある浸食深は、供試体の総浸食土砂体積を底面積で除して求めた平均量である。ただし、テストセクションの上下流端付近では水路表面の状態が急変することなどから特異な変化をする場合があるため、この区間については測定の対象外としてある。さて、この図-3より、粘土塊の浸食には次のような特徴があることがわかる。第一に通水開始後 10 分間の浸食がその後比べて急激に進行することである。これは供試体表面付近ほど耐浸食性が小さいことを意味する。この原因を探るために、供試体内の含水比の鉛直分布を調べたところ、表面に近いほど大きな値をもつものの厚さがわずか 3 cm であることもあってその差は有為なものとは言えないことがわかった。一つには浸食の進行に伴い供試体を上昇させて表面の高さを維持するような構造になっていないため、表面に作用する流速が時間とともに低下していくことが予想される。しかし、供試体表面の高さを維持する構造をもった装置で行った土木研究所の水路実験<sup>9)</sup>でも類似の結果が得られており、これが主たる原因とは考えられない。このように浸食速度が時間的に低下していく原因を特定することはできなかった。第二点は、先ほど指摘した通り、作用流速の増大に伴って浸食形式が遷移し、この材料の場合には 45 cm/sec 程度の流速を境として浸食速度が急増することである。このことをさらに明確にするため、浸食速度を縦軸にとって示したのが図-4である。ここでは、パラメータとして最初 10 分間の平均浸食速度と、その後、通水終了までの平均浸食速度とを求め、両者を上下限値とした範囲を示してある。以上が粘土塊の浸食過程の特徴であり、その特性は、主に、浸食限界速度と各作用流速に対する浸食速度の 2 つの物理量によって代表される。

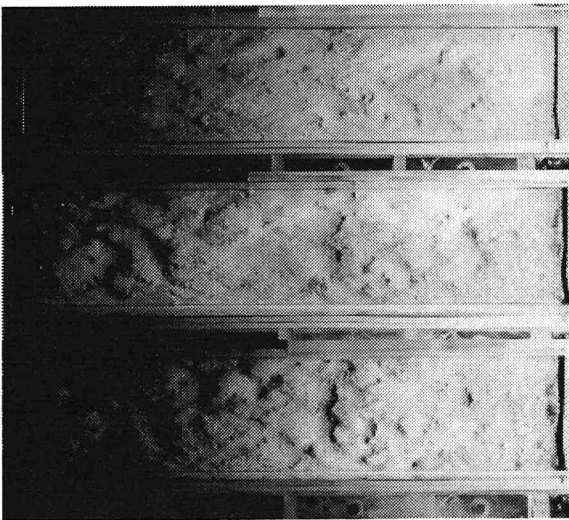
### 4. 粘土含有率が浸食特性に及ぼす影響

次に、粘土と砂との混合材料を対象として、粘土含有率の低下に伴って前述の浸食特性のどのような変化が生じるかについて検討した結果について説明する。

ここでは、まず粘土含有率が 80 % の場合の浸食過程について見ていくことにする。この場合には、わずか 20 % とはいえ砂が存在しているために、そのまわりを粘土が取り囲むような構造になっている。ここで参考までに、写真-3に示した範囲の流速を硅砂 3



断面平均流速：40 cm/sec



断面平均流速：45 cm/sec



断面平均流速：50 cm/sec

写真-2 流速による浸食過程の違い  
(粘土含有率：100%)  
各々上から順に通水後  
10分後、30分後、60分後

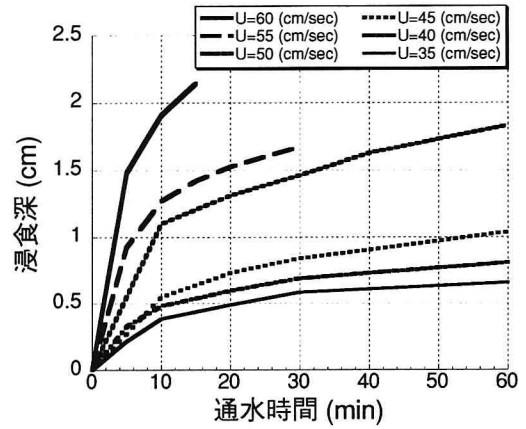


図-3 浸食深の経時変化 (粘土含有率 100%)

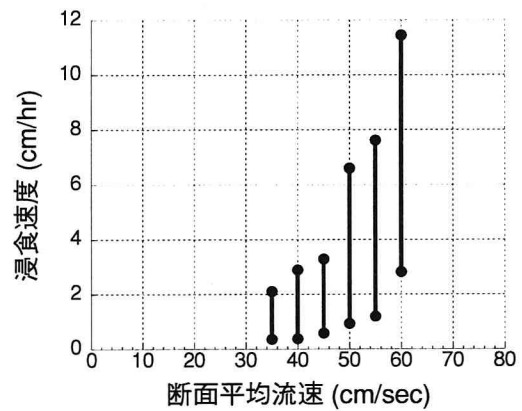
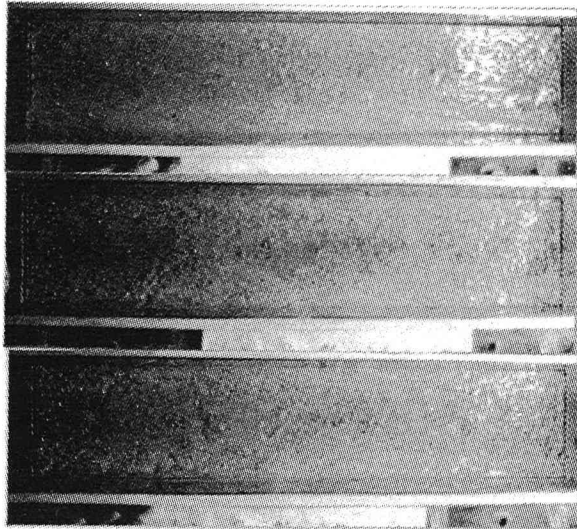
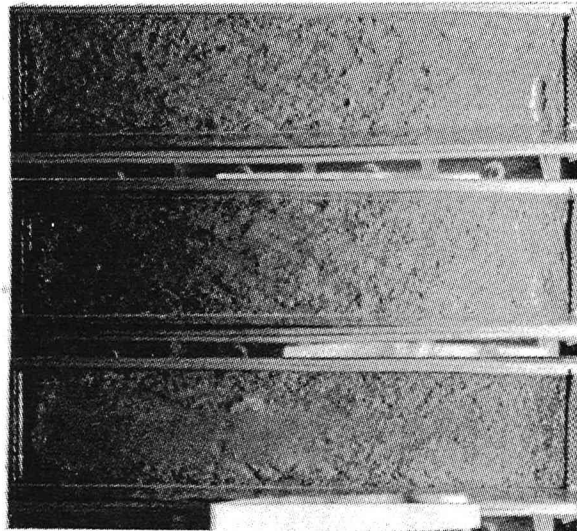


図-4 流速と浸食速度の関係 (粘土含有率 100%)

号に対する無次元掃流力に換算すると 0.095, 0.148 および 0.213 となり、一方、この珪砂が単独で存在するとした場合の無次元限界掃流力が 0.036 である。さらに、粘土の粘着力を無視することを前提として、この比率で配合された砂の無次元限界掃流力を Egiazaroff の限界掃流力の関係式から求めると 0.015 となる。このことから判断すると、ここでの設定流速の下で、仮に粘着性が無視できるものとするれば、かなりの量の砂が掃流砂として供試体表面から離脱することが予想される。さて、以上のことを予備知識として実際の浸食過程を見ていくことにしよう。写真-3には浸食状況を示した。これを写真-2と比較しながら見ると、この浸食過程には次のような特徴があることがわかる。まず第一に表面付近の粘土分が浸食によって抜けだし、取り残されるように砂が露出する。一部が露出した砂はその後掃流砂として移動し、その粒径スケールの洗掘孔が供試体表面に残される。しかし、洗掘孔を構成する粘土もやがては浸食を受け、再び砂が露出する状態となる。必ずしもこればかりとは言えないものの、この材料の浸食を特徴づけるプロセスはこのように進行していくものと考えられる。写真-3にもこの痕跡を見ることができ、粘土のみの土塊の



断面平均流速：40 cm/sec



断面平均流速：50 cm/sec



断面平均流速：60 cm/sec

写真-3 流速による浸食過程の違い  
(粘土含有率：80%)

各々上から順に通水後  
10分後、30分後、60分後

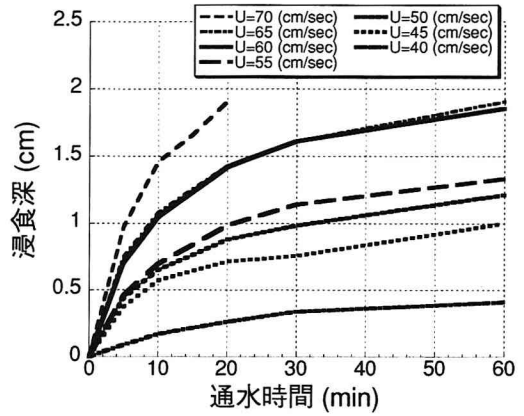


図-5 浸食深の経時変化 (粘土含有率 80%)

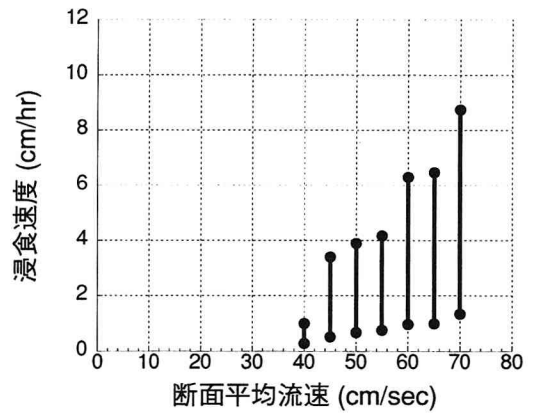


図-6 流速と浸食速度の関係 (粘土含有率 80%)

浸食過程とは性質を異にすることがわかる。

次に、浸食深の経時変化および浸食速度と流速の関係は、図-5および6に示す通りであり、全体として、非粘着性材料が混入した分だけ浸食は抑制されていることがわかる。これは砂による遮蔽効果によって粘土に作用する掃流力が低減されることによると考えられ、砂の存在によって粘着力の発現が妨げられ、塊としての耐浸食力が低下するというマイナス要因を補って余りあるということではないかと考えている。なお、この場合の浸食限界流速は55 cm/sec程度と判断され、粘土100%の場合に比べて大きくなった。

このように粘土含有率が低下すると、砂による遮蔽効果は増大する反面、土塊として発揮される粘着力が低下することが予想される。一方、すべてが砂になった場合にはかなり大きな浸食速度となることは前述の計算から明らかである。そこで、同一の流速に対して浸食速度が最小値となる混合比が存在すると推察される。これを確かめるために、流速を60 cm/secに固定して、粘土含有率を変化させた一連の実験を行った。その結果をまとめたのが図-7、8および9である。図-8および図-9の横軸は粘土含有率である。

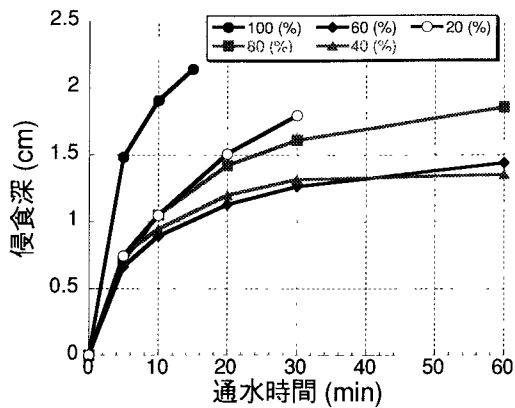


図-7 浸食深の経時変化 (流速60cm/sec)

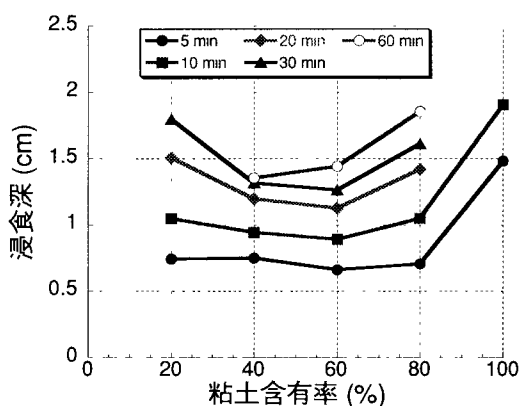


図-8 粘土含有率と浸食深の関係 (流速60cm/sec)

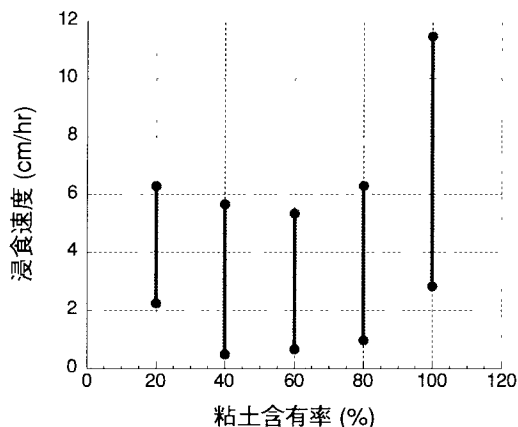


図-9 粘土含有率と浸食速度の関係 (流速60cm/sec)

これより上記の予想通り、粘土含有率が60%のあたりで浸食深ならびに浸食速度が最小となることがわかる。以上のように粘着性土の浸食過程は粘土含有率の影響を強く受けることが明らかになった。

## 5. 結論

本研究では、粘着性土の浸食特性を理解するため、砂と粘土の混合材料をつくり、これを供試体として、流速と粘土含有率とを変化させた一連の系統的な実験を行った。これにより、主に次のような成果が得られた。(1)粘着性土の浸食限界速度を定義するとともに、これが粘土含有率に応じて変化することを示した。(2)粘着性土の浸食速度もまた粘土含有率に応じて変化し、ある比率の時にこの値が最小となることを示した。しかし、ここでの成果は限られた条件に対して得られたものに過ぎず、また、浸食速度が最小になることがありうるとした前述の予想にしても、未だ明確な裏付けのないものである。今後はこうしたことを念頭に置いて、より広範な条件に対する実験的検討を重ね、粘着性土の浸食のメカニズムについてのさらに深い理解を得たいと考えている。

**謝辞** 本研究の遂行に当たり、早稲田大学理工学部学生 宇野哲平君(現、(株)日本工営)および飯塚暢明君、高部一彦君の協力を得た。また、早稲田大学流体実験室の職員諸氏には様々な支援を戴いた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 山本晃一：沖積地河川学，山海堂，1994。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 福岡捷二・渡邊明英・小俣篤・片山敏男・島本重寿・柏木幸則：河岸侵食速度に及ぼす土質構造の影響，水工学論文集第42巻，pp.1021～1026，1998。
- 5) 建設省土木研究所河川研究室：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動，土木研究所資料第3489号，1998。
- 6) 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。

(1998.9.30 受付)