

実河川に堆積した粘着性土の浸食速度 評価に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EROSION RATE OF
NATURALLY DEPOSITED COHESIVE SEDIMENT ON RIVER BEDS

西森研一郎¹・関根正人²・樋口敬芳³・赤木俊雄³

Kenichiro NISHIMORI, Masato SEKINE, Takayoshi HIGUCHI and Toshio AKAGI

¹ 正会員 工(修) 早稲田大学理工学術院助手 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

² 正会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 (同上)

³ 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

The erosion rate of naturally deposited cohesive sediment on river beds was investigated experimentally. In this study, we tried to establish reasonably the preparation procedure of a test sample which has almost same property of deposited cohesive sediment in an actual field of each river. After some detailed investigations about the preparation of test sample, a series of experiments were conducted in a laboratory flume in a same manner as that of our previous work. As a result of this erosion experiments, it was found that the measured data has the same tendency as that obtained by previous work.

Key Words: cohesive sediment, erosion rate, water content, liquid limit, compaction, erosion process

1. 序論

近年、河川の治水・環境上の諸問題を考える際に、粘着性土の浸食特性に関する情報が求められるようになってきている。粘着性土の浸食の問題を取り扱ったこれまでの研究をふりかえると、湖底や貯水池底部に堆積した底泥を対象としたもの^{1,2,3)}が比較的多く、河川に堆積した粘着性土を対象とした研究はそれほど多いとは言えない。その中で、たとえば、著者らはこれまでカオリンなどの市販の粘土を用いた基礎的な実験を積み重ねて来ている。これらは、室内水路において諸条件を制御しつつ、掃流力、水含有率、水温等の条件を系統的に変えて行った実験である。結果として、浸食過程に関する力学的な理解が深まるとともに、浸食速度予測式を誘導するところまでその成果を集約することができた⁴⁾。また、その後、沿岸域や干潟に堆積した粘着性土を念頭において、湿潤と乾燥の履歴を与えた粘着性土の浸食特性についての検討⁵⁾を行った。しかし、これらの研究は、基礎研究の域に留まっており、本来の目的である実河川などの水域に堆積した粘着性土を対象とした検討は未だなされてこなかった。本研究では、この実河川に堆積した粘着性土の浸食速度

を評価することを目的とする。

実水域に堆積した粘着性土の浸食速度を評価するための方法としては、次の二つのやり方が考えられる。ひとつは、実河川において浸食速度を直接的に評価する方法である。これに関しては、福岡ら⁶⁾が行った現地試験がその一例と言える。彼らは、実河川の高水敷上に水路を開削し、この水路においてガタ土と呼ばれる粘着性土の浸食実験を行っており、興味深い知見を数多く報告している。ただし、かなり大がかりな準備を必要とする実験であるため、容易にかつ頻繁に実施することはできない。また、最近になって横山ら⁷⁾が工夫に満ちた計測を試みている。彼らは、粘着性河床の中に水温計を鉛直方向に並べて設置し、連続的に水温データを計測することによって、間接的に底泥の浸食量を評価することによって成功している。これに対して、著者らは、簡易浸食試験装置と名づけた移動可能な計測ユニットを試作し、これを用いた現地浸食試験法の開発を進めてきた⁸⁾。現段階では、屋外の大規模水路内に粘着性土を堆積させ、これを対象とした実験を通じてこの試験法の検証を終えたところである。結果として、室内実験水路における実験結果と同程度の精度で信頼性のあるデータがとれることが確認されており、実



図-1 六角川における粘着性土の堆積状況：(a) 六角橋付近の全景，(b) 採泥場所，(c) 堆積した粘着性土
(国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所より提供)

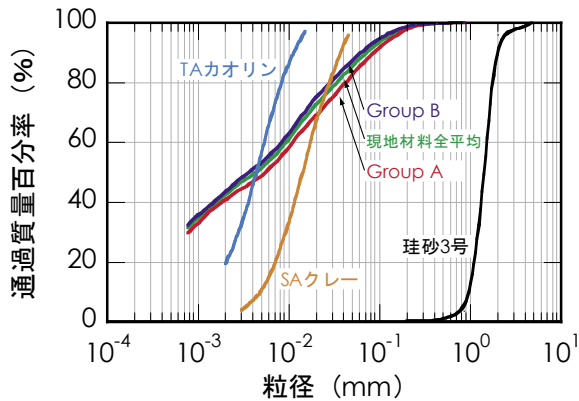


図-2 粒度分布図

河川に適用する準備は整いつつある。

第二の方法としては、現地に堆積している粘着性土を採取し実験室まで輸送して、室内実験水路において浸食速度を計測する方法である。この方法により工学的に意味のあるデータを得ようとする、実水域に堆積している粘着性土と同一と見なせる状態の供試体を水路内に再現する必要がある。本研究では、六角川という実河川で採取された粘着性土を対象とし、その浸食実験手法を確立することをひとつの目的とする。また、条件を変化させつつ行った浸食実験の結果から、実河川に堆積した粘着性土の浸食速度が、これまでに提案されてきた評価式にどの程度適合するかを明らかにすることも目指した。

2. 研究方法

(1) 実河川に堆積した粘着性土の物性

本研究で対象とした粘着性土は、佐賀県六角川が有明海に注ぐ河口から約 14 km 上流に位置する六角橋付近において採取されたものである。この粘着性土は主として攪乱状態で採取されたが、現地で実際に堆積している材料の性質を評価するため不攪乱状態で採取も行った。図-1 には六角橋付近の全景と粘着性土の堆積状況の写真を示した。この六角川の河口部では、干満の差が約 6 m にもなり、感潮区

表-1 現地に堆積していた材料の平均的な物性値

土粒子密度 g/cm ³	自然含水比 %	液性限界 %	強熱減量 %	塩分濃度 %
2.56	135.44	102.75	8.55	0.39

表-2 供試体の元となる現地材料の物性値

Sample No.	60% 粒径 mm	液性限界 %	ベーンせん断強さ kN/m ²
A-1	10.7 ^{x10⁻³}	94.6	0.266
A-2	11.1	96.2	0.289
B-1	7.01	105.0	0.347
B-2	8.93	102.5	0.333
B-3	9.13	102.0	0.347

間は河口から約 29 km 地点にまで及んでいる。また、河道内には、有明海の潮汐作用により「ガタ土」と呼ばれる浮泥が堆積している。これは、水分を多く含んだ非常に軟弱な材料であり、河道の改修や維持管理を進める上での大きな障害となっている。

本研究で用いる粘着性土は、六角橋付近の 10 数地点の河床上から無作為に採取されたものであり、それぞれを混合させることなく区別して実験を行った。ただし、後述するようにわずかな採取場所の違いにもかかわらず、粒度分布や土質特性に違いがあることが判明しており、現地材料が場所により不均一であることの証と言える。本研究では、このうち合計 5 地点から採取された材料（以下、サンプルと呼ぶ）を用いた実験の結果を基に考察を加えることにする。この材料の鉱物組成については、X 線回析分析による定性分析を行い、その概要を把握した。結果として、この試料には石英が非常に多く含まれ、次に灰長石が多量に、白雲母・緑泥石・堇青石が少量含まれることがわかっている。このうち白雲母と緑泥石が粘土鉱物である。

まず、実験に先立って行われた種々の測定結果に

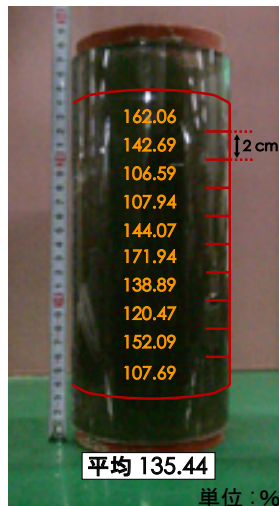


図-3 不攪乱状態で採取された材料の含水比

ついてまとめておく．図-2には採取された材料の粒度分布を示した．また，表-1にはサンプル全体の平均的な物性値がまとめられている．表-2には採取地点毎のサンプルに対して行った土質試験の結果が示されている．この表よりわかるように，これらのサンプルは，その性質において二つのグループに分けて整理する方がわかりやすい．そこで，便宜的ではあるもののそれぞれをグループ A または B と分けて呼ぶことにする．図-2には，この二つのグループ毎に代表的な粒径加積曲線を示すとともに，全サンプル平均のものも併記した．なお，上記の図表中の数値を計測するに当たり，自然含水比の計測には不攪乱状態で採取された試料を，それ以外の計測には攪乱状態で採取されたものを用いた．

図-2に示した粒度分布図からは，この材料が粘土から微細砂までかなり広い分布をもつことがわかる．仮に土質工学上の分類に従って粒径 $5\ \mu\text{m}$ 以下の土砂を粘土とするならば，この材料には 50 % 程度の粘土が含まれていることになる．同図中には，著者らがこれまでの研究で用いてきた市販の粘土ならびに砂の粒度分布も参考のために併記してある．

表-1には，ここで対象としたすべてのサンプルの平均的な物性を示しているが，このうち液性限界に関しては次のことが理解された．著者らのこれまでの実験で用いてきた TA カオリンの場合にはこの値が 51.1 % であったのに対して，ここで対象とする材料の値は 102.7 % であり，かなり水分を含有する材料であることが理解された．また，表-1には強熱減量や試料に含有される水分中の塩分濃度などの値も示されている．強熱減量の値はさほど大きいとは言えず，含有される有機物が耐浸食力に与える影響は小さいと推察される．また，塩分濃度に関しては，試料中の含有水に対する塩分の重量比として

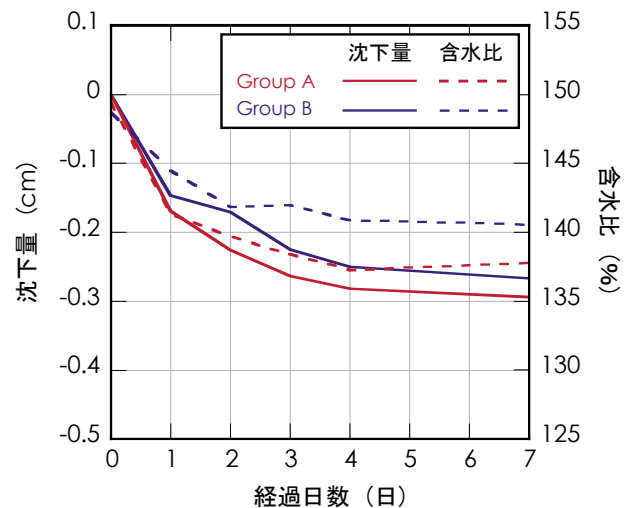


図-4 沈下量と含水比の時間変化

算定したが，採取地点が感潮域であるため通常の河川水に比べて 10 倍程度高い値となるものの，海水の 1/10 程度の値となっており，相対的に高い値とは言えないと判断している．自然含水比に関しては，不攪乱状態で円筒状に採取された図-3のようなサンプルを用い，これを深さ方向に 2 cm ずつの 10 層に切り分け，その各々について含水比試験を行った．図-3中に示されたオレンジ色の数字が，各層の含水比を表しており，各層の堆積時期の違いによって値にかなりのばらつきが生じていることがわかる．このことは，サンプルを採取する位置が違えば含水比にこの程度のばらつきが生じている可能性があることを示唆するものであり，これが表-2に提示したように諸量に差異が現れた原因ではないかと判断している．ここに現地材料を採取して実験をする際の難しさが現れている．なお，図-3中の数値の平均値は 135 ~ 140 % であった．どの層の含水比も当然のことながら後述する液性限界よりは大きな値であることがわかる．

また，表-2により，不攪乱状態で採取された個々のサンプルの液性限界について見ると，粒度の大きいグループ Aの方が小さいグループ Bより 10% 程度低い値となっている．また，この材料の内部の強度を知るひとつの目安として，後述する方法に従って作成した供試体に対してベーンせん断試験を行い，その強度を求めた．表-2にはこの結果も示されているが，液性限界が小さい材料ほど強度が小さくなることが確認された．

(2) 供試体の作成方法

ここでは，供試体の作成方法について説明する．本研究では，浸食実験の供試体として現地において攪乱状態で採取された材料を用いて作成したものを

使用する。これは、たとえ不攪乱状態で採取された材料と言えども、現地に堆積していた時の応力の状態を保ったまま採取・輸送することは難しく、これを供試体として用いたとしても、それだけで現地に堆積している材料に対する浸食速度が得られるとは考えられないためである。そこで、ここでは攪乱状態で採取された材料に所定の水を加えてよく練り混ぜた後に、十分な圧密を加え、その結果としてできあがった材料の含水比が、不攪乱状態で採取されたサンプルの自然含水比に等しくなるように供試体を作成することにした。なお、本来であれば、材料の応力状態や強度などが、現地に堆積しているものと一致していることを確認することが望ましい。しかし、ここで対象とする材料が液性限界よりも大きな含水比を持つ流動性が高いものであり、土質試験によって試料内の応力状態や強度を計測することが容易でないため、この点についての検証はできていない。供試体作成の具体的な手順を確定するに当たっては、圧密を加える前の供試体の含水比ならびに圧密時の載荷重、圧密時間を決定することが必要がある。そこで、異なる初期含水比を有するサンプルを用意し、載荷重を変えながら系統的な圧密試験を繰り返した。その結果、次のことが理解された。すなわち、初期含水比を 150 % とし、荷重を 0 として試料の自重のみにより圧密を加えることにより、図-4 に示すように 7 日間で自然含水比である 135 ~ 140 % の含水比をもつ供試体ができあがることが理解された。図中には、表-2 において分類した二つのグループ毎に結果を整理し、それぞれの平均的な曲線が示されている。この圧密試験の際には、表面が乾燥することを防ぐため、供試体を水面下に没して静置することが望ましく、必要最小限の水深となるように水位を維持しつつ実験を行った。供試体の厚さは浸食実験の際のものと同じ約 5 cm とした。図-4 より、供試体の含水比は 1 日程度で急激に低下し、その後は緩やかな低下となることがわかる。本研究では、同一の供試体を複数用意し、これらを一斉に水中に没することで圧密試験を開始し、所定の時間を経た後にそのひとつひとつを取り出し、沈下量ならびに含水比を計測することにした。その際、供試体を鉛直方向に三層に分け、それぞれの含水比を求めているが、その上層の含水比に関して言えばおよそ 3 日経過時点で変化の速度は小さくなり、135 ~ 140 % 程度の含水比に達していることが確認された。ただし、現地に堆積している材料の状態を再現するためにはできるだけ長い時間にわたって圧密を加えるべきとの判断により、圧密を加える期間を 7 日とした。なお、この 7 日の時点でサンプルに生じた最

終沈下量は 3 mm 程度であった。

以上が本研究により見出された供試体の作成方法である。次章では、この方法により用意された供試体を用いた浸食実験の結果について説明する。

3. 実験結果

(1) 浸食速度

本研究では、著者らのこれまでの室内実験で用いたものと同じ正方形断面閉水路⁴⁾において浸食実験を行った。試験水路は全長 5 m、幅 10 cm、高さ 10 cm であり、この水路中央部には長さ 70 cm、深さ 5 cm の供試体を設置する凹部が設けられている。ここでは、既に説明したように含水比を自然含水比に等しい値に固定しているため、摩擦速度 u^* のみ 6.64 ~ 11.4 cm/s の範囲で変化させて実験を行った。ただし、水温は実験の時期により異なるため、これも結果に影響を及ぼすパラメータとなる。実験時には、通水を開始する前ならびに浸食実験終了後にレーザ式変位センサーを用いて供試体表面高さを面的に計測しており、その差である浸食深の平均値を求め、これを通水時間 3 分で除すことで浸食速度を求めることにした。

図-5 には、実験の結果として得られた浸食速度 E_s と摩擦速度 u^* との関係を示す。ここでは、データを表-2 にあるような二つのグループに分けて表示した。また、水温については著者らのこれまでの整理方法に倣い、目安として 15℃ を境に記号の種類を変えて示した。データを二つのグループに分けたのはデータ間のばらつきの程度を明確にするためであり、一括して示したとしてもそれほど大きなばらつきではないが、結果を判読しやすくするためにこのような表示にした。著者らのこれまでの研究⁴⁾によれば「浸食速度は摩擦速度の 3 乗に比例する」ことが明らかになっている。そこで、図中には参考のためこの関係が実線で描かれている。結果として、市販の粘土を用いたこれまでの実験に比べてデータのばらつきが大きくなっているとはいえ、いずれの結果も上記の 3 乗則が成り立っていることが確認できる。また、同一の摩擦速度に対するデータを比較すると、これまでの成果と同様に、水温が高い場合ほど浸食速度が大きくなる傾向にあることも確認された。関連する実験として、福岡ら⁶⁾は同じ六角川において自然沈降堆積させたガタ土を対象に洗掘実験を行っており、この結果を基に浸食速度を試算したところ、図-5 に示すような値となることがわかった。この実験は、高水敷上に掘削した水路内に、干満の差を利用して 3 ヶ月にわたり土砂（ガタ土）を

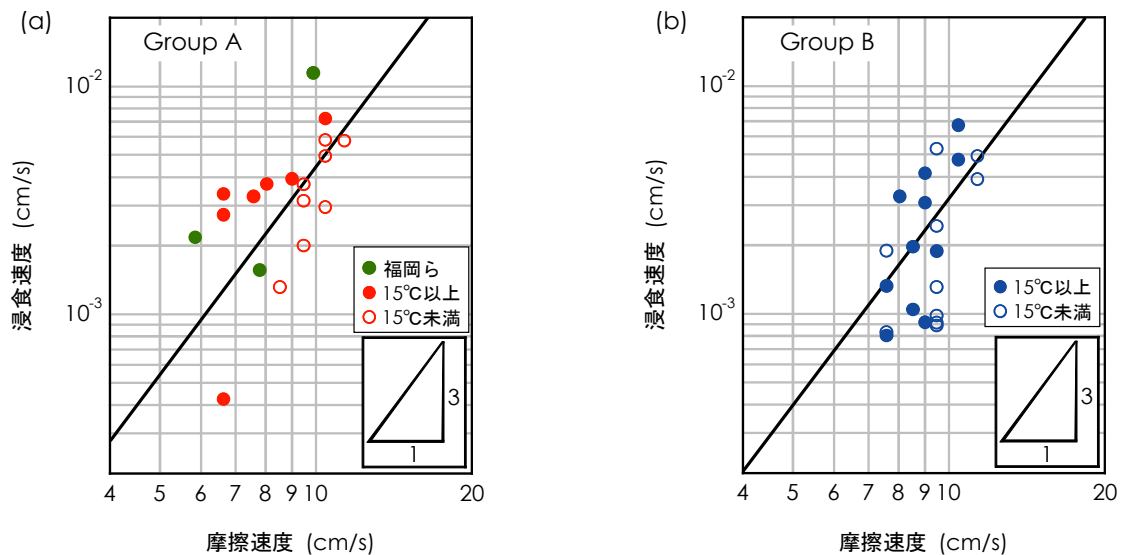


図-5 摩擦速度 u_* と浸食速度 E_s との関係

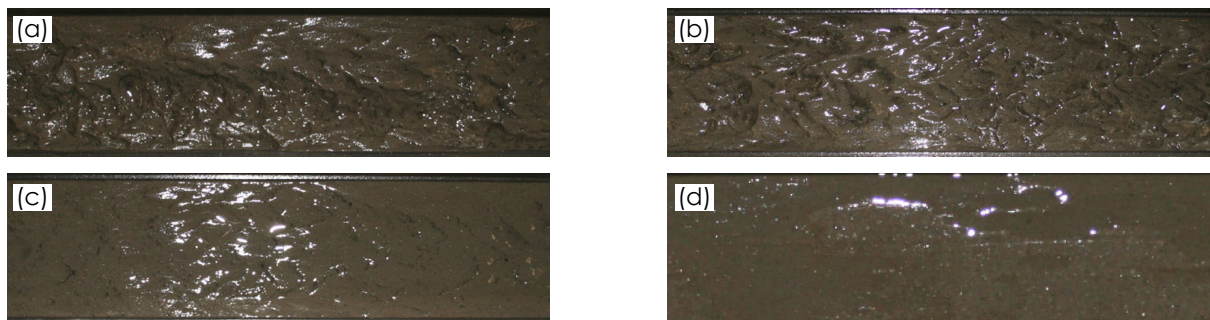


図-6 通水後の供試体表面：(a) 大規模な浸食が生じた場合、(b) 最も多く見られた表面の波状の形状、(c) 形成された波が小さな場合、(d) ほとんど浸食が生じなかった状態

運び込み、これを自然堆積した後に行われたものである。そのため、堆積した材料の粒度分布は本研究で用いたものよりも小さく、含水比についてはここでのものより大きいことが報告されている。このことを念頭において、図-5を見ると、福岡らのデータの方がわずかに大きいもののほぼ同じような値であり、しかも同様の变化傾向を示していることがわかる。そこで、厳密には更なる検討が必要であるものの、本研究で採用した供試体の作成方法は概ね当を得たものであったと判断している。

最後に、二つのグループに分けて整理した浸食速度の差について考察を加えておくことにする。既に説明したように、グループ A の材料の方がわずかに粒径が大きく、液性限界が小さいことがわかっている。本研究では、それぞれの材料が採取された地点の自然含水比をグループによらずに 135 ～ 140% と判断し、グループ毎に差をつけることなくほぼ等しい含水比となるように供試体を作成した。また、著者らのこれまでの基礎的な実験の結果から、その他の要因が変化しないならば、(含水比-液性限界)

の値が大きいほど浸食速度が大きくなることがわかっている。このことを踏まえて考えると、供試体の(含水比-液性限界)の値が大きいグループ A の方が、平均的に見て浸食速度が大きくなることは容易に理解できる。図-5 の左右のグラフを相互に比較すると、上記のような傾向が現れており、特に矛盾はないものと考えられる。

(2) 浸食形態

著者らは、これまでの研究において、粘着性土の浸食がいくつかの形態をとって進行することを報告してきた。本研究で観察された浸食形態もこれまでのものと同様であり、結果的に浸食量が大きかったものから順に浸食後の表面状態を示すと、図-6 (a) ～ (d) のようになる。

本研究で見られた浸食の全般的な特徴は、供試体表面の微小な隙間や亀裂などの窪地に流水が集中することによって、供試体がある大きさをもった塊となって剥離することである。それに加えて、比較的粒径の大きな砂が供試体表面上を滑動している様

子も確認された。著者らがこれまでにカオリンを用いて行ってきた実験⁴⁾の場合には、表面上にしわが寄るように生じた波がその形を変えつつ、下流側に移動しながら浸食が進行していく様子が確認されたが、本研究ではこのような浸食は生じていなかった。これは、材料の持つ粘着性の大小によるものと推察される。本研究で最も多く確認されたのは、流速が比較的大きい場合には図-6 (b) のような形態であり、小さい場合には同図 (c) のようであった。

図-6 (a) に現れている大規模な破壊は、供試体内に不均質な部分があるために生じたと考えられる。このことは、著者らがこれまでに行ってきたカオリンの湿潤・乾燥実験⁵⁾における履歴の初期の段階において確認されている。供試体内の含水状態が局所的に異なる場合や、供試体内に空隙が存在していたことが原因であろう。本研究で用いた供試体は、元々感潮域から採取された材料から成っているため、よく練り混ぜられているとはいえ局所的に不均質な状態が現れることも考えられる。また、現地に堆積している粘着性土に関して言えば、このような不均質性の影響が現れることは十分考えられる。

一方、図-6 (d) を見るとわかるように、供試体にほとんど浸食が生じていない場合も観察された。これは、既に説明したように、(含水比-液性限界)の値に関わるものと考えられ、圧密の過程を経て到達した供試体の含水比が、予期しない理由により目標とする設定値よりも小さくなってしまったためではないかと判断している。著者らは、既に進めてきた基礎的な実験を通じて、含水比が液性限界に近づくと浸食が生じなくなることを確かめているが、このことと図-6 (d) のような結果が現れたことは深い関わりがあるものと考えている。なお、こうしたことは液性限界が大きなグループ B ほど多く観察されており、この点においても矛盾はない。

4. 結論

本研究では、実河川に堆積した粘着性土を対象として室内浸食実験を行う手法について検討を行った。あわせてその材料の浸食速度をはじめとした浸食特性についてもその考察を加えた。現地に堆積した材料を取り扱うことは難しく、その浸食実験を行うに当たってはできるだけその堆積の状態を再現するように供試体を準備する必要がある。ここでは、不攪乱状態で採取された材料を分析することにより元々これが堆積していたときの状態を推定し、その知見を基に、攪乱状態でとられた材料を用いていかに適切に供試体を作成すべきかについて検討を行った。また、こうした供試体を用いた浸食実験を行い、

これまで著者らが明らかにしてきた浸食速度式の関係が、ここで対象とした材料に対しても適用しうることを確認した。ただし、たとえ同一河川から採取されたサンプルであっても、わずかな場所の違いによってその性質に違いが現れることも確認された。そこで、現地に堆積した材料の浸食特性を把握するには、ある程度十分な数のサンプルを用意して浸食実験を行う必要がある、当然のことながら得られる浸食速度にはある程度のばらつきを覚悟しなければならないことなどが明らかになった。今後は、たとえば現地の粘着性土に簡易浸食試験装置を据えつけ浸食速度の直接計測を行うなどして、本研究で説明してきた供試体作成方法の妥当性をさらに検証していくことが必要である。現地に堆積した粘着性土の浸食速度を室内水路実験によってより精度よく計測できるように今後も検討を続けていくつもりである。

謝辞：本研究の遂行に当たり、国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 梅田 信，高峰 一，石川忠晴，大滝諭，市山誠：霞ヶ浦低泥の洗掘過程に関する実験的研究，土木学会論文集，No.740，II-64，pp.63-73，2003.
- 3) 角 哲也，井口真生子：貯水池に堆積した微細粒土砂の浸食特性に関する研究，水工学論文集，第 51 巻，pp.871-876，2007.
- 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) 関根正人，西森研一郎，安藤史紘：乾燥・湿潤履歴が粘着性土の浸食速度に及ぼす影響に関する研究，水工学論文集，第 49 巻，pp.877-882，2005.
- 6) 福岡捷二，石川 浩，日比野忠史，島本重寿：粘着性（ガタ土）流路の浸食，掃流機構に関する研究，水工学論文集，第 40 巻，965-970，1996.
- 7) 横山勝英，金子 祐，高島創太郎：温度計測に基づく感潮河道の底泥浸食過程に関する研究，水工学論文集，第 51 巻，877-882，2007.
- 8) 西森研一郎，関根正人，樋口敬芳：簡易試験装置を用いた粘着性土の浸食実験とその試験法に関する研究，水工学論文集，第 51 巻，865-870，2007.

(2007. 9. 30 受付)