

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

EXPERIMENTAL STUDY ON EROSION RATE OF COHESIVE SEDIMENT
BY USING A MOVABLE APPARATUS OF EROSION TEST

西森研一郎¹・関根正人²・樋口敬芳³

Kenichiro NISHIMORI, Masato SEKINE and Takayoshi HIGUCHI

¹ 正会員 工修 早稲田大学助手 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

² 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (同上)

³ 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

Erosion rate of soft cohesive sediment was investigated experimentally in the present paper. In this study, we developed a movable apparatus of erosion test, which was designed to conduct a field measurement of erosion rate. In order to check the validity and utility of this apparatus, the several series of measurements were carried out outside in large-scale experimental flume. It was verified that the results by this new measuring system has almost same order of accuracy as that by our standard test in laboratory. Effect of water temperature on the erosion rate were also evaluated quantitatively.

Key Words: cohesive sediment, erosion rate, movable apparatus of erosion test, water temperature.

1. 序論

本論文では、これまで培ってきた粘着性土の浸食に関する実験技術とその成果^{例えば1)}を踏まえて、実河川に堆積した粘着性土の浸食特性を現地において簡便に計測する試験装置ならびに試験法を考案するとともに、その検証を行うことを目的とする。

実河川を流送される粘土の鉱物組成は水系毎に異なることが予想され、その鉱物組成に応じて浸食特性が大きく異なる可能性がある。そのため、現地河川の計画・管理を行う上で必要とされる粘着性土の浸食特性については、各河川毎に評価した関係を用いるべきである。これには、現地材料をサンプルとして持ち帰り、これまで通り室内の水路で実験を行う方法がまず考えられる。しかし、供試体の水分や圧密状態をどの程度保ちながら輸送することが可能かについては疑問が残る。また、実験に用いられる水についても、水中や土中に存在するイオン濃度の高低が粘着性土の耐浸食力に影響を及ぼすことが予想されるため、より現実に近い値の予測を行うためには、実際の河川水をそのまま通水することが望ましい。こうした点に鑑み、著者らは、粘着性土の現

地浸食試験法についての検討も始めている²⁾。本研究では、簡易的な小規模試験装置を設計・試作し、これを用いた屋外実験を系統的に行うことにより、このような目的に適う試験装置ならびに試験法について検討した。本論文は、その第一報をとりまとめたものであり、今後に残された課題とあわせてその結果を報告する。

本研究に関連する従来の研究をふりかえると、建設省土木研究所(現、国土交通省国総研)河川研究室による浸食実験³⁾を挙げることができる。同河川研究室では、高流速高落差侵食試験装置を用いて河岸や高水敷を構成する粘着性土の浸食実験を行っており、その対象として現地で不攪乱のまま採取した粘着性土を供試体とした。また、そのデータの解析にあたっては、現地にて引張り試験器を用いて計測した引張破壊応力 σ_b を指標として取り上げ、これとの関係で浸食速度を推定する方法を見出している。ただし、ここで対象としているのはかなり締め固めを受けた粘土であり、著者らが想定しているような比較的含水比の高い粘着性土に対して、この方法を適用することは不可能である。一方、実験水路によらず粘着性土の浸食速度を評価しようとする試

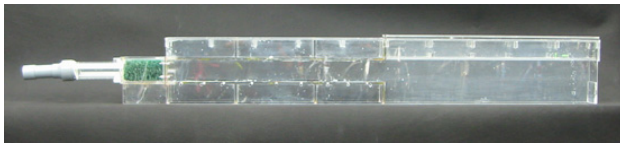


図-1 現地浸食試験装置全景

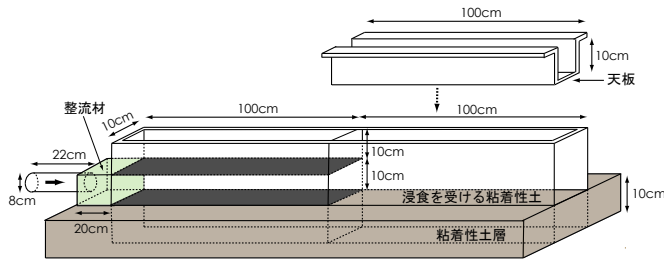


図-2 現地浸食試験装置模式図

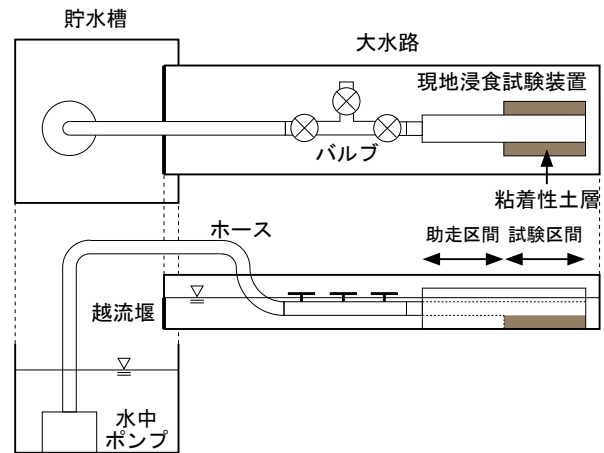


図-3 実験水路全景の模式図（上：平面図，下：立面図）

みはほとんどなされておらず，たとえばここで提案するような現地試験法に対する必要性は高まっていると考える．

2. 現地試験装置と実験の概要

(1) 試験装置

図-1 に現地浸食試験装置（水路部分）の全景写真を，図-2 にその模式図を示す．装置の基本的な構造は以下の通りである．まず，全体の構造は下流側 100 cm の試験水路区間と，上流側 100 cm の助走水路区間とからなっており，浸食状況を目視可能とするため全体をアクリル製とした．このうち，試験水路は，横断方向に 10 cm 離れて鉛直に取り付けられた二枚の側壁と，取り外し可能な天板とからなっている．実験時には，この二枚の側壁を，あらかじめ堆積した粘着性土に垂直に差し込むことでこの装置全体を設置し，その後に天板を設置する．これにより，粘着性土を底面とし，その他三方をアクリル板で囲まれた長方形断面水路が形成される．通水前の横断面形状については，原則としてこれまでの室内実験と同様に 10 cm × 10 cm の正方形となるようにしてある．なお，この試験水路の上流側に接続された助走水路の横断面形状も上記と同一の正方形となっている．この助走区間の上面と底面には，これまでの室内実験水路と同様に，高さ 3 mm のピラミッド型の突起が密についたゴム板を貼り付けてある．これは，突起状の粗度によって，水流の境界層を十分に発達させ，室内実験水路と同様の十分に発達した乱流場を生成させるためである．また，助走区間のさらに上流側には，同じ断面積をもつ長さ 20 cm の正方形管路が取り付けられており，この中に整流

材が設置されている．さらに，この上流には，長さ 22 cm の円形管路が接続されており，ポンプから水を運び入れる硬質ビニールホースを繋ぐような構造となっている．

試験水路に限り上面の天板を着脱可能としたが，これは，通水実験を行い水路底部の粘着性土を浸食させた後にこの天井部分を取り外し，レーザー式変位センサーを用いて浸食深の面的な評価を行うためである．

(2) 実験方法

現地河川における測定に先立って，本研究では，先に説明した試験装置よりも十分大きな屋外長方形断面水路（全長 8 m × 幅 60 cm × 深さ 40 cm，勾配 1/125，以下これを「大水路」と呼ぶ）を用いて実験を行った．すなわち，大水路の底面に粘着性土を堆積させた模擬河床を形成させ，その上に前述の試験装置を設置して屋外浸食実験を試みた．実際には，この大水路の下流側 5 m の区間を用いることにし，この区間の上流端に止水壁を，下流端に越流堰をそれぞれ設置し，この間に水深が一定となる静水区間が生じるようにした．ここで行った実験の全体像を明らかにするため，図-3 の模式図を示す．

次に，実験の手順について説明する．

(a) 著者らのこれまでの室内実験と同様の方法で練り混ぜて用意した粘着性土を，大水路のほぼ中央部の水路床上に流し入れて成形し，粘着性模擬河床を構成する．粘着性土が敷きならされた水路床上の区域は，長さ 150 cm，幅 35 cm の範囲であり，試験装置の水路部の規模から考えて十分な大きさをもつ（図-4(a)）．

(b) 大水路に静かに水を入れ，水位を一定に保ちな

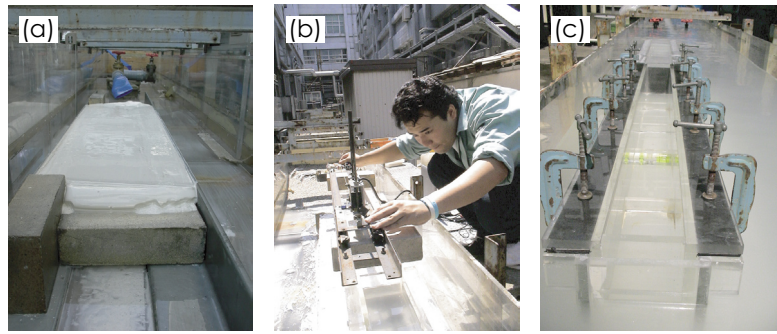


図-4 実験時の写真：
(a) 粘着性河床の設置，(b) 供試体表面高さの計測，(c) 大水路の満水状態



図-5 浸食を受けた供試体表面写真
上下端が側壁に相当する

がら半日程度静置することで自然圧密をかける．ここでの水深は場所によらず 25 cm 程度であった．

(c) 半日程度の静置の後，大水路下流端の越流堰を静かに開放し，水路内の水を時間をかけて排出する．その後に粘着性河床上に試験装置を設置し，試験水路を固定する．

(d) レーザー式変位センサー（キーエンス社製）を用いて，粘着性土の初期表面高さのデータを面的に計測する．計測は，試験水路の側壁に平行に 1 cm 毎にとられた縦断方向測線で行われ，この測線に沿って変位センサーを一定速度で移動させることで，高さの相対的なデータを連続的に計測した（図-4(b)）．測線長は 60 cm，測線数は 8，各測線毎のデータ数は 120 であり，結果として一回の計測で得られる総データ数は 960 であった．なお，手順(c)で排水を行っているのは，レーザー式変位センサーの性能上の制約から，水面下の粘土表面の高さを精度よく計測することが技術的に容易でないためである．

(e) 次に，大水路内にゆっくりと水を入れ，再び上記と同じ静水の状態に戻す（図-4(c)）．その後，貯水槽内に設置した水中ポンプを稼働させ，硬質ビニールホースを通して水を試験水路内に送り，水路底面上の粘着性土に対する浸食実験を行う．通水時間はこれまでの研究と同様に 10 分間とする．通水時間中，試験水路下流端から排出された水は，この試験水路の外壁と大水路の側壁の間を通過して，大水路下流端から流出する．なお，この試験水路周辺の流れが試験水路内の流れに直接的な影響を与えることがないように留意し，その確認も行っている．試

験水路内を流れる水の流量は，試験水路への流入入口のバルブの開閉によって調節する．その際，バルブの回転数と流量との関係を計測した予備実験の結果を用いる．また，摩擦速度 u_* の算出に用いられる抵抗係数 C_f は，室内実験水路と同程度の値であることを確認している．

(f) 通水終了後，手順(c)と同様に水路内の水を時間をかけて排出する．この際，試験水路内の粘着性土が改めて浸食を受けたり，水路内に浮遊状態で存在している粘土が堆積を起こすことのないように留意した．

(g) 手順(d)と同じ方法で，浸食を受けた粘着性土の表面高さのデータを計測する．この計測は，通水開始から 3 分後と 10 分後の二度にわたって行われた．そして，手順(d)で得られたデータとここで得られたデータとの差がその点における浸食深となる．これを面的に積分することで浸食体積を求め，対応する水路床面積で除すことで「平均浸食深」を求めた．本研究では，これまでの室内実験と同様に通水 10 分間のデータを用いて浸食速度を評価することにしており，「浸食速度 E_s 」をこの間の平均浸食深の値を通水時間 10 分で除した値として求めている．

3. 実験結果と考察

(1) 実験結果

本実験は，粘土材料としてこれまでと同様に TA カオリンを用い，供試体の粘土含有率 R_{cc} を 1.0，水含有率 R_{wc} を 0.7-0.8 とした．

まず，図-5 に浸食を受けた供試体表面の状況を示す．著者らのこれまでの室内実験と同様に波状の凹凸が形成されていることが見てとれる⁴⁾．なお，後述する浸食速度の計測は，写真に示されている試験水路中央付近を対象に行っており，側壁付近のデータは除外してある．従って，ここで得られた浸食速度は，側壁の影響を受けない水路中央部の面的

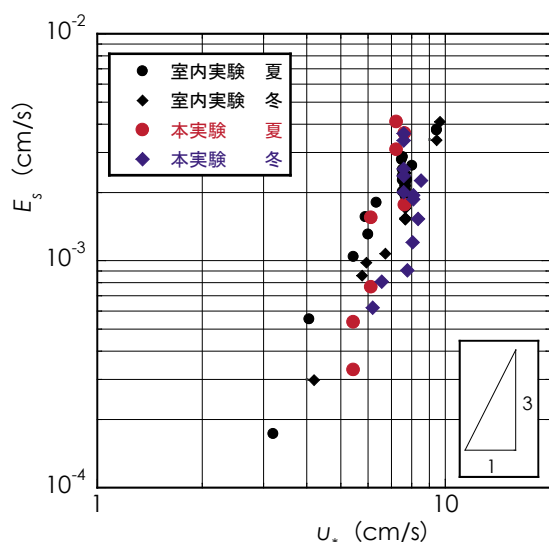


図-6 摩擦速度 u_* と浸食速度 E_s との関係

に平均化された値と見る事ができる。

本研究では、浸食速度 E_s と摩擦速度 u_* 、水含有率 R_{wc} ならびに水温 T との関係に注目する。これは、著者らのこれまでの研究により、浸食速度を支配する因子として上記三つが最も重要であり、これら以外の影響はほとんど二次的であるとの知見に基づくものである。

図-6には摩擦速度 u_* と浸食速度 E_s との関係を両対数グラフ上に描いたものを示す。図中には著者らのこれまでの室内実験の結果も比較のために併記した。ここでは、著者らのこれまでのデータの整理方針に則り、便宜的に水温 15°C を境としてデータを分けて示した。この図より、本実験結果は室内実験に比べてデータのばらつきは大きいものの、これまでの研究¹⁾と同様に浸食速度 E_s は摩擦速度 u_* の3乗に比例することがわかる。また、室内実験と同程度の精度で浸食速度を計測できることが確認された。浸食速度 E_s と水含有率 R_{wc} との関係については、計測対象とする R_{wc} の範囲をあまり大きく設定できないという実験上の制約があり、十分に広い範囲での検討とは言えないものの、これまでと同じ2.5乗則が成り立つことが確認された。

(2) 水温による影響

著者らは、これまで計測された浸食速度のデータを整理するにあたって、水温が $18 \sim 22^\circ\text{C}$ の範囲で得られたものを夏季（水温高）のデータ、 $8 \sim 12^\circ\text{C}$ の範囲で得られたものを冬季（水温低）のデータとして二つに分けて解析してきた。しかし、屋外で実験を行う場合には、外気温の影響を顕著に受けて冬季にはより低く、夏季にはより高い水温となるほか、

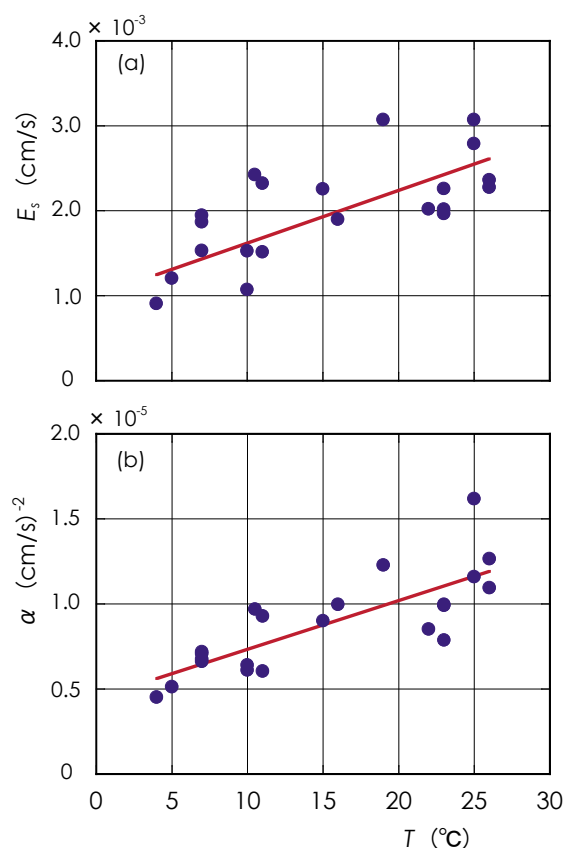


図-7：(a) 水温 T と浸食速度 E_s との関係、
(b) 水温 T と浸食速度式中の係数 α との関係

春・秋季にはその中間の値をとるなど上記の範囲を逸脱する条件となることがある。そこで、本研究では、これまでの室内実験結果に加えて、屋外実験装置を用いた系統的な実験を行い、得られた結果に基づいて「浸食速度と水温との関係」を新たに探ることとした。なお、実験データの採取に当たっては、室内ならびに屋外の実験とも水温を直接調節することはできず、実験に用いられる水が通常の水道水であることから、結果として水温が 5°C 程度の冬季から 25°C 程度の夏季までの範囲のデータを一年かけて採取することにした。

水温 T と浸食速度 E_s の関係を図-7(a)に示す。この図に示されたデータは図-6中のデータの中から以下の条件を満足するもののみ選んだものである。すなわち、摩擦速度 u_* の値を $7.49 \sim 7.77 \text{ cm/s}$ 、水含有率 R_{wc} を 0.75 、粘土含有率 R_{cc} を 1.0 とし、水温以外の支配要因を一定とした条件下で E_s と T の関係を調べた。この図より、水温 T が上昇するに伴い、浸食速度 E_s も増加する傾向にあることが見てとれる。また、図中には、最小自乗法による近似直線も描かれており、この浸食速度 E_s と水温 T との間の関係は、

$$E_s = 6.2 \times 10^{-5} T + 1.0 \times 10^{-3} \quad (1)$$

と近似されるようである。ただし、ここでは水温の影響のみに注目したが、屋外の実験の場合には、夏季の特に温度が高い日には供試体ならびに試験装置が直射日光に曝されるため、その影響が結果に現れることも予想される。水温が高い条件で得られたばらつきが相対的に大きいのは、ひとつにはこのようなことが原因であったと判断している。また、浸食深を計測するために排水を行っているが、このわずかな時間で粘着性土の表面に乾燥が生じることも考えられ、その場合には浸食速度が過小評価されることも確認されている。現地で浸食速度を計測する場合には、このような点について配慮する必要がある。

次に、この結果を基に、著者がこれまでに提案している浸食速度式¹⁾

$$E_s = \alpha \cdot R_{wc}^{2.5} \cdot u_*^3 \quad (2)$$

における比例係数 α と水温 T との関係について説明する。この結果を整理したのが図-7(b) である。係数 α は、水温 T や粘土の種類などに依存する係数であり、 $(\text{cm/s})^2$ の次元をもつ。ここでは、式(2)の関係から、実測された浸食速度 E_s の値を水含有率 R_{wc} の2.5乗、摩擦速度 u_* の3乗で除すことで係数 α の値を求めることとし、その結果を水温との関係で整理した。ここに示されているデータは図-7(a) に示されたものと同一であり、水温以外の他の要因の影響は無視できる。この図より、水温が上昇するに伴い、係数 α も増加する傾向があることがわかり、図の直線は、

$$\alpha(T) = 2.8 \times 10^{-7} T + 4.6 \times 10^{-6} \quad (3)$$

の関係満足する。

(3) 浸食速度式との比較

以上の結果から、浸食速度 E_s の実測値と式(2)による予測値とを比較した結果を図-8に示す。係数 α に関しては式(3)の関係を用いる。なお、図-8には、式(3)を導く際に用いたデータ以外のものも多数含まれている。図を見ると、屋外簡易実験の結果のうち水温が高い条件下で行われたものに関しては適合度が低いものの、両者は概ね良好な一致を見せているものと考えられる。

最後に、水温 T が高い場合に浸食速度 E_s あるいは係数 α のばらつきが相対的に大きくなる原因について考える。一般に粘土が外力を受けたときの挙動は、周囲の温度変化に対して非常に鋭敏である⁵⁾。本研究で想定しているような飽和状態にある粘着性土においては、粘土粒子と水との間に相互に電気的・物理化学的な力が発揮することで、粘着力を発現させている。そのため、粘土と水の温度が上昇すると、

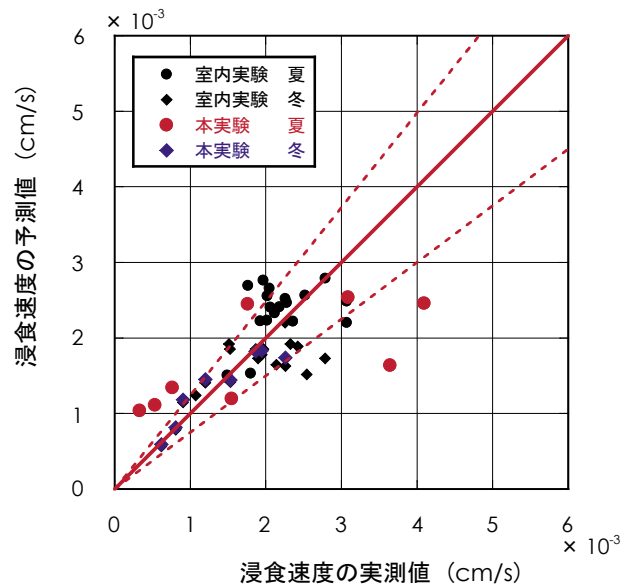


図-8 浸食速度の実測値と予測値の比較

分子の熱運動エネルギーが増大する結果、粘土粒子同士の接点の結合力が弱くなり、粘土粒子に外力が働いたときにそれに抵抗する力が弱くなると考えられる。本研究では、このような粘土の粘着力を定量的に評価することはできなかったものの、図-6および図-7の結果からは、粘着力が温度に依存して変化することを間接的に評価することができた。しかし、以上の点については今後も引き続き検討を続けていく予定である。

4. 結論と今後の課題

本論文では、試作した現地試験装置を用いて粘着性土の浸食実験を行い、その結果をこれまでの研究により得られた室内実験のデータと比較することで、試験装置ならびに試験方法の妥当性の検証を行った。また、浸食速度と水温との関係について新たに考察を加え、両者の間の関係を明らかにした。結果として、浸食速度予測式(2)に含まれる係数の温度依存性を考慮すると、算定された予測値と実測値がこれまで以上によく一致することが確かめられた。ただし、水温が高い夏季に行われた計測結果を見ると、他の水温下で得られたものに比べてばらつきが大きく、予測値との適合度が低下することも明らかになった。この点については今後の課題とする。

最後に、今後実河川のような水域で同様の計測を行うに先立って検討しておくべき課題について整理しておくことにする。

まず第一に、現地に設置した試験水路内の供試体表面に働く底面せん断力の評価についての問題が挙

げられる。通水によって現地の粘土が浸食されたとき、その表面にどのような形状の凹凸が現れ、その結果として流れ場がどのようになるかについての知見をあらかじめ得ておかなければならない。この粘着性土の浸食形態については、著者らによりこれまでに確認してきたものとは異なる規模あるいは形態となる可能性もあり、その際には浸食を受けた供試体表面の状況に応じて、摩擦速度を算出する際に用いる摩擦損失係数の値を定めなければならないと考える。

第二に、河川感潮域などのような水域においては、塩水による影響をどのように評価すべきかという問題がある。塩水中では、粘土粒子がフロックを形成して沈降するなど、淡水中とは異なる挙動を示す。また、水中や土中のイオン濃度が粘着性土に与える影響についての研究は未だ十分であるとは言えず、このことについての検討も必要であると認識している。

第三に、現地河川の土砂の粒度分布との関係で、粘土含有率をどのように評価すべきかという問題がある。著者らはこれまでに粘土含有率 R_{cc} が 40 ~ 80 % の範囲では、浸食速度がほぼ一定となることを見出してきた。また、混入させる砂の粒径の違いが浸食速度に及ぼす影響についての検討も行ってきた⁶⁾。しかしながら、粘土含有率 R_{cc} が 30% 未満である場合についての浸食速度の予測については、未だ確たる知見を持ち合わせていない。今後はこの点について明らかにしていくことが必要である。

第四に、現地河川に試験装置を設置することが困難であると判断された場合には、土砂と河川水のサンプルを取り、室内など別の場所で浸食実験を行うほかない。この場合には、土砂のサンプルの採取の仕方が重要となる。比較的固い土砂であればそれを

乱さずに採取することが可能であるが、軟らかい土砂を乱さずに採取することは困難となる。そのような土砂については、あらかじめ含水比や圧密の度合いなどの土質特性を調べた上で、実験水路内に同程度の状態の土砂を再現することが重要となる。

こうした点を踏まえて、今後も室内実験を通じて粘着性土の浸食のメカニズムの解明に努めるとともに、現地における効率の良い計測手法の確立を目指した研究を進め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.17560463) の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 関根正人, 樋口敬芳, 西森研一郎: 現地浸食試験装置を用いた粘着性土の浸食実験, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, pp.489-490, 2006.
- 3) 宇多高明, 望月達也, 藤田光一ほか: 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, 1997.
- 4) 関根正人, 西森研一郎, 安藤史紘: 粘着性土の浸食過程とそれに与える乾燥湿潤履歴の影響, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.937-942, 2004.
- 5) 村山朔郎: 土の力学的挙動の理論, 技報堂出版, 1990.
- 6) 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.

(2006. 9. 30 受付)