

# 流水の直接作用による 粘性土の浸食量式に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE EROSION VOLUME FORMULA  
OF COHESIVE SEDIMENT BY A DIRECT AGENCY OF WATER JET

吉川 泰弘<sup>1</sup>・阿部 孝章<sup>2</sup>・黒田 保孝<sup>3</sup>・佐々木 寿史<sup>4</sup>

Yasuhiro YOSHIKAWA, Takaaki ABE, Yasutaka KURODA and Hisashi SASAKI

<sup>1</sup>北見工業大学 (〒095-0015 北見市公園町 165)

E-mail: yoshi@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>2</sup>寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

<sup>3</sup>北海道開発局札幌河川事務所 (〒005-0032 北海道札幌市南区南 32 条西 8 丁目 2-1)

<sup>4</sup>水工リサーチ (〒062-0933 札幌市豊平区平岸 3 条 3 丁目 2 番 7 号)

**Key Words:** erosion volume, cohesive sediment, water jet, river bank, dimensional analysis

## 1. はじめに

平成23年9月の北海道十勝川水系音更川出水では、多くの箇所でも河岸浸食が発生した。十勝川との合流点から18.2km上流の地点(以下、KP18.2)では、堤防が一部流出した。桑村ら<sup>1)</sup>は、堤防の一部流出現象として、KP18.2の直上流の高水敷が洗掘されて流路が短絡し、KP18.2で大きな蛇行が発達して流れ方向が変化し、蛇行流の外岸部に位置する河岸が水衝部となって浸食され、堤体が一部流出したと推察している。また彼らは、KP18.2地点の河道断面形状の出水後の調査結果から、出水前は流路であった箇所に砂州が形成され、出水前は高水敷であった箇所に新たに流路が形成されていたことを明らかにしている。永多ら<sup>2)</sup>は、既往最大流量を記録した平成15年洪水では、今回のような流路変動が生じていないことに着目して、この原因について流量ハイドロに基づき考察を行っている。無次元限界掃流力となる流量 $180\text{m}^3/\text{s}$ の継続時間でみると、平成15年出水は11時間であったのに対して、平成23年出水は34時間であり、今回の出水は河床材料が動き易く、流路変動を引き起こし易い流量条件下にあったと指摘している。今回の堤防の一部流出現象の原因として、既

往研究<sup>1),2)</sup>から、過去の洪水に比べて洪水継続時間が長く、移動する河床材料の総量が多いため、内岸側に砂州が形成され、流れが流下方向から横断方向へと変化した。そのため、外岸側の河岸では、長時間、流水からの直接作用による浸食を受けて、堤防の一部が流出したと考えられる。

河岸浸食を再現する計算モデルとして、河床洗掘に伴う斜面崩落をモデル化した清水ら<sup>3),4)</sup>の既往研究がある。このモデルは、緩やかに蛇行する砂質河岸・河床材料を有する河道を対象としており、河岸近傍で河床が低下し、河岸の角度が限界角以上になった場合、限界角度を超える部分は瞬時に崩落し、河岸浸食が生じるというモデルである。旭<sup>5)</sup>や永多ら<sup>6)</sup>は、実河川を対象に斜面崩落モデルを用いた数値計算を実施しており、解析結果が格子に依存する等の課題もあるが、蛇行発達を一定程度再現できることを示している。

一方で、今回の音更川出水でみられた砂州形成によって流れが流下方向から横断方向に変化する現象では、流水が河岸に直接作用する。Hasegawa<sup>7)</sup>は、断面平均流速からの偏倚流速が河道外岸部に加わることによる蛇行形状の発達を論じている。また、破堤後の堤体横断面に流水が衝突する現象では、流水

が堤体に直接作用する。島田ら<sup>8)</sup>の越水破堤実験に基づく研究では、破堤進行過程を4つの過程に分類している。そのうち、第2、第3の過程では、流水が直接的に堤体横断面に衝突し、破堤幅が下流方向へと進むことを示しており、この過程で流水の直接作用が生じていると考えられる。このような河岸や堤体に対して流水が直角に衝突する場合の浸食機構については、十分には研究が実施されていない。

永多ら<sup>2)</sup>は、音更川 KP18.2 の堤防浸食箇所周辺の土質調査を実施している。この調査結果から、堤防の一部が流出した箇所の土質は、河床から堤防にかけて、砂礫、砂礫混じりシルト質砂(1962年以前の盛土)、玉石混じり砂礫(1974年以前の盛土)であり、堤防は、砂質シルト(2009年以前の盛土)であるとの調査結果を得ている。主に流水にさらされた土層は、砂礫混じりシルト質砂であり粘土分を含んでいる。また、本田ら<sup>9)</sup>の既往研究によると、粘土分を含有している堤体は粘り強く浸食速度が遅いことが示されている。

本研究の目的は、従来、十分に検討されてこなかった流水の直接作用による河岸浸食現象の把握および浸食量式の提案である。本研究で対象とした土質は、既往研究により、音更川の河岸に粘土分が含まれている<sup>2)</sup>こと、粘土分により浸食速度が異なる<sup>9)</sup>ことから、河岸の土質として粘性土に着目した。実河川の流域において粘性土を採取し、流水を直接的に衝突させて、粘性土の浸食量を測定した。次元解析により流水の直接作用を対象とした浸食量式を導出し、実験値との比較から本研究の浸食量式の妥当性を検討し、本式を用いて実河川を対象とした感度分析を実施した。

## 2. 粘性土の浸食実験

### (1) 粘性土の土質特性

浸食実験に使用した粘性土は、実際の流域に堆積している粘性土として、石狩川水系の千歳川近傍から採取した。採取した粘性土を粘性土 A と粘性土 B と呼称し、図-1 に土粒子の粒度試験(JIS A 1202-2009)により得られた粒径加積曲線を示す。粘性土 A では、礫分(2~75mm)0.0%、砂分(0.075~2mm)0.9%、シルト分(0.005~0.075mm)20.9%、粘土分(0.005mm未満)78.2%であり、最大粒径 0.85mm、コンシステンシー指数 0.48 であった。粘性土 B では、礫分 0.2%、砂分 11.2%、シルト分 25.5%、粘土分 63.1%であり、最大粒径 9.5mm、コンシステンシー指数 0.44 であった。図-1 より、粘性土 A の方が粘土分を多く含んで

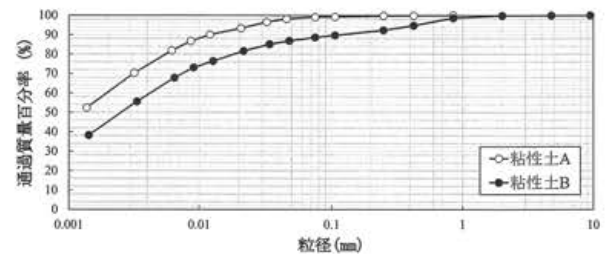


図-1 本実験に用いた粘性土の粒径加積曲線

表-1 本実験に用いた粘性土の土質特性

	粘性土 A	粘性土 B
土粒子密度 $\rho_s$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2674	2621
粘着力 $c$ [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]	5550	1550
含水比 $w$ [%]	70.0	73.9
粘土の質量百分率 $I_s$ [%]	78.2	63.1
水含有率 $R_{wc}$	0.90	1.17

いることが分かる。

表-1 に土質特性を示す。土粒子密度 $\rho_s$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]は、土粒子の密度試験(JIS A 1202-2009)により、粘性土 A で3試料の平均値、粘性土 B で3試料の平均値とした。粘着力  $c$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]は、一軸圧縮試験(JIS A 1216-2009)により一軸圧縮強さ $q_u$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]を求め、粘性土のため粘着力 $c = q_u/2$ として、各2試料の平均値とした。含水比 $w$ は、土の含水比試験(JIS A 1203-2009)により、各3試料の平均値とした。粘土の質量百分率 $I_s$ は、土の粒度試験(JIS A 1204-2009)結果を基に粘土(0.005mm未満)のみの質量百分率とした。水含有率 $R_{wc}$ については、西森・関根<sup>10)</sup>の既往研究で定義された値であり、「粘土の重量に対する含有水の重量の比率」である。粘土の質量 $m_c$ を、土粒子の質量 $m_s$ と粘土の質量百分率 $I_s$ を用いて表わすと、 $m_c = m_s \times I_s \div 100$ となる。また、含水比 $w$ は、水の質量 $m_w$ を用いると、 $w = m_w \div m_s \times 100$ である。水含有率 $R_{wc}$ は、定義上、 $R_{wc} = (m_w g) \div (m_c g)$ となるため、本研究では、 $R_{wc} = w/I_s$ として値を得た。

### (2) 浸食実験の方法

浸食実験の概要図を図-2に、実験状況を図-3に示す。本実験は、上方の給水管から試験体の上面(水平面)に流水を直接衝突させる実験である。衝突した流水は、試験体の外側に配置している水槽内に貯められる。このような実験方法とした理由を述べる。水流の洗掘に対する土の抵抗力を試験する方法として、既往の実験方法<sup>11),12)</sup>がある。この試験方法は、細粒の軽石や火山灰であるシラスを対象として考案された実験方法であり、試験体の鉛直面に流水を衝突させて土の抵抗力を測定する方法である。このため、試験体は、自立可能な硬度を有する必要がある。一

方、本実験では粘性土を対象としているため重力の影響により試験体の形状が変化する可能性があり、また、流水衝突後には重力の影響により試験体表面の上下左右に加わる流水の力が変化する。本研究では、現象解明の第一歩として現象を簡便に捉えるために、試験体の上面(水平面)に流水を衝突させる実験方法を考案した。

#### a) 試験体の製作方法

縦 30cm×横 30cm×高さ 5cm の木枠内において、1層 1cm として 1層 225 回の突き固めを行い、5層 5cm からなる試験体を製作した。1層 225 回の突き固め回数とした理由は、突き固めによる土の締め固め試験 (JIS A 1210) では、1層はモールドφ100mm の場合、1層あたり 25 回である。本実験では、この値を参考に、100mm×100mm で突き固め回数 25 回と考えると、試験体は 300mm×300mm であるため、25 回×9 面=225 回とした。本実験による突き固め方法は、浸食実験と一軸圧縮試験で同様の方法とした。なお、実験終了後の浸食範囲が、木枠内に収まるように大きさ(30cm×30cm)を決定した。

#### b) 流水の供給方法

この試験体の 25cm 上方の位置に、直径 2cm の円形の給水管を下方向に向けて設置した。桑村ら<sup>1)</sup>は、平成 23 年 9 月の十勝川水系音更川出水において、9 月 7 日 14 時に浮子観測を実施し、流速は 3.52m/s であったことを明らかにしている。本実験では、この値を参考にして、流速 3m/s の流水を下方向に放出させて、試験体の上面に対して直角に流水を衝突させた。給水管内の流況を安定させるために、給水管内に整流用としてヘチマロン(新光ナイロン株式会社、土木用、品番 230)を設置した。

#### c) 浸食量と浸食深の測定方法

1 時間毎に流水を木板で遮蔽し、試験体の水分を排除して、試験体の状況を確認し、浸食が確認された場合、試験体の重量を測定した。流水が木枠底部に達した場合も測定した。図-3 の右に示す木板は、45° の角度をつけて、流水を水槽の奥側に逃がすように設置した。水分の排除方法は、試験体の形状を乱さないように注射器を使用して水分を排除し、注射器で排除出来ないごく少量の水分については、スポンジを用いて排除した。浸食量は、試験体の重量の変化を基に測定した。なお、実験時の試験体の含水量は測定することが出来なかった。このため、本研究では、実験時の試験体の含水量の変化は、試験体の総重量に対して小さいと仮定し、無視して検討を進めている。面的な浸食状況を把握するため、図

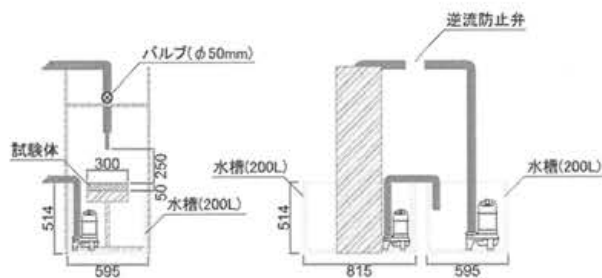


図-2 浸食実験の概要図(単位:mm)



図-3 実験状況

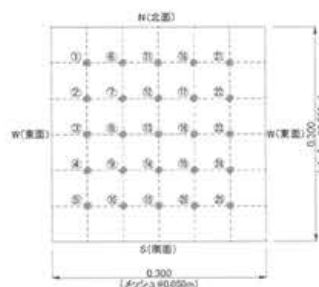


図-4 試験体のポイントゲージ測定箇所(単位:m)

-4 に示す試験体の水平面の 25 点において、ポイントゲージを用いて浸食深を測定した。

#### d) 流水の流速と断面積

給水管から試験体上面まで 25cm の距離がある。給水管直近の流速 3m/s、流水断面積 0.000314m<sup>2</sup> が、試験体上面でどのように変化しているのかを測定するために、事前に試験体上面位置での流水径を 4 方向で測定した。4 方向の測定値を平均すると、0.01888m であった。流水の断面積  $A[m^2]$  は、これらの平均値を用いて 0.000280 の値を得た。試験体上面での流水の流速  $u[m/s]$  は、2 次元電磁流速計、3 次元電磁流速計を用いて計測を試みたが、流れが速く流速計で測定できなかった。このため流量  $Q=0.9425L/s$  は一定と考慮して  $u=Q/A$  の関係式より、 $u=3.37m/s$  の値を得た。

### (3) 浸食実験結果

ポイントゲージによる最大浸食深  $D_m$ 、平均浸食深  $D_a$ 、 $D_a/D_m$  の値を、粘性土 A は図-5 に、粘性土 B は図-6 に示す。平均浸食深  $D_a$  は、25 点のデータの平均値である。

図-5 の粘性土 A では、最大浸食深が 13.8mm に達するのに 3 時間かかり、図-6 の粘性土 B では、最大

浸食深が 15.5mm に達するのに 1 時間かかっている。図-5 の粘性土 A では、最大浸食深が 43.9mm に達するのに 17 時間かかり、図-6 の粘性土 B では、最大浸食深が 50.0mm に達するのに 2 時間 17 分かかっている。最大浸食深と経過時間の結果から、粘性土 B は粘性土 A に比べて浸食速度が速いことが分かる。

広範囲で浸食されるのか、局所的に浸食されるのか比較するために、 $D_a/D_m$  = 平均浸食深  $D_a$  ÷ 最大浸食深  $D_m$  の値を用いた。 $D_a/D_m$  が大きいと広範囲で浸食され、 $D_a/D_m$  が小さいと局所的に浸食されていることを示す。図-5 の粘性土 A の  $D_a/D_m$  の値は、3 時間後 0.13、9 時間後 0.24、17 時間後 0.26 であり、浸食の範囲は、初期に比べて後期は、広範囲に浸食が進んでいることが分かる。図-6 の粘性土 B の  $D_a/D_m$  の値は、1 時間後 0.13、2 時間後 0.13、2 時間 17 分後 0.12 であり、浸食の範囲は、初期に比べて後期も変化していないことが分かる。

粘性土 B は、粘性土 A に比べて、 $D_a/D_m$  の値が小さく、局所的に浸食が進む結果であった。局所的に浸食が進み浸食速度が速い粘性土 B は、粘性土 A と比べて、表-1 より、粘着力が小さく、含水比が大きく、粘土の質量百分率が小さいことが分かる。

### 3. 粘性土の浸食量式の導出

次元解析により、流水の直接作用による粘性土の浸食量  $Q_{sv}$  [m<sup>3</sup>/s] を求める式の導出を試みた。本実験の結果を踏まえて、流水の直接作用による主な影響因子として、流水による力  $F$  [N]、粘着力  $c$  [N/m<sup>2</sup>]、土粒子密度  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>]、含水比  $w$  [%]、粘土の質量百分率  $I_s$  [%] に着目した。流水による力、粘着力、土粒子密度は独立変数とし、含水比と粘土の質量百分率は水含有率  $R_{wc}$  で代表させて係数  $K$  として考慮した。

浸食量  $Q_{sv}$  は、基本物理量を質量  $M$ 、長さ  $L$ 、時間  $T$  とし、係数を  $K$  とすると次式となる。

$$Q_{sv} = K \times M^0 \times L^3 \times T^{-1} \quad (1)$$

独立変数は、それぞれ次式となる。

$$F = M^1 \times L^1 \times T^{-2} \quad (2)$$

$$c = M^1 \times L^{-1} \times T^{-2} \quad (3)$$

$$\rho_s = M^1 \times L^{-3} \times T^0 \quad (4)$$

$Q_{sv}$  は  $F$ 、 $c$ 、 $\rho_s$  のべき乗の積で表されると仮定し、各物理量のべき指数を  $x$ 、 $y$ 、 $z$  とすると、 $Q_{sv}$  は次式で表される。

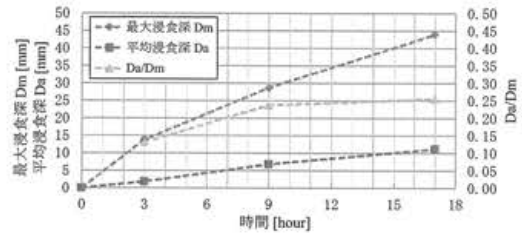


図-5 粘性土 A における最大浸食深  $D_m$ 、平均浸食深  $D_a$

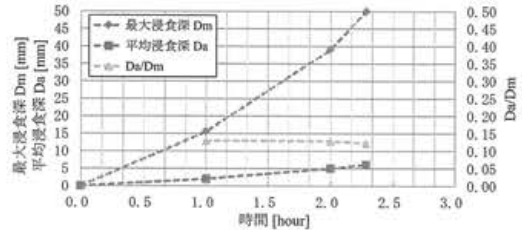


図-6 粘性土 B における最大浸食深  $D_m$ 、平均浸食深  $D_a$

$$Q_{sv} = K \times F^x \times c^y \times \rho_s^z \quad (5)$$

式(5)に式(2)、(3)、(4)を代入した式と、式(1)より、 $x = 1$ 、 $y = -0.5$ 、 $z = -0.5$  が得られる。これらの値を式(1)に代入すると、 $Q_{sv}$  は次式となる。

$$Q_{sv} = \frac{K \times F}{\sqrt{\rho_s \times c}} \quad (6)$$

$F$  [N] は、運動量保存則を適用すると次式となる。なお、 $F$  [N] は、試験体上面における力である。

$$F = \rho_w \times A \times u^2 \quad (7)$$

流水の密度  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] については、水温によって値が変化する。実験時の平均の水温は、粘性土 A で 13°C、粘性土 B で 8°C である。これらの水温に応じた水の密度は、粘性土 A で 999.34、粘性土 B で 999.82 である。なお、流水中に微細な土砂や浮遊砂が含まれている場合は、流水の密度は大きく、流水による力  $F$  [N] は大きくなり、結果として浸食量は大きくなることが推察できる。

式(6)の係数  $K$  は、以下のように与えた。西森・関根<sup>10)</sup>は、アクリル製循環閉水路の水路底部に粘性土を設置し、その上部に水を流すことにより生じる浸食現象を対象に研究を実施しており、「カオリン粘土に対する浸食速度」は、係数  $\alpha$ 、水含有率  $R_{wc}$  の 2.5 乗、摩擦速度  $u^*$  の 3 乗に比例するという有益な知見が得られている。本研究では、この知見を援用して、式(6)の係数  $K$  を次式で与えた。

$$K = \alpha \times R_{wc}^{2.5} \quad (8)$$

係数 $\alpha$ については、西森・関根<sup>10)</sup>は、粘着性土の浸食速度と水温の関係について、浸食速度が水温に比例してゆるやかに増加することを実験結果から明らかにしており、この関係を次式で表している。

$$\alpha = 3.3 \times 10^{-7} \times T + 5.8 \times 10^{-6} \quad (9)$$

ここで、水温 $T$ [°C]である。本実験における平均水温は、粘性土 A で 13°C、粘性土 B で 8°C であり、式(9)に代入すると、係数 $\alpha$ は、粘性土 A で  $1.0 \times 10^{-5}$ 、粘性土 B で  $0.8 \times 10^{-5}$  であった。

本実験方法の試験体に作用する浸食現象は、試験体表面に対して鉛直方向では「流水の直接作用による浸食」が発生し、試験体表面に対して水平方向では「底面せん断力による浸食」が発生する。「底面せん断力による浸食」については、西森・関根<sup>10)</sup>による次式の浸食速度式を用いて算出を試みた。

$$E_{sh} = \alpha \times R_{wc}^{2.5} \times u^{*3} \quad (10)$$

浸食速度 $E_{sh}$ [m/s]である。摩擦速度 $u^*$ [m/s]は、水平方向の流速 $u_h$ [m/s]、マンシングの粗度係数 $n$ [s/m<sup>1/3</sup>]、重力加速度 $g$ [m/s<sup>2</sup>]、水深 $h$ [m]とすると、 $u^* = u_h \times n \sqrt{g} \div h^{1/6}$ となる。本実験では、これらの値を測定出来なかったため、以下の仮定を設けて検討を進めた。 $u_h$ は、流水と試験体表面の摩擦を無視すれば、速度の方向は変化するが大きさは不変であり試験体衝突直前の流速と等しくなるため 3.37m/s とした。 $n$ は、試験体表面の初期状態は平坦であるため 0.01 s/m<sup>1/3</sup> とした。 $h$ は、流量を流速と流水衝突部の円周で割った値として 4.7mm とし、水平方向の浸食範囲は実験終了後の浸食範囲を参考に直径 10cm とし、水平方向の浸食量 $Q_{sh}$ を参考値として算出した。

浸食の総量 $Q_s$ を、 $Q_{sv}$ と $Q_{sv} + Q_{sh}$ に分けて考えて、図-7 に浸食の総量の実験値と計算値を示す。 $Q_{sh}/(Q_{sv} + Q_{sh}) \times 100$ で見ると、平均して 11% であった。 $Q_{sh}$ は全体に対して小さく、参考値であるため、本研究では、以後、 $Q_{sv}$ に着目して検討を進めた。

式(6)の $Q_{sv}$ のみを対象とした平均絶対誤差(MAE)は、粘性土 A で 49g、粘性土 B で 132g であり、計算値は実験値を良く再現した。また、粘性土 A および粘性土 B の浸食の総量の誤差が最小となるように、係数 $\alpha$ を試行錯誤により検討した。 $\alpha = 1.1 \times 10^{-5}$ とした場合の平均絶対誤差(MAE)は、粘性土 A で 69g、粘性土 B で 69g であった。式(6)の計算値は、実験値を良く再現していることから、式(6)を踏まえ、浸食量 $Q_{sv}$ が大きくなる条件として、係数 $\alpha$ 、水含有

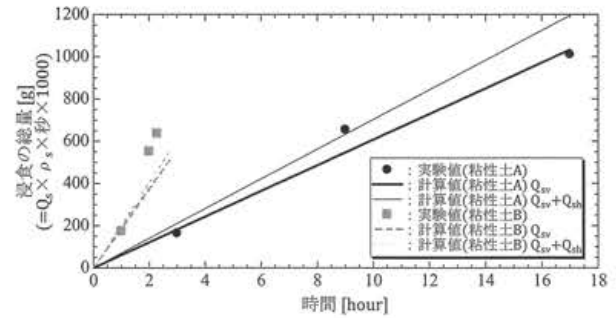


図-7 浸食の総量の実験値と計算値

率 $R_{wc}$ 、流速 $u$ が大きく、土粒子密度 $\rho_s$ 、粘着力 $c$ が小さい条件であることが分かる。

#### 4. 粘性土の浸食量式の感度分析

##### (1) 感度分析に用いる浸食速度式

流水の直接作用による浸食量式を基にして、実河川を対象とした感度分析を行った。式(6)、式(7)、式(8)を整理すると次式となる。

$$Q_{sv} = \frac{\alpha \times R_{wc}^{2.5} \times \rho_w \times A \times u^2}{\sqrt{\rho_s \times c}} \quad (11)$$

ここで、浸食面積 $A_{sv}$ [m<sup>2</sup>]、浸食速度 $E_{sv}$ [m/s]として、 $Q_{sv} = A_{sv} \times E_{sv}$ として表す。本研究では簡便のため、浸食面積 $A_{sv}$ と流水断面積 $A$ が等しいと仮定して、式(11)の両辺を面積で割ると、流水の直接作用による浸食速度式は次式となる。

$$E_{sv} = \frac{\alpha \times R_{wc}^{2.5} \times \rho_w \times u^2}{\sqrt{\rho_s \times c}} \quad (12)$$

桑村ら<sup>11)</sup>は、平成 23 年 9 月音更川出水において、全川にわたる河岸浸食を対象に、流路の短路による河岸浸食を除いた場合の浸食幅を整理している。この結果、河川横断方向の最大の浸食幅は 80m であったことを示している。一方で、永多ら<sup>2)</sup>は、無次元限界掃流力となる流量 180m<sup>3</sup>/s の継続時間に着目し、平成 23 年 9 月音更川出水では 34 時間であることを示している。感度分析時の一つの基準値として、浸食幅 80m、継続時間 34 時間を採用した。浸食幅の計算値は、式(12)の浸食速度式に時間を乗じて求めた。

##### (2) 感度分析の土質特性の条件

土粒子密度 $\rho_s$ は一般値として $\rho_s = 2600\text{kg/m}^3$ を与え、粘土の質量百分率 $I_s$ は、永多ら<sup>2)</sup>による堤体での河床材料調査結果の図から読み取り、 $I_s = 10\%$ の値

とした。含水比 $w$ および粘着力 $c$ は、観測値がないため、既往文献<sup>13)</sup>を参考に決定した。既往文献<sup>13)</sup>によると、堤体土は、大まかに「粘性土」、「砂質土」、「礫質土」に分類される。音更川 KP18.2 の堤体での河床材料調査結果より、「砂質土」と判断できる。既往文献<sup>13)</sup>から、「砂質土」の場合、含水比 $w$ は $w=10\% \sim 30\%$ である。粘着力 $c$ については、 $c=0 \sim 5000\text{N/m}^2$ の範囲が多いことが示されている。本検討では、含水比 $w$ は、 $w=20\%$ 、 $w=30\%$ の2ケース、粘着力 $c$ は $c=1000\text{N/m}^2$ 、 $c=3000\text{N/m}^2$ 、 $c=5000\text{N/m}^2$ の3ケースを設定した。係数 $\alpha$ は、本実験において誤差が最小であった $\alpha=1.1 \times 10^{-5}$ を用いた。式(9)の水温に換算すると $15.8^\circ\text{C}$ である。流速については、桑村ら<sup>1)</sup>による平成23年9月の十勝川水系音更川出水の浮子観測の観測流速 $3.52\text{m/s}$ を参考にして、横断方向の流速として、 $u=1.0\text{m/s}$ 、 $u=1.5\text{m/s}$ 、 $u=2.0\text{m/s}$ 、 $u=2.5\text{m/s}$ 、 $u=3.0\text{m/s}$ の値を与えた。流水の密度 $\rho_w$ は一般値として $\rho_w=1000\text{kg/m}^3$ を与えた。

### (3) 感度分析結果

感度分析結果を整理すると、粘着力 $c$ が小さいほど、流速 $u$ 、含水比 $w$ 、水含有率 $R_{wc}$ が大きいほど、河川横断方向の浸食幅は大きい結果であった。

平成23年9月音更川出水の最大浸食幅に最も近い条件(含水比 $w=30\%$ 、粘着力 $c=1000\text{N/m}^2$ 、横断方向流速 $u=2.5\text{m/s}$ )を図-9に示す。本検討は、現地データが無い場合推定値を代入した結果である。一方で、34時間後の実河川での浸食幅は $80.0\text{m}$ に対して、本式の計算値は $79.5\text{m}$ であり、良く一致していることから、今後、現地データを与えることにより、本式を実河川へ適用できる可能性が示された。

## 5. まとめ

粘性土を対象として、試験体上面に直角に流水を衝突させる実験を実施し、流水の直接作用による粘性土の浸食量を測定した。局所的に浸食が進み浸食速度が速い土質特性として、粘着力 $c$ が小さく、含水比 $w$ が大きくなり、粘土の質量百分率 $I_s$ が小さいことが分かった。

次元解析により流水の直接作用による浸食量式を導出した。本式の妥当性は、実験値との比較から確認した。本式を用いた感度分析より、河川横断方向の浸食幅が大きくなる条件として、粘着力 $c$ が小さく、含水比 $w$ 、横断方向の流速 $u$ 、水含有率 $R_{wc}$ が大きいことを示した。本式に実河川の現地データを与えることにより、適用できる可能性を示した。

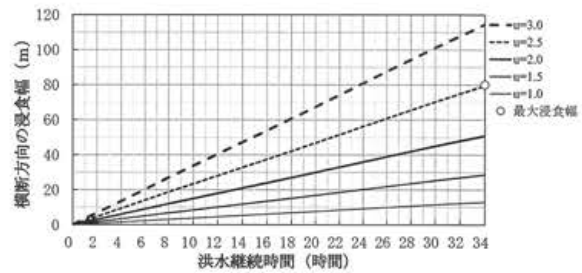


図-9 各流速の浸食幅 ( $w=30\%$ 、 $c=1000\text{N/m}^2$ )

謝辞：本研究は、公益財団法人河川財団の運用する河川基金の助成を受けて実施しました。記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 桑村貴志, 河合崇, 永多朋紀：音更川における堤防流出の原因分析, 平成24年度国土交通省国土技術研究会, 一般部門, 安全・安心, 2012.
- 2) 永多朋紀, 柿沼孝治, 桑村貴志：音更川の河道変遷と蛇行特性について, 寒地土木研究所月報, No.706, pp.2-11, 2012.
- 3) 清水康行, 平野道夫, 渡邊康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, Vol.40, pp.921-926, 1996.
- 4) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工学論文集, Vol.47, pp.643-648, 2003.
- 5) 旭一岳：河岸侵食と河道の陸地化を考慮した河道形状追跡モデルの開発研究, 北海道大学, 博士論文, 乙第6938号, 2004.
- 6) 永多朋紀, 渡邊康玄, 安田浩保, 伊藤丹, 桑村貴志：低水路河岸の平面形状に誘発された蛇行発達, 寒地土木研究所月報, No.721, pp.2-11, 2013.
- 7) Hasegawa, K.: Universal Bank Erosion Coefficient for Meandering Rivers, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 115(6), pp.744-765, 1989.
- 8) 島田友典, 横山洋, 平井康幸, 三宅洋：千代田実験水路における氾濫域を含む越水破堤実験, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.I\_841-I\_846, 2011.
- 9) 本田隆英, 織田幸伸, 伊藤一教, チャトラ マナワセカラ, 中村友昭：盛土材料に着目した津波越流に対する海岸堤防の粘り強さに関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I\_859-I\_864, 2015.
- 10) 西森研一郎, 関根正人：粘着性土の浸食過程と浸食速度式に関する研究, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.2, pp.127-140, 2009.
- 11) 土木試験法(第2回改訂版): 社団法人 土質工学会, pp.7-4-18, 1979.
- 12) 山口嘉, 小川直樹, 川崎将生, 中村昭：簡易試験によるダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性の評価, 応用地質, Vol.38, No.3, pp.130-144, 1997.
- 13) 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント：国立研究開発法人土木研究所, 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム, 平成25年6月版, 2013.

(2016. 5. 31 受付)