

粘性土河岸の侵食量評価法の提案

PROPOSAL OF PREDICTION METHOD OF THE EROSION WIDTH OF COHESIVE BANKS BY FLOOD FLOW

末次忠司¹・服部敦²・板垣修³・榎本真二⁴

Tadashi SUETSUGI, Atsushi HATTORI, Osamu ITAGAKI and Shinji ENOMOTO

¹正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室長
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 ダム研究室 主任研究官(同上)

³正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 主任研究官(同上)

⁴工修 (株)ウエスコ 技術部(〒651-0092 神戸市中央区生田町2-2-2 元河川研究室交流研究員)

To study the prediction method of the erosion width of cohesive banks by flood flow, field survey at the Kokai River is conducted. According to the result, the relation between the erosion width of bank and the characteristics of flood flow was analyzed. Basing on this result and past studies, we made a proposal of the method to predict the erosion width of bank. The method that we recommended is calculation method of the erosion width from 3 factors such as the tensile break stress of cohesive soil, the fourth power of shear velocity and its working time.

Key Words : cohesive soil, erosion, tensile break stress, shear velocity, working time, Kokai River

1. はじめに

本研究の目的は、河川環境面からの川らしさに配慮して流路の変動を許容する河川管理に資するため、この環境面と治水面(侵食被害を発生させない)との折り合いを保ちながら堤防防護ライン・低水路河岸管理ライン¹⁾を設定するとともに低水路を管理するための粘性土河岸の侵食量評価法の提案である。

本研究では利根川水系小貝川の距離標49.2km付近の粘性土河岸(左岸)に設定した延長約200mの調査箇所(図-1)における河岸侵食について把握するとともに、同調査結果と既往の研究成果に基づき粘性土河岸の侵食量評価法を提案した。

本研究で提案する侵食量評価法は、河岸の粘性土の引張破壊応力、河岸に作用する正時摩擦速度の4乗の累加値(近似的な時間積分値)から河岸侵食量を評価するものであり、例えば、河床掘削等により将来の縦横断形状が大幅に変化する河道などにおいても適切に河岸侵食量を評価することが可能であると考えられる。

2. 研究の概要

上記調査箇所について、1963～1999年の航空写真及び1966～2002年の定期横断測量結果を収集し河岸侵食状況(以下「長期間の河岸侵食状況」)を整理した。

また、1998年以降現地調査として河岸侵食測量(河岸に基準杭(流下方向に約25m間隔で下流からA-1～A-9, A-2～A-3に約2.5m間隔で下流からB-1～B-9, A-3～A-4に

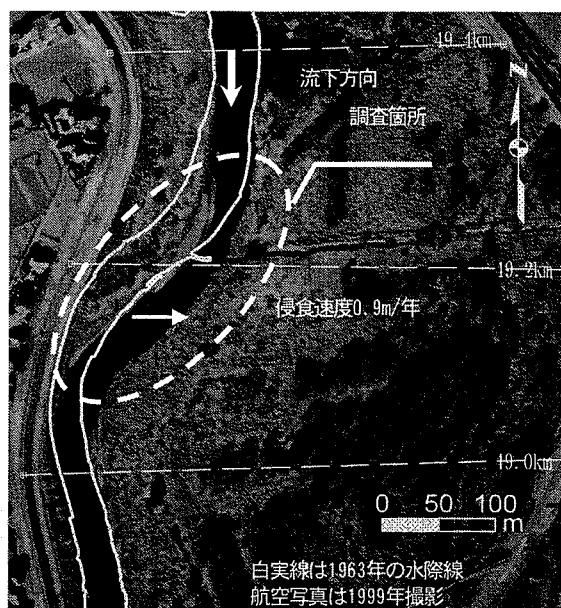


図-1 調査箇所の概要

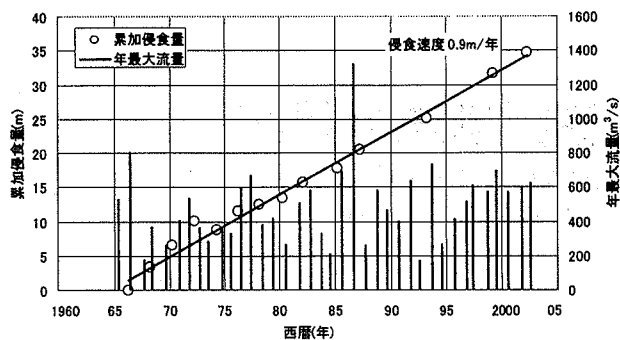


図-2 河岸侵食量と年最大流量との関係

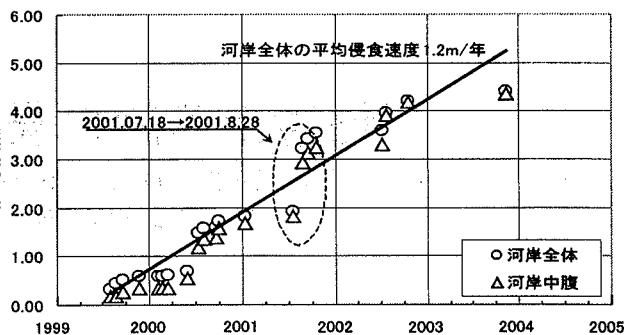


図-4 河岸侵食測量結果から求めた河岸侵食量 (A-5測線)

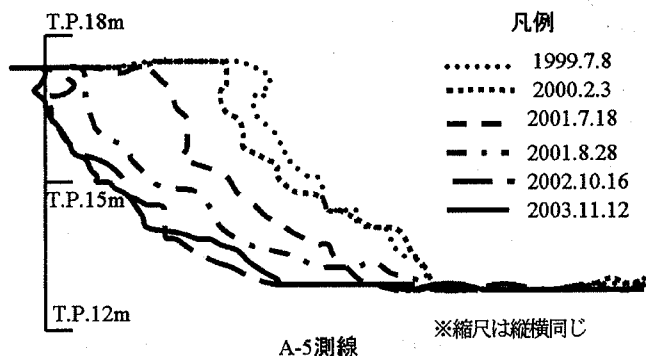


図-3 河岸侵食測量結果

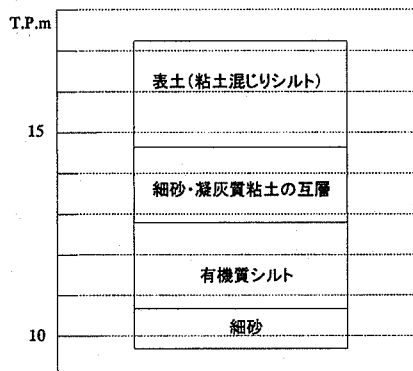


図-5 河岸土質構成調査結果 (B-17測線)

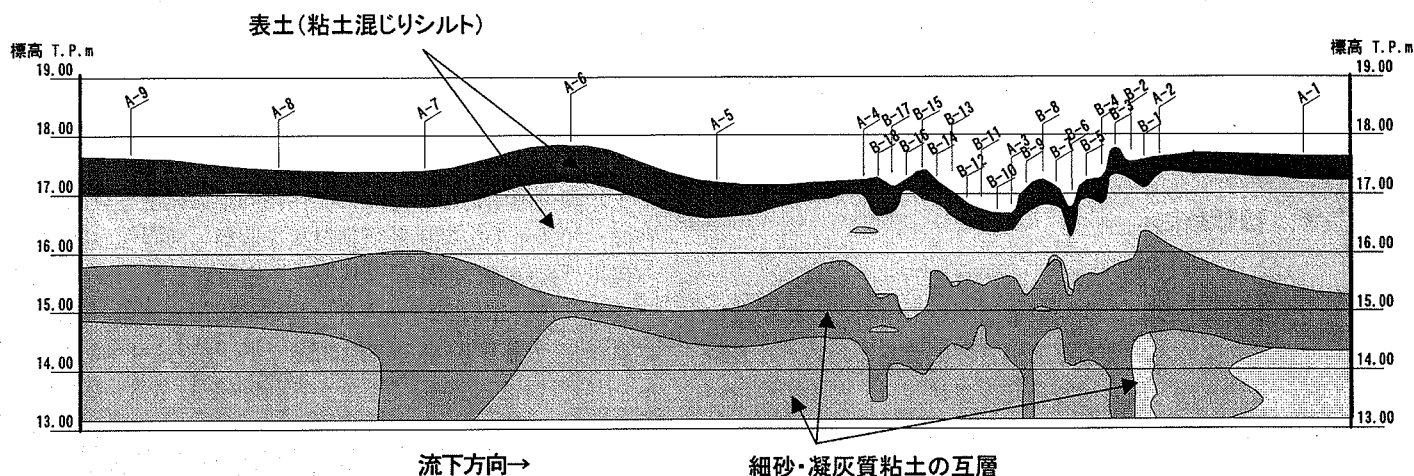


図-6 河岸面観察結果 (2002年)

同B-10～B-18 (図-6)) を設置し主要出水後に河岸の横断形状を測量) , 河岸土質構成調査 (河岸近傍で土質ボーリング (シンウォールサンプリング) 等を行い地層別に土質試験を実施) , 河岸面観察 (河岸侵食面の地層等を年1回記録) , 土塊調査 (河岸法尻に堆積した土塊の位置・形状等を調査) 及び水位観測 (調査箇所上下流の低水路内に2箇所ダイバー式水位計を設置) を行った。さらに、調査箇所上流の黒子観測所 (同観測所と調査箇所との間に大きな支川の流入等はない) における流量データを収集し、調査箇所周辺の平面二次元流解析等 (河岸侵食測量期間を対象) を行い流速、河岸近傍の摩擦速度等を算出し、出水特性を表す指標 (ピーク流量等) と河岸侵食量との相関分析を行い相関の強い指標の抽出を行った。

そして最後に上記分析結果と既往の研究成果を活用することにより粘性土河岸の侵食量評価法を提案した。

3. 長期間の河岸侵食状況

航空写真から求めた低水路の平面形状の変化を図-1に、定期横断測量結果から求めた河岸侵食量と年最大流量との関係を図-2に示す。図-2より年最大流量は大きくばらついているのに対し、累加侵食量 (定期横断測量結果の重ね合わせにより求めた河岸侵食量を累加したもの) はほぼ一定の速度で増加しており、年最大流量と河岸侵食量との間に相関は認められない。ただし、上記測量は2～6年間隔で実施されていることから、同図は概略の傾

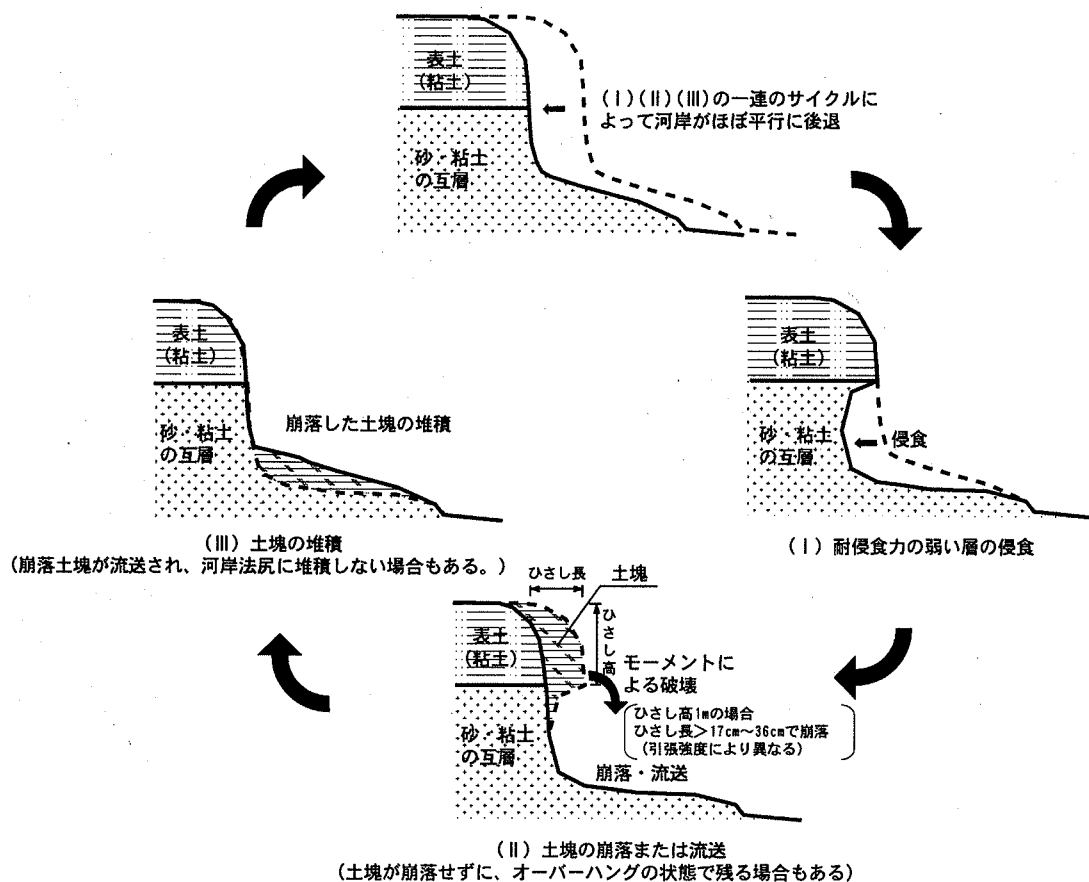


図-7 調査箇所の侵食過程

向のみを示しているものと考えられる。

4. 現地調査結果

河岸侵食測量結果(調査箇所中央付近のA-5測線のもの)を図-3, 同結果から整理した河岸侵食量の経年変化を図-4(図中「河岸全体」は低水路河岸肩～法尻の平均侵食量, 「河岸中腹」は細砂・凝灰質粘土の互層のみの平均侵食量), 河岸土質構成調査結果(上記A-5測線に最も近いB-17測線のもの)を図-5, 河岸面観察結果(2002年)を図-6に示す。

なお, 低水路河岸中腹に位置する細砂・凝灰質粘土の互層は, 粘性土の引張破壊応力(σ_{tb})が表土(粘土混じりシルト)及び有機質シルトより小さいため最も侵食されやすい層であると考えられる³⁾(細砂・凝灰質粘土の互層の粘土部分の最小の σ_{tb} は86kgf/m², 表土(粘土混じりシルト)は同123kgf/m², 有機質シルトは同157kgf/m²)。

図-4より河岸全体の侵食速度は, 河岸中腹の侵食速度とほぼ同じであることが見てとれる。

これは, 図-7に示すとおり出水中に細砂・凝灰質粘土の互層がまず侵食され, 支えを失った表土(粘土混じりシルト)が崩落することを繰り返して河岸が後退してい

るためと考えられ, 細砂・凝灰質粘土の互層の侵食量を評価することができれば河岸全体の侵食量を評価することができることを示しているものと考えられる。なお, 土塊調査により河岸法尻の土塊と表土(粘土混じりシルト)の土質はほぼ同じであることを確認している。

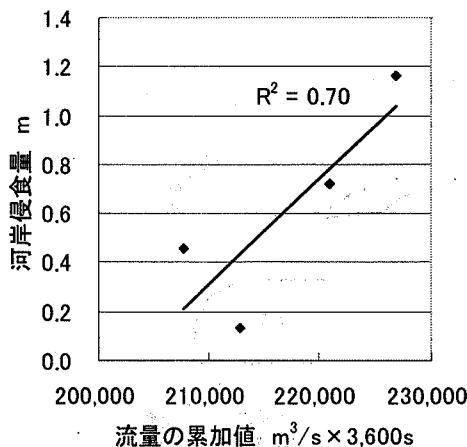
また, 図-4より2001年7月18日～同8月28日の侵食量了他時期に比べて大きいことが見てとれ, 河岸侵食速度は一定ではなく出水特性により変化することが示唆される。

5. 河岸侵食量と出水特性との関係

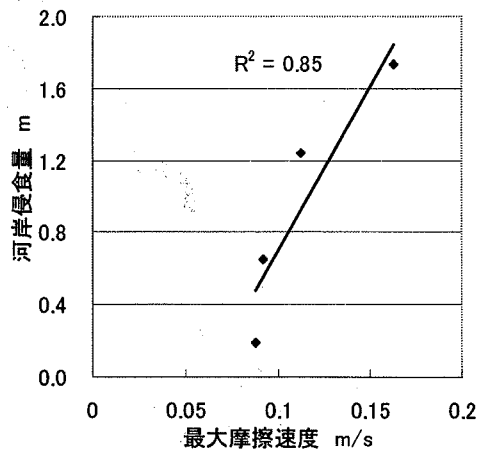
河岸侵食測量結果から求めた河岸侵食量と出水特性との関係について次のとおり相関分析を行った。

相関分析に先立ち調査箇所上流の黒子観測所における流量データを収集し, 調査箇所周辺の平面二次元流解析(高水敷の地形・植生データが十分には得られていないことなどから低水路内の流況のみを対象に解析することとし河岸肩付近に仮定の壁を設置)等を実施し低水路内の平均流速, 河岸の摩擦速度等を算出した。

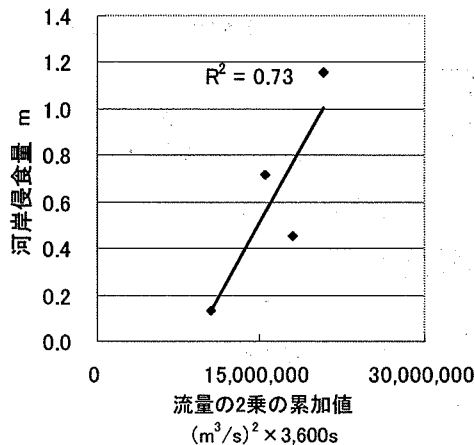
なお, 相関分析は年間の河岸侵食量を対象として行っているが, これは, より細かい期間(主な出水(年1～8回生起)間)の河岸侵食量を対象とした相関分析を行ったところ相関係数の2乗(R^2)が小さくなり, 相関の強さの比較を行うには不適当であると判断したためである



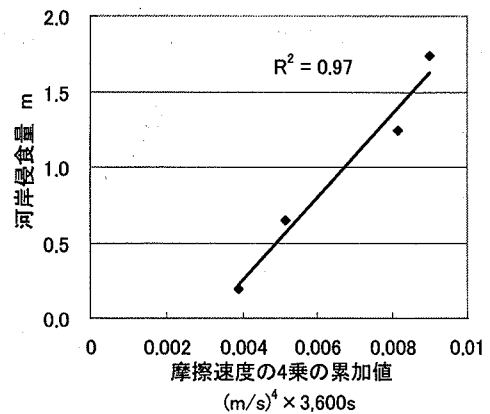
(1) 正時流量の累加値との関係



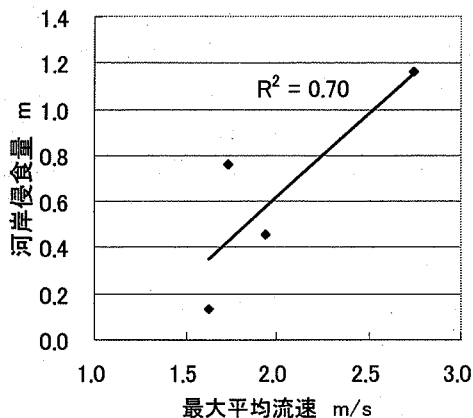
(4) 最大摩擦速度との関係



(2) 正時流量の2乗の累加値との関係



(5) 正時摩擦速度の4乗の累加値との関係



(3) 最大平均流速との関係

図-8 各指標と河岸侵食量との関係

(粘性土河岸の侵食量は一般に小さいため誤差等の影響が大きくなったためと考えられる)。

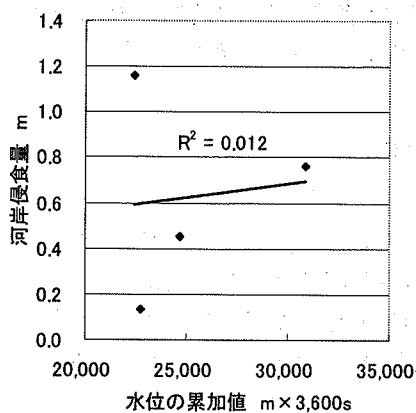
出水特性を表す指標としてはピーク流量(年最大流量)、正時流量(毎正時の黒子観測所における流量)の累加値(近似的な時間積分値)、正時流量の2乗の累加値、最高水位、正時水位の累加値、(低水路内の)最大平均流速、同平均流速の累加値、(河岸の細砂・凝灰質粘土の互層の位置における)最大摩擦速度、同正時摩擦速度の累加値、同正時摩擦速度の4乗の累加値及び同3乗

の累加値を選定し、2000～2003年の4箇年のデータにより河岸侵食量との相関について各分析を行った。

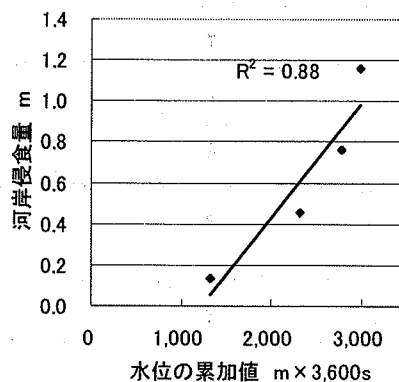
なお、ダイバー式水位計の設置高さがT.P.15m弱であることからT.P.15mを下まわる水位データの信頼性が低いため、水位データ(水位データを利用して算出する平均流速及び摩擦速度を含む)についてはT.P.15m未満のデータを除いている。

分析の結果、正時流量の累加値、正時流量の2乗の累加値、最大平均流速、最大摩擦速度及び正時摩擦速度の4乗の累加値の5指標が河岸侵食量と相関の強い(R^2 が0.7以上)指標として抽出された(図-8)。なお、ピーク流量については相関が強いとは認められず、3.で述べた傾向を裏づける結果となった。

また、低水位時には細砂・凝灰質粘土の互層の高さの河岸が水面上に露出していることから全ての水位における流量等を累加することは同層に作用する外力の観点から不適当であると考えられるため、下限水位を設定する(下限水位以下の水位における流量等を累加値に算入しない)ことにより相関が強まるかどうか分析を行ったところ、一部の指標(正時水位の累加値等)で下限水位を低水路満杯程度(T.P.17m程度)とすることにより著しく相関が強まった(図-9)。



(1) 下限水位T.P. 15m



(2) 下限水位T.P. 17m

図-9 下限水位の違いによる相関の変化 (正時水位の累加値と河岸侵食量との関係における例)

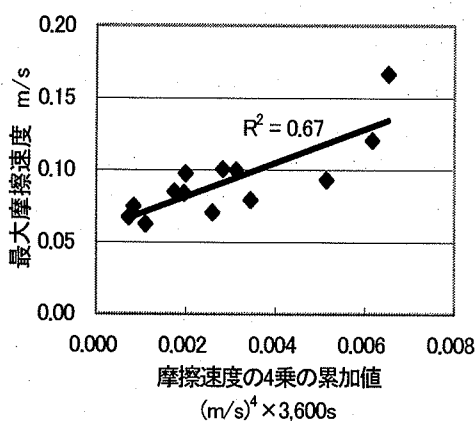


図-10 摩擦速度の4乗の累加値と最大摩擦速度との関係

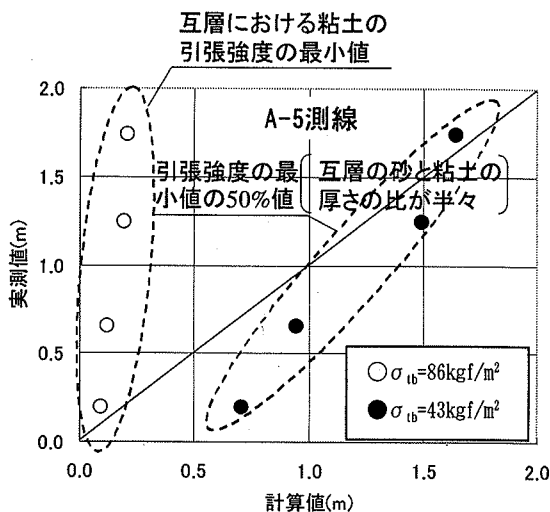


図-11 計算値と実測値との比較

6. 考察

河岸侵食量と強い相関が認められた上記5指標のうち、正時流量の累加値及び正時流量の2乗の累加値は支川の合流等がない限り流下方向に一定であるため、河道の平面形状 (曲率半径等) の違い等による影響を評価できないものと考えられる。

また、最大平均流速及び最大摩擦速度は外力の作用時間の概念が入っていないため理論的に説明しづらいものと考えられる。

したがって、河道の平面形状の違い等による影響を評価できるとともに外力の作用時間の概念が含まれている正時摩擦速度の4乗の累加値が、河岸侵食量を評価する上で最も妥当な指標であると結論づけられる。

なお、正時摩擦速度の4乗の累加値と残りの4指標との相関分析を行い、比例関係が認められることを確認している (図-10)。

また、粘性土の侵食に関する既往の研究²⁾で提案されている侵食速度を評価する式等における摩擦速度の次数は1~10であり、本研究で得られた次数4はこの範囲に

入っている。

本研究における摩擦速度 (最大0.2m/s程度) は上記既往研究の中では大きい部類に入るが、同程度の摩擦速度を対象とした研究で侵食速度を評価する式等における摩擦速度の次数を明記しているのは宇多等³⁾のみであり、同研究で提案された次数は4と本研究で得られた次数と一致している。

なお、関根・西森⁴⁾、梅田・石川・高⁵⁾は同次数として各3, 2を提案しているが、両研究は液性限界を超える軟弱な粘性土を対象としており、本研究で対象とした河岸を構成する (自立する) 粘性土とは異なる特性を示すものと考えられるため特に矛盾しないものと考えられる。

7. 粘性土河岸の侵食量評価法の提案

宇多等³⁾によれば、実験より求めた侵食速度と摩擦速度との関係は次のとおりになる。

$$E/(\sigma_{ib}^{0.5}/\rho^{0.5}) = C(\rho u_*^2/\sigma_{ib})^2$$

ここで、E: 侵食速度 [m/s]

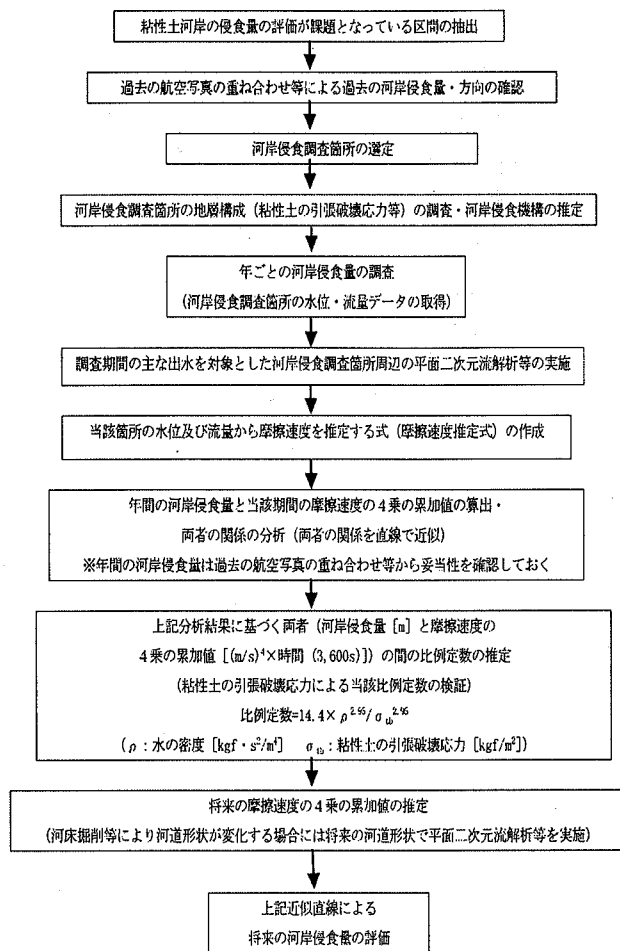


図-12 粘性土河岸の侵食量評価法

σ_{ib} : 粘性土の引張破壊応力 [kgf/m²]

ρ : 水の密度 [kgf・s²/m⁴]

C : 係数

u_* : 摩擦速度 [m/s]

また、 $C=4.0 \times 10^{-3} ((\sigma_{ib}/\rho)^{0.5})^{-2.9}$

上式を本調査箇所に適用すると大幅に小さな河岸侵食量となる（図-11）が、これは、互層の粘性土部分の σ_{ib} の最小値（86kgf/m²）をそのまま代入しているためと考えられる（互層の砂部分の引張破壊応力はゼロであり、粘性土と砂等の互層を代表する（平均的な）引張破壊応力は粘性土部分の σ_{ib} よりも明らかに小さくなるものと考えられるため）。

ここで、上記互層における粘性土層の占める割合はおおむね50%程度である（河岸土質構成調査結果より）ため、粘性土部分の σ_{ib} の50%を互層を代表する σ_{ib} として試算すると実測値とおおむね一致した（図-11）。

したがって、上記関係式と本研究成果を活用し図-12のとおり粘性土河岸の侵食量評価法を提案する（侵食量を評価する河岸の土質が現在の河岸の土質から著しく変化することが想定される場合（河床掘削により従来河岸でなかった（著しく異なる）地層が新たに河岸となる場合など）については末次等⁶⁾ 参照）。なお、本評価法の

適用範囲は宇多等³⁾の実験範囲より u_* で約0.7m/s以下、 σ_{ib} で8～768kgf/m²程度と考えられる。

8. まとめ

本研究で得られた主な知見は下記のとおりである。

- ① 今回対象とした粘性土河岸においては、流水により比較的侵食されやすい中間の層がまず侵食され、同層の侵食により支えを失った上部の層が崩落し、流送されることを繰り返して河岸侵食が進むものと考えられる（比較的侵食されやすい中間の層の侵食量を評価できれば河岸全体の侵食量を評価できる）。
- ② 同河岸の侵食量と作用する正時摩擦速度の4乗の累加値等との間に強い相関が認められた。
- ③ 同侵食量とピーク流量との間には強い相関は認められなかった（年最大流量から河岸侵食量を評価することは困難）。
- ④ 粘性土河岸の侵食量と出水による外力との関係の分析は年間値等を対象に行うべきである（一般に河岸侵食量が小さいため誤差等の影響が大きくなるため）。

また、上記知見と既往の研究成果を活用することにより、河岸の粘性土の引張破壊応力、河岸に作用する正時摩擦速度の4乗の累加値から粘性土河岸の侵食量を評価する手法を提案した。

なお、本手法については他河川のデータ等による検証が必要であるとともに、粘性土と砂等の互層を代表する引張破壊応力の評価手法の開発が今後の課題である。

謝辞：本研究にご協力いただいた関東地方整備局下館河川事務所等の関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，2002。
- 2) 例えば 岸力・山口忠男・平野悟：流れによる粘性土の洗掘破壊と水路の限界流速，土木学会第21回年次学術講演会講演概要集，II-18，pp.18-1～18-2，1966。
- 3) 宇多高明等：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：粘着性土の侵食速度とその進行過程に関する実験的研究，土木学会，第2回粘着性土の侵食に関するシンポジウム論文集，pp.7-16，2004。
- 5) 梅田信・石川忠晴・高峰一：霞ヶ浦流体泥の洗掘特性に関する実験的研究，土木学会，第2回粘着性土の侵食に関するシンポジウム論文集，pp.45-50，2004。
- 6) 末次忠司・服部敦・板垣修・榎本真二：粘性土河岸の侵食量評価法，国土技術政策総合研究所資料第234号，2005。

(2005. 4. 7 受付)