

粘着性材料を有する河岸の侵食に関する研究

長田信寿*・村本嘉雄*・峯岸邦行*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究では、粘着性材料を有する河岸の侵食について基礎実験を行い、粘性土の侵食特性を把握するとともに、河岸の侵食過程を再現するための数値解析モデルの構築を行った。実験は、土質条件、水理条件を変えて複数ケース行い、圧密荷重、掃流力等が粘性土の流送と側岸侵食量に与える影響について考察した。また、粘着性材料の離脱・流送過程について、粘性土が土粒子凝集体として剥離するとして、その過程を確率モデルを用いて定式化し、側岸侵食モデルに導入した。

キーワード： 粘着性材料，河岸侵食，確率モデル，数値解析

1. はじめに

治水上あるいは近年の新河道計画等で問題になっている河岸の侵食現象に対して、地形学、流砂水理学等に裏付けられた有用な知見が蓄積されつつあるが、それらの多くは非粘着性材料からなる河岸を対象としたものである。しかし、実際の河岸は非粘着性材料のみで構成されているとは限らず、粘着性を有している材料を含んでいる場合も多い。このような場合、侵食河岸形状、河岸侵食過程、および河岸材料の流送機構は非粘着性材料の場合と大きく異なる。

まず、河岸形状については、非粘着性材料の場合では、河岸近傍の土砂が流送されると、主に重力の作用、言い換えれば横断勾配により、河岸から土砂が供給され、河岸形状はほぼ安息角を保ちながら侵食が進行する。これに対して粘着性材料の場合、河岸は側方に侵食が進行し、場合によってはオーバーハングに至り、上部土塊崩落後の侵食河岸形状は鉛

直に近い角度で保持されている。

このような形状・侵食過程の相違のみでなく、流送機構についても両者には相違が見られる。すなわち、非粘着性材料の場合、個々の砂粒に作用する力から砂粒の運動を考える際に、重力の効果が大きく、そのため、これまでに提案されたほとんどの流砂量式、及び pick-up rate 式は、砂の特性を表すパラメータとして粒径が重要な指標となる。しかし、粘性土については、その限界せん断力、あるいは侵食速度等が、個々の粒子の結合力に関係し、それが粘着性材料の物理的、化学的性質に大きく影響されている。この点について以下に概説する。

まず、粘性土の侵食限界せん断応力については、従来より測定可能な土質指標あるいは化学的指標と結びつけることに大きな関心が払われてきた。その中でも、特に着目されたのは一軸圧縮強度、ベーンせん断強度等の土のせん断強度と限界せん断応力との関係である（例えば、Kamphuis and Hall, 1983; 中野・喜田, 1996）。土のせん断強度以外の指標として

は、例えば、圧密荷重 (Kamphuis and Hall, 1983), 含水比 (Otubo and Muraoka, 1988; 芦田ら, 1982), 塑性指数 (Committee on Sedimentation, 1965; Kamphuis and Hall, 1983) との関係が検討されている。また、最近の建設省土木研究所(1997)の報告によれば、現地の土質を対象とした場合には、上述の土質パラメータと土木研究所で定義した侵食限界速度はよい相関を示さないとした。そこで、土木研究所で考案された引張り試験器を用いて、粘性土の引張り破壊強度と侵食限界流速の関係を提示している。

侵食速度については、これまで摩擦速度あるいは壁面せん断応力の関数として実験式がいくつか提案されている(Pardure and Mehta, 1985; Shaikh et al., 1988; 澤井・芦田, 1974)。関数形は指数関数等で表されているが、その係数については対象とする粘性土の土質条件によって異なると考えられる。Shaikh et al. (1988)は、土のせん断強度、粘土含有率との関係に着目し定式化を試みている。

これらは、主に、土の侵食特性に影響を及ぼすパラメータを実験的手法を用いて検討を行ったものである。これに対して、粘性土の侵食機構を力学的なモデルで表現しようという試みも若干ではあるがなされている(澤井・芦田, 1974; 芦田ら, 1982; 青木・首藤, 1982)。しかし、粘性土の侵食現象に対しての研究の多くは、侵食限界せん断応力、あるいは侵食速度等の粘性土の侵食特性そのものを対象としたものであり、その知見をもとに粘着性材料を有する河岸あるいは河床の形状変化を扱った研究は、河床変動を対象に若干報告されているものの(例えば、澤井・芦田(1974)によるリルの発生を含めた横断形状の変形過程の解析)、極めて少ない。

本研究では、これまで重要性が指摘されつつも十分に現象の解明がなされていない粘着性材料を有する河岸の侵食過程について、その機構を把握するとともに、河岸の変形過程を扱い得るモデルを構築することを目的としている。

粘着性材料を有する河岸の変形過程は、前述したように粘性により鉛直に近い角度で切り立った側岸の浸水部が洗掘され、オーバーハングに至り、やがて上部土塊が崩落し、その崩落土塊の流送というサイクルを繰り返す。本研究で対象とするのは、このうち粘着性材料の流送により河岸の側方侵食が進行しオーバーハングに至る過程である。まず、粘着性材料を用いて河岸侵食に関する基礎実験を行い、粘着性材料の流送過程、侵食特性について把握する。次に粘着性材料を有する側岸の侵食過程を解析するためのモデルについて検討する。

2. 側岸侵食の実験方法

2.1 実験の概要

1.で述べた粘性土の侵食に関する研究の多くは、粘着性材料を水路床に設置し、その洗掘過程を計測したものである。しかし、本研究は河岸侵食現象を対象としており、その侵食形状の変化過程を、河岸の掃流力分布をも含めた検討を試みるため、粘性土を側岸に設置して実験を行った。このような研究は、柏木ら(1997)によるものがあり、現地試料を用いて側岸侵食実験を行っている。このように現地試料を用いた場合は、実際の河岸の侵食機構が把握できる反面、対象土の不均一性のため、侵食が一樣に進行せず、侵食過程に影響を与えるパラメータの特定が難しくなると考えられる。このような河岸材料の不均一性が、河岸侵食に与える影響も重要な検討課題と考えられるが、本研究では粘性土を有する河岸変形過程を解析するための基本的な数値解析モデルの構築に重点を置き、現象の複雑さを減じるため、河岸材料が均一な場を対象とする。

そこで、侵食性側岸として用いる供試体の作成にあたっては、粘性土を攪拌装置を用いてスラリー状にした後、圧密することにより、側岸の材料特性が空間的にばらつかないようにした。

この供試体を実験水路の側壁に設置し、通水後、側岸の侵食過程を計測する。計測は侵食幅、流量、流速、水深、水温について行った。侵食幅の測定は供試体設置区間の上流端から 30cm, 50cm, 70cm の位置での 3 断面で行った。

2.2 供試体の作成方法

侵食性側岸として用いた材料は深草粘土(シルト系が主成分)と砂の混合物である。以下に作成方法の概要を述べる。

まず、深草粘土と砂を実験ケースごとに一定の比率で混合する。次に、液性限界より多めの蒸留水を加え(各実験シリーズごと一定の比率)、攪拌装置でミキシングを行い、スラリー状になった試料を圧密装置(Fig.1)に入れる。次に、空気泡が混入しないよう処理を行った後、自重圧密を含め 3~4 回の段階載荷により圧密を行う。なお、圧密は恒温室(20℃)で行い、各圧密過程で 90%圧密となったのを確認して次の載荷を行う。最終段階の圧密が終了後、除荷を行い、水路設置に必要な整形を行った後、圧密装置より供試体ははずし水路に設置する。

2.3 実験水路の概要及び実験ケース

実験水路の概要を Fig.2 に示す。実験水路はガラス

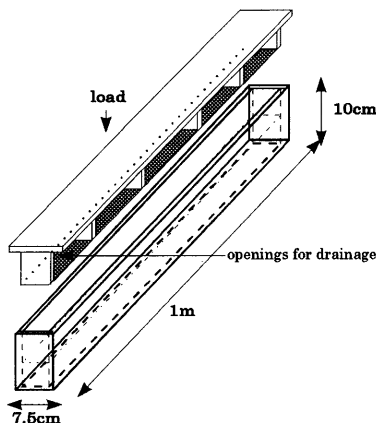


Fig. 1 Apparatus for soil consolidation

製で、長さ4m、幅15cm、高さ25cmで上流に整流装置を設置した。供試体は、長さ1m、奥行き5cm、高さ6~7cmであり、上下流端の影響を受けないように水路中央部に設置した。供試体設置区間の上下流は固定壁とし、供試体と同じ幅の木材を設置した。また、供試体と固定壁の結合部には薄いアルミ板を張って、固定壁と滑らかに接続されるようにした。

実験は、土質条件(粒度分布、圧密荷重、練り返し等)と水理条件(水路勾配、流量等)を変えてトータルで15ケース行った。実験条件一覧をTable 1に示す。Table 1においてCase番号の英数字は第1文字から第3文字までが土質条件を示し、第4文字が水理条件を示す。具体的には、以下の通りである。

第1文字(C~E)	粒径分布の相違(Fig.3にC~Eの粒径加積曲線を示す。)
第2文字(S,N)	S: 乱さない試料, N: 乱した試料
第3文字(1~4)	各実験シリーズで圧密荷重の小さい順とした。
第4文字(1~4)	流量、勾配を変えて平均摩擦速度を変え、各シリーズにおいて摩擦速度の小さい順とした。

なお、これらの実験ケースにおいて、CシリーズとDシリーズは、側岸材料を乱した場合、乱さない場合、あるいは粒度分布の相違によって、粘性土側岸の侵食量がどの程度の影響を受けるかを把握するための実験であり、掃流力、圧密荷重を系統的に変えての実験はEシリーズで行った。Eシリーズでは、ES3-1を共通に、ES1-1, ES2-1, ES3-1, ES4-1が圧密荷重を変えたケース、ES3-1, ES3-2, ES3-3, ES3-4が水路床勾配を変えて、平均摩擦速度を変化させたケースである。

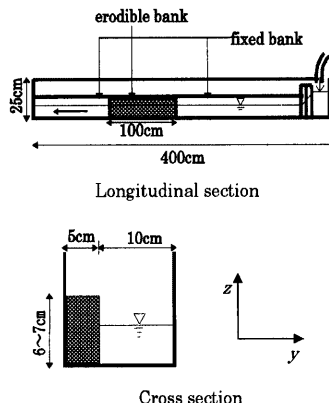


Fig. 2 Experimental configuration

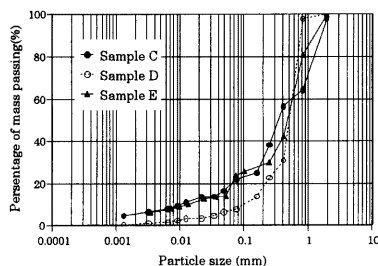


Fig. 3 Grain size distributions

3. 粘性材料を有する側岸の侵食実験結果

ここでは、2.で述べた粘性材料を有する側岸の侵食実験を行った結果について述べる。まず、粘性材料の流送過程の一般の特徴について述べ、次に側岸形状の変化過程、および土質条件、水理条件の相違が侵食量に与える影響について考察する。

3.1 粘性材料流送過程の特徴

非粘性材料の場合の流送過程は砂粒単位であるのに対し、粘性材料の場合、その粘着力によって粒子が結合し、土粒子の凝集体として側岸から剥離する。剥離塊の大きさは、痕跡より判断すれば、本実験Eシリーズに関しては1mm程度であり、その形状は側岸に対して垂直方向(奥行き)の長さよりも側岸に平行な長さのほうがやや大きい。建設省土木研究所(1997)が剥離土塊の採取により、剥離塊の形状がラグビーボール状であり、その短軸(奥行き)・中

軸・長軸比が剥離塊の粒径によらず 0.7:1.0:1.4 と近似できているが、本実験についても同程度のようである。剥離塊の大きさは、本実験範囲内では、圧密荷重の変化に対して顕著な相違が見られなかった。ただし、乱した試料を用いた場合(CN-1～CN-3, DN-1～DN-3)では、明らかに剥離塊が大きくなったが(5mm 程度)、これは試料を乱すことによる土粒子凝集体間での結合力に変化が生じたためと考えられる。また後述するように掃流力の増大に対して侵食量は増加するが、これは実験の観察より判断すれば、剥離塊の大きさが変化するのではなく、単位時間あたりの剥離個数が増加するためと考えられる。

次に、剥離の空間的分布について述べる。側岸の侵食量の流下方向分布はいずれのケースも若干のばらつきはあるもののほぼ同程度である。しかし、粘性土の剥離現象は、同時に対象領域全体で生じているのではなく、一度ある箇所では剥離が生じると、その周辺で連続的に剥離が生じる。これは、①土粒子凝集体が離脱することにより生じた河岸表面の凹凸による乱れの増加によって土粒子凝集体に作用する

力が変化すること、②土粒子凝集体が剥離する際に周辺の河岸材料を乱すことによる周辺土塊の限界掃流力の低下が主な原因として考えられる。

また、本実験においては剥離した土粒子凝集体は、剥離後は流れの中に取り込まれるので、その大きさの砂粒と仮定した場合の限界掃流力よりはるかに大きい掃流力が働いているため、河床に堆積せず、そのまま流送される。

3.2 側岸形状と侵食量

ここでは計測結果をもとに、側岸形状の変化過程及び侵食量に影響を及ぼす土質・水理特性について考察を行う。

まず、Fig.4 に C シリーズの側岸形状の時間変化を示す。なお、これらの図に示した断面は計測を行った 3 断面のうち、中央の断面(供試体の上流端から 50cm の位置)である。時間の経過とともに側岸の侵食が進行しており、その形状は、水深の半分あたりの高さで最大侵食を示す。また、圧密した試料を用いた CS-2, CS-3 と繰り返した試料 CN-2, CN-3 を比

Table 1 Experimental conditions

Case No.	Bank material			Hydraulic conditions							
	Sample	Consolidation pressure (kgf/cm ²) (10 ³ Pa)	Water content (%)	Discharge (cm ³ /s)	Mean velocity (cm/s)	Bed slope	Water depth (cm)	Temperature (°C)	Friction velocity (cm/s)	Fr	Re (10 ⁴)
CN-1	C		18.7	2139	82.0	1/71	2.61	15.9	4.87	1.62	1.92
CN-2	C		18.7	3731	92.4	1/71	4.04	15.9	5.55	1.47	3.35
CN-3	C		18.6	4095	147.3	1/27	2.78	15.9	8.05	2.82	3.67
CS-2	C	0.70 (68.6)	18.5	3731	89.3	1/71	4.18	15.9	5.61	1.40	3.35
CS-3	C	0.70 (68.6)	18.6	4095	147.3	1/27	2.78	15.9	8.05	2.82	3.67
DN-1	D		16.5	2139	84.2	1/71	2.54	15.9	4.82	1.69	1.92
DN-2	D		16.5	3731	85.5	1/71	4.36	15.9	5.67	1.31	3.34
DN-3	D		17.1	4095	147.3	1/27	2.78	15.9	8.05	2.82	3.67
ES1-1	E	0.13 (12.7)	24.8	3731	103.6	1/71	3.60	15.3	5.37	1.74	3.29
ES2-1	E	0.16 (15.7)	23.4	3731	94.7	1/71	3.84	11.0	5.52	1.54	2.86
ES3-1	E	0.20 (19.6)	23.4	3731	97.9	1/66	3.81	15.3	5.67	1.60	3.30
ES4-1	E	0.24 (23.5)	24.3	3731	95.9	1/71	3.89	11.0	5.50	1.55	2.94
ES3-2	E	0.20 (19.6)	25.8	3731	110.7	1/40	3.37	11.0	7.02	1.93	2.94
ES3-3	E	0.20 (19.6)	23.1	3731	117.3	1/32	3.18	11.0	7.72	2.10	2.93
ES3-4	E	0.20 (19.6)	24.7	3731	121.5	1/26	3.07	11.0	8.31	2.22	2.93

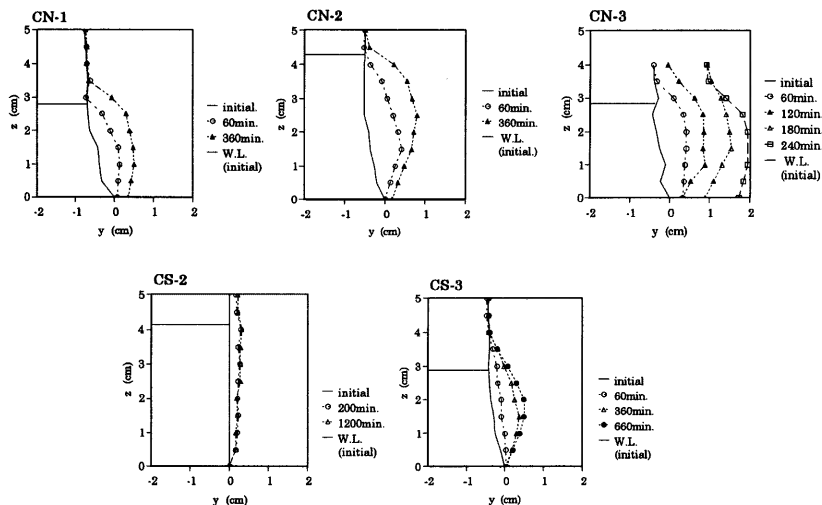


Fig. 4 Temporal changes in bank profiles

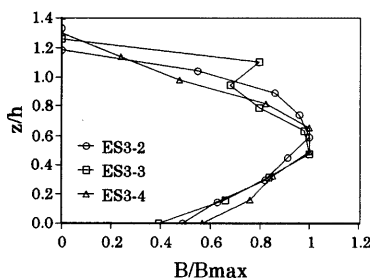


Fig. 5 Dimensionless expression of bank profiles

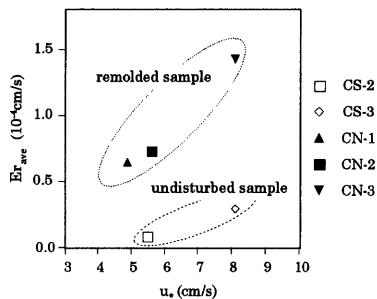


Fig. 6 Comparison of erosion rate for the remolded and undisturbed samples

較するとその侵食速度に明らかな差が生じていることが分かる。CN-3 においては、側方侵食に伴い河岸が不安定となり、側岸上部土塊の崩落が見られた。

前述したように、水深の半分あたりの位置で最大侵食を示すのは、C シリーズに限ったことではない。例えば E シリーズについて、横断形状の無次元表示（縦軸は高さ z を初期水深 h で、横軸は侵食幅 B を最大侵食幅 $B_{\max}$ で無次元化）したものを Fig. 5 に示す。なお、同図の侵食幅は通水後 120min. に測定した 3 断面の各高さごとの平均値である。同図には、水路床勾配を変えることにより平均摩擦速度を変化させた ES3-2, ES3-3, ES3-4 について示している。これらのケースにおいて侵食形状はほぼ相似であり、 z/h が 0.5~0.6 の位置で側方侵食が最大となる。こ

れは、富永・江崎(1985)による長方形断面水路の実験で、アスペクト比 2~4 の断面を有する水路側面でのせん断応力がピークとなる位置とほぼ合致している。

次に、側岸材料として用いた試料の繰り返しの影響について考察する。Fig. 6 は、C シリーズの平均侵食速度 E_{ave} と摩擦速度の関係を示したものである。なお、平均侵食速度 E_{ave} は計測した 3 断面において水深以下の計測点における平均値を用いて算出した。乱した試料を用いたケース (CN-1~CN-3)、乱さない試料を用いたケース (CS-2, CS-3) は、両者とも摩擦速度の増加に伴い、平均侵食速度が増加している。しかし、両ケースの侵食速度は、同じ摩擦速度のケースごとに比較すれば、大きな差がある。このことは粘性材料を有する実際の河岸侵食量の算定を行

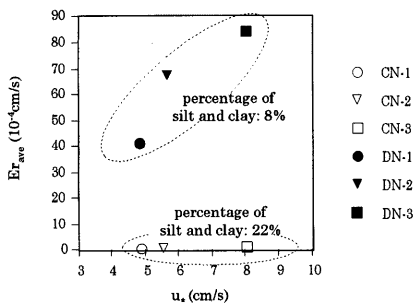


Fig. 7 Influence of the percentage of silt and clay content on erosion rate

う際に、乱した試料を用いて計測を行うと、侵食量が過大に評価する場合があることを示唆するものであり、注意を要する。

次に、粒度組成と侵食速度の関係について考える。Fig. 7はCN-1～CN-3(シルト・粘土分22%)とDN-1～DN-3(シルト・粘土分8%)の平均侵食速度と摩擦速度の関係を示したものである。同一の平均摩擦速度に対する侵食速度を比較すると、Cシリーズ、Dシリーズでは数十倍の差がある。これは、シルト・粘土分が8%程度になると結合力が著しく低下し、剥離に対しての粒子間の粘着力による抵抗がほとんど失われることによると考えられる。

次に、水理条件を同一として圧密荷重を変化させたES1-1～ES4-1について、圧密荷重と平均侵食速度の関係をFig. 8に示す。また、圧密荷重を一定として水理条件を変化させたES3-1～ES3-4の平均摩擦速度と平均侵食量の関係をFig. 9に示す。これらの図より圧密荷重が小さいほど、及び摩擦速度が大きいほど侵食速度が大きくなることが分かる。ここで実際の河岸について考えてみると、河岸のある位置における圧密荷重は鉛直方向で異なっており、河岸が同一の材料で構成されていたとしても、河岸天端からの鉛直距離に応じて侵食強度が変化していると考えられる。一方で河岸における掃流力も水際から河床まで分布しており、これらのことから河岸侵食過程を解析するには、側岸における壁面せん断応力の分布、及び圧密荷重等の変化による侵食特性の変化を反映し得るモデルを構築する必要がある。

4. 粘着性材料を有する河岸の侵食モデル及びその適用例

4.1 流れの計算法

河岸侵食過程の解析を行うためには、まず河岸に

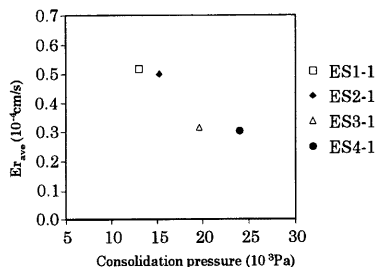


Fig. 8 Erosion rate versus consolidation pressure

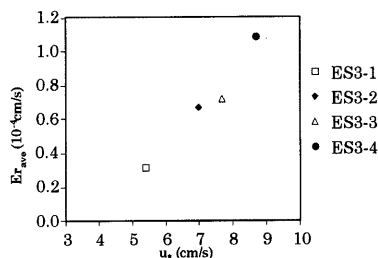


Fig. 9 Erosion rate versus friction velocity

作用するせん断力分布を求めなければならない。Fig. 4, Fig. 5で見たような側岸形状の変化過程は、側岸における掃流力分布との関連性が大きいと考えられることから、その鉛直分布が計算できるように、ここでは流れの基礎式として、3次元の連続式及び運動方程式を用い、河岸が侵食により変形した後も解析が可能ないように一般座標系で表示する。また、河岸侵食速度に影響を与える壁面せん断応力分布は、2次元により分布形状が変化することから、それが再現できるように、ここでは乱流モデルとして代数応力モデルを用いる。

基礎式の離散化は有限体積法を用いて行い、変数配置はスタッガードスキームを用いる。移流項の離散化にはQuickスキーム、時間積分にはアダムスバッシュフォース法を用いる。また、連続式を満たすようSOLA法を用いて圧力、速度の同時緩和を行う。

境界条件については、まず、壁面では、壁面から第一格子点において、壁面に平行な流速成分から対数則より摩擦速度を算出する。乱流エネルギー k 、乱流散逸率 ϵ の壁面境界条件は、この摩擦速度を用いて壁法則より与える。自由水面の境界条件については杉山ら(1997)が提示したものと同様に、自由水面

を含む計算セルにおいて鉛直方向速度変動値を 0 とし、乱流散逸率 ε を壁関数を使用する場合と同様に与えた。また、格子点の配置は側面近傍で密となるように一次元補完関数を用いて与えた。

4.2 粘着性材料を有する河岸の侵食過程のモデル化

(1) モデル化の基本方針

粘着性河岸の侵食過程を解析するにあたっては、壁面せん断応力と河岸の変形過程を対応づけるモデルが必要となる。

従来の河川横断形状の変化を扱ったモデルは、平衡あるいは非平衡の流砂量式を用い、計算対象領域の各地点の流砂量を算出した後、河床の連続式を用いて、河床高の変動量を計算するものが主であった。しかし、河床、河岸の粘着性材料を考慮した流砂量式は、粘土含有率が小さい場合を除いて、これまでほとんど提示されていない。また、実河川での河岸は粘着性材料を含むため鉛直壁に近い角度で河岸を形成している場合が多いが、これまでの流砂量式のように砂粒に作用する力の釣り合いから定式化すると、鉛直壁面上での流砂量には適用し得ない。

以上のことから、本研究で対象とするようなシルト分を多く含む粘着性材料では、砂粒のように運動方程式から流砂量の算出モデルを導出することが困難であると考え、本研究では、Einstein(1941)により導入された確率モデルを用いて河岸の侵食現象を表すこととする。なお、ここでは、河岸土塊の崩落を伴う侵食過程は除外している。

河床材料の移動を確率モデルを用いて扱った研究としては、例えば、Einstein(1941)、中川・辻本(1975)が砂粒を対象に、また芦田ら(1982)が等厚な粘土が周辺に付着した砂粒を対象にして、検討を行っている。これに対し、本研究では、3.で述べた実験事実から、青木・首藤(1982)や土木研究所(1997)の研究での指摘と同様に、粘着性材料は土粒子凝集体の剥離塊として離脱すると考え、この土粒子凝集体の離脱過程を対象とする。

(2) 土粒子凝集体の pick-up rate 算出法

本項では、土粒子凝集体の剥離過程を表現するための確率モデルについて検討する。まず、移動確率 p_0 は中川・辻本(1975)と同様に

$$p_0 = \frac{\int_{r_0}^{\infty} \phi(r) dr}{\int_{-1/\eta_0}^{\infty} \phi(r) dr} \quad (1)$$

と表すこととする。ここに、 $\phi(r)$: 標準正規分布の確率密度関数、 r : 正規分布に従う確率変数で、それぞ以下のように表される。

$$\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (2)$$

$$r = \frac{\frac{\bar{u}_*}{u_*} - 1}{\eta_0}, \quad r_c = \frac{\frac{u_{*c}}{u_*} - 1}{\eta_0} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{u}_*$: 変動を含む摩擦速度、 u_* : 摩擦速度の時間平均値、 η_0 : 摩擦速度の変動係数、 u_{*c} : 基準摩擦速度である。上記の p_0 と単位時間当たりの離脱確率である pick-up rate p_s は exchange time t_{EX} を用いて次式のように結びつけられる。

$$p_s = \frac{p_0}{t_{EX}} \quad (4)$$

中川・辻本(1975)は、この t_{EX} の概念が曖昧であるとして、 p_s を上式で算出せず、離脱する砂粒子の運動方程式から導いた。すなわち、転動形式の場合は運動方程式より算出された離脱速度 v_s 、及び離脱したとみなされる距離 $k_0 d$ (d は粒径、 k_0 は定数)を用いて、 $p_s = v_s / k_0 d$ で与えられるとしている。しかし、ここで対象とする粘性土の剥離過程においては、離脱したとみなされる距離の算出が困難であることから、運動方程式より p_s を算出する手法をとらず、式(4)に従って検討を進める。

まず、摩擦速度の変動係数 η_0 については、村上(1992)が壁面せん断応力を推定した手法を参考に行う。村上は壁面近傍の流速と壁面せん断応力が従う確率分布が同じであるとして次式の関係を仮定した。

$$\overline{\tau_b(1+r\cdot\eta_r)} \propto \overline{\rho u_d^2(1+r\cdot\eta_r)^2} \quad (5)$$

ここに、 η_r, η_b : それぞれ壁面せん断応力、壁面近傍流速の変動係数、 $\overline{\tau_b}, \overline{u_d^2}$: それぞれ壁面せん断応力、壁面近傍流速の 2 乗の時間平均値である。また、粗面乱流では $\sqrt{u' u'} / u_* \approx 2$ 、さらに u_d の算出に対数則を用い、式(5)の関係を仮定すれば、 $\eta_r = 0.5$ となる。村上(1992)はこの値を利用して、中川・辻本(1975)の提案した pick-up rate 推定式と、せん断応力の変動を考慮した pick-up rate 推定式を関係づけている。

本研究においても、壁面近傍流速と摩擦速度の確率分布が同じであると仮定すると、(3)式中の摩擦速度の変動係数 η_0 は $\eta_0 = \eta_b$ (壁面近傍の変動係数)となる。 η_b の算出には、主流速の変動流速 u' の標準偏差 $\sqrt{u' u'}$ (乱れ強度)と壁面近傍の時間平均流速が必要であるが、前者は 4.1 で述べた乱流モデルを用いて求め、後者は代表流速を与える高さを剥離土塊の平均厚 d_s として対数則より求めることとする。

次に、exchange time t_{EX} は Einstein により導入され

た概念で、ある地点の粒子が剥離した後、その地点が統計的に同一の状態となるまでの時間とされている。Einstein は、これを粒径と沈降速度の比として表した。しかし、ここで対象としている粘性土の剥離現象については、沈降速度を用いて t_{EX} を表現することは妥当性を欠くと考えられる。一方、3. で述べたように、実験の観察によれば、ある土粒子凝集体が剥離した後は、その周辺を中心に剥離が連続的に生じる。このことは、ある地点の剥離はそれに隣接する土粒子凝集体の剥離によって促進されると考えられる。この土粒子凝集体の剥離の空間的な進行は、摩擦速度 u_* が大きいほど速くなり t_{EX} を小さくさせると考えられることから、摩擦速度と剥離土塊の平均厚 d_s を用いて、時間の次元を持つ次の簡単な式形で表すこととする。

$$t_{EX} = a_t \frac{d_s}{u_*} \quad (6)$$

ここに、 a_t は実験定数であり、4.3 で検討する。

(3) 側岸侵食幅の計算

対象とする側岸は、鉛直に近い横断勾配を有しており、またその側岸材料もシルト分が多いため、一度剥離した土塊は堆積せず、そのまま流送される。従って、側岸の形状変化には堆積を考慮せず、侵食のみを考える。

(1)~(3) で述べた手法により、pick-up rate p_s を計算すれば、側岸侵食幅は次式で計算できる。

$$\frac{\partial n_w}{\partial t} = -p_s d_s \quad (7)$$

ここに、 n_w : 側岸に垂直方向の座標である。

4.3 モデルの適用に必要な諸量の決定

4.2 で提示したモデルにおいて決定しなければならない諸量としては、剥離塊の平均厚 d_s 、粘性材料の基準摩擦速度 u_{*c} 、及びモデル定数として、exchange time に関わる a_t である。このうち、 d_s 及び u_{*c} については、汎用性の高いモデルとするためには、土質パラメータの関数として表す方が望ましい。しかし、本研究では実験ケースに限りがあり、土質パラメータとの関連づけが困難である。したがって、ここでは d_s 、 u_{*c} 及びモデル定数の算出手法を検討することに主眼を置き、具体的な数値については3. で用いた E シリーズの土質条件での値を示すにとどめる。

(1) 平均剥離厚 d_s

平均剥離厚 d_s は 3. で述べたように、剥離後の洗掘孔の大きさより判断すれば、大まかには 1mm 程度であるが、個々の洗掘孔の大きさ自体を精度よく計測

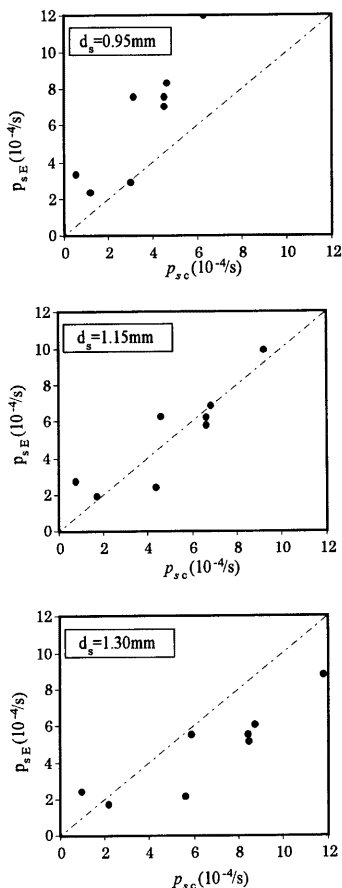


Fig. 10 Estimation of mean thickness (d_s) of detached sediment flakes

することは困難である。そこで、比較的測定の容易な剥離個数(粘性土側岸の反対側の水路側面がガラスばりのため目視で計測可能)と河岸形状の変化量から d_s を求めることとした。具体的には以下の通りである。

まず、剥離個数の測定範囲の面積を A 、測定時間を T 、その範囲、時間内に計測された剥離個数を n とする。これらを用いて単位時間当たりの剥離個数である pick-up rate に換算するのであるが、そのためには側岸表面での剥離塊の面積 A_p を与える必要がある。これについては、3. で述べたように、粘性土の粒径範囲に関わらず、剥離塊の短軸 (d_s) : 中軸 : 長軸

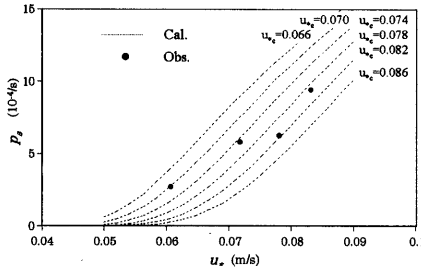


Fig. 11 Pick-up rate versus friction velocity (parameter: u_{*c})

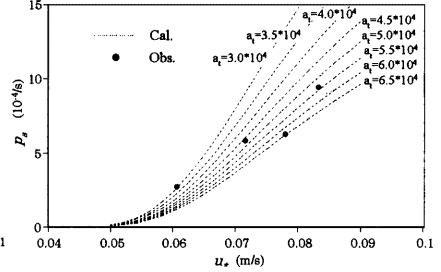


Fig. 12 Pick-up rate versus friction velocity (parameter: a_t)

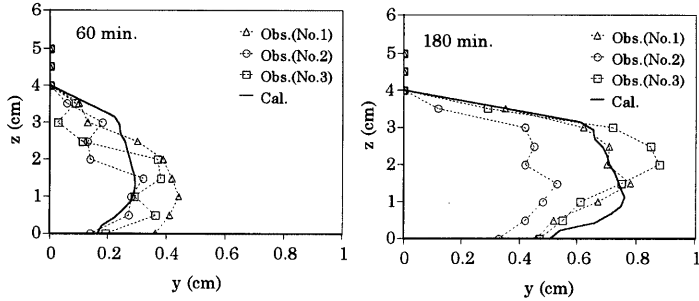


Fig. 13 The observed and calculated bank profiles

=0.7:1.0:1.4 と近似できるとした土木研究所 (1997) の計測結果を用いて、 $A_p = 2.86d_s^2$ とした。これらの値を用いると p_s は、

$$p_s = \frac{nA_p}{TA} = \frac{2.86nd_s^2}{TA} \quad (8)$$

で求めることができる。一方、側岸変動量の計測結果を用いて、計測時間間隔を Δt 、側岸後退幅を Δn_w とすれば、式(7)より

$$p_s = \frac{\Delta n_w}{\Delta t d_s} \quad (9)$$

となる。式(8)、(9)から求められる p_s を、それぞれ p_{sc} 、 p_{se} とすれば、この両者は等しいはずである。そこで、ES3-1、ES3-2、ES3-3、ES3-4 の 4 ケースの 0~1 時間、1~2 時間の実験値から p_{sc} と p_{se} を求め、これを Fig.10 のように整理した。Fig.10 において、1 点鎖線で示したものが $p_{sc} = p_{se}$ の直線であり、 $d_s = 0.95 \text{ mm}$ 、 $d_s = 1.15 \text{ mm}$ 、 $d_s = 1.30 \text{ mm}$ と仮定した場合の実験値がプロットされている。このように d_s を変化した実験値が $p_{sc} = p_{se}$ の直線に近づいた時の d_s を剥離塊の平均厚と考えると、 $d_s = 1.15 \text{ mm}$ と

なる。

(2) 基準摩擦速度 u_{*c} 及び a_t

基準摩擦速度 u_{*c} と exchange time に関する係数 a_t は以下に示す手法で決定する。

- ① 変動係数 η_0 を、4.1 で示したモデルおよび 4.2(2) で述べた手法を用いて算出する。
- ② r_c を式(3)より (u_{*c} はパラメータとして与える) 計算する。
- ③ ①、②で求めた η_0 、 r_c を式(1)に代入し、式(1)を数値積分することにより p_0 を計算する。
- ④ 式(6)より t_{EX} を求める。 (a_t はパラメータとして適当に与え、 d_s は 4.3(1)で述べた手法より算出)
- ⑤ 以上で求めた p_0 と t_{EX} より、式(4)を用いて pick-up rate p_s を計算する。

実験データとしては、摩擦速度を変化させて実験を行った ES3-1、ES3-2、ES3-3、ES3-4 を用いた。本手法を用いて u_{*c} と a_t をパラメータとして作成した $u_* - p_s$ 曲線を Fig.11 ($a_t = 4.5 \times 10^4$ に固定して u_{*c} をパラメータとして表示) と Fig.12 ($u_{*c} = 0.074$ に固定して

a_i をパラメータとして表示)に示す。

4.4 モデルの適用例

本節では、粘性材料を有する河岸の侵食モデルを側岸侵食実験へ適用し、側岸の変形過程の解析を試みる。 u_{*c} 及び a_i は $u_{*c} = 0.074 \text{ m/s}$, $a_i = 4.5 \times 10^4$ を用いる。なお、計算の対象としたケースは ES3-2 である。

計算の水理条件は前出の Table 1 に示した ES3-2 の実験条件に合わせている。また、侵食性側岸の側壁は粗面として計算を行い、相当粗度は平均剥離厚で与える。もう一方の側壁及び底面は滑面とする。計算手順としては、まず、4.1 に記述したモデルで流れの計算を行う。次に、側壁での摩擦速度の変化率が十分小さくなった時、4.2 で示したモデルを用いて側岸侵食量を計算する。この手順を繰り返して側岸の変形過程を計算する。

計算結果を側岸後退量の鉛直分布として Fig.13 に示す。左図が通水後 60min.、右図が 180min. であり、実験結果は計測した 3 断面すべてについて示している。時間の経過とともに側岸材料が流送され、側岸が後退していく様子が再現されている。側岸形状については、60min. 経過後の側岸侵食量の計算結果は、ピーク位置については実験値とほぼ合致しているが、侵食量は実験結果の方がそのピーク位置近傍に集中している。また、実験においては、時間の経過とともに侵食ピーク位置が上方に移動する傾向が見られるが、計算結果ではこれが再現されていない。このように、今後改良すべきいくつかの問題点を指摘できるが、粘性土の離脱・流送の確率モデルと、流れのモデルを結合させることによって、側岸の侵食過程を再現しうることが示された。

5. おわりに

本研究では、粘性材料を有する河岸の侵食現象を対象として基礎実験を行い、その基本的特性を把握するとともに、側岸侵食過程を再現するための数値解析モデルについて検討を行った。主要な事項について以下にまとめる。

河岸材料の流送過程は、非粘性材料の場合であれば砂粒単位で運動するのに対し、粘性材料を含む場合は、土粒子凝集体として河岸より剥離する。この剥離塊の大きさは、乱さない試料については、今回の実験範囲内において大きな変化はない。すなわち、掃流力の増加に対して、剥離塊は大きさを変化させるのではなく、離脱個数が増加することで、河岸侵食の進行を速める。

河岸侵食速度は、圧密荷重が小さいほど、また作用するせん断応力が大きいほど増大する。実際の河岸においては、河岸天端からの距離に応じて、圧密荷重が異なっていることから、河岸が同一の材料で構成されていたとしても、侵食強度が鉛直方向に変化していると考えられる。一方で、河岸における掃流力も側壁上で分布しており、河岸侵食量を算定するには、これら両者の影響を反映しうるモデルが必要である。

本研究では、粘性材料が土粒子凝集体として剥離するとして、その剥離過程を確率モデルを用いて定式化した。さらにモデルを適用する際に必要となる諸量（土粒子凝集体の剥離厚、基準摩擦速度、exchange time に関するモデル定数）の決定方法を示すとともに、河岸の掃流力分布を評価する流れのモデル（代数応力モデル）と結合させて河岸の侵食過程を予測するモデルを提案した。

次に、今後の課題について、モデルの問題点を中心に整理すれば以下の通りである。

河岸変形過程の再現性を向上させるためには、まず、壁面せん断応力の再現性を高める必要がある。次に、粘性土の基準摩擦速度と平均剥離厚については関連する土質特性、水理特性の関数として表示し、汎用性、工学的有用性のあるものとする必要がある。これについては、粘性材料の剥離現象自体の解明とともに様々の条件下での実測データを蓄積する必要がある。

また、本モデルでは pick-up rate 算出に複雑な計算スキームを用いているので、より簡単な式系で表現する等のモデルの簡略化が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたって、京都大学土木工学教室の矢野隆夫技官ならびに小林俊一助手から、粘性材料を用いた供試体の作成・試験手法等に関して多くの貴重なご助言をいただいた。また、実験およびデータの解析に際しては修士課程 1 回生の道端浩司君に助力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 青木美樹・首藤伸夫 (1982): 粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究, 第 26 回年次水理講演会論文集, pp.87-92.
- 芦田和男・江頭進治・加本 実 (1982): 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1), 京大防災研究所年報, 第 25 号 B-2, pp.349-360.

- 柏木幸則・福岡捷二・渡邊明英・陶山幸夫・島本重寿 (1997): 流路の側岸侵食に関する研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会, pp.482-482.
- 建設省土木研究所河川部河川研究室 (1997): 粘性土が有する耐侵食性の評価方法に関する研究, 土木研究所資料第 3489 号, pp.7-96.
- 澤井健二・芦田和男 (1974): 粘性土流路の侵食と横断形状に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 17 号 B, pp. 571-584.
- 杉山均・秋山光廣・亀澤正之・野口大介 (1997): 傾斜側壁を有する複断面開水路内の乱流構造解析, 土木学会論文集, No.565, pp.73-83.
- 富永晃宏・江崎一博 (1985): 長方形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.357/II-3, pp.81-88.
- 中川博次・辻本哲郎 (1975): 水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.244, pp.71-80.
- 中野 晋・喜田将司 (1996): 底泥の降伏値・移動限界に及ぼす細砂混入の影響, 水工学論文集第 40 巻, pp.959-964.
- 村上正吾 (1992): 非平衡流砂モデルの展開による河川流砂に関する研究, 京都大学博士論文.
- Committee on Sedimentation (1965): Erosion of the cohesive sediments, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.91, HY1, pp.105-139.
- Einstein, H. A. (1941): Formulas for the transportation of bed load, ASCE, pp.351-363.
- Kamphuis, J.W.and Hall, K.R.(1983): Cohesive material erosion by unidirectional current, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.109, No.1, pp.49-61.
- Otubo, K.and Muraoka, K. (1988): Critical shear stress of cohesive bottom sediments, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.114, No.10, pp.1241-1256.
- Parchure, T. M.and Mehta, A. J. (1985): Erosion of soft cohesive sediment deposits, Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.111, No.10, pp.1308-1326.
- Shaikh, A., Ruff, J. F.and Abt, S. R. (1988): Erosion rate of compacted Na-montmorillonite soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.114, No.3, pp.296-305.

The study on bank erosion with cohesive materials

Nobuhisa NAGATA*, Yoshio MURAMOTO* and Kuniyuki MINEGISHI*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Erosion processes of river bank with cohesive materials are investigated by means of hydraulic experiments and numerical analyses. In the experiments, we used the consolidated soil samples as the erodible bank. The influence of consolidation pressure, shear stresses and the percentage of silt and clay content on bank erosion rates are discussed from the results of the experiments. A numerical model for the bank erosion processes is developed by coupling the algebraic stress turbulence model with a stochastic model for the detachment and transportation of cohesive sediment flakes.

Keywords: cohesive material, bank erosion, stochastic model, numerical analysis