

粘着性(ガタ土)流路の侵食、掃流機構に関する研究

On the erosion and transportation in a channel
formed with cohesive soil (gata soil)

福岡捷二* 石川 浩** 日比野忠史*** 島本重寿****

by Shoji FUKUOKA, Yutaka ISHIKAWA, Tadashi HIBINO, Shigehisa SHIMAMOTO

There are serious problems of the deposition of gata soil along the bank in rivers inflowing to the Ariake Sea. The erosion and transportation of the gata soil is investigated by the experiment using an open channel excavated on the flood channel of the Rokkaku river. It is found that while naturally-deposited gata soil on the channel bed is eroded by the tractive force of the flow as much as 1/40 of gata soil cohesive resistance, the gata soil forming the flood channel and deposited along the river bank has very strong erosive resistance. The removal methods of the gata soil which are deposited on the bank are proposed by the field experiment, considering characteristics of gata soil.

Keywords : *cohesive soil, gata soil, erosive resistance, field test, countermeasure*

1. はじめに

有明海に流入する河川では、有明海特有の大きな干満差により湾内の「ガタ土」と呼ばれる微細な粘土が浮遊して河道内を移動し、河岸付近に堆積する。このため河積が減少し洪水時には氾濫しやすい状態が生じており、これに対する対策が求められている。

本研究は河岸付近のガタ土の堆積軽減のための対策を考えることを狙いとして、六角川高水敷上に水路を開削しガタ土の現地流送実験を行い、ガタ土の洗掘、輸送特性について検討を行っている。自然河岸は複雑な土質構造、特性を有しており、侵食機構に関する実際研究は少ない¹⁾。福岡、大東ら^{2) 3)}が荒川高水敷上で行った砂、シルト、粘土が互層をなす河岸での実験では、耐侵食性の小さい砂層から侵食が始まり、ヒサシ状河岸の形成、ヒサシ部土塊の崩落、崩落土塊の細分化・流送という一連のプロセスによって河岸の侵食・拡幅が進行することが示されている。しかし粘着性の高い微細な粘土からなる六角川のようなガタ土河岸の侵食機構については十分明らかにされていない。ガタ土は乱すとその特性が変化することから、本研究

-
- * 正会員 Ph.D 工博 広島大学教授 工学部第四類(建設系)
(〒739 広島県東広島市鏡山1-4-1)
- ** 正会員 建設省九州地方建設局 武雄工事事務所長
(〒843 佐賀県武雄市大字富岡8847)
- *** 正会員 工博 広島大学助手 工学部第四類
- **** 学生員 広島大学大学院工学研究科 博士課程前期

ではガタ土の堆積土からなる六角川の高水敷上に水路を掘削し、通水することにより、ガタ土の侵食、流送機構について検討を行っている。

2. 六角川高水敷における現地実験

2.1 実験方法

六角川10.6km左岸の高水敷上に表層から0.8mの深さの位置に幅7m、長さ40mにわたって掘削し、さらにその掘削部の中央に高水敷幅3.0m、低水路幅1.1m、長さ30m、深さ0.5mのほぼ水平な河床を持つ複断面直線水路を掘削した(写真-1)。高水敷上にはヨシが生育し、ヨシの根が深く地中に入っていたため、その影響を除くためにあらかじめ0.8mの深さまで掘削を行った。実験はポンプによって河川水を水路内に導き、ポンプ台数を変えることで流量を変化させた。水路上流を断面No.1とし5m間隔にNo.7まで測定断面を設置し、各測定断面において水位を測定し、水路中央部(No.4の2.5m下流)で流速分布の測定を行った。また通水停止後に各測定断面で横断面形状の測定を行った。侵食実験は三種類行った。第一は掘削したままの高水敷堆積ガタ土の洗掘実験(case A)、第二は現地河岸に堆積しているガタ土を採取し一晩静置した後、case Aの水路の右岸側に左岸法先から右岸法肩まで敷きつめた河岸堆積ガタ土の洗掘実験(case B)、第三はcase Aの水路内に約3カ月間潮の干満差を利用してガタ土を含む河川水を自由に流入させ、ガタ土を自然に沈降堆積させた自然沈降堆積ガタ土の洗掘実験(case C)である。

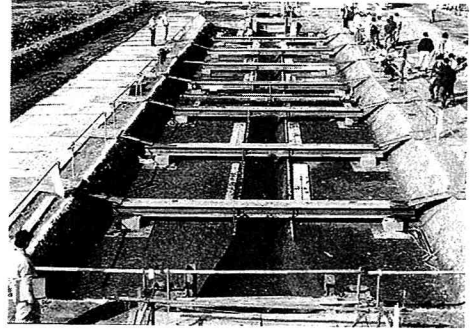


写真-1 実験水路全景

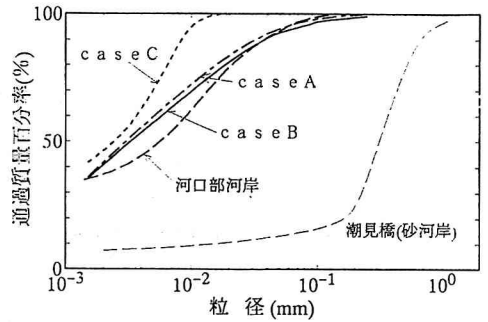


図-1 粒度分布

表-1 ガタ土の粘着力及び含水比

		試験方法	粘着力 c (kgf/m ²)	含水比 ω (%)
高水敷堆積ガタ土		一軸圧縮試験	618~885	118~130
河岸堆積ガタ土			317~475	117~125
沈降 堆積	堆積深さ10cm	ベーンせん断 試験	10~26	340~380
	50cm		45~70	270~280

2.2 ガタ土の土質特性

図-1はcase Aに用いた高水敷堆積ガタ土、case Bの河岸堆積ガタ土及びcase Cの自然沈降堆積ガタ土の粒度分布を示している。比較のため六角川上流の砂河岸及び河口部河岸の粒度分布を併せて載せている。図-1から分かるように、実験水路を構成する高水敷堆積ガタ土及び河岸堆積ガタ土は95%以上が粒子径75μm以下のものである。一方、自然沈降堆積ガタ土では95%以上が1μm以下となっており粒子径が非常に小さく、粘土が60~70%、シルトが30%程度の分布となっている。自然沈降堆積ガタ土は、河川水の上澄みの部分が水路内に流入して形成されたため、河岸堆積ガタ土に比べさらに微細な粒子から成っている。

ガタ土の粘着力を一軸圧縮試験及びベーンせん断試験から求めた。表-1はcase A~Cのガタ土の粘着力及び含水比を、図-2は自然沈降堆積ガタ土の野外ベーンせん断試験の結果を示してい

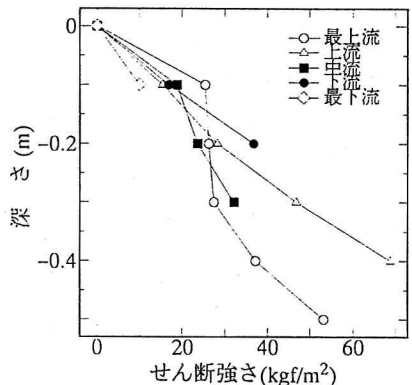


図-2 堆積深さと粘着力の関係

る。ガタ土の含水比、粘着力は堆積厚さ、堆積時間、堆積場所等により異なる。高水敷堆積ガタ土は、その上かなりの量のガタ土が長期間堆積し圧密作用を受けていたために、粘着力は、河岸堆積ガタ土の2倍となっている。一方、自然沈降堆積ガタ土は他のガタ土に比し含水比は約300%と倍以上であり、粘着力は1/10のオーダーである。図-2より自然沈降堆積ガタ土は深さ方向に粘着力が約12.5kgf/m²/10cmの傾きで増していることが分かる。

2.3 河岸侵食実験

行った実験の一覧を表-2に示す。実験条件は六角川の洪水流速に相当する流速の流れに対し、ガタ土はどのような応答をするかを調べることを主目的とした。高水敷を掘削して作った水路(case A)では、ガタ土がほぼ均一で粘着力が非常に大きかったために河岸の洗掘は全く発生しなかった(写真-2)。六角川では洪水時に、河岸の堆積ガタ土が洗掘、流送されていることから河岸堆積ガタ土を採取し一日静置した後、これを図-3の初期断面に示すように水路に敷き均し、ほぼ三角形断面について0.07、0.15、0.18m³/sの3流量を通過し実験を行った(case B)。この場合にもガタ土河岸法面のほとんどの部分で流れによる侵食は生じなかった。この理由は採取された河岸ガタ土で流路をつくるとき乱してしまい、自然の河岸堆積ガタ土よりも粘着力を増大させてしまったためであると考えられる。しかし、写真-3及び図-3に示す水路下流端の断面No.7では射流が現れ、流量0.15m³/s通水時に法面の侵食、崩落が生じた。このとき侵食の生じた場所では最大2m/s以上の流速が発生していた。このときの流れの掃流力は7.3kgf/m²となり等流部の約25倍の底面せん断力となっている。この掃流力はガタ土の粘着力に比し約1/40の大きさである。これらcase A、Bの結果から、圧密されたり、乱されたガタ土は大きな粘着力を持つため侵食抵抗が著しく大きくなっており、河岸は2m/s以上の流速(粘着力に対しては約1/40程度の掃流力)が発生しないと侵食は生じないことが分かった。

2.4 自然沈降堆積ガタ土の掃流実験

高水敷堆積ガタ土及び河岸堆積ガタ土は侵食抵抗が著しく大きく流れによる侵食が生じなかったことを踏まえ、より実際のガタ土の洗掘、流送実験を行うために、潮の干満差を利用して水路内にガタ土を含む河川水を自由に流出

表-2 実験条件

	流量 Q(m ³ /s)	エネルギー 勾配 I _e	水深 h (m)	掃流力 τ (kgf/m ²)	平均流速 V(m/s)
case A	0.08	14/10000	0.20	0.18	0.61
	0.17	18/10000	0.28	0.31	0.84
	0.25	17/10000	0.33	0.32	1.00
	0.38	29/10000	0.44	0.67	1.07
	0.46	36/10000	0.52	0.94	1.03
case B	0.07	21/10000	0.41	0.27	0.42
	0.15	16/10000	0.50	0.27	0.60
	0.18	24/10000	0.56	0.48	0.57
case B (断面No.7)	0.15	72/1000	0.24	7.25	1.60
case C	0.03	61/10000	0.06	0.35	0.52
	0.07	64/10000	0.10	0.62	0.72
	0.14	52/10000	0.19	1.00	0.86

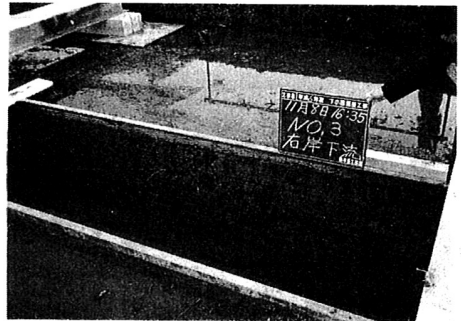


写真-2 河岸法面の状況 (case A)



写真-3 洗掘、崩落の状況 (case B)

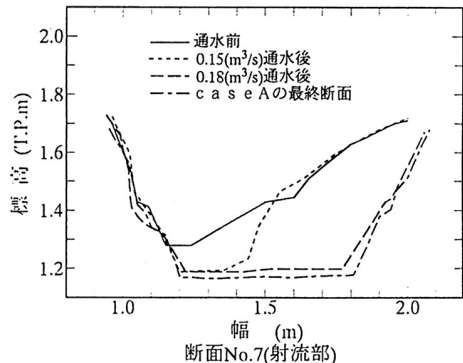


図-3 横断面形状 (case B)

入させ水路底に自然に沈降堆積させた状態での沈降堆積ガタ土について実験を行った。ガタ土の堆積深さは水路上流で約50cm、下流で約10cm、最終的な堆積勾配は1/150である。図-4は通水による平均縦断水位と平均河床高を流量毎に示している。下流端の堰の影響で下流側の水位が少し高くなっているが実験は概ね等流状態で行われたことが分かる。写真-4は流量0.03m³/s通水10分後の断面No.1~No.2の河床の洗掘状況を示している。このように表層のガタ土の洗掘抵抗の弱い部分が層状に剥がされ塊状で流送されている。そしてこの箇所流れが集中して滯筋を発達させながら次第に洗掘が進んでいく。河床は様に洗掘されず、最初に洗掘の生じた場所に集中して洗掘が起こっている。この時の平均的な流れの掃流力は0.052kgf/m²となり、表層のガタ土の粘着力に対し約1/40となっている。これは表層の含水比が高く粘着力の小さな部分または細かな亀裂等のある弱い部分に最初に洗掘が生じ、そこから徐々に洗掘面が広がっていくために小さな掃流力でも洗掘域が発達していくものと考えられる。流量増加により流速が大きくなると、滯筋周囲のガタ土の崩落を伴いながら大きな洗掘へと進み、侵食量は増大していく。

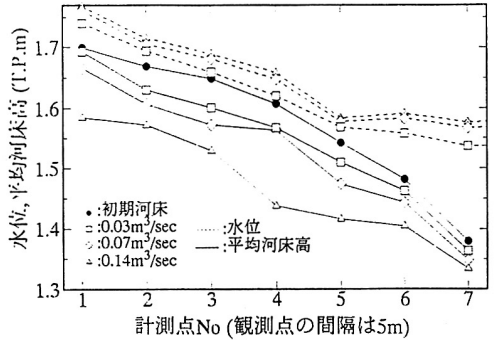


図-4 縦断水位と平均河床高

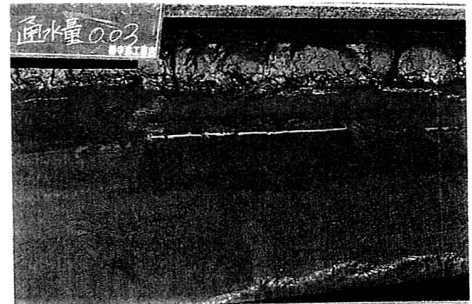


写真-4 河床の洗掘状況 (case C)

実験結果の解析は7つの測定断面の値を平均した値を用いている。図-5は通水時間と平均侵食深の関係を示している。侵食深の標準偏差は0.5~3cm程度であり、洗掘深の増大に伴いその値は大きくなっている。侵食深は通水時間の対数にほぼ比例して増加していき、通水流量が大きいほどその傾きも大きいことが分かる。福岡、藤田³⁵⁾は野芝で覆われた地面の侵食について平均侵食深 y (cm)と通水時間 t (min)との間に次の関係が成立することを見出している。

$$y = A \log t + B \quad (1)$$

沈降堆積ガタ土においても式(1)の形が近似的に成立すると考えて良い。図中の実線はB値を0として各通水量の平均流量と通水時間の関係を式(1)の形で表現したものである。図-6に図-5から求められるA値と摩擦速度 U_* との関係を示している。A値は U_* の関数となっており、今後さらにこの点について検討し、利用可能な式まで精度を高める必要がある。

図-7は平均侵食(掃流)深と摩擦速度の関係を示している。平均侵食深は摩擦速度の増加に伴い増加している。△のケースは他のプロット点の傾向からずれている。これは急激な洗掘が生じたため河床勾配が緩やかになり、摩擦速度が減少したためである。

図-8は沈降堆積ガタ土の粘着力と掃流力の関係を示している。図中のせん断強さはベーン試験によって求めたものである。これによると沈降堆積したガタ土の洗掘は平均的には粘着力の約1/20

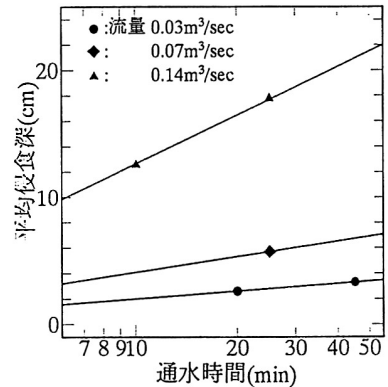


図-5 侵食深と時間の関係

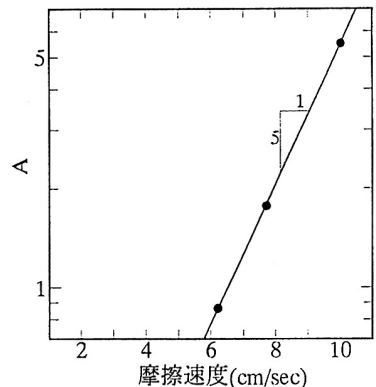


図-6 A値と摩擦速度の関係

の掃流力で起こっている。
これは各断面を平均して求めたものであり、初期の局所的な洗掘は粘着力の約1/40の掃流力で生じている。したがって、この沈降堆積ガタ土では粘着力の約1/40～1/20のオーダーの掃流力で侵食が起こることが分かる。

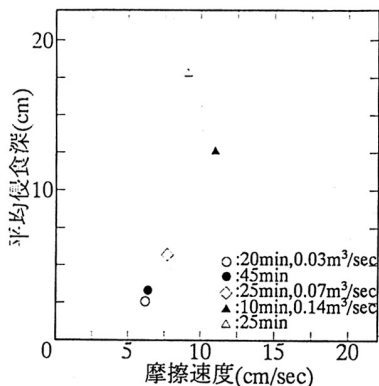


図-7 侵食深と摩擦速度の関係

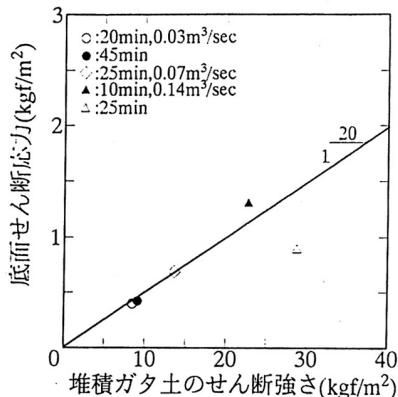


図-8 底面せん断力と粘着力の関係

2.5 河岸堆積ガタ土の除去対策

河岸堆積ガタ土は含水比が高いため、ガタ土斜面法先が洗掘されたり、またガタ土表面の亀裂に水が入ると滑りやすくなるのが現地で確認されている。これらは、河岸ガタ土を除去する技術として利用できるかどうかを検討するために以下の2つの実験を行った。

高水敷を表面から約4m掘り下げた位置で、ガタ土の上面、側面の土を取り除いた後、徐々に下方のガタ土を切り出すことによって、幅、厚さの等しい正方形断面を持つヒサシ状ガタ土を整形する。あるヒサシ長さになり、安定が崩れ崩落したときの限界ヒサシ長さを測定した(写真-5)。4m掘り下げた理由は、ヨシ原の根が入らない様なガタ土材料について実験を行うためである。図-9は実験結果をプロットしたものである。荒川で行われたシルト材料の同様な方法による実験³⁾と異なり、ガタ土ではヒサシのスケールに関わらず、限界ヒサシ長さはほぼ一定値を取ることが分かる。いまヒサシ状ガタ土は図-10に示す破壊面でせん断破壊するものと考え、重力とせん断力の釣り合いから、

$$\tau = \gamma Lc \quad (2)$$

となる。ここに、 τ はせん断応力、 γ は単位体積重量、 Lc は限界ヒサシ長さである。同一のガタ土ではせん断強さ、単位体積重量はほぼ一定値をとるため、式(2)より限界ヒサシ長さはほぼ一定値を取ることになる。このようにガタ土の崩落はせん断破壊によって生じ、ほぼ一定のヒサシ長さで崩落する。このときのせん断強さを求めると347～611kgf/m²となり、一軸圧縮試験で求めた粘着力とほぼ等しい値を取っている。ガタ土のこのような崩落機構を利用して、種々の手段を用いて河岸に堆積したガタ土の法先部分に侵食を起こさせ、ヒサシ状にすることで安定性を失わせてヒサシを崩落させ、流れによって流送させることによって、河道幅の維持の可能性が考えられる。

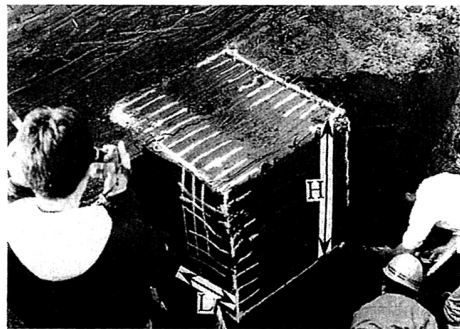


写真-5 崩落実験の状況

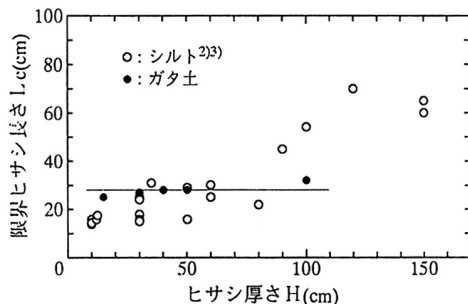


図-9 ヒサシ厚さと限界ヒサシ長さの関係

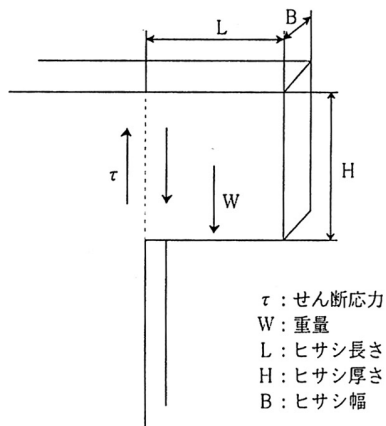


図-10 破壊の形態

τ : せん断応力
W: 重量
L: ヒサシ長さ
H: ヒサシ厚さ
B: ヒサシ幅

他の1つは、ガタ土の亀裂に水が入ると滑りやすくなる性質を利用することである。この機構を調べるために模型実験を以下の手順で行った。縦1.5m、横2m、高さ0.9mの大型の水槽に穴を開けた仕切り板を設ける。1) 仕切板を挟んだ一方の側に河岸から採取したガタ土を斜めに敷き詰める。2) ガタ土を敷き詰めた側に法肩まで水を入れ満した後、もう一方の側に同じレベルまで水を満す。3) ガタ土を敷き詰めた側の水を徐々に排水し、ガタ土の滑り破壊を調べる。写真-6は実験の結果、亀裂を生じて滑り破壊している様子を示している。これは川表側の水位低下で生じたガタ土の亀裂内の水圧との圧力差により、ガタ土が押し出され滑り破壊したものと同様と解釈される。ガタ土河岸では自重によるガタ土の流動及び表面の乾燥収縮により河岸斜面に亀裂が発生しており、潮汐による水位上昇によって亀裂に水が入り、斜面の滑りと破壊を起こさせることになる。このガタ土斜面の滑りの機構を利用して、河岸斜面に人工的に多くの亀裂をつくり出し、滑り破壊を増大させ、流送によって堆積ガタ土を除去することも1つの対策として考えられる。これら2つの方法を現地に適用し、河岸ガタ土の除去に有効な方法と成り得るかを現在検討中である。

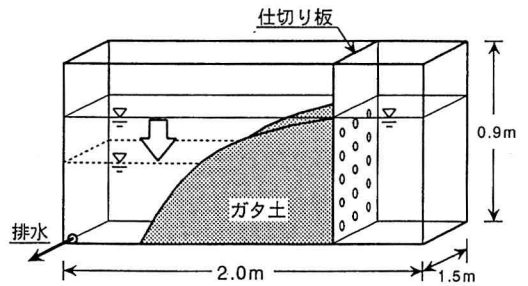


図-11 実験装置及び実験方法

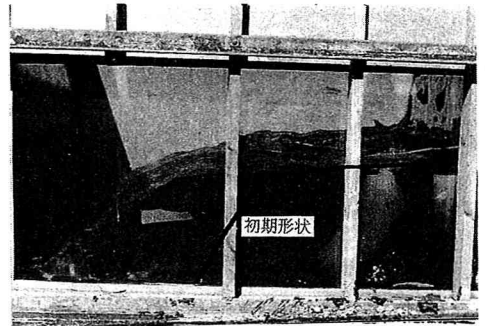


写真-6 滑り実験の状況

3. 結論

以上の調査、研究から次のような主要な結論が導き出された。

- 1) 高水敷及び河岸に堆積したガタ土は大きな粘着力を持つため、侵食抵抗が著しく大きい。
- 2) 河川水の流入によって自然に沈降堆積した粘着力の小さい軟弱なガタ土河床は、含水比が高く粘着力の小さい部分から、層状に剥がされるよう洗掘され、その箇所に流れが集中して濘筋を発達させながら洗掘が進行していく。河床の洗掘は平均的な流れの掃流力が粘着力の約1/40程度で起こっている。
- 3) ガタ土の侵食深と時間の関係は次式、 $y = f(u_*) \log t$ で近似的に表される。
- 4) ガタ土の崩落破壊はせん断破壊によって生じ、ほぼ一定のヒサシ長さで崩落する。
- 5) 堆積ガタ土の法先部分に侵食を起こさせヒサシ状にしたり、ガタ土の亀裂への水の注入によってガタ土を崩落、流送させることにより河岸堆積ガタ土を除去できる可能性を調べた。

参考文献

- 1) 吉川秀夫編著：流砂の水理学 第8章 粘着性土砂の侵食と堆積 丸善株式会社 pp.249-271 1985
- 2) 福岡、木暮、佐藤、大東：自然堆積河岸の侵食過程 水工学論文集 第37巻 pp.643-648 1994
- 3) 建設省荒川上流工事事務所：河岸侵食・拡幅機構に関する研究－荒川上流部低水路河道を事例として－ 94p. 1994
- 4) 福岡、藤田：堤防法面張葦の侵食限界 水工学論文集 第34巻 pp.319-324 1990
- 5) 福岡、渡辺、柿沼：堤防芝の流水に対する侵食抵抗 土木学会論文集 No.491/II-27 pp.31-40 1994