

# 粘性土(シルト)河岸の流水による侵食拡大機構

## EROSION EXPANSION MECHANISM OF COHESIVE (SILT) BANK BY THE STREAM FLOW

福岡捷二<sup>1</sup>・渡邊明英<sup>2</sup>・片山敏男<sup>3</sup>・板屋英治<sup>4</sup>・  
柏木幸則<sup>5</sup>・山縣 聡<sup>5</sup>・林 基樹<sup>6</sup>

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Toshio KATAYAMA, Eiji ITAYA,  
Yukinori KASHIWAGI, Satoshi YAMAGATA and Motoki HAYASHI

<sup>1</sup>フェロー会員 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)

<sup>2</sup>正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類(建設系) (〒739 同上)

<sup>3</sup>正会員 建設省中国技術事務所副所長 (〒736広島県広島市安芸区船越南2-8-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 建設省徳島工事事務所調査一課課長 (〒770徳島県徳島市上吉野町3-35)

<sup>5</sup>学生員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程前期 <sup>6</sup>学生員 広島大学工学部 環境工学課程

It is important subject for controlling flood to estimate erosive resistance of natural riverbank. Several studies on the erosion of consisting of cohesive soil have been made in recent years. In those studies, only cross sectional erosion depth has been paid attention to. But, bank erosion depth increases with widening its area. And, failure of overhanging bank comes about by large erosion area.

The point of this paper is that expansion mechanism of erosion area is examined. Indoor erosion experiments were given using undisturbed floodplain soil of the Yoshino River, Shikoku, Japan. In addition, overhanging banks are reproduced by hydraulic model to examine the longitudinal change of flow characteristics. As the consequence of those experiments, erosion process of cohesive bank and mechanism of failure of overhanging bank are clarified.

**Key Words :** *undisturbed cohesive soil, erosive resistance, overhanging bank, erosion expansion mechanism,*

### 1. 序論

多自然型川づくりが、河道設計の基本に位置づけられるようになった今日、自然堆積河岸が洪水によってどの程度侵食されるのか把握することは、治水上の重要な課題である。このため自然堆積土、特に粘着性土の持つ侵食抵抗を見積もることが必要となっている。このような背景のもと、近年我が国においても、粘着性河岸の侵食に関連する研究が行われるようになってきている<sup>1), 2) 3)</sup>。

福岡ら<sup>1)</sup>は、最近数年間にわたり現地河川や実験室において、粘性土河岸の侵食機構について検討を進めている。すなわち、荒川、百間川、六角川などの高水敷に造られた現地水路の側岸侵食実験では、シルト、砂の互層構造を成す自然堆積河岸は、1) 比較的侵食抵抗の小さい層の侵食によるヒサシの形成、2) ヒサシ状となった河岸の崩落、3) 崩落土塊の細分化・流送、といった侵食過程をとることが示されている。これをもとに、各侵食過程

に着目した研究<sup>4), 5)</sup>がなされており、ヒサシ状河岸の崩落に至る限界ひさし長さの評価、土塊の流送時間の計算、これらを総合化した河岸の侵食抵抗の計算方法等が提案されている。さらに、現地の高水敷から採取した種々の自然堆積土を用いた侵食実験<sup>6)</sup>では、土質特性と侵食特性の関係付けを試みている。

しかしそれらに共通して言えることは、河岸侵食を幾つかの断面の、侵食の深さに着目して考えており、侵食を平面的な広がり幅で評価していないという不十分さである。河岸侵食は横断方向に深さだけを増していくことはなく、縦断方向にある程度の広がりを持たなければヒサシ状河岸の崩落も起こり得ない。

本研究では、シルトから成る比較的均質な土質構造の吉野川の高水敷土を、乱さずに採取し実験を行い、河岸侵食が縦断・横断方向に拡大していく機構を調べた。さらに、侵食が縦断方向(上下流)に伝播し拡大していくプロセスをより詳細に調べるため、ヒサシ状河岸を水理模型により再現し、侵食実験の結果の説明を試みている。

表-1 侵食実験条件

	実験番号	流量(l/s)	流速(cm/s)	水深(cm)	水路勾配	フルード数	通水時間(hours)
実験case1 (総通水時間6.8時間)	case1-1	4.7	12.3	15.5	1/1000	0.10	2.6
	case1-2	6.3	16.7	15.7	1/500	0.13	0.7
	case1-3	16.9	43.3	15.6	1/200	0.35	2.0
	case1-4	35.3	113.4	12.5	1/200	1.03	1.0
	case1-5	41.1	129.3	12.7	1/150	1.16	0.5
実験case2 (42.5時間)	case2-1	14.1	37.5	15.1	1/1000	0.31	9.0
	case2-2	19.9	52.5	15.2	1/500	0.43	18.0
	case2-3	42.5	113.9	14.9	1/200	0.94	15.5

## 2. 吉野川の土を用いた侵食実験

### (1) 試料の採取及び土質特性

吉野川高水敷土をこれまでと同様の方法<sup>9)</sup>により乱さずに採取した。採取した試料は一つが長さ1m、高さ0.3m、奥行き0.15mである。土質特性の連続性を持たせるため同じ層から15個採取した。試料の運搬中に破損していたもの及び特異な土質構造を有しているものは侵食実験には用いないことにした。

採取した試料の粒度試験の結果を図-1に示す。いずれも粒径0.005mm以下の粘土分を20%程度含み、0.425mm以上の粗砂分はほとんど含まず、中間の粒径に集中しているため、工学的にシルトに分類される。一軸圧縮試験により求めた試料の粘着力は0.15kgf/cm<sup>2</sup>であり、比較的粘着性が高い土であることが分かった。試料の表面から見た土質構造はほぼ均質で、明確な層構造や局所的な構造の偏りは認められなかった。

### (2) 実験条件及び方法

採取した試料を、図-2に示す可変勾配型の直線水路に4~5個連続して設置した。この水路は、全長16.5mで上流に3mの整流槽を持ち、水路長さ13.5m、水路幅0.4m、深さ0.5mである。試料の上下流には試料と同じ厚さの平板を設置し水路幅を0.25mに設定している。

侵食実験は2回行った。1回目(case1)は試料を5個設置し、2回目(case2)は4個設置した。それぞれの実験条件を表-1に示す。実験case1では条件を頻繁に変えている。実験case2では基本的に一定の外力条件で通水し、横断方向の侵食深さ、縦断方向の侵食幅の時間的な変化過程を調べた。通水中にポイントゲージを用いて水位の測定を行い、電磁流速計により流速を測定した。流量は下流端に設置した水槽の四角堰を用いて算出した。ある程度の侵食の進行が認められた時点で通水を止め、水路から徐々に排水した。通水停止後に試料の形状を鉛直方向に1cm、流下方向に2~10cmピッチで測定した。試料の連続写真を撮影した後、再び通水を開始し、これを繰り返した。

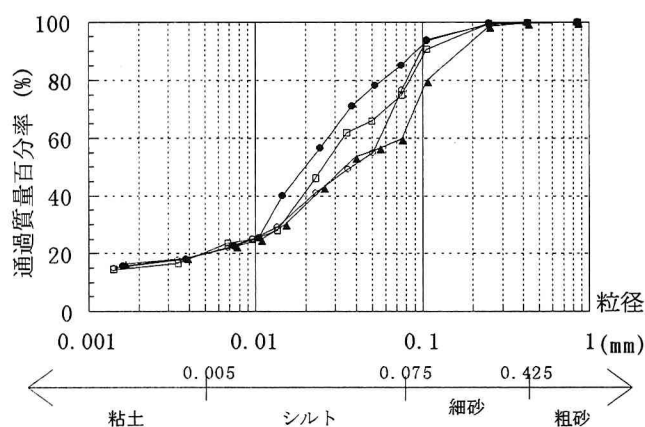


図-1 粒径加積曲線

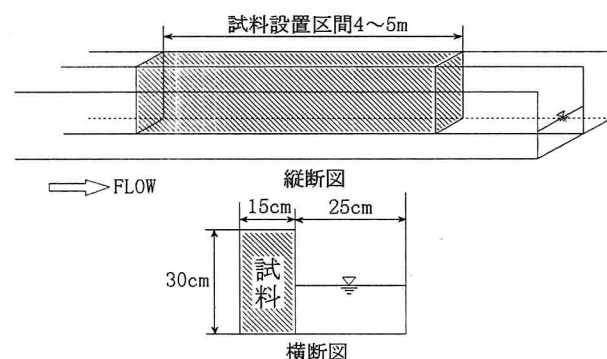


図-2 実験水路

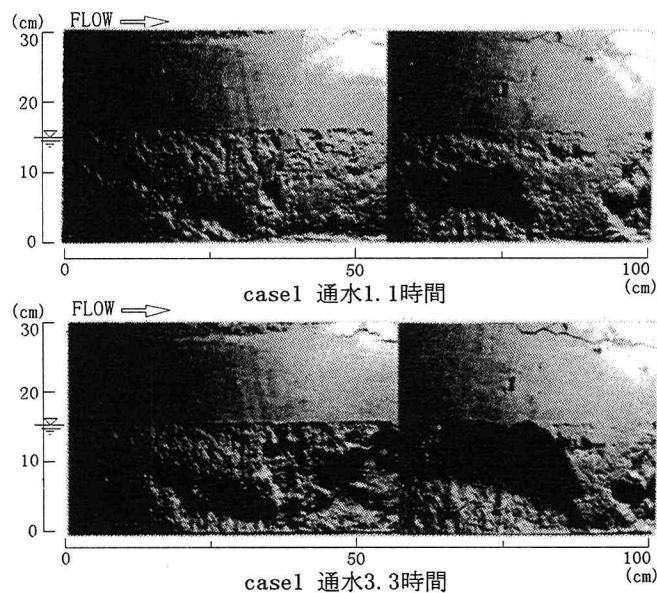


写真-1 試料の侵食状況

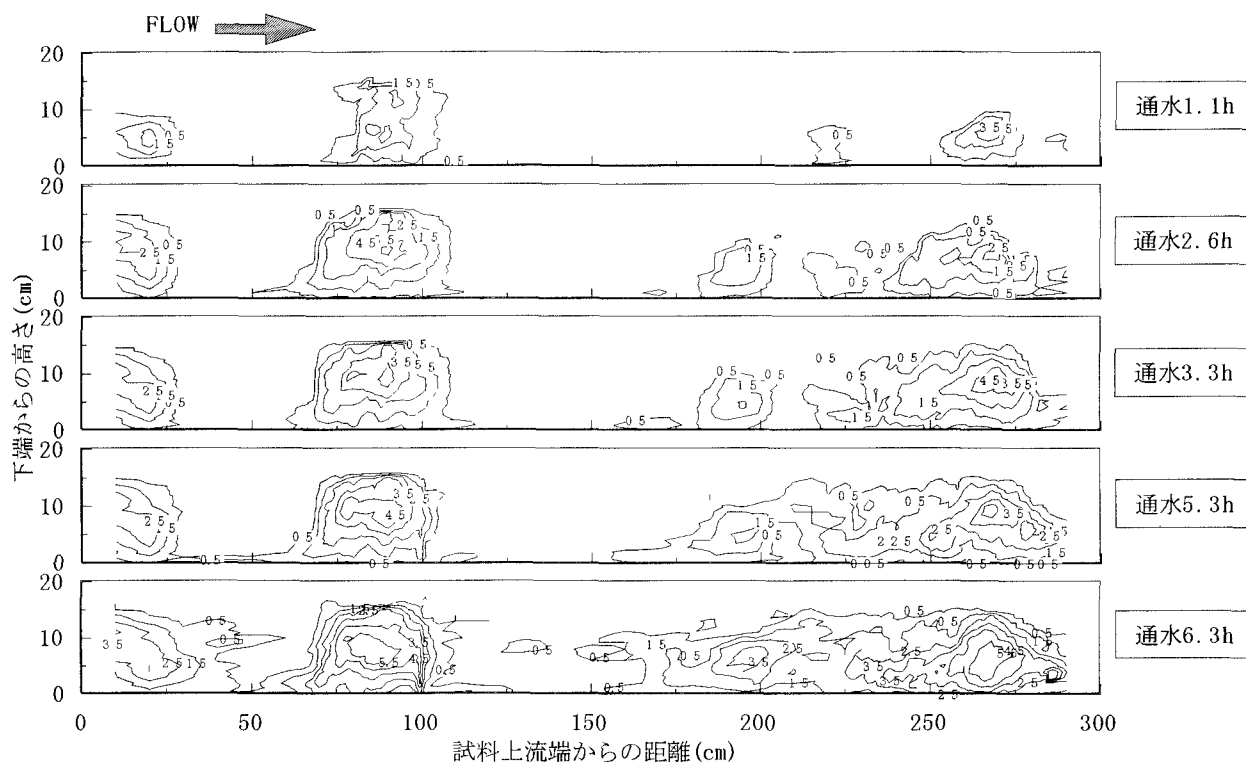


図-3 侵食深コンター (実験case1)

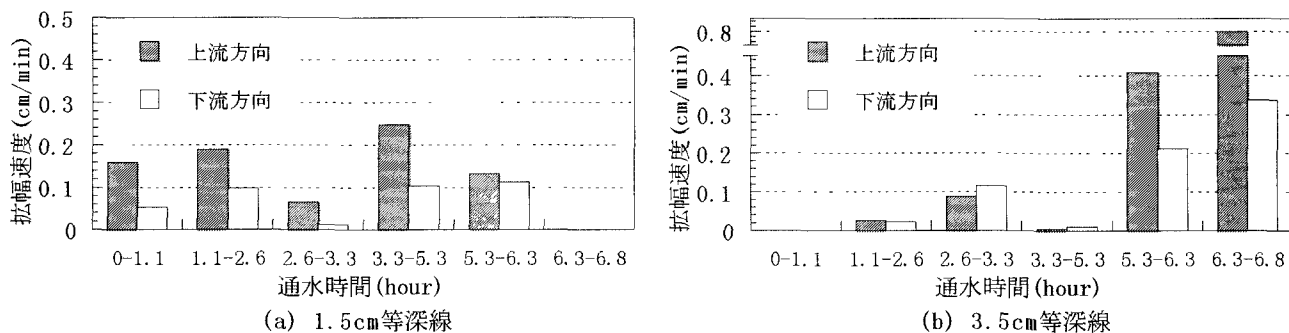


図-4 縦断侵食速度の比較 (実験case1)

### (3) 実験case1の結果

上流から3個目に設置した試料の侵食状況を写真-1に示す。水面下の試料全体が均等に侵食されるわけではなく、試料左端から60cm付近で大きな侵食が生じている。上流から4個目と5個目に設置した試料はほとんど侵食されなかった。これは下流端で堰上げを行っている影響と考えられる。

図-3は、試料の侵食状況を侵食深のコンターにより示したものである。ランダムに生じた初期の侵食部分が長さ、高さ、奥行きを増しながら、しかし最大侵食深の位置はほとんど変わらず、縦断方向につながって行く過程が見られる。注目すべきことは、260cm付近で生じた侵食が明らかに上流方向に進んでいることである。

これを定量的に評価するため、侵食深の等深線が上下流へ進んだ距離を用いて、縦断方向の侵食速度を求めた。260cm付近で生じた侵食について、侵食深が1.5cmと3.5cmの等深線における上下流への拡幅速度を比較した結果を図-4に示す。どちらの深さにおいても、ほとんど

の時間帯で上流方向へ拡幅する速度が、下流方向に比して大きくなっている。このため、ある箇所が発生した粘性土の河岸の侵食は、主に上流に伝播すると言われている。また、等深線1.5cmの拡幅速度が6:18~6:50でゼロになっているのは、十分に拡幅した結果隣の侵食部分とつながったためである。等深線3.5cmでは後半の時間帯で拡幅速度が大きくなっている。このことから、表面付近の侵食が十分広く生じた後に、比較的深い部分が侵食されることが分かる。

### (4) 実験case2の結果

case2-1, case2-2では試料の欠陥部や比較的侵食抵抗の低い箇所でも崩れるように侵食され、それ以上侵食は進行しなかった。そのため、case2-3の条件に変更し通水を行った。図-5に、case2-3以降の侵食深のコンターを示す。case1と同様、初期の侵食は異なる箇所でもランダムに発生しており、これが核となって拡大していくことが分かる。通水5.0~11.5時間では、各箇所の侵食が複

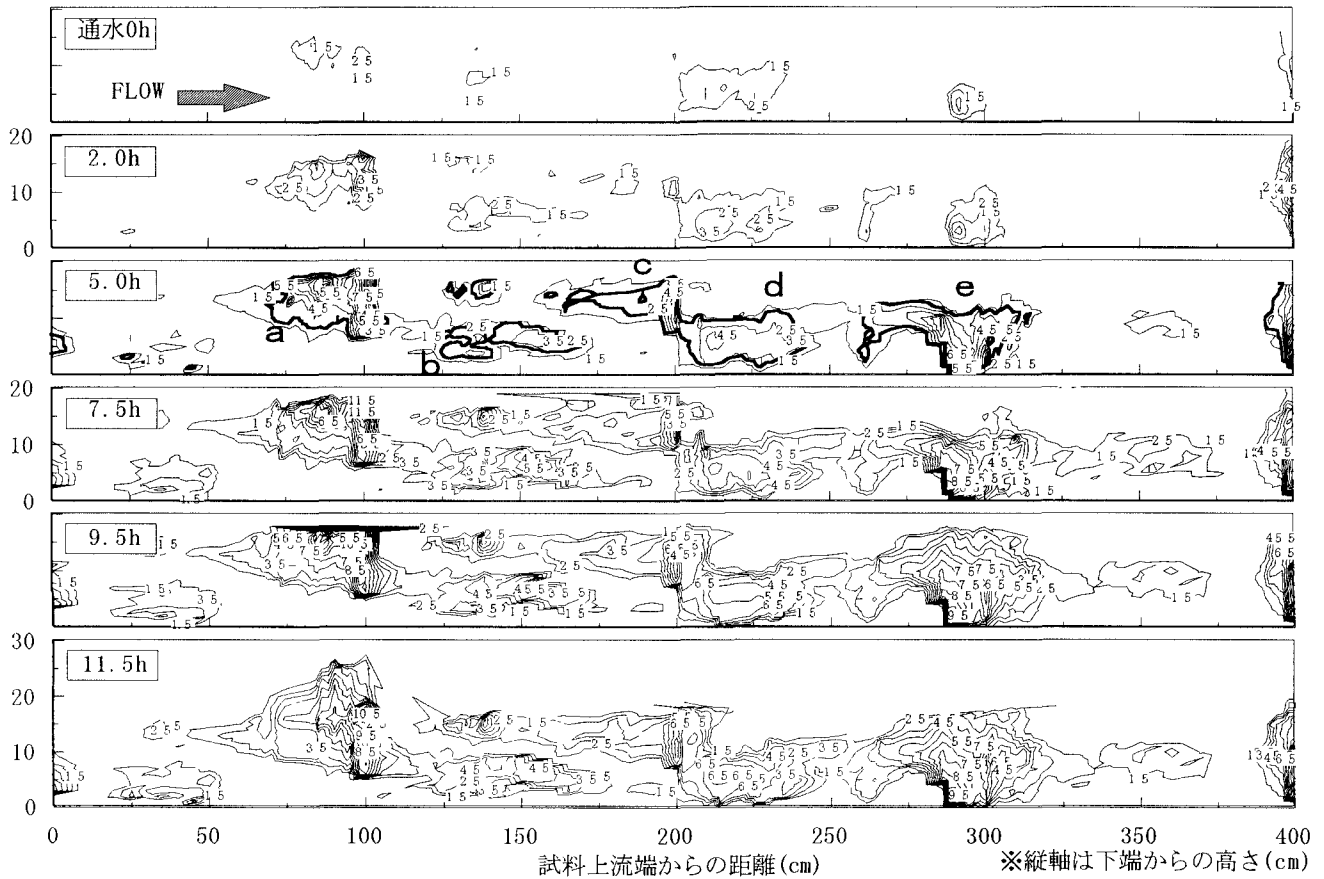
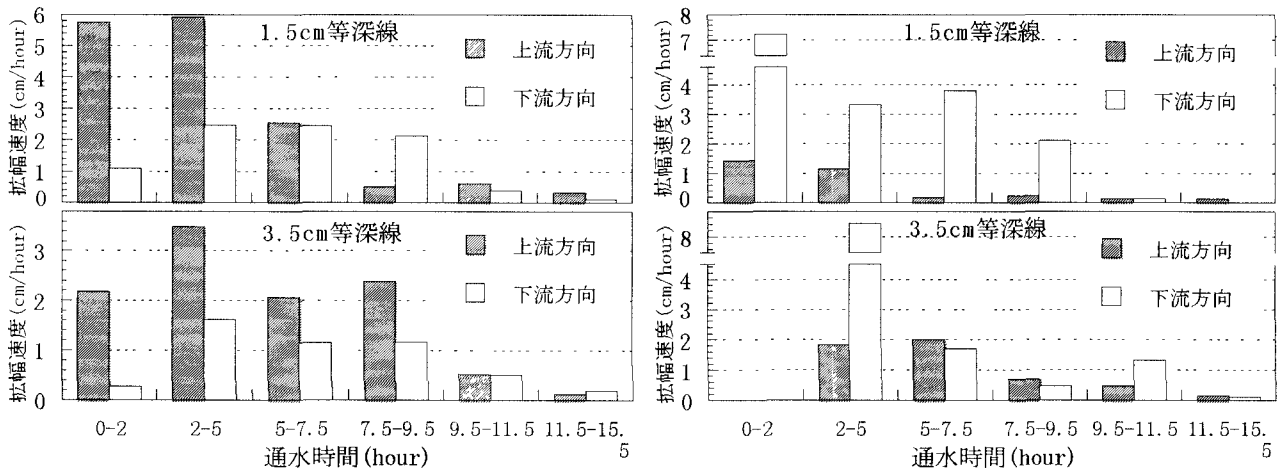


図-5 侵食深コンター (実験case2)



(a) 侵食箇所 a, c, e の平均(同心円侵食タイプ)

(b) 侵食箇所 b, d の平均(平面侵食タイプ)

図-6 縦断侵食速度の比較 (実験case2)

雑につながって行き、試料全体にわたる大きな侵食となっている。各箇所の侵食が拡大する過程を検討するため、図中に示すようにそれぞれの侵食箇所を a, b, .., e と呼ぶ。侵食箇所 a, c, e は、侵食箇所 b, d に比して最大侵食深は大きく、侵食の形状は最大侵食深を中心に同心円状である。一方侵食箇所 b, d は、侵食の深さは比較的浅く、侵食の形状は平面的である。そこで図-6に、侵食箇所 a, c, e (以下同心円タイプ) と侵食箇所 b, d (以下平面タイプ) を区別し、上下流への拡幅速度の平均を比較した結果を示す。

同心円タイプの侵食ではどの深さの等深線においても、明らかに上流方向の拡幅速度が下流方向より大きくなっている。これとは逆に、平面タイプでは下流方向の拡幅速度が卓越している。このように、河岸の侵食には異なる二種類の侵食機構が存在していると言える。同心円タイプは侵食抵抗の低い箇所が深掘れを起こし、そこを中心として主に上流方向に侵食が進行する。一方、平面タイプは同心円タイプの下流に位置し、直上流の同心円侵食部分の影響を受けた流れによって、粘性土河岸の表面が剥れるように主に下流方向に侵食が進行する。

### (5) 崩落機構

実験case1, case2共に侵食を受けて図-7に示すようなヒサシ状河岸となり、やがて崩落が生じた。実験case1-5では、試料上流端から210cm~290cmの区間で大規模な崩落が起きた。実験case2-3では侵食箇所a, eで小規模な崩落が起きている。表-2に崩落土塊の厚さH, 長さL, 幅Bに関する諸元, 及び引張強度 $T_c$ を示す。荒川高水敷における現地調査<sup>2)</sup>では、ヒサシの幅と厚さの比が、平均的に $B/H=4.0$ という値をとることが示されている。本実験の平均は $B/H=3.1$ であり、値は若干小さいがこの関係にはほぼ対応していると言える。

引張強度については、福岡ら<sup>1)</sup>による引張破壊の式(1)から求めている。ただし土質試験により求めた湿潤密度 $\gamma=1.53\text{g/cm}^3$ を用いている。

$$T_c = \frac{3\gamma L^2}{H} \quad (1)$$

表中の引張強度 $T_c$ の平均値 $T_c=0.026\text{kgf/cm}^2$ を式(1)に代入して求めた曲線、及び各崩落の厚さHと長さLの関係を図-8に示す。実験結果と計算値との差が小さいことから、限界ヒサシ長さLはヒサシ厚さHの平方根に比例して増加すると言うことができる。

また、粘性土の引張強度 $T_c$ は粘着力の1/2~2/3程度の値をとることが過去の崩落実験で報告されている<sup>1), 2)</sup>。ところが本実験での引張強度は、粘着力 $0.15\text{kgf/cm}^2$ の1/5以下となっている。この原因は対象とした崩落が、ヒサシ上部全体の崩落ではなくヒサシ下部の部分的な崩落であり、比較的小さな引張強度で土塊が崩落したためと説明できる。

次に崩落時の侵食規模について検討を行う。図-9, 10は最大侵食深、及び縦断方向の侵食幅の経時変化を侵食箇所ごとに示している。侵食幅については侵食深4.5cmまでの平均値を用いている。図-9は本実験case2-3について示している。侵食箇所a, eの崩落は図中に示す時点に生じた。それらの崩落前の最大侵食深は10cm以上あり、他の侵食箇所と比べて侵食幅も比較的大きい。これよりヒサシ状河岸が崩落するためには、十分な侵食深と侵食幅の両方が必要と言える。

図-10は荒川の高水敷土を用いた侵食実験<sup>9)</sup>により得られたデータである。ほとんどの試料において、通水6分30秒には、全試料幅である100cmの侵食幅になっており、最大侵食深8~13cm程度で次々に崩落している。

### 3. 河岸侵食の伝播機構の実験

実験に用いた水理模型は、図-11に示す長さ170cm, 高さ10cm, 奥行き5cmのヒサシ形状の窪みである。これを水路左岸側に100cmの間隔で2個設置しており、上流側に設置した模型を侵食A, 下流側を侵食Bと呼ぶ。実験の水理条件は、侵食実験のcase2-2に近い条件<sup>7)</sup>に設定した。

表-2 崩落土塊の諸元

崩落箇所	H(cm)	B(cm)	L(cm)	B/H	$T_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
case1 270cm	23.8	75	11.1	3.15	0.024
case2 侵食 a	6.9	24	6.6	3.49	0.029
case2 侵食 e	5.4	14	5.4	2.58	0.025

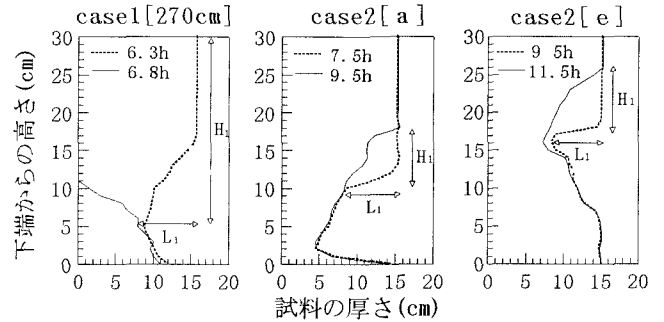


図-7 崩落前後の横断形状

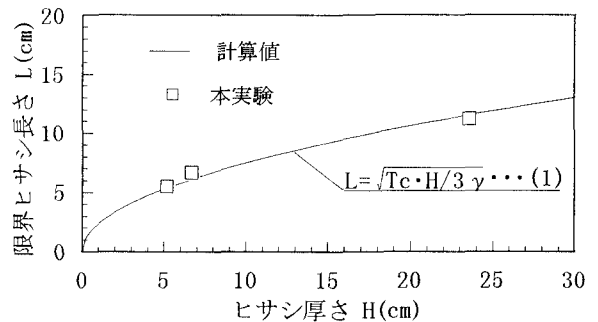


図-8 ヒサシ厚さと限界ヒサシ長さの関係

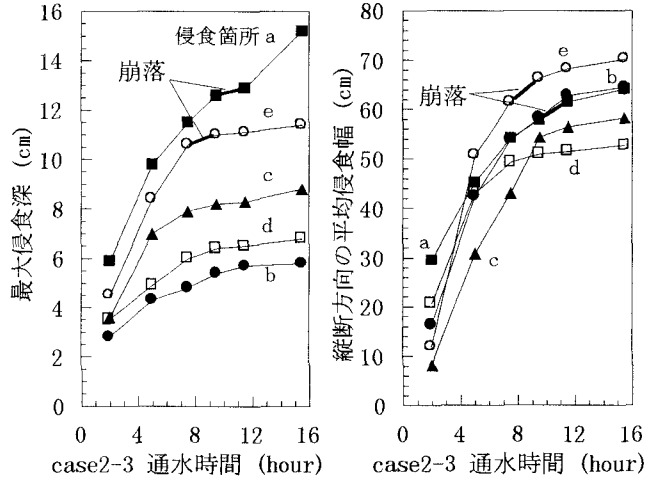


図-9 侵食規模の経時変化(本実験シルト河岸)

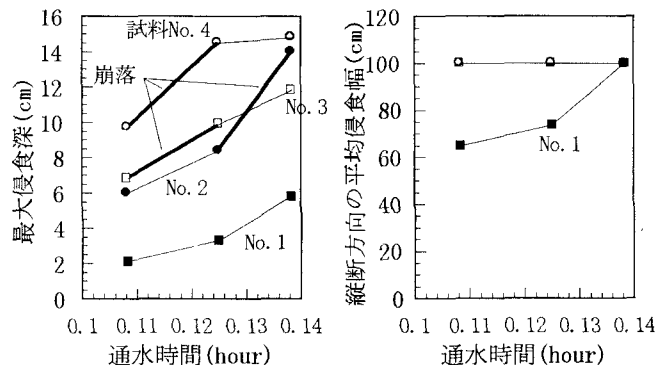


図-10 侵食規模の経時変化(荒川層構造河岸)

図-12は左岸から2cmの縦断面において、I型電磁流速計により測定した主流速の縦断的な変化を示している。侵食Bから0.2m下流の位置では、水路幅の減少に伴う流れの剥離により、大きく減速されている。しかし距離とともに流速は徐々に回復し、約1.5m下流で侵食Aの上流付近の流速と同程度の大きさになっている。侵食Aの直下流においても、減速された流速は侵食Bに至るまで、回復の傾向にある。このことから、侵食部から流下するにつれ、河岸に働くせん断力は大きくなっていると考えられる。

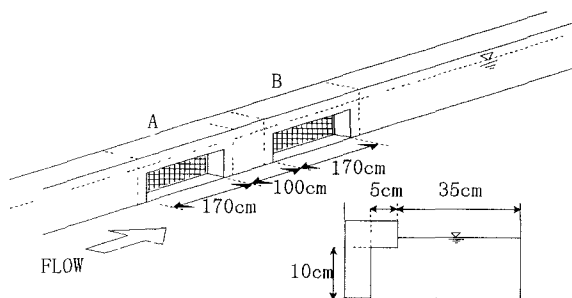


図-11 ヒサシ形状模型

図-13は、侵食抵抗の低い箇所では侵食がランダムに生じた河岸近傍の流況を、模式的に示している。ある間隔で上下流に侵食部が生じている場合、上流側侵食部の下流付近の流速、せん断力は上述の理由により小さくなっており、ここでの侵食は起こりにくい。しかし、下流側侵食部の上流付近では流速、せん断力は回復し大きくなっているため侵食は生じやすい。これが深掘れの侵食部の、上流に伝播する機構であると説明できる。

また、初期に発生した侵食間の河岸の侵食抵抗は比較的高いため、侵食深は小さくなると考えられる。そのため下流側での流れの剥離による減速は小さいが、上流側は深掘れの侵食部の影響により減速されており、侵食されにくい。このため深掘れの侵食部間に発生した侵食は、主に下流に伝播すると説明できる。

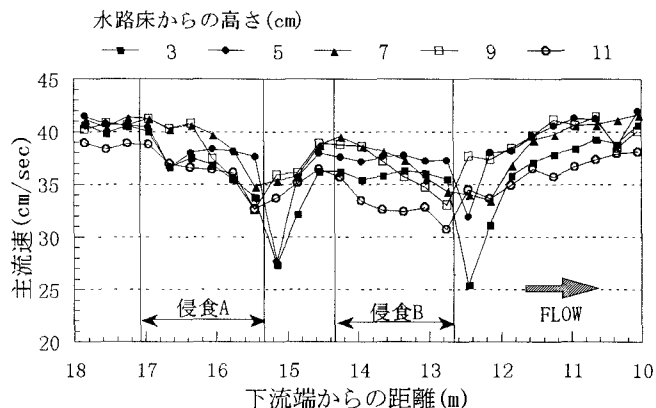


図-12 主流速の縦断変化

#### 4. 粘性土河岸の侵食機構

明確な層構造を成す河岸では、侵食抵抗の小さい砂層が急激に侵食され、縦断方向に河岸全体がヒサシ形状となり、崩落するという侵食過程をとることが示されている<sup>2),6)</sup>。一方、比較的均質な土質構造を成すシルト河岸の侵食過程が、2, 3章の実験より明らかになった。シルト河岸における侵食層の拡大機構は、上述の層構造河岸とは大きく異なっており、2つの拡大機構を有している。

侵食過程は以下のようなものである。1) 比較的侵食抵抗の小さい箇所が侵食されることによる、局所的な深掘れの発生。2) 深掘れを中心とした侵食の上流方向への伝播、及び深掘れ間の平面的な侵食の下流方向への伝播。3) ヒサシ長さ及びヒサシ幅の拡大による、ヒサシ状河岸の崩落。

#### 5. 結論

比較的均質な土質構造を成す、粘性土(シルト)河岸の侵食過程を明らかにし、侵食部が上下流に伝播する機構を説明した。また、同粘性土におけるヒサシ河岸の崩落機構を調べた。今後は、実現象との対応を付けるため、侵食特性を明確に表す土質特性の河川工学的な分類方法、及び侵食外力の定量的な評価方法の検討を行う。

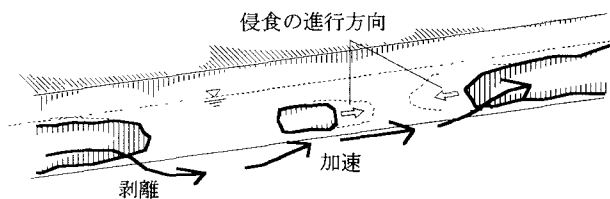


図-13 模式的な侵食機構の説明

#### 参考文献

- 1) 福岡捷二, 木暮陽一, 佐藤健二, 大東道郎: 自然堆積河岸の侵食過程, 水工学論文集, 第37巻, pp. 643-648, 1994.
- 2) 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 -, 1994.
- 3) 建設省土木研究所: 洪水流を受けた時の多自然型河岸防衛工・粘性土・植生の挙動 - 流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために -, 土木研究所資料, 第3489号, 1997.
- 4) 大東道郎, 福岡捷二, 佐藤健二: 自然堆積河岸の侵食係数について, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, II, pp. 568-569, 1993.
- 5) 福岡捷二, 石川 浩, 日比野忠史, 島本重寿: 粘着性(ガタ土)流路の侵食, 流送過程に関する研究, 水工学論文集, 第40巻, pp. 965-970, 1996.
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 小俣 篤, 片山敏男, 島本重寿, 柏木幸則: 河岸侵食速度に及ぼす土質構造の影響, 水工学論文集, 第42巻, pp. 1021-1026, 1998.
- 7) 山縣 聡, 柏木幸則, 福岡捷二, 片山敏男: 流水による河岸侵食の拡大機構, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, II, pp. 460-461, 1998.

(1998. 9. 30受付)