

# 粘性土河床の変動に関する実験的研究

小川 芳明\* 村端 克己\*\* 大石 功\*\*

## まえがき

北海道では泥炭地が広く分布しているが、これらの流域を流れる河川の維持改修に当たって、その河床の洗掘機構が常に問題にされてきた。砂質河床に対しては、移動限界せん断力、流砂量などの研究が進み、河床変動の予測および対策の検討が可能にされるまでになっている。これに対し粘性土河床では研究が少なく、河床の変動を考える基礎的な資料を欠いている現状である。

本研究で対象とした幾春別川は河床が泥炭混り粘土で、ショートカットして以来、河床の洗掘低下が著しく、伏越管、ピアなどに危険を及ぼすようになり、早急に対応が必要となっている。このため昭和39年度から北海道大学工学部河川工学研究室において、41年度からは土木試験所河川研究室において、粘性土河床の洗掘機構およびその防止対策について研究を進めてきた。

## § 1 昭和39年度の実験概要

39年度は取りあえず床止めによる粘性土河床の洗掘防止を重点に研究を進め、次のような結果を得た。

(1) 粘性土では、粘着力Cが洗掘の抵抗を表わすものとしてよく、河床の洗掘速度も河床せん断力 $\tau$ と粘着力Cとの比(C/ $\tau$ )に支配される。

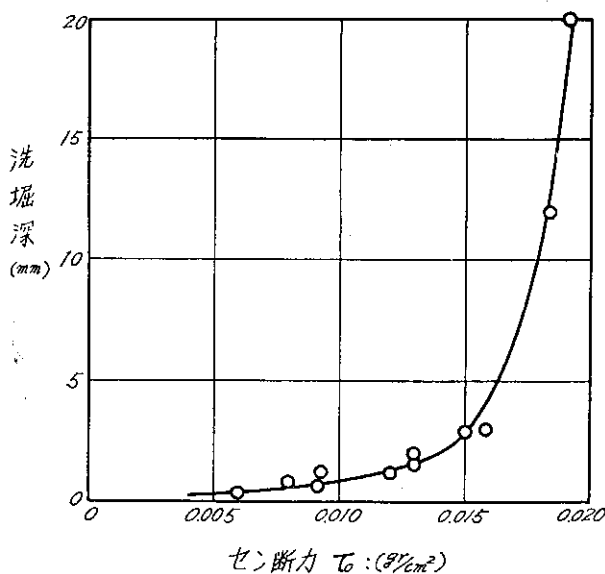


図-1 セン断力と洗掘深との関係

(2) 粘性土では、河床洗掘が急増するようなある限界せん断力が存在する。

(3) 粘性土では、土粒子の移動がただちに河床洗掘となって現われるので、砂質河床のように動的平衡は考えられない。それゆえ、粘性土河床の洗掘を防止するには河床せん断力を限界値以下に保つはかはない。

(4) 河床せん断力を低下させる一方法として、低いセキの効果を実験的に調べ、幾春別川の場合は高さ0.5mのセキの設置により上流約100mの区間の河床せん断力を限界値以下にできる見通しが得られた。

(5) 図-1に示すように、 $\tau_c = 0.012 gr/cm^2$ が限界値とみられる。この値は粘性土の粘着力Cの約1/400である。

## § 2 昭和40年度の実験

### 2.1 実験目的

39年度の実験では模型縮尺として1/30を採用したため、河床せん断力、粘着力とも比較的小きな値であったが、前述のような興味ある結果が得られた。40年度はより大きい粘着力をもついくつかの材料を用い、また実験水路をより大きいせん断力を得るものに変えて実験を行ない、次の諸点を確かめた。

- (1) 河床洗掘に対する粘着力の効果
- (2) 粘性土の洗掘機構の解明

### 2.2 実験装置および実験方法

#### イ 実験装置

大きな粘着力をもつ河床材料の洗掘を研究するためには広い範囲のせん断力を必要とするので、40年度は、最大1.5  $gr/cm^2$ のせん断力までとれるように落差4mを有する閉水路を使用した。水路は10×15cmの矩形断面で長さ4.5mの鉄製のもので、中央付近の上面および側面を透明板で作り、洗掘状況の観察に便ならしめた。

#### ロ 実験方法

粘土とシルトを表-1に示した割合で混合し、水路底に厚さ5cm長さ3mに敷き均した。通水はそれぞれ30分間で、また通水の前後には図-2に示すように35点で河床高を測定し、洗掘深を求めた。流れのせん断力 $\tau$ は次式によって計算した。

$$\tau = wRI \quad (gr/cm^2)$$

\* 河川研究室長 \*\* 同室

表-1

土	a	b	c	d	e	41年土試
配合	clay : silt 1 : 0	3 : 1	2 : 1	1 : 1	1 : 5	clay : silt : sand 49 : 40 : 11
含水比 (%)	71.9	71.0	74.4	62.4	40.0	45.2
Vane 値 (gr/cm <sup>2</sup> )	15.2	9.0	7.3	14.0	5.0	147
比重	2.59	2.63	2.64	2.65	2.70	2.61
平均径 (mm)	0.001	0.0026	0.0034	0.0061	0.11	0.043
5 μ % (%)	70	57	54	47	13	50
限界せん断力 $\tau_c$ (gr/cm <sup>2</sup> )	0.042	0.041	0.040	0.026	0.012	—
粘着力 C (gr/cm <sup>2</sup> )	15.2	9.0	7.3	14.0	5.0	147
$C/\tau_c$	362	220	183	538	418	—

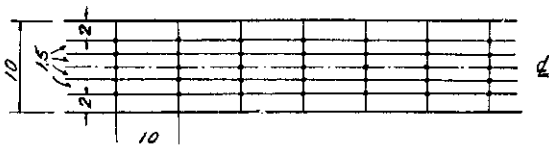


図-2 測点の位置 (単位 cm)

ここに w: 水の単位重量 (gr/cm<sup>3</sup>)

R: 水路の径深 (cm)

I: 動水勾配

### 2.3 河床土の性質

一般に泥炭地河川の河床を構成している土粒子は主として粘土分とシルト分の2つに分けることができる。本実験においても粘土分としてカオリンクレイ、シルト分として0.2mmフルイを通過したものを適当な割合で配合し、粘着力をもつ河床材料とした。

イ 各種の配合に対する粒度および比重

河床材料の粘着力の差による洗掘限界せん断力の変化を調べるため、粘土のみを用いたものから徐々にシルト分を加えたものの4種類について実験を行なった。

土の力学的性質は土を構成する粒子の大きさや形により著しい差があるので、土質試験によって材料のもつ性質

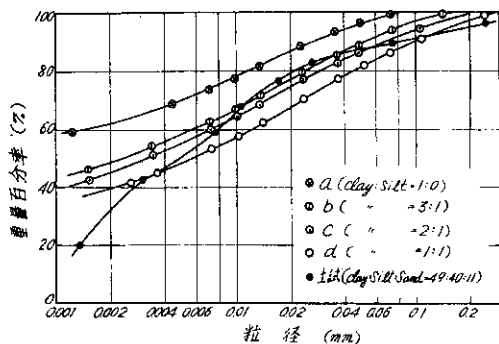


図-3 粒径加積曲線

質を明らかにした。表-1には a, b, c, d の4種の土の諸定数、図-3にはその粒度分析の結果を示した。

ロ 粘着力

粘着性河床材料は粒子相互の粘着力により流れのせん断力に抵抗すると考えられる。本実験においては粘着力を Vane test の測定値で代表させた。

### 2.4 実験の結果および考察

イ 洗掘限界について

河床材料として用いた a, b, c, d の4種の土と39年度に実験した土 (e) について、河床せん断力と洗掘速度の関係を図-4に示した。粘着性河床材料においては河床せん断力の増加に伴って土の洗掘速度も漸次増加していくが、せん断力がある値に達すると洗掘速度は急激に増加をはじめめる。この値を限界値とするなら、本実験の土の強度の範囲では明らかに洗掘限界せん断力が存在

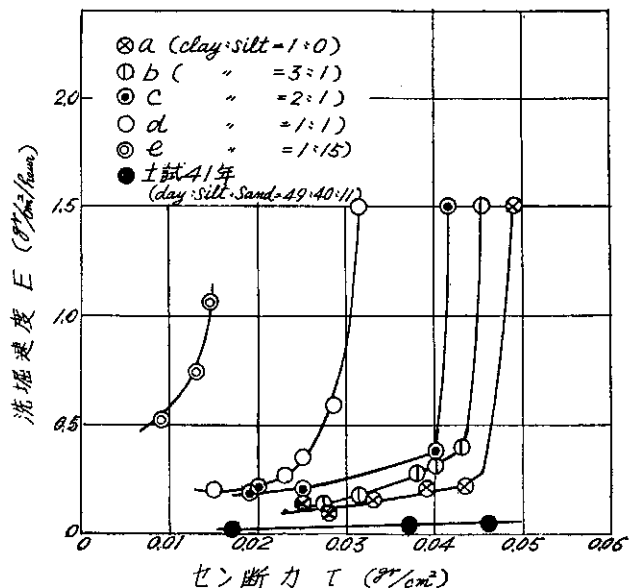


図-4 セン断力—洗掘速度

する。しかし、この値は Vane test によって求めた土の粘着力に比してはるかに小さく（表-1 参照）粘着力すなわち Vane 値の増減がそのまま洗掘限界せん断力の増減とはなっていない。

また、粘着力は微細粒子の含有量に大きく影響されるから、粘土とシルトを分つ粒径 0.005 mm 以下を含む重量パーセント ( $U_f$ ) と本実験で得た限界せん断力 ( $\tau_c$ ) をプロットすれば図-5 を得る。図-5 では  $\tau_c$  と  $U_f$  の相関関係は密接であり、河床材料の粒度分析から  $U_f$  を求めることによって洗掘限界せん断力をかなりの精度で推定できることを示している。

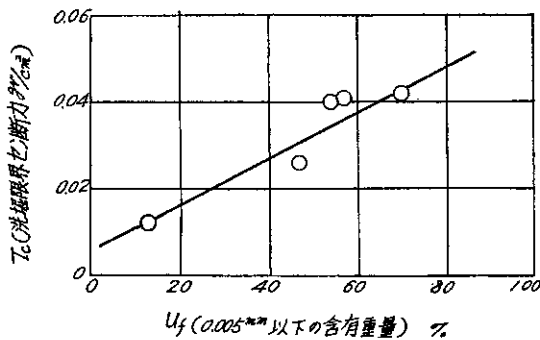


図-5

□ 洗掘速度の検討

E. Partheniades は土粒子の洗掘を確率に基づいて次のような洗掘速度の式を導いた。

$$E = \frac{A \cdot D_s \gamma_s}{t(\tau_0)} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{2.75f}{K\bar{\tau}_0} - 2.75}^{\frac{2.75f}{K\bar{\tau}_0} - 2.75} \exp\left\{-\frac{w^2}{2}\right\} dw \right]$$

- ここに E: 洗掘速度 (gr/cm<sup>2</sup>/hr)
- f: 洗掘抵抗力 (gr/cm<sup>2</sup>)
- $\bar{\tau}_0$ : セン断力 (gr/cm<sup>2</sup>)
- t( $\tau_0$ ): 粒子がはがされる時間 (hr)
- A: 土粒子の形状係数
- D<sub>s</sub>: 土粒子の平均径 (cm)
- $\gamma_s$ : 土粒子の単位重量 (gr/cm<sup>3</sup>)
- K: 定数

洗掘抵抗力 f が粘着力 C と等しいと考えるなら、 $U_f$  と C の間には図-6 のような関係がある。

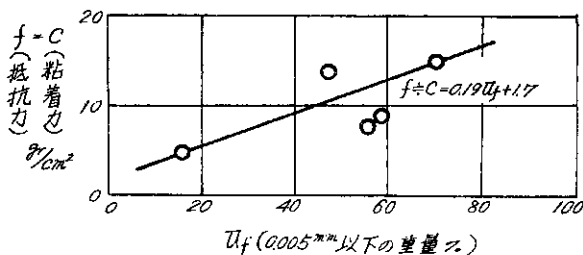


図-6

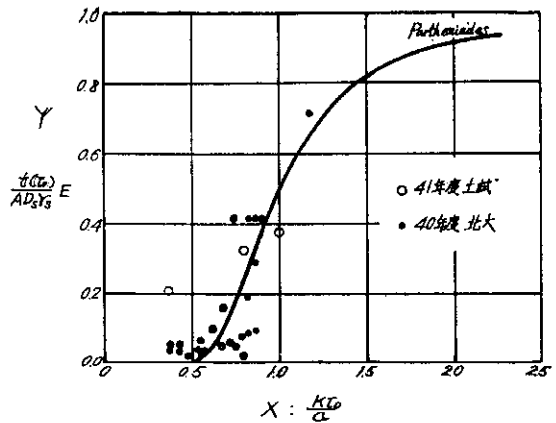


図-7

また、せん断力  $\bar{\tau}_0$  および洗掘速度 E を無次元表示して

$$X = \frac{K\bar{\tau}_0}{f}, \quad Y = \frac{t(\tau_0)}{AD_s} E$$

とすれば K および t( $\tau_0$ ) を定数と考え 妥当な値を選べば図-7 の諸点を得る。このとき

$$K = 250, \quad t(\tau_0) = 0.0002 \text{ hr (0.72 sec)}$$

であった。図-6 の関係とこれらの定数および  $A = 0.575$ ,  $D_s = 0.0005 \text{ cm}$ ,  $\gamma_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3$  を使えば次式を得て洗掘過程を説明できる。

$$E = 3.62 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{0.011f}{\tau_0} - 2.75}^{-\frac{0.011f}{\tau_0} - 2.75} \exp\left\{-\frac{w^2}{2}\right\} dw \right] \text{ (gr/cm}^2\text{/hr)}$$

図-7 に Partheniades の式と実験結果を示した。

ハ 破壊の観察

4 種の河床材料について、粘土分とシルト分の配合の変化に起因する破壊の様相は、a, b, c 種と d 種で顕著ではないが、ある程度の差異が認められる。したがってここでは a 種と d 種について述べる。

(1) 破壊のはじまり

洗掘が始まる瞬間を観察した結果次の事から推論できる。第 1 は土中の気泡によるものであり、表面の随所に 1~2 mm 程度の穴があき、主としてここから洗掘が進行していく場合、第 2 は側壁と河床材料とが一体とならずに弱点となり洗掘が進行していく場合、第 3 は非粘着性河床材料にみられるように表面から徐々に削られて洗掘が進行していく場合であって、実験では第 1 と第 2 とがほとんどであったが、実際の河川においては主として第 3 の場合によるものと考えられる。

(2) 洗掘の過程

a 種、d 種とも洗掘が上流側に進行せず、下流側に進行していく点で共通しているが、その様相は異なっている。a 種においてはその粘着力が大きいため破壊された土塊はただちには流されず、下流側に乗り上げるかまたは河

床面の土を巻きながら流されていく。d種においては破壊された土塊は下流側に乗り上げることなく、また、乗り上げても留まることなく流されていく。

## 2.5 結論

40年度の実験で次のような結論を得た。

(1) 河床の洗掘抵抗力 $f$ は土の粘着力と同じ程度の大きさをもち、その値は図-6によって土の0.005 mm以下の含有重量パーセント $U_f$ から得ることができる。

(2) 洗掘限界せん断力 $\tau_o$ と $U_f$ とは図-5のような相関をなし、土のせん断強さとは無関係に土の性質のみから $\tau_o$ を求めることができる。

(3) Partheniadesの式を利用して、次のような洗掘速度の計算式を得た。

$$E = 3.62 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-0.011 \frac{f}{\tau_o} - 2.75}^{0.011 \frac{f}{\tau_o} - 2.75} \exp\left\{-\frac{w^2}{2}\right\} dw \right]$$

ここに E: 洗掘速度 (gr/cm<sup>2</sup>/hr)

$\tau_o$ : せん断力 (gr/cm<sup>2</sup>)

f: 洗掘抵抗力 (gr/cm<sup>2</sup>)

### § 3 昭和41年度の実験

#### 3.1 実験の目的

昭和39年、40年度の実験は北海道大学工学部河川工学研究室で行なわれたが、これまでの実験によって粘性土の洗掘現象が十分とはいえないが、かなり明確になった。そしてこれらの資料は北海道の粘土質泥炭地河川の洗掘問題を扱う上での基礎資料として十分役立つと思われる。しかし、現地の粘性土の粘着力は実験に用いたものよりかなり大きく、これまでの実験結果とどのように結びつくかはまだ不明である。

41年度においては水路を断面の大きい開水路とし、河床材料も現地の粘性土を用いて、現地に近い状態で検討を行なった。

#### 3.2 実験装置および実験方法

実験水路は長さ26 m幅150 cm高さ75 cmの矩形断

面で、表面をモルタル仕上げした。この水路に径40 cmのパイプと30 HPのポンプを取りつけ、水が循環するようにした。

実験に用いた粘性土は幾春別川新川橋付近の高水敷から採取したもので、これを水路底に厚さ15 cmに敷き均しVane testで粘着力を測定し、その後水を20~30時間流した。通水前と通水してから3時間ごとに図-8に示した77点で河床高を測定し、洗掘量を求めた。

また、流れのせん断力 $\tau$ は $\tau = wRI_e$ 、 $w$ は水の単位重量、 $R$ は径深、 $I_e$ はエネルギー勾配で計算した。

#### 3.3 実験結果および考察

実験結果は土の諸性質とともに表-1および図-4に示した。図-5からわかるように、本実験では洗掘限界せん断力を見いだすことができなかった。

洗掘速度については、Partheniadesの式を用いて検討した。まず、定数 $K$ は洗掘抵抗力すなわち粘着力に比例すると考え、40年度の実験値から次のような値を得た。

$$K = \frac{147}{11.4} \times 250 = 3,200$$

これと $A = 0.575$ 、 $\gamma_s = 2.61$  (gr/cm<sup>3</sup>)、 $D_s = 0.0043$  (cm)を用いて $t(\tau_o)$ を求めると、 $t(\tau_o) = 0.05$  hr = 180 secとなった。(表-2参照)

表-2

	Vane 値 C (gr/cm <sup>2</sup> )	K	$t(\tau_o)$ (hour)
北大(平均)	11.4	250	0.0002
41年土試	147	3,200	0.05

これを見ると、 $K$ は粘着力 $C$ に比例し、土粒子がはがされる時間 $t(\tau_o)$ は $C$ の自乗に比例するようである。したがって、図-7からわかるように本実験で用いた粘性土は洗掘される確率は小さくないが(20%以上)、一方、粘着力 $C$ が大きいため土粒子のはがされる時間 $t(\tau_o)$ が非

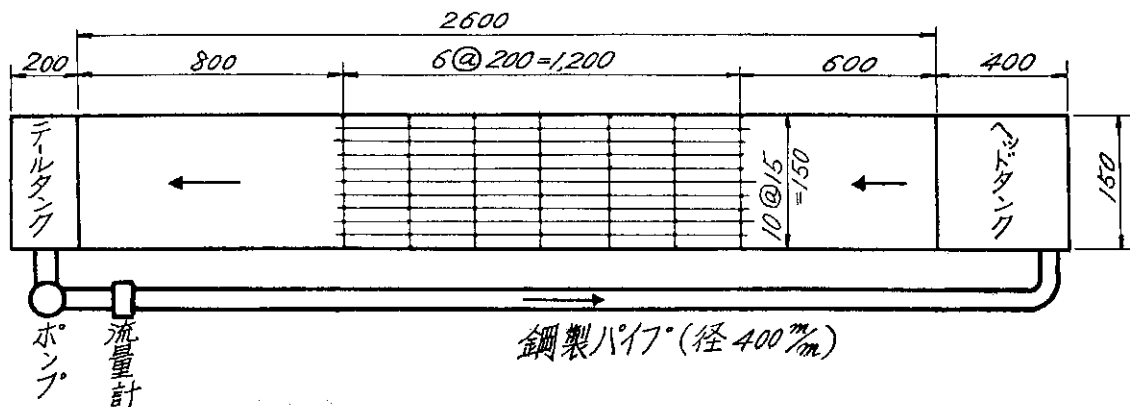


図-8 実験水路および観測点 (単位 cm)

常に大きくなり、結局、図-4のように洗掘速度が他の粘性土に比して小さいと説明できる。

### 3.4 結 論

41年度の実験から次のような結論を得た。

(1) 本実験に用いた粘性土は粘着力が大きいため、前年度のような洗掘限界せん断力を見いだすことができなかつた。つまりこの値はかなり大きいものと想像される。

(2) 流れのせん断力 $\tau_0$ が小さければ洗掘速度も小さく、したがって床止工の設置などによって洗掘量を減少させることができる。

(3) 実験結果を Partheniades の式で整理したところ、 $K=3,200$ 、 $t^{(c)}=0.05$  hr を得た。

(4) 本年度の実験結果から、Partheniades の洗掘速度式における定数  $K$  は粘着力  $C$  に比例し、また土粒子のはがされる時間  $t^{(c)}$  は  $C$  の自乗に比例するらしいといえる。

### あ と が き

これまで3年間実験が行なわれ、粘性土河床の洗掘機

構がしだいに明らかになってきた。しかし、これはあくまでも水理実験におけるものについてであり、実際に現地に適用できる段階までにはいたっていない。したがって、実験結果の応用を考えると、今後は粘性土河床の相似則の検討が課題となろう。

なお、39年、40年の研究成果は北海道大学工学部河川工学研究室で発表したものの抄録であることを付記し、41年度の研究に当たり大変参考になったこと、また利用させていただいたことを深く感謝します。

### 参 考 文 献

- 1 Erosion and Deposition of Cohesive Soil; By E. Partheniades (Pro. A. S. C. E. HY1. 1965)
- 2 Erosion and Deposition of Cohesive Soil; Discussion by Altschaeffl and B. A. Christensen (Pro. A. S. C. E. HY5. 1965)
- 3 Tractive Resistance of Cohesive Soil; By I. S. Dunn (Pro. A. S. C. E. SM3. 1959)

\*

\*

\*