

粘性土河床の洗掘機構について

村端克己* 大石 功* 小川芳昭**

目 次

まえがき

1. 粘性土河床の洗掘理論
2. 実験装置および実験方法
3. 実験結果および考察
 - (1) 流水濃度、浮遊土砂量と洗掘速度の関係
 - (2) 洗掘速度
 - (3) 洗掘限界せん断力

4. 結論

あとがき

参考文献

ま え が き

河川の改修工事を計画施工するにあたって、河床の変動量もしくは安定河床の推定は的確になされねばならない。それには第一に流水の作用によって起こる河床の洗掘および堆積の機構を解明する必要がある。砂質河床をもつ河川については、これまで多くの研究がなされて種々の流砂量公式が示され、河床変動をある程度まで予測できるまでになっている。しかし、北海道に多く存在する粘性土河床をもつ河川については既往の公式を適用することができず、河床変動を推測する方法の確立がまたれている現状である。

この研究は、昭和41年から行なわれているもので、本文は昭和42年度分の成果を主体に過年度分も含めてとりまとめたものである。

1. 粘性土河床の洗掘理論

ここでは、E.Partheniades の洗掘理論と、これに対する Altschaeffl と Christensen の意見を総合してその概要を述べ、さらに著者らの若干の考察を述べる。

H.A.Einstein と El Samni は粗な壁面の突出部に作用する流体力を詳細に測定した結果、乱流において壁面に作用する圧力の変動は時間的に正規分布することを明らかにした。E.Partheniades は、河床に作用するせん断力の変動もまた時間的に正規分布するとして、上の考えを適用した。すなわち、せん断力 τ の平均を τ_0 、標準偏差を τ_0/η_0 とすれば、 τ の密度関数は

$$f(\tau_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\tau_0}{\eta_0}} \exp \left\{ -\frac{(\tau - \tau_0)^2}{2 \left(\frac{\tau_0}{\eta_0} \right)^2} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

である。 η_* を標準正規分布 $N(0, 1)$ の標準変量とすれば

$$\frac{\tau - \tau_0}{\frac{\tau_0}{\eta_0}} = \eta_*$$

$$\tau = \tau_0 \left(1 + \frac{\eta_*}{\eta_0} \right) \dots \dots \dots (2)$$

である。洗掘を引起す力は流れのせん断力であるが、これに抵抗する力として土の粘着力を考えた。せん断力が河床表面で流水に接しているすべての土粒子に均等に分布するものと仮定すれば、個々の土粒子に働く引張力は次のようになる。

$$\sigma = \frac{K' \tau}{N} \dots \dots \dots (3)$$

ここに N : 河床単位面積当たりの有効粒子数

K' : 係数

また、巨視的に見た土のせん断強度 c は土粒子間の引張抵抗力 C に起因するから次式がなりたつ。

$$C = \frac{K'' c}{N} \dots \dots \dots (4)$$

ここに K'' : 引張抵抗係数

したがって、土粒子が洗掘される条件は次のようになる。

$$\frac{\sigma}{C} = \frac{K' \tau}{K'' c} = K \frac{\tau}{c} \geq 1 \dots \dots \dots (5)$$

ここに K : 定数

(5)式の起きる確率を

$$Pr = Probability \left\{ \frac{K \tau}{c} \geq 1 \right\} \dots \dots \dots (6)$$

とすれば、土粒子が単位時間に洗掘される度合は有効粒子数 N と確率 Pr に比例する。ここで、(6)式の Pr は単位時間において洗掘を起こすのに十分な大きさのせん断力が作用する時間と考えることができる。すなわち、粒子1個がはぎ取られるのに必要な時間を $t(\tau_0)$ とすれば、単位時間内には $pr/t(\tau_0)$ 個の土粒子がはぎ取られることになる。

* 河川研究室 ** 同室長

また、河床単位面積当たりの有効粒子数は次のようになる。

$$N = \frac{1}{A_1 D_s^2} \dots \dots \dots (7)$$

ここに A_1 : 土粒子の占有面積を表わす係数
 D_s : 面積平均径

したがって、単位面積について単位時間にはぎ取られる土粒子数は次のようになる。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{A_1 D_s^2} \cdot \frac{Pr}{t(\tau_0)} \dots \dots \dots (8)$$

一方、土粒子の平均重量は $A_2 D_v^3 \gamma_s$ で表わされる。ここに、 A_2 は土粒子の体積を表わす係数、 D_v は土粒子の体積平均径、 γ_s は土粒子の単位重量である。

よって洗掘速度 E は次式で表わされる。

$$E = A_2 D_v^3 \gamma_s \cdot \frac{1}{A_1 D_s^2} \cdot \frac{Pr}{t(\tau_0)}$$

$$= \frac{AD\gamma_s Pr}{t(\tau_0)} \dots \dots \dots (9)$$

ここに A : 形状係数
 D : ($= D_v^3 / D_s^2$) 体積平均径

(2)式と(6)式より

$$Pr = P \left[\frac{K}{c} \left\{ \tau_0 \left(1 + \frac{\eta_*}{\eta_0} \right) \right\} \geq 1 \right]$$

$$= P \left[(\eta_0 + \eta_*) \geq \frac{c}{K\tau_0} \eta_0 \right] \dots \dots \dots (10)$$

となるが、 τ が負になっても洗掘は起こると考えているので、(注 詳細は参考文献(1)を参照)

$$Pr = P \left\{ (\eta_0 + \eta_*)^2 \geq \left(\frac{c}{K\tau_0} \eta_0 \right)^2 \right\}$$

$$= 1 - P \left\{ -\frac{c}{K\tau_0} \eta_0 < \eta_0 + \eta_* < \frac{c}{K\tau_0} \eta_0 \right\}$$

$$= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\left(\frac{c}{K\tau_0} + 1\right)\eta_0}^{\left(\frac{c}{K\tau_0} - 1\right)\eta_0} \exp \left\{ -\frac{w^2}{2} \right\} dw$$

$$\dots \dots \dots (11)$$

とする。したがって、洗掘速度 E は(9)と(11)から次式で表わされる。

$$E = \frac{AD\gamma_s}{t(\tau_0)} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\left(\frac{c}{K\tau_0} + 1\right)\eta_0}^{\left(\frac{c}{K\tau_0} - 1\right)\eta_0} \exp \left\{ -\frac{w^2}{2} \right\} dw \right] \dots \dots \dots (12)$$

以上が粘性土河床の洗掘理論であるが、著者らは(9)式の形状係数 A について、対象とする土粒子をすべて球形

とした場合を考えてみた。

上の間隙比を e 、間隙率を n とすると(7)式の A_1 は

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (1 + e) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{1 - n} \dots \dots \dots (13)$$

となる。また、 $A_2 = \pi/6$ であるから(9)式の形状係数は次式で表わされる。

$$A = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1 + e} = \frac{2}{3} (1 - n) \dots \dots \dots (14)$$

e 、 n と A の関係を図-1に示した。

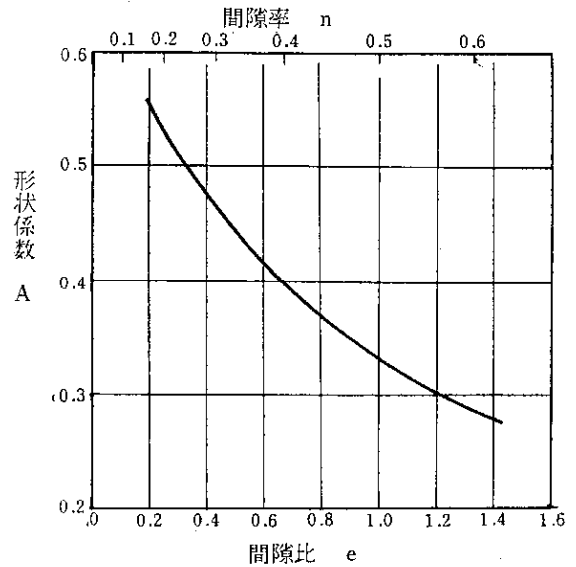


図-1 形状係数

2. 実験装置および実験方法

実験水路は幅1m、高さ75cmの矩形断面、表面モルタル仕上げしたもので、 $\phi 40$ cmのパイプと30HPポンプによる循環型給排水装置を取り付けてある。また、採水には図-2に示すとおり、ポイントゲージのロッドに径6mmのガラス管を取りつけ、これにビニールパイプを連結したサイフォン式を採用した。

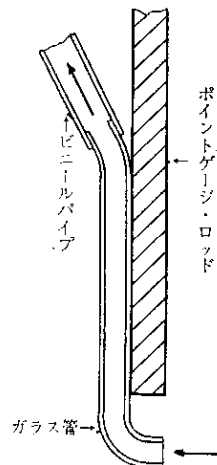


図-2 採水装置

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、これをまず水路床に所定の勾配に敷き均して水を張り均一になるようこねかえし、設置したあとベーン・セン断試験機で粘着力を測定し、その後、水を8~12時間流した。

通水後、各時間ごとに図-3に示した3点で水面より深さ5cmごとに500ccずつ採水して流水濃度の時間変化を求め、(18)式により洗掘速度を計算した。

流れのせん断力 τ_0 は、 $\tau_0 = wRIe$ によって算出した。ここに、 w は水の単位重量、 R は径深、 Ie はエネルギー勾配である。

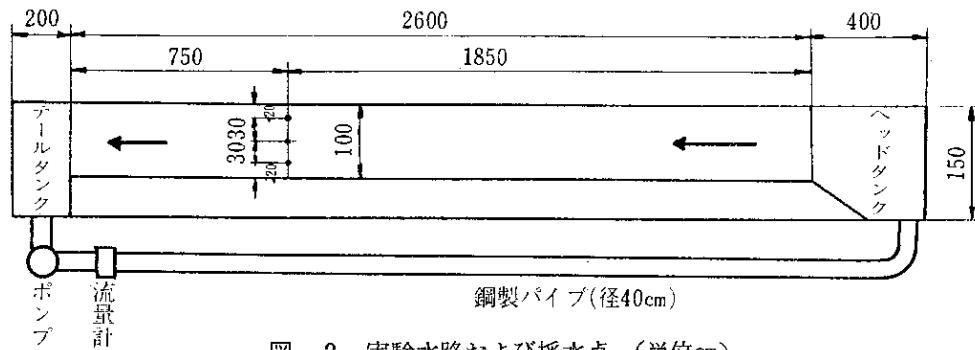


図-3 実験水路および採水点 (単位cm)

3. 実験結果および考察

実験結果は上の諸性質とともに表-1, 2, 図-4,

5に示した。これらの資料について、洗掘速度と洗掘限界せん断力に重点をおいて考察した。

表-1 土の諸性質

実験年度	41年	42年	備考
配合	clay:silt:sand 49:40:11	54:35:11	ベーン値は年度の平均値を示す。
ベーン値(g/cm ²)	147	48.4	
比重	2.61	2.67	
平均径(mm)	0.0331	0.0444	

表-2 実験結果 (42年度)

実験番号	含水量 (%)	間隙比	ベーン値 (g/cm ²)	せん断力 (g/cm ²)	洗掘速度 (g/cm ² /hr)
1	52.96	1.41	50.1	0.0246	0.0294
2	52.02	1.39	43.8	0.0172	0.0149
3	51.46	1.37	32.8	0.0499	0.0317
4	47.18	1.26	45.0	0.1059	0.0541
5	52.71	1.41	55.6	0.0316	0.0160
6	46.00	1.22	65.9	0.0343	0.0179
7	50.10	1.34	47.9	0.0355	0.0112
8	49.11	1.31	45.8	0.0323	0.0072

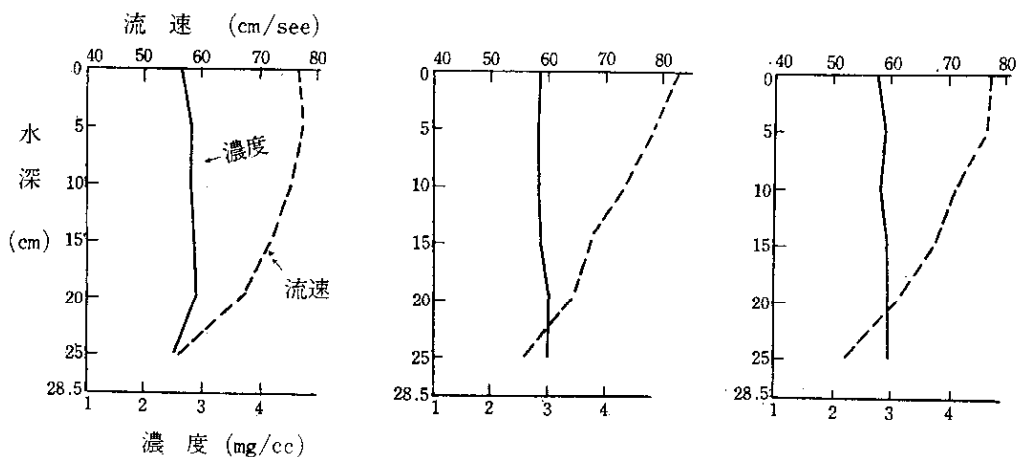


図-4 濃度および流速の垂直分布

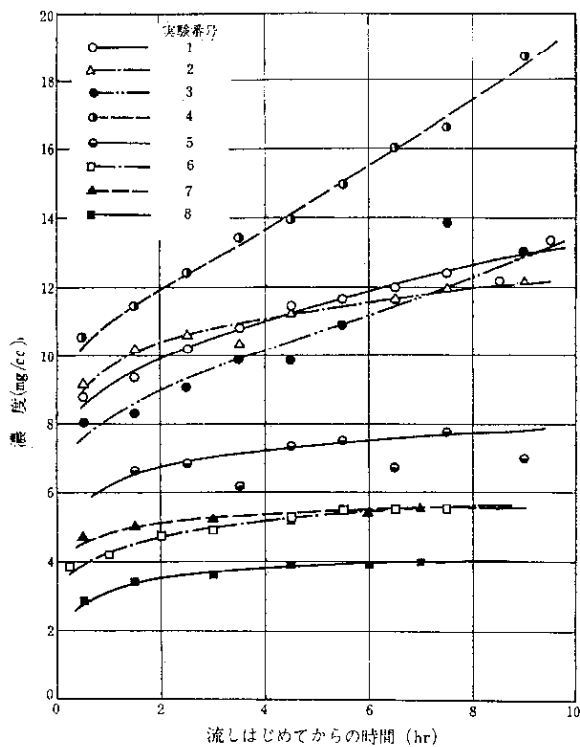


図-5 濃度の時間変化

(1) 流水濃度、浮遊土砂量と洗掘速度の関係

本実験に用いた土の粒径が小さいので、洗掘された土粒子はすべて浮遊して流れ、さらに通水時間中には堆積がないものと考えてよい。

いま、通水後 t 時間後の濃度を β 、 $t + \Delta t$ 時間の濃度を $\beta + \Delta\beta$ とすると、 Δt 時間内に水路床から離れて水中に浮遊する土砂量は次のようになる。

$$\Delta W_{s1} = \Delta\beta \cdot V_w \dots\dots\dots (15)$$

ここに V_w : 水路内の全水量

一方、洗掘速度を E 、土を敷いた水路底幅 B 、長さを L とすると、 Δt 時間内に河床から離れる土砂量は

$$\Delta W_{s2} = E \cdot B \cdot L \cdot \Delta t \dots\dots\dots (16)$$

となり、(15)式、(16)式の ΔW_{s1} と ΔW_{s2} が等しくなければならない。すなわち、

$$E = \frac{V_w}{B \cdot L} \cdot \frac{\Delta\beta}{\Delta t} \dots\dots\dots (17)$$

である。 Δt を微小にとれば次式で表わされる。

$$E = \frac{V_w}{B \cdot L} \cdot \frac{d\beta}{dt} \dots\dots\dots (18)$$

図-5 に流水濃度の時間変化を示してあるが、曲線の勾配が洗掘速度である。

また、流量を Q 、浮遊土砂量を Q_s とすれば、 $Q_s = Q \cdot \beta$ なることより、 Q が一定の場合は $dQ_s = Q \cdot d\beta$ となり(18)式は次のように変換される。

$$E = \frac{V_w}{B \cdot L \cdot Q} \cdot \frac{dQ_s}{dt} \dots\dots\dots (19)$$

(2) 洗掘速度

洗掘速度とせん断力を無次元表示し、表-1、2、図-1の各数値と、Einstein と El Samni が実験で求めた $\eta_0 = 2.75$ を用いて、 K 、 $t(\tau_0)$ に適当な値を選べば図-6

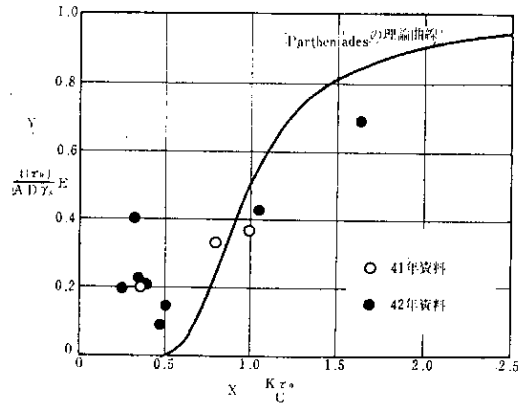


図-6 洗掘速度の無次元表示

の諸点を得る。このとき、 $K = 700$ 、 $t(\tau_0) = 0.045 \text{ hr}$ であった。ここで、 K 、 $t(\tau_0)$ は理論的に土の粘着力に影響する factor すなわち、粒径分布、間隙比などに関係するものと考えられるが、資料の数が少ないため、その関係は明らかにできなかった。

(3) 洗掘限界せん断力

洗掘速度とせん断力の関係を図-7 に示したが、洗掘

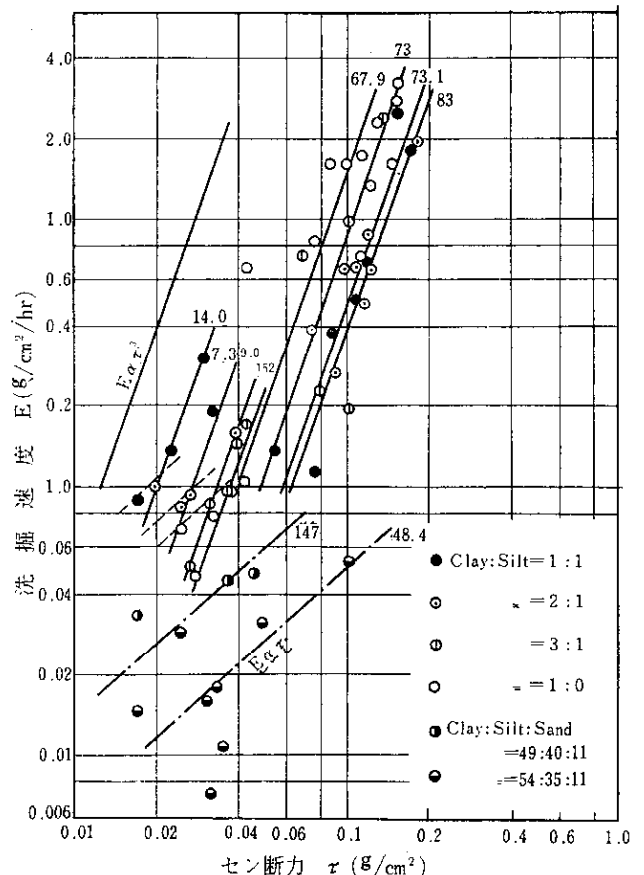


図-7 洗掘速度とせん断力の関係 (図中の数字はベーン値を表わす)

速度 $E=0.1g/cm^2/hr$ を境にして E が急激に増加している。このときのせん断力を限界せん断力 (τ_c) とすれば、べーン値が大きい土ほど τ_c の値は大きいようである。実験に用いた土のべーン値はほとんどが $100g/cm^2$ 以下であり、現地の土のべーン値が $350g/cm^2$ であることを考慮すれば、現地の土の限界せん断力は $0.15g/cm^2$ くらいであると考えられる。

4. 結 論

これまでの実験から次のような結論を得た。

- (1) 掃流土砂がないと仮定した場合、流水濃度あるいは浮遊土砂量から洗掘速度を求める式を得た。
- (2) Partheniades の洗掘速度式における K , $t(\tau_c)$ が土の粘着力に影響する factor である粒径分布、間隙比などに関係すると考えられる。しかし、資料の数が少ないのでその関係は明らかにできなかった。
- (3) 現地の土 (べーン値 $350g/cm^2$) の洗掘限界せん断力は、これまでの実験結果から推測して、 $\tau_c=0.15g/cm^2$ くらいであると考えられる。

あ と が き

これまで2年間実験が行なわれ、資料の増加とともに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、実験の装置や方法において、土の複雑な要素に対処できない面もあり、かなり困難な問題をかかえている。さらに、実験結果の応用を考えると粘性土河床の相似則の検討が課題となろう。

なお、北海道大学工学部河川工学研究室の研究成果の一部を参考にさせていただいたことを感謝します。

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 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)