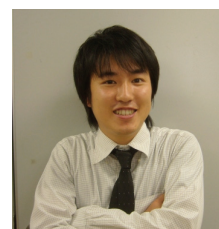


## 越流及びパイピングによる堤体侵食



所属名：岡山大学大学院環境学研究科

発表者： 藤澤和謙

### 1. はじめに

近年、堤防やため池の豪雨災害が頻発している。その主要な原因として越流及びパイピングが挙げられる。この両者に共通する点は土の侵食に起因する点である。本論ではまず土の侵食特性を詳しく説明し、主に堤体の越流崩壊について考える。

### 2. 土の侵食特性

土の侵食を議論する上では対象にしている土の種類を明確する必要がある。たとえば砂の侵食では、砂粒子は自重や粒子間にはたらく摩擦によって流体力に抵抗し、流体力が砂粒子の持つ抵抗力を上回った時に砂粒子の流体への取り込みが生じる。一方、粘土の場合では粘土粒子間に働く化学的な作用がその侵食に影響を与え、流体や粘土に含まれるイオンの量や温度によって侵食特性が変化することが知られている。このように砂と粘土では侵食機構が異なるためそれらの侵食特性は異なったものとなる。堤防に用いられる材料は粘土分を含む砂質土が使われることが多く、砂と粘土を含む材料の侵食特性についても議論する必要がある。ここでは砂、粘土、堤体材料の 3 種類の土質材料の侵食について記述する。越流による堤体侵食では流体に取り込まれた土粒子は瞬時に堤体の外側へと運ばれると考えられるため土の堆積を考慮せず、土の侵食速度について取り扱うこととする。土の侵食速度は単位時間に単位面積あたりから流体に取り込まれる土粒子の体積を意味し、速度の次元を持つ。

#### ● 砂（非粘着性材料）の侵食

砂の侵食は砂粒子一つ一つが流体に取り込まれることによって起こるため、流砂力学で用いられる pick-up rate の考え方を適用することができる。pick-up rate とは砂粒子の単位時間当たりの離脱率を意味し、 $p_s$  で表す。pick-up rate  $p_s$  を用いると侵食速度  $E$  は以下のように表すことができる。

$$E = \frac{A_3 d}{A_2} p_s \quad (1)$$

ここで、 $d$  は砂粒子の直径、 $A_2$ 、 $A_3$  はそれぞれ 2 次元、3 次元の形状係数を表しおり、 $A_2 d^2$

は砂粒子 1 個の投影面積、 $A_3 d^3$  は砂粒子 1 個の体積を意味する。単位面積当たり存在する砂粒子数は  $1/A_2 d^2$  であるから単位時間当たり  $p_s/A_2 d^2$  個の砂粒子が浸食面から離脱し、流体に取り込まれる。したがって  $p_s/A_2 d^2$  に砂粒子 1 個の体積である  $A_3 d^3$  を乗ずることで侵食速度  $E$  が式(1)で与えられる。

Nakagawa & Tsujimoto (1980) は無次元 pick-up rate  $p_{s^*}$  の推定式を無次元掃流力  $\tau_*$  及び無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  を用いて以下のように提案している。

$$p_{s^*} \equiv p_s \sqrt{\frac{(\sigma/\rho - 1)g}{d}} = 0.03\tau_* \left(1 - 0.7 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^3, \quad \tau_* = \frac{\tau}{(\sigma - \rho)gd}, \quad \tau_{*c} = \frac{\tau_c}{(\sigma - \rho)gd} \quad (2)$$

ここに  $\tau$ 、 $\tau_c$  はそれぞれ掃流力（浸食面に加わる流体によるせん断応力）、限界掃流力であり、 $\sigma$ 、 $\rho$ 、 $g$  は砂粒子の密度、流体の密度、重力加速度を表す。無次元限界掃流力  $\tau_{*c}$  は砂粒子の離脱が始まる時の無次元掃流力の値を意味し、Shields ダイアグラムを用いて求めることができるが幅広い範囲で  $\tau_{*c} = 0.05$  となることが知られている。

式(2)を式(1)に代入することで

$$E = 0.03 \frac{A_3}{A_2} \sqrt{\frac{\rho d}{(\sigma - \rho)^3 g^3}} \tau \left(1 - 0.7 \frac{\tau_c}{\tau}\right)^3 \quad (3)$$

と与えられる。

このように砂の侵食速度は浸食面に加わるせん断応力を評価することで見積もることができる。式(2)は実験的に求められたものであり、その結果から得られる式(3)も実験に基づいて導出されている。そのため、実験結果のモデル化の違いによって式(3)以外にも砂の侵食速度の近似式が用いられており、Wang & Bowles (2006) は非粘着性材料の侵食速度の推定式として

$$E = 0.0513(\tau - \tau_c)^{1.3} \quad (\text{単位は } E \text{ [m/s], } \tau \text{ 及び } \tau_c \text{ [kN/m}^2]) \quad (4)$$

を非粘着材料の堤体侵食を解析する際に用いている。

#### ● 粘性土の侵食

粘土の粒子は非常に小さく、砂のように土粒子一つ一つの浸食面からの離脱を考えるとできない。そのため、流体が粘性土に加えるせん断応力とそのせん断応力下での侵食速度を計測することで、粘性土の侵食速度と流体によるせん断応力の関係が実験的に求められている。粘性土の場合、侵食速度  $E$  は以下の形で表されるのがほとんどである。

$$E = \alpha(\tau - \tau_c)^\gamma \quad (5)$$

ここに、 $\alpha$ 、 $\gamma$  は材料定数であり、 $\gamma$  の値として  $\gamma = 1$  が頻用されている。近年では、関根ら(2004)は自然堆積した粘土の侵食速度  $E$  が掃流力  $\tau$  の  $3/2$  乗に比例する粘性土の侵食速度を提案している（式(5)では  $\tau_c = 0$ 、 $\gamma = 1.5$  に対応）。さらに関根ら(2004)は粘土の含水状態が侵食速度に与える影響について議論しているが、Shaikh *et al.* (1988) は締固められた粘性土を用いた侵食実験の結果、締固め時の含水状態の違いは侵食速度に影響を及ぼさないとし

ている。関根ら(2004)は自然堆積粘土を、Shaikh *et al.* (1988)は締固め土を実験対象にしているため、粘性土の作成過程がその侵食特性に影響を及ぼすことが示唆される。粘性土については現在も普遍的な侵食速度式を求めようと議論が続いている最中である。

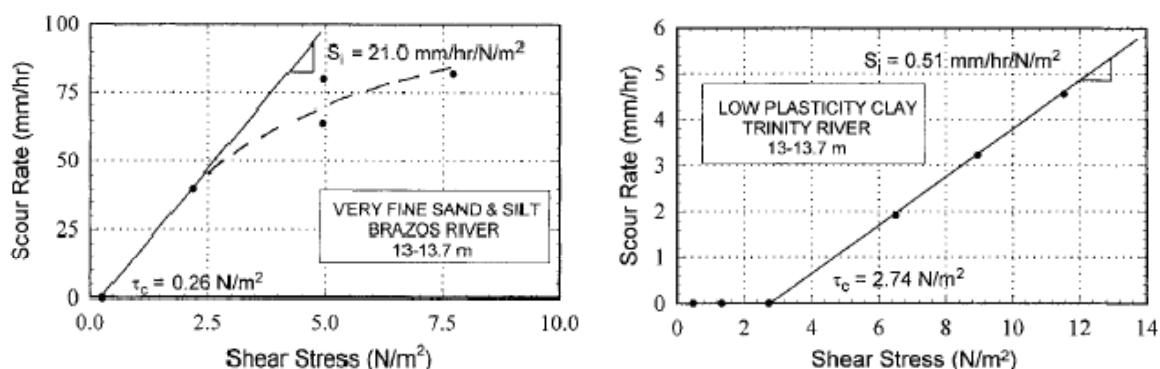


図1 砂及び粘土の侵食速度とせん断応力との関係 (Briaud *et al.*, 2001 より引用)

式(5)からわかるように、粘性土においてもその侵食速度は掃流力の関数として表される。しかし、粘性土の侵食速度は砂のそれに比べてかなり小さいことに注意する必要がある。図1に Briaud *et al.*(2001)によって求められた砂及び粘土の侵食速度とせん断応力(掃流力)の関係を示す。同図左側の砂の侵食速度はせん断応力が  $5.0 \text{ N/m}^2$  の時およそ  $75 \text{ mm/hr}$  に対して、右側の粘土の侵食速度はせん断応力が  $5.0 \text{ N/m}^2$  の時およそ  $1 \text{ mm/hr}$  となっており、両者の間には70倍程の差がある。したがって非粘着性土の侵食速度式を粘性土に適用することはできない。

#### ● 堤体材料の侵食

実際の堤防を作る際には、15~50%の細粒分を含み、自然な粒度分布をもつ材料が望ましく、日本では細粒分質砂に分類される材料がよく使われる。このような特徴をもつ堤体材料の侵食速度に関する研究は非常に少ない。Fujisawa *et al.* (2008)は自然粒度をもつ、締固められた細粒分質砂の侵食速度  $E$  を測定し以下の結果を得ている。

$$E = \alpha(\tau - \tau_c), \quad \alpha = -a \frac{\rho_d}{\sigma} + b \quad (6)$$

ここで、 $\rho_d$  は乾燥密度、 $a$  及び  $b$  は正の値を持つ材料定数である。式(6)は式(5)と類似しているが、係数  $\alpha$  が乾燥密度  $\rho_d$  の影響を受ける。Fujisawa *et al.* (2008)による実験の中では締固め度85~95%の間で同一材料の侵食速度に10倍程度の差が生じている。これは、図2に示すように乾燥密度が大きくなると、間隙が小さくなり、砂粒子の周りに存在する粘土分が砂粒子同士をくっつけるようになる。そのため、粘土分が侵食されなければ砂粒子は動くことができず、土塊の侵食速度が粘土のそれに左右されるためだと考えられている。堤防の侵食に対する抵抗性は密度の大きさにかなり影響を受ける。

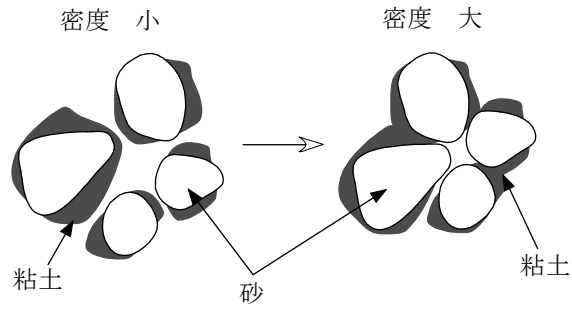


図2 密度の増加によって粘土分が砂粒子の間隙を埋める様子

### 3. 越流水の水理と堤体侵食

越流による堤体侵食を考えるには、堤体表面を流れる越流水の流れの特徴について把握し、その結果生じる堤体の侵食を予測することになる。図3は侵食を受けていない堤体上を流れる越流水の流れの様子と堤体表面にくわわるせん断応力の分布を示している。

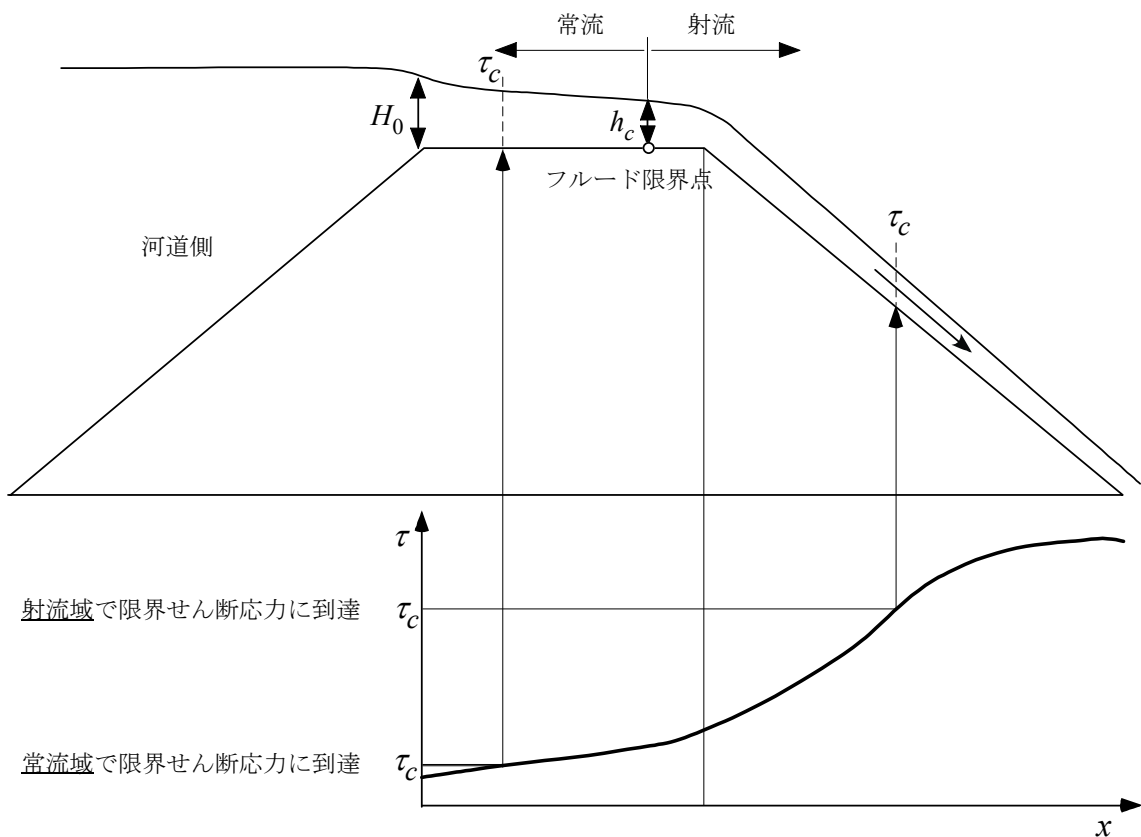


図3 越流水の水理と堤体に加わるせん断応力の分布

図 3 に示されるように越流した水の流れは河道側（河表側）の法肩で越流水深  $H_0$  となる。その後天端上で限界水深  $h_c$  をとり、常流から射流へと流れは変化する。河裏側の斜面では射流となって加速され等流水深へと漸近する。堤体表面に水流によってくわわるせん断応力は河表側から河裏側へと進むにつれて大きくなる。したがって、河裏側斜面の法尻では最大のせん断応力がくわわることになる。越流量が大きい、もしくは河裏側斜面の勾配が急である場合、河裏側の法肩では流れの剥離が生じる。その時は河裏側の法肩付近のせん断応力は 0（零）となる。流れの剥離が生じる場合は、河裏側斜面のどこかで流れは再付着するが、再付着点では流体が堤体表面に衝突することで洗掘が起こる可能性がある。

前節で説明されているように、土の侵食には侵食の始まる限界せん断応力が存在する。堤体表面に作用するせん断応力がどこで限界せん断応力に達するかは、その後の侵食過程に変化を与えると考えられる（図 3 参照）。というものの、射流域（河裏側斜面）にて堤体表面に作用するせん断応力が限界せん断応力に到達すると、その点よりも下流側が侵食を受ける。射流域での侵食であるため、この影響は上流側（河表側）にはつたわず、限界せん断応力に到達した点よりも上流側の流れの様子が変わることはない。この場合は、河裏側法尻付近の洗掘から破堤につながるものと推定される。法尻付近からの洗掘が卓越する場合、ほぼ鉛直な侵食面が形成され、その底部の侵食によって堤体侵食が発展していく。この鉛直な侵食面は **Headcut**（ヘッドカット）と呼ばれ、その底部の侵食によって上流側（堤防では河表側）に進展していく様子は **Headcut migration**（ヘッドカット移動）と呼ばれる現象である。

常流域（天端）で水流によるせん断応力が限界せん断応力に到達すると、天端が侵食されると同時に、その侵食の影響は上下流に伝わることで堤体上のすべての場所で流れに変化が生じる。そのため、上述した射流域で限界せん断応力に到達する場合の侵食過程とは異なるものになると考えられる。

J. L. Briaud *et al.*: Erosion function apparatus for scour rate predictions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.2, pp.105-113, 2001.

K. Fujisawa *et al.*: Erosion Rates of Compacted Soils for Embankments, *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.64, No.2, pp.403-410, 2008.

H. Nakagawa. & T. Tsujimoto: Sand bed instability due to bed load motion, *Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the ASCE*, Vol.106, No.HY2, pp.2029-2051, 1980.

M. Sekine: Erosion process of cohesive sediment and erosion rate formula, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE*, 2004.

A. Shaikh *et al.*: Erosion rate of compacted Na-montmorillonite soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No.3, pp.296-305, 1998.

Z. Wang & D. S. Bowles: Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model. Part 1: Theory and methodology, *Advances in Water Resources*, Vol. 29, pp.1528-1545, 2006.