

III - 2 スリットによる噴砂現象について

愛媛大学工学部土木工学教室

正員

○滝野正次

九州大学工学部水工土木学教室

〃

崎山正常

九州大学工学部水工土木学教室

〃

椿 東一郎

1, 新潟地震に於て被害の大きかった低地砂層地域で地下水の噴出・土砂の噴き上げがみられた。これは被圧地下水上部の不透水層に地震のため亀裂を生じ、その割れ目よりいわゆる *quick sand* の現象が起つたものと考えられている。このような現象は福岡県田川市周辺の石灰岩地帯に於ても地表面の陥没現象としてあらわれ著者の一人はこれらについて実験的な研究を行なってきたが、今回は地震による *quick sand* 現象を *model* 化してとくに噴砂限界について若干の考察をおこなった。さて *quick sand* は古典的な問題であり、砂層流動化は動水勾配 I_c が次式

$$I_c = \frac{\Delta H}{B} = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} (1 - n) \quad \text{----- (1)}$$

n : 空隙率

$\rho_s \cdot \rho$: 砂粒および水の密度

ΔH : 水位差

B : 砂層の厚さ

に達したとき起るとされている。然し乍ら (1) 式は砂層における動水勾配が一様で砂層そのものの流動化の可能性が一様に分布する場合について導かれたもので、動水勾配が一様でない場合すなわち *floating dam* 下部や天板の噴砂限界については *creep ratio* などの *index* が流用されており水理学的には明瞭でない臭が残されている。この実験も動水勾配が大きく変化する一つの例である。

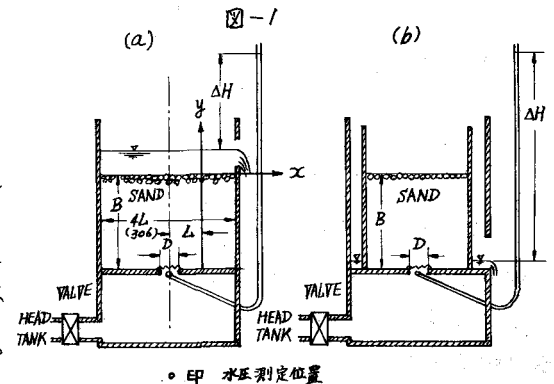
2, 実験の概要

実験に用いた試料は真比重 2.65 粒径 0.75 ~ 0.49 mm 単粒子の沈降速度は 10.72 cm/sec である。実験装置としては高さ 4m のヘッドタンクから導いた水を *slit* を通じて上部砂層に流入させる。この *slit* が不透水層に生じた割れ目に対応するものであるが、中 $D = 1.25$ cm, 0.625 cm の二次元的なものとして直径 $D = 1.25$ cm の半円 *slit*

を用いた。実験は *valve* を調節して順次水压をあげ定常状態に達した後の *slit* 内の圧力水頭・地下水位・水位差および流量を測定した。圧力をあげてゆく過程に於て、まず最初に底板の *slit* 位置の砂層内に *crack* が発生し、圧力の増加とともに徐々に発達して空洞を形成する。さらに水压をあげると空洞内の砂は流動を始め *slit* 上部の砂層が吹きあげられて *sand jet* を形成して一つの実験を終える。実験に用いた砂の厚さ B は 5, 7.5, 10, 15, 20 および 25 cm の 6 種類で、図-1 (a) のように地下水位が砂層上にある場合 (A) と図-1 (b) のように地下水位が殆んど存在しない場合 (B) について行なった。

3, *slit* よりの滲透解析

two-dimensional flow の場合には図-1 (a) の半分を考え Σ 平面の x 軸を図-2 のよ



・印 水压測定位置

うにとると、この矩形領域は Schwarz-Christoffel の定理により楕円積分

$z = M \int \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)\sqrt{(1-m^2-t^2)}\sqrt{(1-t^2)}}}$ になり $t = z + i\eta$ 平面に寫像される。また複素速度 potential $w = \xi + i\psi$ は図-2の z 面を参照して矩形領域を形成するから楕円積分

$w = N \int \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)\sqrt{(1-m^2-t^2)}\sqrt{(1-t^2)}}}$ により t 平面に寫像される。二つの矩形周辺はいずれも

平面上の実軸に図に示すように対応するから、 t 平面を媒介として w と z との関係が求められる。まず z 面と t 面との対応関係のうち $O''B'$ 線上の対応から

$\sin \theta = \sqrt{\frac{t^2-1}{t^2-m^2}}$ 即ち $t = -\frac{\sqrt{1-m^2}\sin^2\theta}{\cos \theta}$ (2) とおいて

$x = -L - M F(\theta, m)$ $L/M = -K(m)$ (3)

が得られる。ここに $F(\theta, m)$ は m を母数とする第一種楕円積分、 $K(m)$ は第一種完全楕円積分である。つぎに $B'A'$ 線上の対応から $B/L = \frac{K(m')}{K(m)}$ $m'^2 = 1-m^2$ (4)

が得られ、 B/L が與えられると特異点の座標(母数) m の値は定まる。なお特異点 C の位置は(3)式より $B'C/L = F(\theta_c, m)/K(m)$ (5)

で與えられるから、相対的な slit の巾 $B'C/L$ を與えれば(5)式を満足する θ_c が定まり(2)式より $C = \frac{\sqrt{1-m^2}\sin^2\theta_c}{\cos \theta_c}$ (6)

従って C の値が B/L および $B'C/L$ の関数として求められる。

同様に w 平面と t 平面との対応から

z 平面の流量(単位巾あたり) q は $q = \frac{\sqrt{(C-m)(1+m)}}{2}$ $\kappa^2 = \frac{(1-m)(C+m)}{(C-m)(1+m)}$ (7)

$\kappa'^2 = 1-\kappa^2$ とおいて $\frac{q(H_1-H_2)}{B} = \frac{K(\kappa')}{K(\kappa)}$ (8)

が得られる。また噴砂現象を規定する量として slit の中心 $B'A'$ 線上における動水勾配および流速は

$v = -\frac{\partial \psi}{\partial y} = +\frac{K(H_1-H_2)}{B} \frac{K(m)}{K(\kappa)} \sqrt{\frac{1-t}{C+t}}$ (9)

ただし $t = -\left\{ \frac{m(1+m) + m(1-m)\sin^2\theta}{(1+m) - (1-m)\sin^2\theta} \right\}$ (10)

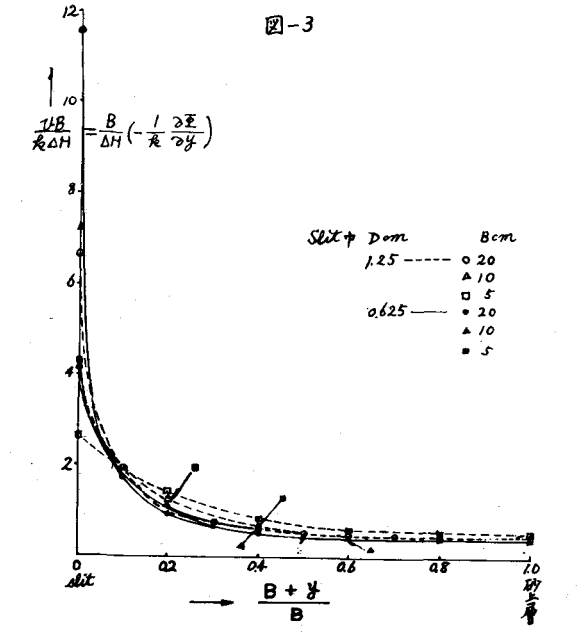
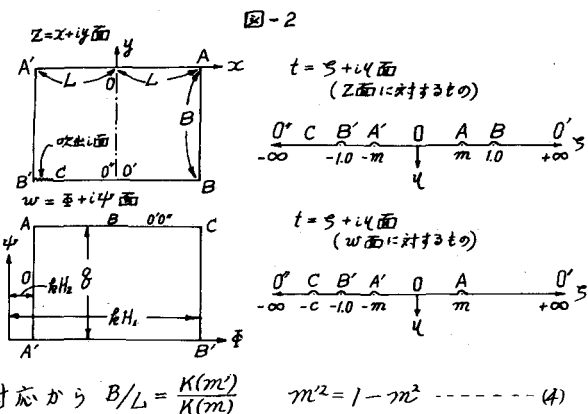
$\frac{q}{B} = -\frac{F(\theta, m')}{K(m)} \frac{L}{B}$

従って砂の厚さ・巾比 B/L および slit 巾比 B/D を與えれば(8)式より

流量 $\frac{q}{B}$ が求められる(9)式より動水勾配 $\frac{B}{(H_1-H_2)} \left(-\frac{1}{\kappa} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)$ が q/B の関数として求められる。本実験の例について

計算した結果を図-3に示した。これより

①一般に slit 位置における動水勾配 $\frac{B}{\Delta H} \left(-\frac{1}{\kappa} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)$ の値は大きく、その近傍における

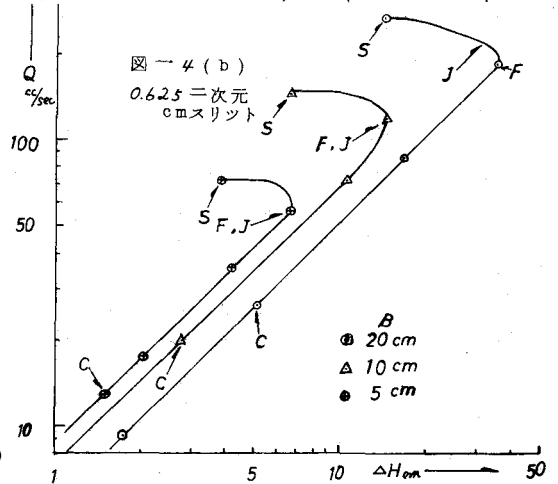
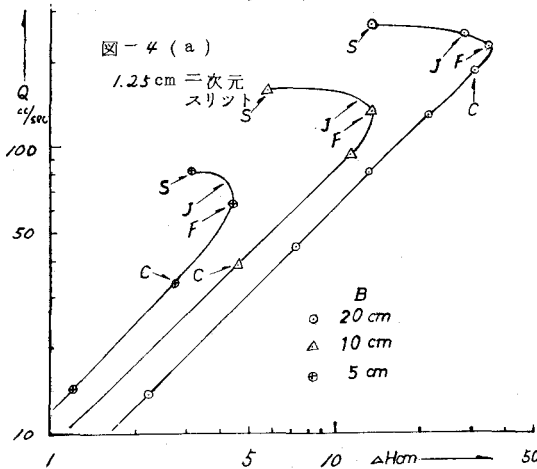


変化はきわめて著しく、その値は B/L および D/L に大きく規定される。然し $y/B \geq 0.1$ より上部では変化は緩慢になり砂の上層部において 0.5 程度の値をもち B/L および D/B による変化は少ない。

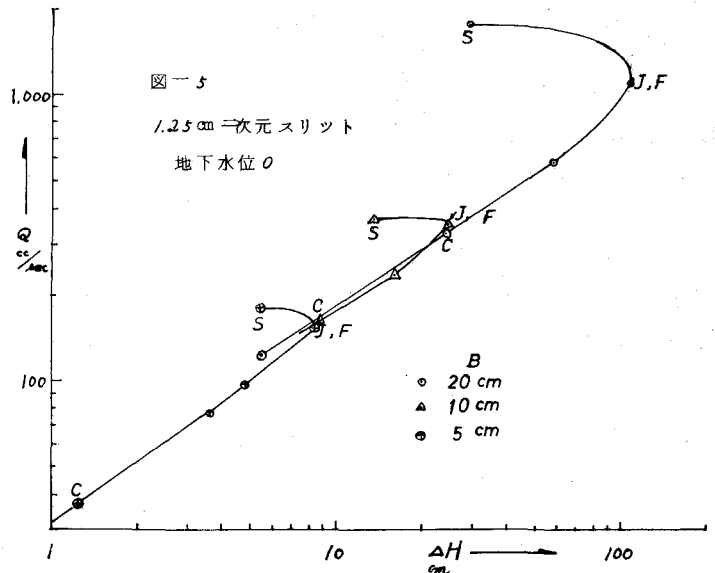
② $D/L = \text{一定}$ の場合 slit 位置の動水勾配は B/L が大きい程大きい値をとり $B/L = \text{一定}$ の場合には D/L が小さい程大きい。

4. 実験結果

図-4 (a) (b) は計算の対象となった 2 次元 slit の流量 Q cc/sec (8) 式の γ とは ($Q = 8 \times 2 \times 30$, $30 \text{ cm} = \text{slit の長さ}$) と水位差 ΔH との関係を示したもので、図中には空洞発生 C



、流動発生 F, sand jet 発生 J, 及び sand jet の安定点 S が矢印で記入してある。Q 及び ΔH の関係ははじめ両対数紙上で 45° 傾斜の直線となり (8) 式を用いて逆算された γ の値はほぼ 0.34 cm/sec 程度であって理論が妥当であることがわかる。然し sand jet の発生点に近づくとき空洞の発達により 45° の直線



からそれ、 ΔH の最大直後に sand jet が発生する。図-5 は地下水位 0 の場合の Q と ΔH との関係であって、空洞発生迄は Q と ΔH との関係が厚さ B に関係せず対数紙上で直線であるが勾配は前よりゆるく $Q \propto \Delta H^{0.75}$ なる関係がある。また ΔH の最大値において

sand jet が発生する。この実験装置では slit 下の水室容積が充分でないなどのため、とくに半円 slit では最大圧に達して砂の流動が始まった後 ΔH がやや下った状態で sand jet が発達したが、実際上は sand jet の発生が ΔH の最大のと看みなすことにし、これを ΔH_j 、空洞発生時の水位差を ΔH_c とすると次の関係

$$\Delta H_j, \Delta H_c = f(B, D, L \text{ および密度 } \rho_s, \text{ 空隙率, slit の形状, 地下水位 } h)$$

が期待される。 ρ_s および L の代りに動水勾配一様な場合の $I_c = \Delta H^*/B$ (この実験では ≈ 0.93) を導入すると

$$\frac{\Delta H_j}{\Delta H^*}, \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*} = f(B/D, L/D, h/B, \text{slit の形状})$$

となり、 $\Delta H_j/\Delta H^*$ および $\Delta H_c/\Delta H^*$ の実験値と主要な parameter B/D との関係は 2 次元 slit および半円 slit に対してプロットしたものが図-6(a)(b)である。2 次元 slit の場合は図-3 に示したように slit 附近では(1)式の限界勾配以上の流体力にさらされ、上部に安定な荷重がのっている感を呈するため、地下水面が砂層上に存在する場合の $\Delta H_j/\Delta H^*$ の値は D/B の小さいときのほかの値から D/B とともに増加して $\Delta H_j/\Delta H^* \approx 2.0$ の値に漸近するようである。また $D = 0.625$, $D = 1.25$ cm の測定がほぼ同一曲線上にあることから $\Delta H_j/\Delta H^*$ には B/D が主要な役割をもつと云えよう。地下水位 $h=0$ の場合には sand jet は起り難く、また $\Delta H_j/\Delta H^*$ は B/D とともに大きくなる。然し乍ら slit 附近の強い動水勾配のため $\Delta H_c/\Delta H^*$ が 1 以下の値において砂層の内部破かいが起り得ることは注意を要することであろう。図-6(b)の半円 slit の $\Delta H_c/\Delta H^*$ は D/B の増加とともに $\Delta H_c/\Delta H^* \approx 4.0$ に漸近し、2 次元 slit にくらべて起りにくいことが知られる。

図-6 (a)

二次元スリット

D (cm)	水位	空洞発生限界	ΔH 最大
1.25	上	□	○
0.625	中	●	●
0.625	下	■	●

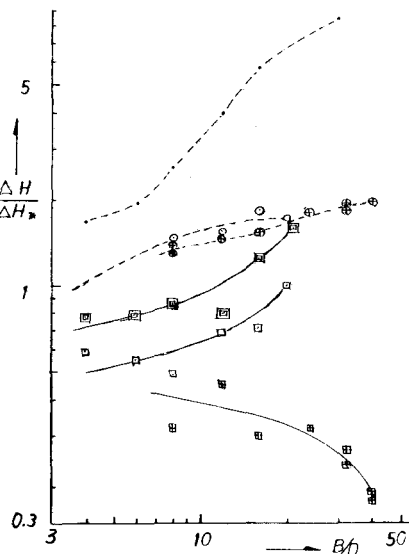


図-6 (b)

1.25 cm 半円スリット

