

愛媛大学工学部土木工学教室

正員

龍野正次

I: まえがき

岩石の大きな間隙や亀裂中における地下水運動は、溝や管の中の水運動と同じであると考えられる。このような運動状態は乱流と呼ばれ層流と違って速度の大きな渦の形成、流れの交叉が特色である。全断面スリットの流出において、上層の試料が下層の試料より粗粒の場合（下層には上層には2の添字を附し区別する）における噴砂に要する水位差については、動水こう配一様としてカウ釣り合いかう求める水た古典的なクイック・サンドの理論

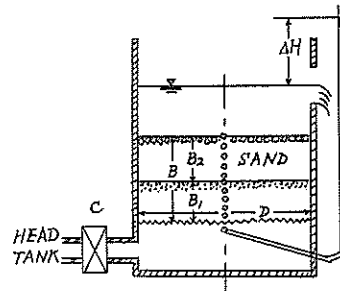
$$\text{動水こう配} = \frac{\Delta H_K}{B} = \frac{1}{B_1 + B_2} \left[\frac{\rho_1 - \rho}{\rho} (1 - \lambda_1) B_1 + \frac{\rho_2 - \rho}{\rho} (1 - \lambda_2) B_2 \right] \text{----- (1)}$$

ここに B : 試料の厚み ρ, ρ : 試料および水の密度 λ : 間隙率 ΔH_K : 水位差
とは著しく相違する。これは動水こう配が一様でないからであって、この種全断面スリットにおける噴砂に要する水位差を主眼におき報告する。

II. 実験装置ならびに実験結果

実験装置は図-1の如く高さ4mのヘッドタンク（水位一定）から導いた水を全断面スリットを通じて上部砂層に流入させるようにしたもので、流量はバルブをもって変化させる。実験槽は直径 $D = 10.4 \text{ cm}$ で、図のO印は動水圧測定個所であって、ピエゾ水頭と水位の読みとを差を $H \text{ cm}$ 特にスリット直前の H を ΔH とした。また用いた試料の性質については表-1

図-1



丙対数方眼紙の横軸に $\Delta H \text{ cm}$ 縦軸に流量 $Q \text{ cc/sec}$ をとると、サンド・ジェットが発生点に近づく迄 45° の直線となし、 ΔH の最大点（サンド・ジェットが発生点）近くなつて 45° の直線からそれ、 ΔH の最大点においてサンド・ジェットが発生する。サンド・ジェットが発生すると、 ΔH は減少し流量 Q は増大して安定点に達する。

普通方眼紙の横軸にスリットからの距離 $B_0 \text{ cm}$ を縦軸に $H \text{ cm}$ をとると、動水こう配一様の場合においては流量 Q 一定のもとで直線となす。しかし、上層が下層より粗粒の場合においては、直線から若干ずれて上層と下層の境界点を境と

表-1 試料の性質

粒 径 mm	有効粒径 $d_s \text{ cm}$	間隙率 λ	透水係数 $k \text{ cm/sec}$	試料密度 $\rho_s \text{ g/cm}^3$
0.5 ~ 0.25	0.035	0.535	0.142	2.679
1.0 ~ 0.5	0.069	0.523	0.423	2.667
2.0 ~ 1.0	0.139	0.511	1.441	2.667
2.8 ~ 2.0	0.236	0.500	3.805	2.655

した二本の直線となるが、そうすれば著しくはない。これは下層の透水係数が上層のそれに比し著しく大きいため下層の動水こう配は上層のそれに比し小さくなるもの、下層よりも上層試料がききに流動状態に達するためであって、この場合においては噴砂限界の水位差は(1)式により求められることが考

えられる。としかるに、上層が下層より粗粒の場合においては図-2に一例を示した如く、動水こう配の変化は著しく、下層の動水こう配は上層のそれに比し著しく大きい。従つて、下層が流動状態に達する条件を具備していても、上層試料が蔽ひかゞさつた形となり噴砂の起り難いことが考えられる。また、下層上層とも一直線とするのは不自然なようにも見られるが、今回は直線となるものとして考えることにする。砂層内の流れには、損失水頭 $\Delta H = \Delta P / \rho g$ 、平均流速 v 、水の粘性係数 μ 、水の密度 ρ 、砂層の長さ B 、砂粒子の粒径（有効粒径） d_s の 6 個の量が関係する。

次元解析により

$$\frac{\Delta P}{B} = C \left(\frac{\mu^2}{\rho d_s^2} \right) \left(\frac{\rho v d_s}{\mu} \right)^n \quad \text{----- (2)}$$

こゝに $\Delta P = \rho g \cdot \Delta H$ なる故

$$\frac{\Delta H}{B} = C \frac{\mu^2}{\rho^2 g d_s^2} \left(\frac{\rho v d_s}{\mu} \right)^n \quad \text{----- (3)}$$

となり $\frac{\rho v d_s}{\mu} = Re$ として梁透流におけるレイノルズ数と定義すると、流速の小さいときは流れは層流で、レイノルズ数に比例するから $n=1$ となり

$$v = \kappa' \frac{\Delta H}{B} \quad \text{こゝに} \quad \kappa' = \frac{1}{C} \frac{\rho g d_s^2}{\mu} \quad \text{----- (4)}$$

となり Darcy の法則となる。従つて Darcy の法則は流れが層流でレイノルズ数一次関係が成り立つ場合において成立する。

乱流すなわち $n=2$ の場合には

(3) 式より

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta H}{B} &= \kappa \frac{1}{d_s^2} \frac{v^2}{g} \\ \text{こゝに} \kappa &= 2C \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (5)}$$

が成立する。 κ は流れの抵抗係数と呼ばれるものである。

従つて

$$v = \sqrt{\frac{2g d_s}{\kappa}} \sqrt{\frac{\Delta H}{B}} = \kappa'' \sqrt{\frac{\Delta H}{B}} \quad \text{----- (6)}$$

となり、乱流状態での平均流速は動水こう配の $\frac{1}{2}$ 乗に比例することを示すもので、ア・ア・クラスノボリスキの式に一致する。従つて、層流状態の透水係数 κ と乱流状態の透水係数 κ' とは同一のもつてはなく、 κ の値を知ることによつて (4) (6) 式より κ' を求める

ことが出来る。なお、 Re との関係を図-3に記してゐるが、この図から限界 Re を知ることは困難である。 κ 、 Re と Re' との関係は図-4に記してゐるが、 Re が 4 程度の値で層流乱流の限界を示すこと、また $Re > 4$ では両対数紙上で直線をなすことがわかる。この点については、Lindquist の説を使つ

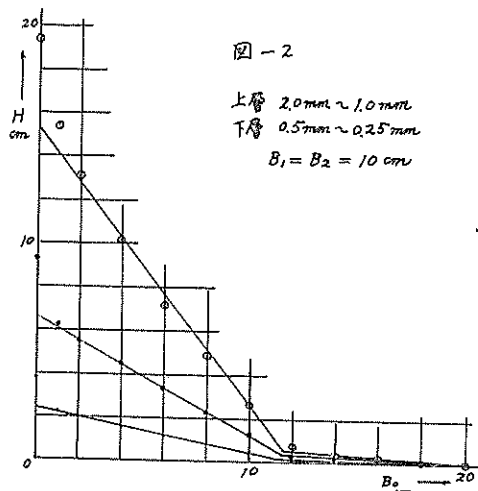
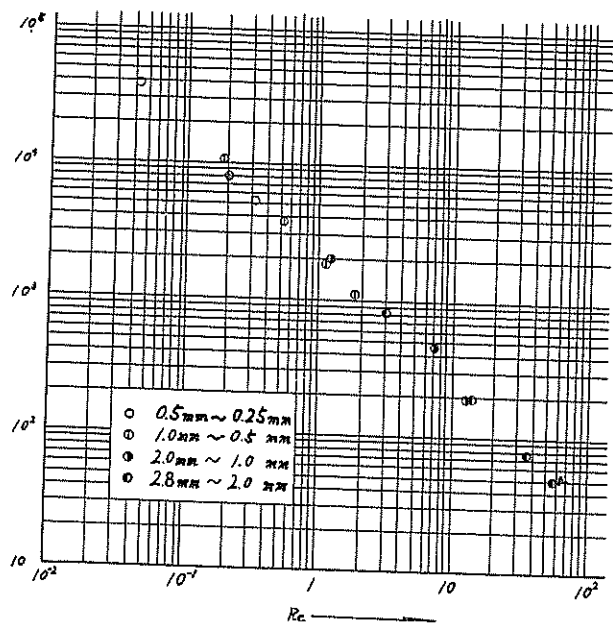
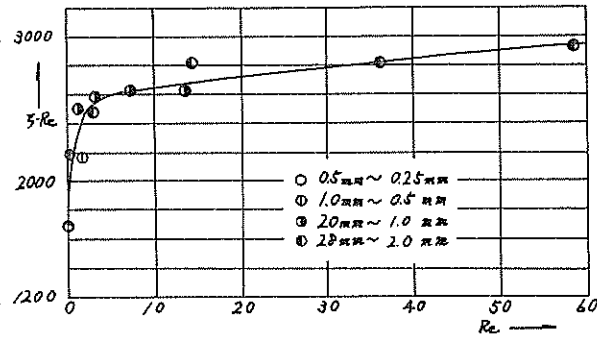


図-3



大実験結果^①と一致する。下層が細粒上層が粗粒の場合においては、水圧をあけてゆく過程で、細粒は流動しかけてもその上に粗粒が押しかぶった形をしている。図-3にも見られる如く、一般的に粗粒になるにつれ Re が大きくなることからしても下層が層流上層が乱流として図-1のフスリット直下上層試料と下層試料との境界および上層試料の上部におけるピエズ水頭の読みを H_a, H_b, H_c とすると、 $H_b - H_c$ の値が力の釣り合い関係に

図-4



上に達すると噴砂がおこると考えられるので、噴砂限界においては $H_b = H_c + \frac{P_{s2} - P}{\rho} (1 - \lambda_2) B_2 \dots (7)$

また、連続の法則より $\rho_1 \left(\frac{H_a - H_b}{B_1} \right) = \rho_2 \left(\frac{H_b - H_c}{B_2} \right)^{0.5} \dots (8)$

(7)(8)式より $H_a - H_c$ を求めると

$$H_a - H_c = \Delta H_{*1} = B_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left[\frac{P_{s2} - P}{\rho} (1 - \lambda_2) \right]^{0.5} + \frac{P_{s2} - P}{\rho} (1 - \lambda_2) B_2 \dots (9)$$

が成立する。いま、 $\frac{P_{s2} - P}{\rho} (1 - \lambda_2) B = \Delta H_{*0}$ とおき $B_1 = B_2 = \frac{B}{2}$ のときは

$$\Delta H_{*1} = \frac{1}{2} \left[B \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left(\frac{\Delta H_{*0}}{B} \right)^{0.5} + \Delta H_{*0} \right] \dots (10)$$

しかし、噴砂のおこる直前においては、下層も上層も乱流と考えると、連続の法則より、

$$\rho_1 \left(\frac{H_a - H_b}{B_1} \right)^{0.5} = \rho_2 \left(\frac{H_b - H_c}{B_2} \right)^{0.5} \dots (11)$$

が成立し、(7)式を入れて $H_a - H_c$ を求めると、

$$H_a - H_c = \Delta H_{*2} = B_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left[\frac{P_{s2} - P}{\rho} (1 - \lambda_2) \right] + \frac{P_{s2} - P}{\rho} (1 - \lambda_2) B_2 \dots (12)$$

が成立する。いま、 $B_1 = B_2 = \frac{B}{2}$ のときは $\Delta H_{*2} = \frac{\Delta H_{*0}}{2} \left[1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \right] \dots (13)$

実験により噴砂をおこすに要す

表-2

る水位差 $H_a - H_c$ の値の測定結果と ΔH_{*1} ならびに ΔH_{*2} とを比較したのが表-2である。なお力の釣り合い(1)式による計算値は著しい差違が認められるので省略している。図-4から見られるように $0.5 \text{ mm} \sim 0.25 \text{ mm}$ の試料については噴砂のおこる

実験番号	上層粒径 mm	下層粒径 mm	B_1 cm	B_2 cm	実験測定による ΔH_{*max} cm	ΔH_{*1} cm	ΔH_{*2} cm
16-1	2.0 ~ 1.0	0.5 ~ 0.25	10	10	32.65	28.81	29.15
16-2	1.0 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	10	10	25.50	23.64	20.02
16-3	2.8 ~ 2.0	2.0 ~ 1.0	10	10	29.00	10.86	21.19
16-4	2.0 ~ 1.0	1.0 ~ 0.5	10	10	30.80	15.10	22.06
16-5	1.0 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	5	5	8.25	11.82	10.01
16-6	2.0 ~ 1.0	0.5 ~ 0.25	5	5	13.95	14.40	14.58
16-7	2.8 ~ 2.0	0.5 ~ 0.25	5	5	13.65	17.11	20.69
16-8	2.0 ~ 1.0	1.0 ~ 0.5	5	5	11.10	2.55	11.03
16-9	2.8 ~ 2.0	1.0 ~ 0.5	5	5	16.00	8.50	15.10
16-10	2.8 ~ 2.0	2.0 ~ 1.0	5	5	19.40	10.85	10.59

直前まで Re の値は4以下である。従って、この実験において下層の粒径が $0.5 \text{ mm} \sim 0.25 \text{ mm}$ の場合における噴砂条件としては、下層は層流上層は乱流として考えた ΔH_{*1} の値を用いるのが妥当と考えられる。下層が $1.0 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ の場合には、 ΔH_{*2} の値の方が測定値に近いようである。これは $1.0 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ の場合、噴砂直前の Re の値が乱流領域に入るためではないかと考えられる。従って下層粒径がこれより大きい $2.0 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ の場合においては、上層下層とも乱流と考えた ΔH_{*2} の値の方が測定値に近いことは勿論である。以上、下層が細粒上層が粗粒の場合における噴砂に要する

水位差について述べたが測定値に近づいたとはいえ可成りの隔たりがある。これについては、つぎの理由によるものと考えられる。図-4に示された如く $R_c > 4$ の範囲を考えると $R_c = 2606 + 5.9 R_c$ の関係にあり、変形して $\frac{\Delta H}{B} = \frac{2606}{29d^2} \psi + \frac{5.9}{29d} \psi^2$ を用いる方がより精度があがると考えられること。また実験の際下層の細粒部分の上に上層試料が押しがけられた形で、噴砂に際し試料が全体的に持ち上げられてゆく場合があり、この場合における噴砂に要する水位差 $H_a - H_c$ の測定が困難なこと。

表-3

上層粒径 mm	下層粒径 mm	B_1 cm	B_2 cm	実験測定による ΔH_{max} , cm	(1)式による ΔH_{max} , cm
0.5 ~ 0.25	2.8 ~ 2.0	5	5	8.30	8.06
1.0 ~ 0.5	2.8 ~ 2.0	5	5	8.50	8.14
2.0 ~ 1.0	2.8 ~ 2.0	5	5	8.40	8.24
0.5 ~ 0.25	2.0 ~ 1.0	5	5	8.10	8.00
1.0 ~ 0.5	2.0 ~ 1.0	5	5	8.00	8.07
0.5 ~ 0.25	1.0 ~ 0.5	5	5	7.55	7.90

上層が下層よりも細粒の場合については、前述の如く下層の動水こう配よりも上層の動水こう配が大きいため、下層よりもさらに上層試料が流動状態に達し、下層の動水こう配が力の釣り合い関係以上に達すると噴砂が

Ⅲ. おまけ

下層試料が上層試料よりも細粒の場合について、全断面スリットによる噴砂に要する水位差について、水理学的立場から述べた。従来、この種噴砂については、間接的に水圧測定による解決法を以て水理学的立場からの解決は困難とされてきたが、この方法により噴砂に要する水位差を推定し得るものと考えられる。終りに、九州大学工学部水工土木学教室 橋本一郎教授のご指導によることを附記して謝意を表します。

参考文献

- ① Lindquist, E. i On the flow of water through Porous Soil, Rep. 1st Cong. Large Dams, Stockholm, 81, 1933.