

噴砂現象に関する研究

福 尾 義 昭

EXPLORATORY STUDY OF SAND JET

By Yoshiaki FUKUO

Synopsis

The model experiments of sand jet were made in connection with the spouting of ground water and sandy soil observed at the districts damaged by Niigata Earthquake. From the result of experiments, it was suggested that a nondimensional measure of sand jet b/T (b : jet width at the surface of sand layer, T : thickness of sand layer) might be proportional to the “reduced seepage rate” per unit head difference $Q/\kappa H$ (Q : seepage flowrate, κ : permeability, H : head difference between the surface and bottom of sand layer)

1. ま え が き

新潟地震において、被害の大きかった低地砂層地域で地下水の噴出、土砂の吹き上げが方々でみられた。噴水、噴砂は発震後数分して起り、強いところでは地上 2~3m の高さにも達したということである。これは砂層底部の不透水層に、地震動のために亀裂や裂目が生じ、そこから被圧地下水が噴き出し砂層の砂と一緒に地表面に吹き上げたものと考えられる。

被害地では多くの建造物が沈下傾斜し災害の激しかったことを物語っているが、これには、地震動にともなっていわれる砂層の quicksand 現象が起り、そのために被害がさらに大きくなったといわれる。

わが国の都市の多くは河口の扇状地に発展している。今回の新潟地震にみられたような災害が起る可能性は大としなければならない。

噴砂の現象としては、そのほかに、山腹の傾斜地において piping と呼ばれている噴砂現象があり、この噴砂が表土崩壊に大きな役割を演ずることも周知のことである。

噴砂は砂層流動化の顕著な現われである。噴砂の現象を調べ砂層流動化のより詳しい知識をもつことは防災上からも重要なことだと思われる。

2. 砂層の流動化

砂層を流れる水の運動方程式は、水平面内に xy 面をとり鉛直上方に z 軸をとるとき、慣性項を無視するならば

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p - \mathbf{R} - g\mathbf{k} \dots \dots \dots (1)$$

で表わされる。ここに ρ は水の密度、 p は水圧、 g は重力の加速度の大きさ、 $\mathbf{k}$ は鉛直上向きの単位ベクトルであり、 $\mathbf{V}$ は砂層の間隙を流れる水の平均流速を表わし、 $\mathbf{R}$ はその間隙の抵抗力である。

$\mathbf{V}$ の代りに砂層内の単位断面積を通じて流れる水の流量を考え、この流量のベクトルを $\mathbf{v}$ で表わすと

$$\mathbf{v} = n\mathbf{V} \dots \dots \dots (2)$$

ここに n は砂層の空隙率である。

Darcy の法則によれば, $\mathbf{v}$ は

$$\mathbf{v} = -\kappa \text{grad} h = -\kappa \text{grad} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに κ は透水係数 (permeability) であり $h = \frac{p}{\rho g} + z$ は水頭 (piezometric head) と呼ばれるものである。

(3) 式をかきかえると

$$0 = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p - \frac{g}{\kappa} \mathbf{v} - g \mathbf{k} \dots\dots\dots (4)$$

この式は, 砂層を流れる水の運動エネルギーがきわめて小さいと考えたときの定常状態における運動方程式とみることができる。(1) 式と (4) 式を対照すると, 砂粒の間隙に生ずる抵抗力は流量ベクトル $\mathbf{v}$ に比例し, その係数が g/κ で与えられることを示している。

次に砂層が水が流れているときに, 砂粒にはたらく力を考える¹⁾。砂層の単位体積中の砂粒について考えると

1. 砂粒にはたらく重力; $\mathbf{F}_1$
2. 砂粒に及ぼす水圧による力; $\mathbf{F}_2$
3. 砂粒間隙を動く水によって生ずる力; $\mathbf{F}_3$

の3つが考えられる。

砂粒の密度を ρ_1 であらわすと $\mathbf{F}_1$ は

$$\mathbf{F}_1 = -(1-n)\rho_1 g \mathbf{k}$$

水圧によって生ずる力は単位体積当たり $-\text{grad} p$ であるから $\mathbf{F}_2$ は

$$\mathbf{F}_2 = -(1-n)\text{grad} p$$

$\mathbf{F}_3$ は砂粒が水に及ぼす抵抗 $\mathbf{R}$ の反作用と考えられる。 $\mathbf{R} = -\frac{g}{\kappa} \mathbf{v}$ は水の単位質量について働く力の大きさであり, 砂層の単位体積中には $n\rho$ の質量の水が存在するから

$$\mathbf{F}_3 = -n\rho \mathbf{R} = \frac{n\rho g}{\kappa} \mathbf{v}$$

となる。

$\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3$ の合力 $\mathbf{S}$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 \\ &= -(1-n)\rho_1 g \mathbf{k} - (1-n)\text{grad} p + \frac{n\rho g}{\kappa} \mathbf{v} \\ &= -(1-n) \left[\rho_1 g \mathbf{k} - \rho g \mathbf{k} - \frac{\rho g}{\kappa} \mathbf{v} \right] + \frac{n\rho g}{\kappa} \mathbf{v} \quad (\because (4)) \\ &= \frac{\rho g}{\kappa} \mathbf{v} - (1-n)(\rho_1 - \rho) g \mathbf{k} \quad (5) \\ &= -\rho g \text{grad} h - (1-n)(\rho_1 - \rho) g \mathbf{k} \quad (6) \end{aligned}$$

この合力 $\mathbf{S}$ がある限界値以上になったとき砂粒が動き始め, 砂層の流動化がおこると思われる。 $\mathbf{S}$ の z 成分は (5) 式から砂粒の水中における重さと水の流速の鉛直成分によって生ずる力と与えられることになるが, この2つの力が平衡したときに quick sand がおこり始めるといわれている²⁾。

3. 噴砂の実験装置と実験結果

新潟市の被災地において, 噴砂跡の調査をおこなった。Photo. 1 は市内になお残っていた噴砂口を写したものである。代表的な噴砂跡の土砂を採取し, その粒度分布を測定した。結果は Table 1 に示される。実験に用いる砂は写真効果を考慮して白い寒水砂 (大理石の碎屑) を使用し, また Table 1 を参照し

Table 1. The relative weight distribution of soil particles spouted by ground water after Niigata Earthquake.

Date of sampling (1964)	Position of sampling	Depth below the ground surface (cm)	Relative weight (%) for each grain size (μ)									
			<74	74~110	110~250	250~400	400~850	850~1200	1200~2000	2000~2500	2500~5000	5000<
4, Jul.	Rear of Sankō manufactory	0	2.23	2.56	13.60	40.30	40.89	0.36	0.06	—	—	—
		25	29.16	6.53	20.87	20.13	16.52	0.79	0.57	0.11	0.48	4.84
		50	2.55	2.00	7.41	19.22	64.73	1.81	1.83	0.10	0.31	0.04
4, Jul.	Rear of Ōgata primary school	0	1.87	2.35	4.78	30.60	60.13	0.17	0.08	0.02	—	—
		20	1.52	1.91	10.80	32.91	49.53	2.35	0.79	0.06	0.13	—
		80	2.03	1.43	4.99	28.15	63.19	0.16	0.05	—	—	—
4, Jul.	Side of apartment building at Kawagishi street	0	0.37	0.51	5.66	19.82	72.60	0.90	0.11	0.03	—	—
		30	0.53	0.59	5.08	23.26	65.24	3.24	1.05	0.15	0.44	0.42
5, Jul.	Front of waiting room of Niigata airport	0	0.95	1.58	19.41	68.35	8.35	0.67	0.50	0.07	0.12	—
		20	0.42	0.58	7.57	24.29	61.64	3.98	1.35	0.11	0.06	—
5, Jul.	Runway of Niigata airport	0	1.52	2.49	35.04	58.79	1.98	0.13	0.05	—	—	—

Table 2. The results of experiments of sand jet.

Grain size (μ)	ρ (g/c.c.)	n	κ (cm/sec)	Q (c.c./sec)	H (cm)	T (cm)	b (cm)	$QT/\kappa bH$
<590	2.73	0.449	0.016	28.7	4.5	8.5	—	1.51×10^3
				26.3	4.8	8.5	—	
				63.1	6.7	9.0	3.5	
590~710	2.71	0.451	0.035	11.0	3.5	6.5	—	1.54×10^3
				92.3	5.7	7.0	2.1	
710~1000	2.72	0.440	0.058	56.7	4.5	6.5	—	1.55×10^3
				75.2	4.2	6.5	—	
				99.4	5.5	7.0	1.4	
1000~1190	2.71	0.439	0.156	98.6	6.1	7.5	1.1	0.71×10^3
				105.0	5.2	6.0	1.3	0.60×10^3

where ρ ; density, n ; porosity, κ ; permeability, Q ; flowrate, H ; head difference, T ; thickness of sand layer, b ; width of sand jet at the surface of sand layer.

て、Table 2 に示されるようにこの白砂を 4 段階の粒径にふるい分け、それぞれについて噴砂実験をおこなった。砂の密度・空隙率および透水係数は京都大学工業教員養成所土質力学研究室で測定していた。密度と空隙率はどの粒径についてもほとんど同じである。

実験装置の概略は Fig. 1 に示される。不透水層に相当する部分は厚さ 1mm の真ちゆう板を使用し、2 次元的な噴砂の実験を対象にして板の中央に巾 2mm のスリットを作り、不透水層に生じた裂け目に対



Photo. 1. An example of spouts of ground water found in the city after Niigata Earthquake. (the length of scale is one meter.)

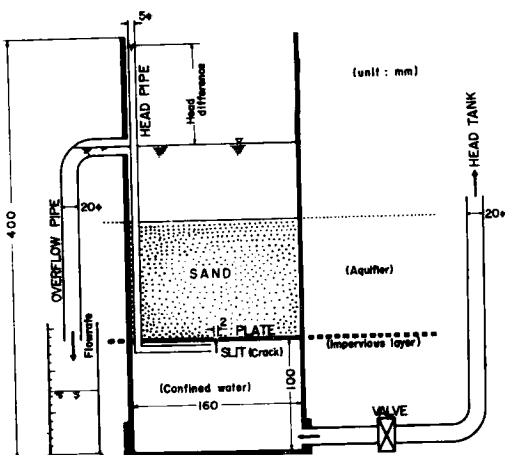


Fig. 1. Sketch of apparatus for spouting the sand grains.

断させた。Head tank から導いた水をこのスリットを通して上部砂層に噴出させる。スリットにおける head はバルブで調節し、head pipe 中の水柱高でその値を読みとった。また overflow の流量も測定する。

実験は各粒径について、次の 3 段階を順次行なった。すなわち

- a). 初めに、砂を装置につめ、バルブを全開してスリットから水を噴出し砂層の空隙を次第に水で満たしながら飽和状態にさせ遂に噴砂をおこさせる
- b). バルブを調節して、スリット付近でのみ砂粒が動いている状態を保つ
- c). 砂層の表面の砂粒が流動限界にあって噴砂が間欠的におこる状態を保つ

この各段階における変化の様子は 8 mm シネフィルムで写真記録した。Photos. 2~4 は 590μ より小さい粒径の砂について a) の段階で記録した写真である。Photo. 2 は砂層間隙を次第に水が満たしていく途中の場面で、砂層下部にみえる波状のおうとつ面のところまで自由水面がきている。Photo. 3 は砂層が完全に水で飽和しスリットの少し上に、砂の動いているかさ形の領域ができた瞬間で、このかさ形領域は上にのび遂に砂層表面を貫いて噴砂状態となる。噴砂がさかんにおこっているときの写真が Photo. 4 であり上部水面は overflow pipe の口まで達している。

Photos. 5 および 6 はそれぞれ粒径 $590\sim 710\mu$, $710\sim 1000\mu$ の砂がさかんに噴砂しているときの記録である。Photo. 7 は (b) 状態を示す一例でスリットのすこし上に小さいが安定した砂粒の流動領域が黒く写っている。砂粒はこの領域内でぐるぐるまわっている。Photo. 8 は状態 (c) における記録の一つで流動域の先がまさに砂層を貫く瞬間である。Photo. 9 は (a) の方法で噴砂させたときの状態である。

実験の結果から次のことが観察できた。

- 1), いづれの粒径の場合も a) の方法で噴砂させるとき、sand jet は砂層が水で飽和するまではおこらなかったし、砂層が水で飽和したところに急に砂層の厚みが増し、そのあとで砂粒が流動し始め sand jet

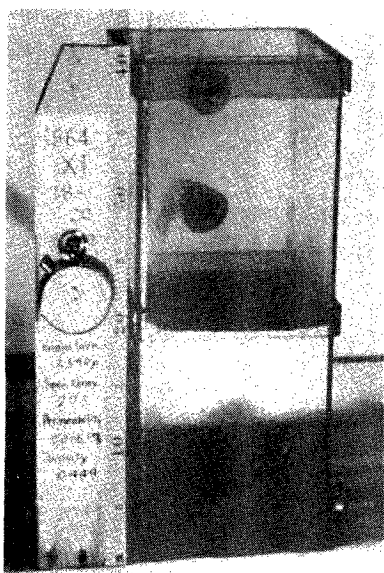


Photo. 2. Wavy form in the lower part of sand layer shows the free surface of seepage flow through the slit.

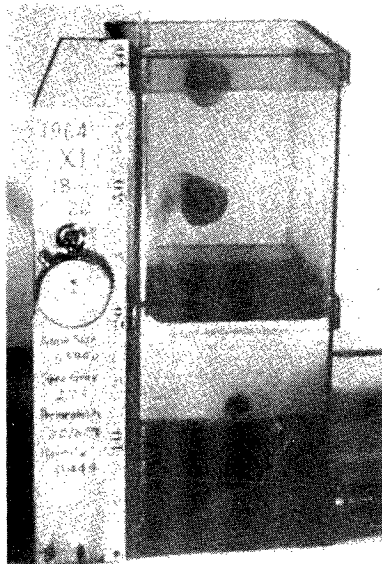


Photo. 3. Dark parasol shape above the slit was the cavity in soil medium, which was born perhaps by the water jet flow. Note that the soil layer was already saturated with water.

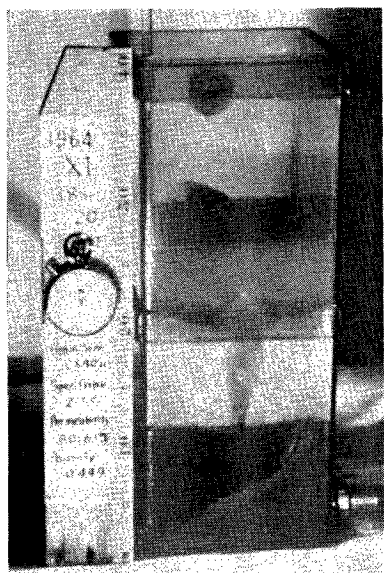


Photo. 4. The fully development of sand jet for the grain size less than $590\ \mu$ ($Q=63.1\ \text{c.c./s}$, $H=6.7\ \text{cm}$).

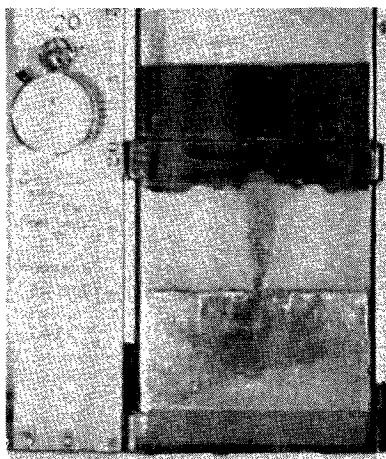


Photo. 5. The fully development of sand jet for the grain size between $590\ \mu$ and $710\ \mu$ ($Q=92.3\ \text{c.c./s}$, $H=5.7\ \text{cm}$).

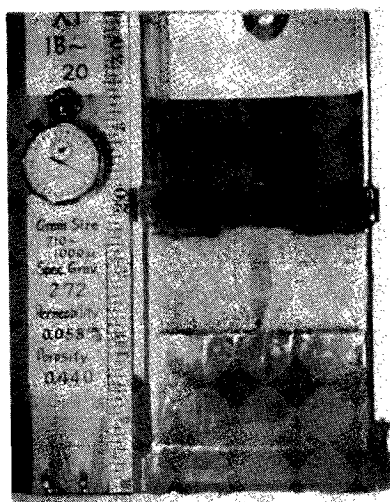


Photo. 6. The fully development of sand jet for the grain size between 710μ and 1000μ ($Q=99.4$ c.c/s, $H=5.5$ cm).

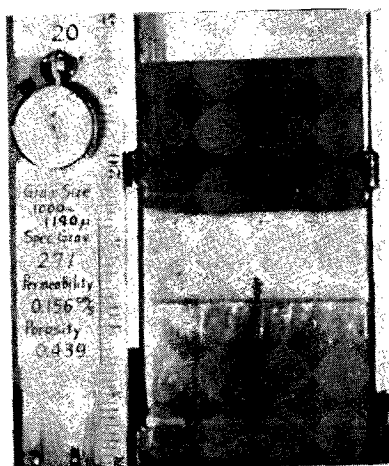


Photo. 7. Dark spot above the slit shows the stable small region in which the grain particles moved at initial stage of sand jet.

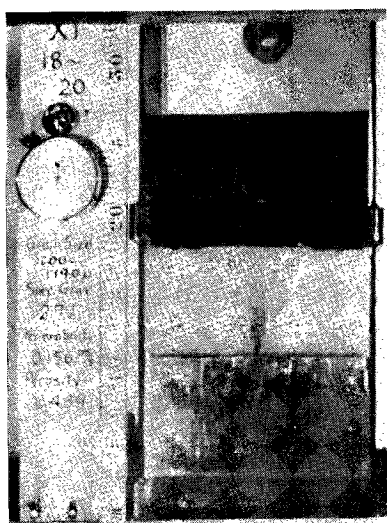


Photo. 8. Intermittent jet of sand grains.

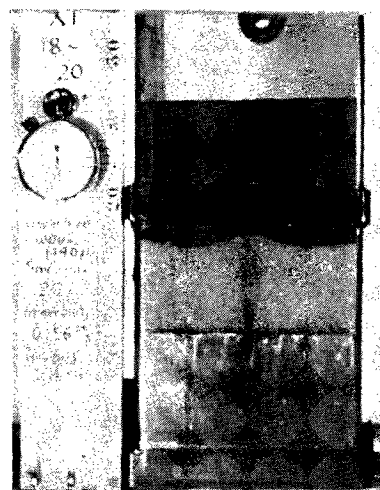


Photo. 9. The fully development of sand jet for the grain size between 1000μ and 1190μ ($Q=105.0$ c.c/s, $H=5.2$ cm).

に発達する。

2), 発達した sand jet の形や位置は, 590μ 以下の砂についてはいくらか変化するが, 他の砂については安定していた。

3), sand jet の幅は粒径が大きいほど狭くなるようである。

4), jet の縁に砂粒の return flowがあり, この流れで下方に砂粒が運ばれ, 途中で jet の中央の主流にと

りこまれると再び砂層表面まで吹き上げられた。

実験の各段階で記録した写真から、水頭差 H , 砂層厚 T , sand jet の砂層表面における幅 b を読みとりまた overflow の流量 Q を測定して、実験結果を整理したのが Table 2 である。

4. 結 果 の 考 察

2 で述べたように、砂粒の運動は砂層中の水の流れと深い関係がある。Table 2 でみられるように、砂の密度 ρ_s や空隙率 n はどの粒径についてもほとんど変りがないから、力 S の値は (5) 式から透水係数 κ や速度 v の値によって変化することになる。実験装置の構造や砂層がほぼ均質であることを考えると、この装置内の水の運動は真ちゆう板のスリットにおいて立てた法線に関して対称であり、各深さではこの法線上で最大流速になるはずである。sand jet の形がこの法線に関してほぼ対称になっていたのもうなづける。Head difference H を増すと流速が速くなり、遂に S の値は砂粒を動かす限界値に達する。この限界値をもつ点から法線までの距離が sand jet の幅の半分に相当するだろう。

噴砂が始まると水の大部分は jet 内を走るように見える。それで流量 Q は sand jet の幅 b と流速に比例するとみなそう。

$$Q \propto bv \dots \dots \dots (7)$$

さらに水の速さ v は透水係数 κ と水頭勾配 H/T に比例すると考えよう。すなわち

$$v \propto \frac{\kappa H}{T} \dots \dots \dots (8)$$

(7), (8) から

$$\frac{b}{T} \propto \frac{Q}{\kappa H} \dots \dots \dots (9)$$

この関係がみたされるときには、 $K \equiv \frac{QT}{\kappa bH}$ の値は粒径に関係なく、ある一定の値をとるはずである。Table 2 の最後の行に K の値が示されているが、最も大きい砂粒以外の K の値はほとんど等しくなっている。このことは、jet の大きさを表わす無次元量 b/T が単位水頭で流れる seepage flow の reduced flowrate $Q/\kappa H$ に比例することを暗示している。

計算に用いた表中の κ の値は定水位透水試験器で測定して得られたもので、sand jet が盛んにおこっているときの透水係数の値とは異なっているだろうし、また jet 中の水の運動はもはや Darcy の法則に従わず、 v が (8) のような関係をみたすかどうかとも疑問である。したがって、 K が果して一定の値にとどまるものかどうかは今後さらに研究する必要があると思われるが、一応興味のある結果である。

謝 辞

この研究に際して、有益な助言をいたゞいた当研究所奥田節夫教授に厚くお礼申し上げるとともに、実験に当って協力を惜しまれなかった研究室の方々に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) P.P. Kochina : Theory of Ground Water Movement, Princeton Univ. Press, New Jersey, (1962), pp. 47-49.
- 2) A.R. Jumikis : Soil Mechanics, D. Van. Nost. Co. Inc., New York, (1962), pp. 333-345.