

水中における砂れきの掘削抵抗に関する実験的研究*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESISTANCE OF EXCAVATION
AGAINST SUBMERGED SANDY SOIL OR GRAVELS

室 達 朗**

By Tatsuro MURO

1. まえがき

近年、海洋土木の時代を迎え、ますます水中における土木工事が増大してきた。この水中における土砂の掘削においては、掘削速度の増大とともにその掘削抵抗は著しく増大することや掘削刃先の摩耗が陸上工事と比較して激しくなるなど、陸上での掘削作業とは異なった特性を示すことが知られている。これは、水浸状態にある土砂の間隙に存在する間隙水の挙動によって大きな影響を受けるためであり、その挙動特性を解明することが水中での掘削抵抗を知るうえで重要なかぎとなる。

従来、著者らの行った丸鋼による掘削試験においては、砂れきの含水状態が水浸状態にあるとき、掘削抵抗におよぼす掘削速度の効果が最も著しいことが判明している¹⁾。その原因としては、粒径の比較的大きな砂れきの場合、掘削速度が増大するほどせん断に伴う土砂の急激な体積膨張により発生する負の間隙水圧が生じ、土粒子間の有効応力が増大することが考えられる。この場合、発生した間隙水圧によって、間隙水が砂れきの間隙を通過する間に失う摩擦損失水頭のために間隙水圧の絶対値が低下する現象を無視するわけにはいかない。また、水浸砂れき中を移動する掘削棒に作用する動水圧に対応する負の間隙水圧が掘削棒とともに移動する土塊中

に発生することが考えられ、さらに、掘削速度が増大すると、土砂と水とが渾然一体となった粘性抵抗として掘削速度の平方に比例した因子が加わると推察される。

ここでは、水中における砂れきの掘削抵抗について、主として、実験結果に基づいて考察していくことを本研究の目的とした。そのため、二、三の実験を行い、種々の掘削速度に対する掘削抵抗および発生間隙水圧の大きさを測定した。その後、掘削に伴って発生する間隙水圧の挙動について考察し、水中における掘削抵抗を砂れきの諸特性と掘削速度に関していかなる関数形で表現していくかについて次元解析を行った。また、得られた解析式と実験式との対応関係から、水中において掘削抵抗を増大せしめている要因の分析を行った。なお、得られた新しい知見に基づいて、水中での掘削抵抗を減少させるための方法を提案し、いくつかの実験を行った結果について記述した。

2. 実験方法および装置

(1) 試料砂れき

実験に使用した 6 種類の砂れきの諸特性として、平均粒径 m 、均等係数 U_c 、および水浸状態における間隙比 e 、湿潤密度 γ_t 、透水係数 k 、切削強度指数 e_s ²⁾、非排水

表-1 水浸状態における試料砂れきの諸特性

記号	名 称	平均粒径 (mm)	均等係数 U_c	間 隙 比 e	密 度 γ_t (g/cm ³)	透水係数 k (cm/sec)	レイノルズ数 R_e	$e_s \times 10^{-3}$ (kg/cm ³)	ϕ' (度)	ϕ (度)
A	標準砂	0.24	1.85	0.81	1.91	6.6×10^{-3}	0.07	11.9	34.5	34.0
B	細砂	0.44	1.60	0.79	1.95	6.2×10^{-3}	0.12	21.7	37.5	36.8
C	粗砂	1.00	4.12	0.88	1.89	8.9×10^{-3}	0.40	7.6	40.0	39.2
D	砂れき	5.10	1.64	1.10	1.82	1.80	43.0	10.7	—	—
E	粗砂れき	7.12	1.43	0.82	1.92	2.12	72.6	15.7	—	—
F	玉石	5.01	1.41	0.61	1.99	1.94	44.3	10.8	—	—

* 本論文の一部は、第 9 回および第 10 回土質工学研究発表会にて発表済である。

** 正会員 工博 福井大学助教授 工学部建設工学科

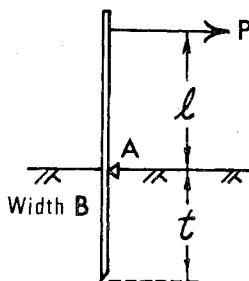
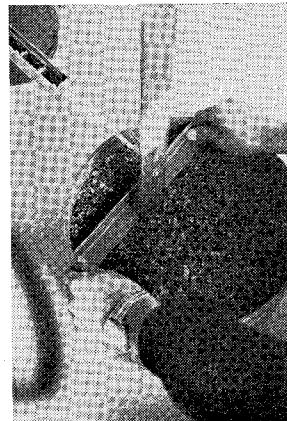


図-1 切削強度試験方法

試験を行った場合の内部摩擦角 φ および φ' についてそれぞれ試験した結果を表-1 に示した。ここで、切削強度指数 e_s の測定にあたっては、直径 31 cm、深さ 25 cm の円筒土槽内に試料砂れきを入れ、図-1 および写真-1 に示すように、幅 $B=5$ cm、厚さ 6 mm の鋼板を深さ t cm だけ砂れき中に押込み、A 点を支承として上方 l cm の位置でばねばかりによって最大引張力 P を計測した。その後、切削強度指数 e_s ($=Pl/Bt^3$) を種々の深さ t および高さ l に対して算定した。

なお、透水係数 k を求めるにあたっては、試料砂 A, B, C に対しては変水位透水試験、試料れき D, E, F に対しては定水位透水試験を行った。それぞれの試験に対して Reynold 数 $R_e^{(3)}$ を算定した結果、同表に示すように、試料砂 A, B, C の細粒砂では層流領域で、D, E, F の粗粒れきでは乱流領域で試験を行っていることが判明した。しかし、後述の実験においては、約 200 cm/sec までの高速での掘削速度を問題とするので間隙水の流れ

写真-1 切削強度指数 e_s の測定

はすべて乱流状態にあることが確認された。

(2) 実験装置

写真-2 は実験装置、図-2 はその掘削抵抗、間隙水圧測定装置と噴流水供給装置の概略図を示す。掘削棒は、一辺が 3.0 cm の正方形断面を有する長さ 30 cm の鋼棒であり、掘削棒前面には下端部より 3.0 cm の位置の中心線上に間隙水圧測定用および噴射水を供給するための孔（直径 5 mm の円孔）が設置されている。また、図において、掘削棒の掘削深さを z_0 で表わし、掘削に伴う砂れきの盛り上り高さを考慮した場合の掘削深さを z 、およびその盛り上り部分と掘削棒との接する位置から間隙水圧測定用孔までの距離を z' とした。間隙水圧は間隙水圧計に連結され、また、掘削抵抗は掘削棒上部に貼り付けたペーパーゲージ（電気抵抗線ひずみ計）を通して、オシログラフに自記させるものとした。また、間隙水圧は、掘削棒の壁面（掘削刃面）だけでなく、掘削される砂れき中の間隙水圧分布を測定するために長さ 8 cm、内径 1.0 mm の注射針を所定の位置に鉛直に設置して測定した。

なお、掘削棒および間隙水圧測定装置一式は固定し、土槽をある一定の速度で移動させるものとした。その移動速度は低速域において、3.88, 5.82, および 7.76 cm/sec の 3 段階とし、高速域においては 70~180 cm/sec の間を 5 段階に変速せらる装置を作製した。また、噴射水は、最大圧力 5 kg/cm² まで与えることが可能である容量の大きいコンプレッサーを使用し、蓄圧タンクを通して供給した。また、噴射ノズルの内径は 2 mm 径であり、ノズルより噴出される水の流量は 0.5 気圧に対して 6.0 cc/sec, 1.0 気圧に対して 8.9 cc/sec であった。

(3) 実験の方法

前述した 6 種類の試料砂れきに対して水中掘削抵抗お

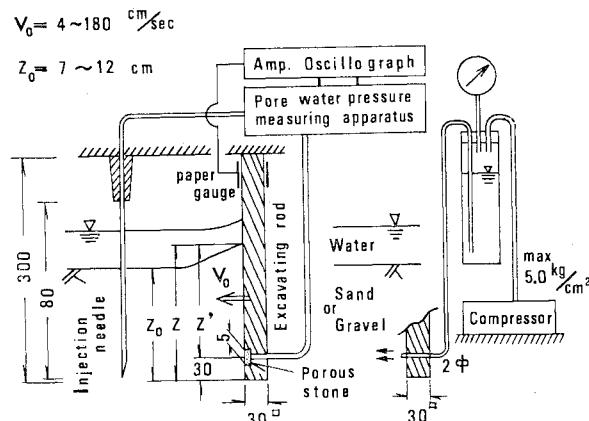


図-2 掘削装置および噴流水供給装置

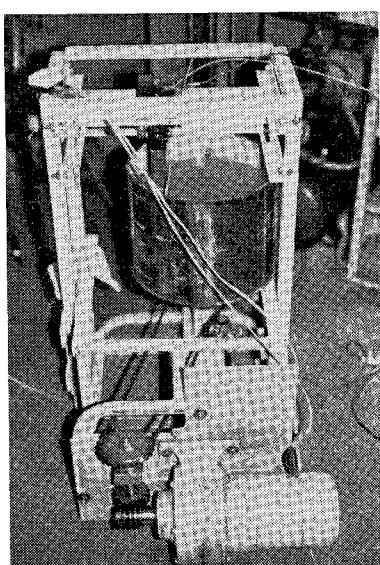


写真-2 実験装置

より発生間隙水圧が掘削速度とともにどのように変化していくかについて実測を行った。この際、掘削深さは 7 cm～12 cm の間とし、掘削抵抗の経時変化をオシログラフで測定した。試料砂の密度は水浸状態で一定となるように努めた。特に、細粒砂の場合は自重による圧縮により時間の経過とともに高密化する傾向にあり、注意を要した。

また、豊浦標準砂（試料砂 A）に対しては、掘削にともなう発生間隙水圧の分布状況を調査するために注射針を所定位置に設置し、発生間隙水圧の測定を行い、さらに、低速域における掘削抵抗と掘削速度との関係を求めた。

なお、実験の手順としては、それぞれの試料砂れきを土槽内に充填し、水面下に水浸させて掘削棒を深さ 7～12 cm の間を 1 cm きざみに 6 段階にセットし、土槽を所定の速度（180 cm/sec までを 10 段階に分割）で移動させ、固定された掘削棒に作用する掘削抵抗と掘削刃面上の間隙水圧を測定していくのである。なお、それぞれの試験の測定回数は測定精度を向上させるため、3 回以上とした。

3. 水中掘削抵抗、発生間隙水圧、および掘削速度との関係

まず、試料砂 A である豊浦標準砂に対する水中掘削抵抗と発生間隙水圧分布について測定を行い、その後、水中掘削抵抗と掘削速度の関係、および発生間隙水圧と掘削速度との関係を求めた。

図-3 は、掘削棒のすくい角 $\alpha=0^\circ$ 、横すくい角 $\beta=0^\circ$ とし、静止時における掘削深さ z_0 を 7 cm、掘削速度を 5.82 cm/sec とした場合の掘削抵抗および掘削棒の進行方向にそって前方 3 cm、深さ 4.5 cm の位置における発生間隙水圧の経時変化をオシログラフに記録させたものである。図より明らかに、掘削直後において掘削抵抗および発生間隙水圧はするどい立ち上がりを見せるが、その後は定常状態に達する。また、発生間隙水圧は最初

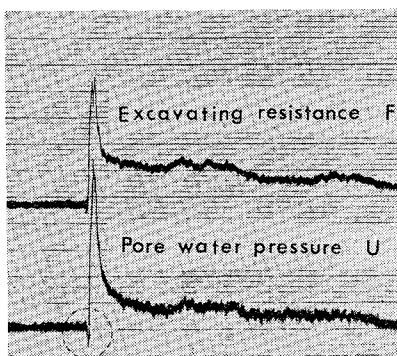


図-3 掘削抵抗と間隙水圧（負値）の測定例、紙送り速度 100 cm/min

わずかに正の値を示すがダイレイタンシーによる負圧が大きく記録されている。同様に、図-4 は、掘削棒の進行方向中央断面における掘削直後のピーク時の発生間隙水圧を測定し、その発生間隙水圧分布を等圧線として示したものである。図より、すべり線近傍においては負の発生間隙水圧の絶対値は減少しており、これはすべり線上で体積膨張を引き起こしたことを実証するものである。図-5 は、掘削速度を 3.88, 5.82, および 7.76 cm/sec とした場合の掘削初期（掘削直後のピーク時）および定常時における掘削抵抗 F と掘削速度 v_0 の関係を示したものである。すなわち、この範囲の低速度域

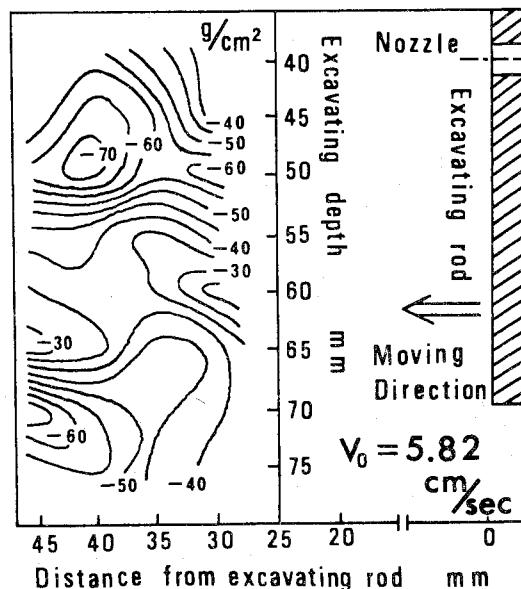


図-4 掘削直後の進行方向中央断面における発生間隙水圧分布

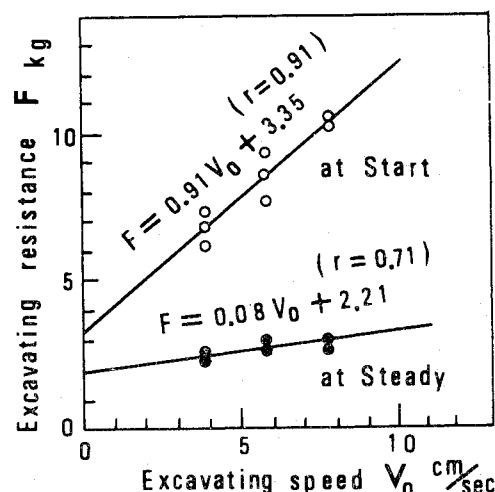


図-5 掘削初期および定常時における F と v_0 との関係

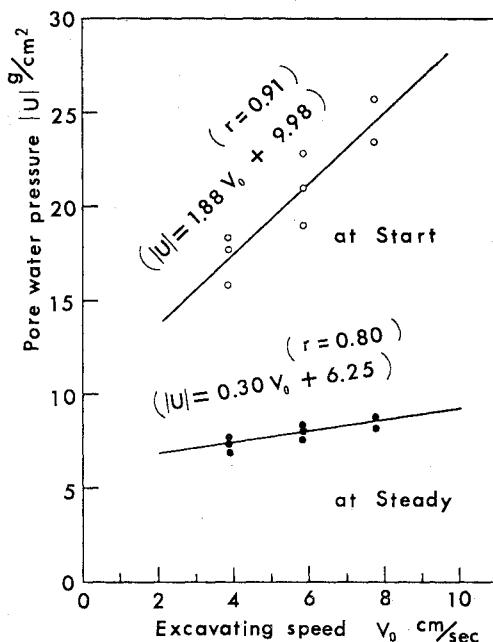


図-6 静止時における深さ 4.0 cm での掘削棒
壁面中央部に作用する発生間隙水圧（負
圧）と掘削速度との関係（豊浦標準砂）

においては、掘削抵抗は掘削速度の増加とともに直線的に増加していくことを意味している。また、同時に求めた負の発生間隙水圧 U の絶対値は、図-6 に示したように、掘削抵抗 F と同様に掘削速度に比例して増大することが判明した。なお、この場合の発生間隙水圧 U は掘削棒壁面中央部において静止時における試料表面からの深さ 4.0 cm の位置に作用する間隙水圧である（図-1 参照）。このように、低掘削速度域においては、掘削抵抗および発生間隙水圧を掘削速度の 1 次関数で表わすと、その相関性がかなり高いことが示され、低速域においては、掘削速度の 2 乗の項はほとんど存在しないことが判明した。

次に、試料砂 A, B, C の細粒砂グループと試料れき D, E, F の粗粒れきグループのそれぞれに対する試験を行った結果をより一般的に表現するため、掘削抵抗 F の値を掘削刃の刃幅 b 、切削強度指数 e_s 、および掘削深さ z_0 の自乗との積 $be_s z_0^2$ で除した値、および発生間隙水圧 U の値を $r_w z'$ で除した値と掘削速度 v_0 との関係を求ることとする。

(1) 細粒砂に対する挙動

試料砂 A, B および C の 3 種類を細粒砂グループとして試験結果を整理することとする。所定の掘削棒を掘削深さ $z_0=6 \text{ cm}$ から 12 cm までの範囲の種々の値に設置し、すくい角 $\alpha=0^\circ$ 、横すくい角 $\beta=0^\circ$ とした場合の掘削抵抗が水中において掘削速度とともにどのように変化するかについて試験を行った。図-7 は、種々の細粒砂および掘削深さに対して、掘削抵抗を一般的に表示するための無次元積 $F/be_s z_0^2$ と掘削速度 v_0 との関係を掘削初期および定常時に対して図示したものである。いずれの場合にも、無次元表示された掘削抵抗は掘削速度の 2 次関数で表わされ、最小自乗法によって係数の最確値を求めるとき次の実験式が成立した。 v_0 の単位を cm/sec として、

掘削初期（以下、この場合の F 値は起動抵抗を示す）

$$\frac{F}{be_s z_0^2} = 1.20 \times 10^{-4} v_0^2 + 1.55 \times 10^{-2} v_0 + 4.08 \quad \dots \dots \dots (1)$$

定常時

$$\frac{F}{be_s z_0^2} = 6.50 \times 10^{-5} v_0^2 + 7.12 \times 10^{-3} v_0 + 1.34 \quad \dots \dots \dots (2)$$

これらは、 $F/be_s z_0^2$ の平均値に対して χ^2 分布表より 2 次曲線に対する適合度は十分高いことが判明している。次に、掘削抵抗を測定すると同時に掘削棒の前方壁面上に設置した間隙水圧測定用孔を通して測定した発生間隙水圧 U を $r_w z'$ で除した値と掘削速度 v_0 との関係を求めるとき、図-8 および図-9 に示すように、掘削初期および定常時において 2 次関数で表現されることが判明

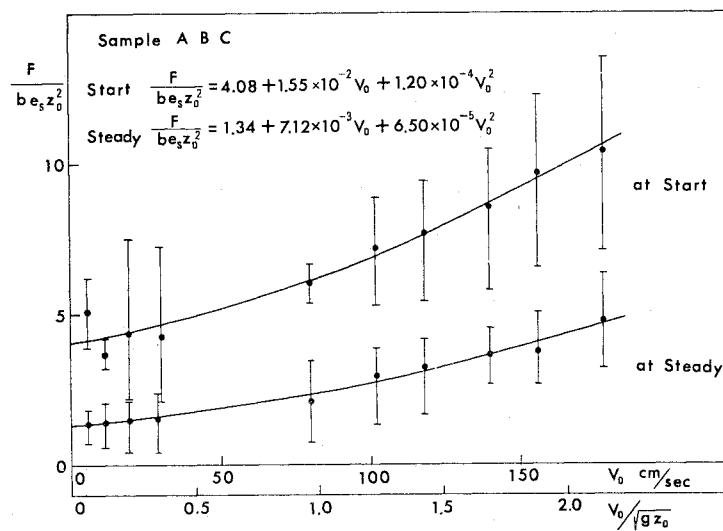


図-7 $F/be_s z_0^2$ と掘削速度 v_0 (フルード数 $v_0/\sqrt{gz_0}$) との関係、
試料砂 ABC

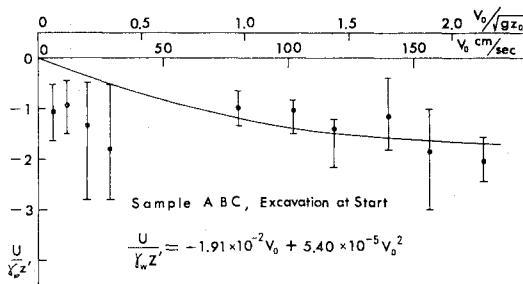


図-8 $U/\gamma_w z'$ と掘削速度 v_0 (フルード数 $v_0/\sqrt{gz_0}$) との関係 (掘削初期, 試料砂 ABC)

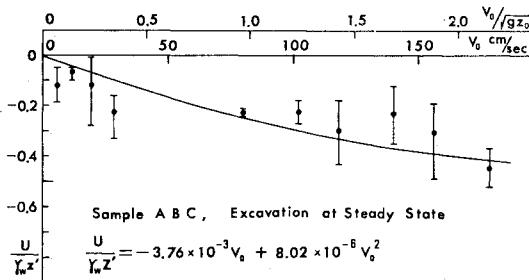


図-9 $U/\gamma_w z'$ と掘削速度 v_0 (フルード数 $v_0/\sqrt{gz_0}$) との関係 (定常時, 試料砂 ABC)

した。すなわち、実験式として次式が成立した。

掘削初期

$$\frac{U}{\gamma_w z'} = -1.91 \times 10^{-2} v_0 + 5.40 \times 10^{-5} v_0^2 \dots (3)$$

定常時

$$\frac{U}{\gamma_w z'} = -3.76 \times 10^{-3} v_0 + 8.02 \times 10^{-6} v_0^2 \dots (4)$$

なお、上式において、 v_0 の単位は cm/sec である。ま

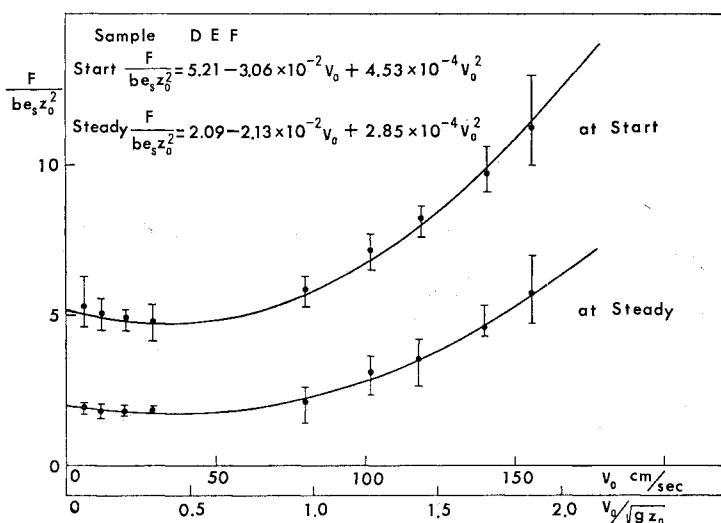


図-10 $\frac{F}{bes z_0^2}$ と掘削速度 v_0 (フルード数 $v_0/\sqrt{gz_0}$) との関係, 試料れき DEF

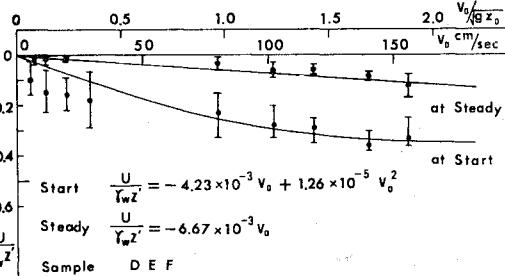


図-11 $U/\gamma_w z'$ と掘削速度 v_0 (フルード数 $v_0/\sqrt{gz_0}$) との関係, 試料れき DEF

た、 $v_0=0$ において、試料砂は排水状態にあり、過剰間隙水圧は発生しないことを前提としたものであるが、低速域においては、図より明らかに、わずかに間隙水圧の絶対値は大きくなる傾向にあった。

(2) 粗粒れきに対する挙動

ここでは、粒径の大きい試料れき D, E, F の 3 種類を粗粒れきグループとして整理することとする。前節で行ったと同様に、掘削深さ z_0 を 6 cm から 12 cm までの間で掘削棒を設置し、また、掘削抵抗および間隙水圧は同様な方法で測定した。図-10 は、掘削抵抗と掘削速度との関係を掘削初期および定常時に対して求めたものである。その結果、掘削抵抗は掘削速度の 2 次関数として次式に示す実験式がえられた。

掘削初期

$$\frac{F}{bes z_0^2} = 5.21 - 3.06 \times 10^{-2} v_0 + 4.53 \times 10^{-4} v_0^2 \dots (5)$$

定常時

$$\frac{F}{bes z_0^2} = 2.09 - 2.13 \times 10^{-2} v_0 + 2.85 \times 10^{-4} v_0^2 \dots (6)$$

なお、上式において、 v_0 の単位は cm/sec である。また、同時に測定した間隙水圧より算定した $U/\gamma_w z'$ の掘削速度にともなう変化は、図-11 に示すように、2 次曲線として次の実験式が成立した。

掘削初期

$$\frac{U}{\gamma_w z'} = -4.23 \times 10^{-3} v_0 + 1.26 \times 10^{-5} v_0^2 \dots (7)$$

定常時

$$\frac{U}{\gamma_w z'} = -6.67 \times 10^{-3} v_0 \dots (8)$$

なお、上式において v_0 の単位は

cm/sec である。また、式(8)においては速度の自乗の項は無視することができる。

4. 水中掘削抵抗に関する考察

砂質土の水中掘削においては負の発生間隙水圧が発生し、その絶対値は掘削速度 v_m の増加とともに増大していく傾向にあることは前述の実験の結果より確認されている。この掘削棒の移動に伴って発生する間隙水圧を分析すると、砂粒子の急激なせん断とともに発生するダイレイタンシーによる負の過剰間隙水圧 p とその消散過程、および水浸砂れきの流体中において掘削棒の運動によって発生する流体抵抗である動水圧の変化としてとらえられる砂れき中の負の間隙水圧 Δq とその消散過程に大別される。

まず、砂粒子のせん断とともに負のダイレイタンシーによって発生する過剰間隙水圧 p は、非排水状態において八面体垂直応力 σ_{oct} と八面体せん断応力 τ_{oct} の関数として次式で与えられることは周知の事実である。

$$p = \frac{1}{1 + C_v n / 3 C_s} \left[\sigma_{oct} + \frac{D}{3 C_s} \tau_{oct} \right] \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 C_v は間隙流体の圧縮係数、 C_s は土粒子実質部分の圧縮係数であり、 n は間隙率、 D はダイレイタンシー係数である⁴⁾。

このように、ある飽和した土要素 ΔV が急激なせん断変形を受ける瞬間では非排水条件が保たれるが、時間の経過とともに体積は変化し間隙水圧は消散する。この負の過剰間隙水圧 p の消散過程は、介在する砂れきの透水係数の大きさに左右される。たとえば、与えられた掘削速度 v_m に対して透水係数 k が小さい場合には動水勾配が上昇し、掘削速度が増大するほど絶対値の高い過剰間隙水圧が残留することとなる。掘削に伴って発生する負の間隙水圧 p の消散過程を理論的に正確に追跡するのはかなりの困難が予想される。そのため、Lindquist の球群中を通過する間隙水の挙動に関する実験結果を適用することとする。

Lindquist は、直径 d の球群中を通過する平均間隙水流を v_m として、動水勾配 $I = \zeta v_m^2 / 2gd$ (ζ は抵抗係数、 g は重力の加速度) において、 $R_e \zeta$ と R_e の関係を求めた結果、 $R_e < 4$ においては $R_e \zeta$ は一定となり、流れは層流で Darcy の法則が成り立つが、 $R_e > 4$ では

$$R_e \zeta = a + b R_e \quad R_e = \frac{\rho v_m d}{\mu} \quad \dots \dots \dots (10)$$

が成り立つことを実証した⁵⁾。ここに、 R_e はレイノルズ数、 ρ は液体の密度、 μ は液体の粘性係数、 d は砂れきの平均粒径、 a および b は定数である。

液体の動粘性係数を $\nu (= \mu/\rho)$ として上式を書きなおすと、

$$\begin{aligned} I &= \frac{v_m^2}{2gd} \left(\frac{a}{R_e} + b \right) = \frac{av_m^2}{2gd} \cdot \frac{\mu}{\rho v_m d} + \frac{bv_m^2}{2gd} \\ &= \frac{av}{2gd^2} v_m + \frac{b}{2gd} v_m^2 \quad \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

となる。

すなわち、間隙水の流れが乱流であるとき、単位長さあたりの摩擦損失水頭は見かけの流速 v_m の 2 次式で与えられるのである。

また、内田⁶⁾は多孔質の媒体を通過するレイノルズ数の高い非線形透水解析の結果、 $R_e < 1000$ における乱流状態での透水係数 k_t は、層流状態での透水係数 k_l を用いて次式で与えられることを Lindquist の実験式より誘導している。

$$k_t = k_l / \{1 - A + A \sqrt{1 + (R_e/R_t)^2}\} \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 $A = 0.20$ 、 R_t は限界レイノルズ数である。この乱流状態における透水係数 k_t を用いて、間隙水の平均流速 v_m と動水勾配 I の間には次式で示す線形関係が成立することが運動方程式から導かれる。

$$v_m = k_t I \quad \dots \dots \dots (13)$$

したがって、掘削による砂れきのせん断によって発生する負の間隙水圧 p は、掘削棒前面のすべり面上において発生し、時間の経過とともに鉛直上方へ消散していく。その動水勾配 I は地表面までの鉛直距離を z として、 $-p_z / \gamma_w z$ に比例すると仮定する。ここに、 $-p_z$ は、深さ z における発生間隙水圧であり、 γ_w は水の単位体積重量である。したがって、式(13)を変形すると次式をえる。

$$p_z = -c_1 \gamma_w z \frac{v_m}{k_t} \quad (c_1 : \text{定数}) \quad \dots \dots \dots (14)$$

一方、掘削棒の移動に伴って掘削された砂れきは掘削棒とともにある速度で静水中を移動することとなるが、このとき、砂れきを含む混合水と掘削棒との間には流体抵抗が作用する。この値は、慣性抵抗として掘削速度の自乗に坑力係数 c_D を乗じたものと、間隙水圧の変化による抵抗とに分析される。この間隙水圧の大きさは土粒子の移動速度から算定される間隙水の見かけの流速 v_m の自乗に比例するものであることが、Bernoulli のエネルギー方程式から導かれる。

すなわち、同一流線上の圧力水頭、速度水頭、および位置水頭の和である全水頭はつねに一定であることより、位置水頭が変わらない場合には、摩擦損失水頭を考えた場合にも掘削によって発生する速度水頭の変化は圧力水頭の変化として表われ、一般に次式によって表現される。

$$\frac{v_m^2}{2g} + z + \frac{q}{\gamma_w} = \text{const.}$$

ここに, q は所定の流線上における圧力である. したがって, この場合, 掘削速度 v_0 を与えた場合のある位置における間隙水の流速が 0 から v_m まで変化するとしたとき発生する間隙水圧 Δq は, 一定の深さ z に対して次式で与えられる.

$$\Delta q = -c_2 \frac{r_w v_m^2}{g} \quad (c_2: \text{定数}) \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここに, Δq は負の間隙水圧, $v_m^2/2g$ は速度水頭, また, c_2 は発生した間隙水圧によって間隙水が土粒子間隙を通過する際の摩擦損失水頭としてエネルギーを消費するために消散していく現象を考慮した場合の係数であり, この場合, 掘削刃面の方向に対しては不变である. なお, 掘削刃面が流線と直交する場合には, 刀面上に動水圧として正の間隙水圧が作用する.

さて, 水中掘削において発生する間隙水圧は, 前述したように, 砂れきのせん断によって発生する間隙水圧 p_z と, 砂れきを含む静水中の掘削棒の移動によって発生する間隙水圧 Δq から構成されていると仮定する. また, 両者とも, ある場所の間隙水の平均流速 v_m は掘削棒の移動速度 v_0 に比例するものと仮定すると, 掘削棒の前方壁面に作用する発生間隙水圧 U は, 掘削深さ z の関数として与えられる間隙水圧 p_z と, 深さ z に無関係な間隙水圧 Δq の和として次式で与えられると仮定しておく.

$$U = p_z + \Delta q = - \left(c_1 r_w z \frac{v_0}{k_t} + c_2 \frac{r_w v_0^2}{g} \right) \dots \dots \dots (16)$$

また, 間隙水圧 U を無次元表示するため, その間隙水頭を深さ z で除した値として表現すると, 上式は

$$\frac{U}{r_w z} = - \left(c_1 \frac{v_0}{k_t} + c_2 \frac{v_0^2}{g z} \right) \dots \dots \dots (17)$$

となる. ここで, k_t はすでに表-1 で与えた透水係数 k に対応するものである.

なお, この関係式はすでにえられた実験式 (3), (4) および (7), (8) とよく対応するものであり, 上述の考察がある程度実証されたものと判断する. また, 定数 c_1 , c_2 は, それぞれの実験式に対応させて算定した結果を表-2 に示した.

したがって, 掘削に伴って発生する負の間隙水圧 U によって土粒子間に作用する有効応力は増大するので, 砂れきの非排水強度は増加し, 掘削抵抗は増大すると考えられる. 掘削棒に抵抗する砂れき中の応力を, 一般的に, 有効応力表示および全応力表示によって表現すると, 図-12 に示すようになる. 実線は有効応力表示, 点線は全応力表示したものである. すなわち, 静的掘削時においては, 最小主応力および最大主応力を有効応力で表わすと, 掘削刃面近傍において $r'z$ および $Kr'z$ ($r' = r - 1$) となり, 一方, 掘削速度 v_0 が上昇するとともに動的掘削となり, その最小主応力は $r'z - p_z - \Delta q$ と

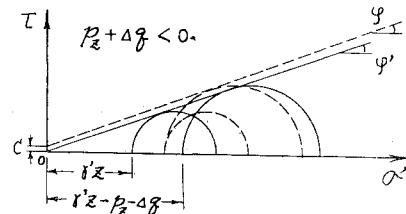


図-12 モールの応力円表示

変化する. ここに, K は受働土圧係数である.

$P_z + \Delta q$ が負の値をとれば, 同じ掘削深さに対してその非排水強度は増大すると考えられる. この場合の砂れきの内部摩擦角を ϕ' とする. 次に, 以上の関係を全応力に対して表示しなおすと, 点線で示すように左の方向へモールの応力円は移動し, 一般に, 内部摩擦角 ϕ は ϕ' よりわずかに大きく, 見かけの粘着力が発生するために, 全応力で表現される掘削抵抗は増大するのである.

すでに, 実験式 (1), (2) および (5), (6) で示されたように, 水中における砂れきの掘削抵抗 F は, 掘削速度 v_0 の2次関数で表現されることが判明した. このように, 掘削速度の増大とともに掘削抵抗が増大するのは, 前文で述べた負の間隙水圧による有効応力の増大と慣性によるものとに大別して考えていくこととする. さて, 慣性によるものについては, K. Wieghardt⁷⁾ も指摘しているように, 乾燥砂においてさえも慣性力の影響を無視することはできない. 実際, 彼の実験においては, Froude 数が 1.0 までの低速域においては, 粒子間の動摩擦係数が静的摩擦係数よりもくわづか小さいにもかかわらず, 大きな面積をもつすべり面のために掘削抵抗は減少すること, および速度増加に伴って Froude 数が増加すると慣性力の影響が顕著に表われてくるために, 乾燥砂の掘削抵抗は速度の2次関数で表わされることが判明している. なお, 本実験での水中における掘削の場合にも, 前 図-10 で示したように, 粗粒れきグループにおいては, 低速域において掘削抵抗は減少しているが, これは粒子間の動摩擦と静摩擦抵抗の差によると考えられる. さらに, 掘削速度の増大とともに掘削抵抗が増大するのは, 有効応力の増加に伴う摩擦抵抗の増大に帰因するものと考えられる.

表-2 各試料砂れきに対する諸定数の算定値

定数	a_0	a_1	a_2	c_1	c_2
細粒砂グループ					
掘削初期	4.08	1.55×10^{-2}	1.20×10^{-4}	1.38×10^{-4}	-3.70×10^{-1}
定常時	1.34	7.12×10^{-3}	6.50×10^{-5}	2.70×10^{-5}	-5.49×10^{-2}
粗粒れきグループ					
掘削初期	5.21	-3.06×10^{-2}	4.53×10^{-4}	8.27×10^{-3}	-8.92×10^{-2}
定常時	2.09	-2.13×10^{-2}	2.85×10^{-4}	-3.10×10^{-5}	3.43×10^{-2}

得られた実験式を一般化して表示すると,

$$\frac{F}{be_{\infty}z_0^2} = a_0 + a_1 v_0 + a_2 v_0^2 \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

となる。定数 a_0 , a_1 および a_2 はそれぞれの実験式に
対応させて表-2 にまとめて示した。

5. 噴流水による掘削抵抗の低減

これまでの実験および理論的考察より明らかなように水中掘削においては負の発生間隙水圧によって掘削抵抗が増大することが判明した。特に、細粒砂の掘削初期においては掘削速度の増大とともに、この発生間隙水圧による掘削抵抗の増加分はかなり大きな影響を示している。この現象を工学的に把えるとき、掘削刃に作用する掘削抵抗が増大するばかりでなく、土粒子間の有効応力が増大するために掘削刃の刃先および刃面が陸上工事と比較して一段と激しく摩耗することなど大きな弊害を与えている。

掘削抵抗を減少させるためには、掘削に伴って発生する負の間隙水圧の絶対値を小さくすることが根本的に重要な問題であり、たとえば、掘削棒の先端部より高圧の噴流水を与えることにより間隙水圧を正の方向に変化させる方法や高圧の圧縮空気を噴射させた場合の負の間隙圧の絶対値の低下と空気容積の浮力による気泡の浮上に伴う砂粒子間隙の増加とせん断強度の低下を目的とする方法がある。しかし、圧縮空気による掘削抵抗の減少効果は少ないことが実験の結果⁸⁾より明らかである。すなわち、これは、空気と水との不連続性のために、土粒子間隙への透気効果は少なく大きな気泡となって浮上するため、掘削抵抗が波状的に変動するためである。ここでは、高圧の噴流水による方法に対して二、三の実験を行い、掘削抵抗の低下に及ぼす効果について検証を行う。

実験条件は、豊浦標準砂（試料砂A）を使用し、初期掘削深さ $z_0 = 7$ cm、すくい角 $\alpha = 0^\circ$ 、横すくい角 $\beta = 0^\circ$ とし、掘削速度 5.82 cm/sec で行った場合の例を以下に示す。

さて、掘削棒の下端より上方 3 cm の中央部に直径 2 mm の噴砂孔をとりつけ、一定の圧力で水を噴射させた場合の掘削抵抗の変化および発生間隙水圧に与える影響効果について実測を行った。図-13 は、送水量を 6.0 cc/sec とし、 0.5 kg/cm^2 の圧力水を噴射させた場合の掘削抵抗と掘削棒の進行方向にそって前方 3 cm、深さ 4.5 cm の位置で注射針によって測定した発生間隙水圧の経時変化をオシログラフに記録させたものである。これは、噴流水を与えない場合に、同じ実験条件および同じ位置において測定した前 図-3 と比較すると、掘削抵抗および間隙水圧はともに立ち上がりがかなり鈍くな

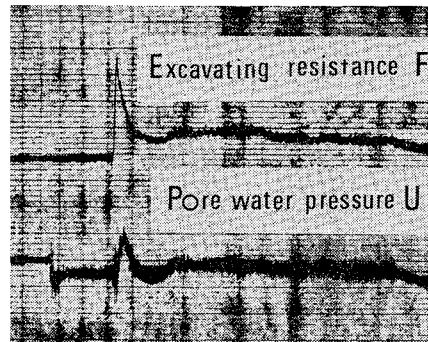


図-13 圧力水を与えた場合の掘削抵抗と
間隙水圧(負値)の測定例、紙送
り速度 100 cm/min

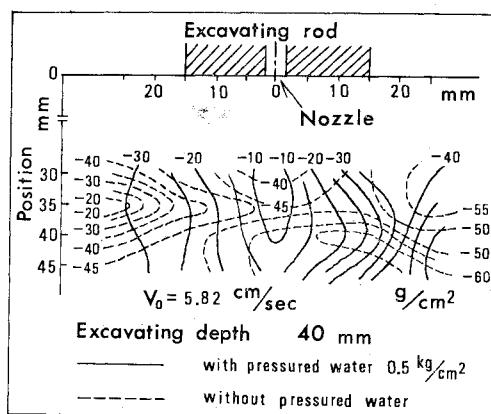


図-14 圧力水の有無に伴う発生間隙水圧分布の変動（掘削初期）

っており、噴流水によって相当の影響を受けていると判定される。また、図-14は、測定結果の一例として掘削直後のピーク時における深さ4cm(噴射孔の設置された位置)の水平面上における発生間隙水圧分布を示したものである。実線は噴流水を与えた場合の間隙水圧分布を、破線は噴流水を与えない場合の間隙水圧分布を等

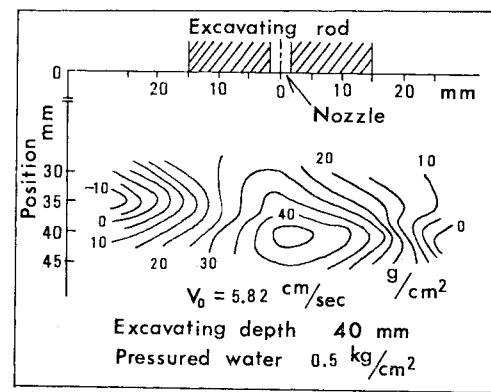


図-15 掘削初期における圧力水による
増加水圧分布

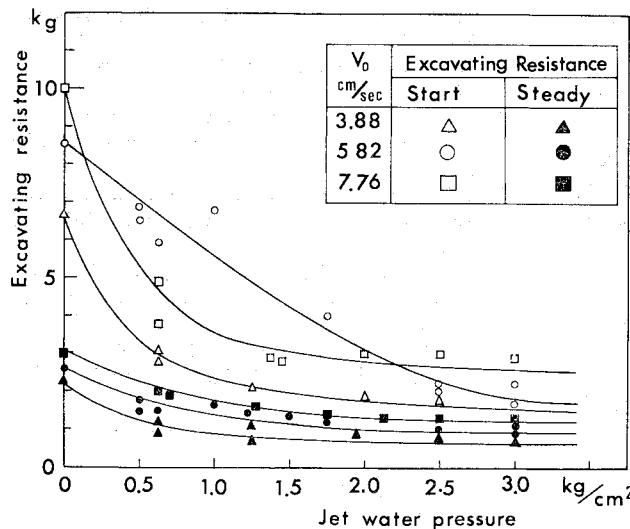


図-16 噴流水圧の増加に伴う掘削抵抗の減少

圧曲線として示した。図より、間隙水圧分布の変化と流線方向の変化が明瞭に示されており、噴射ノズルからの噴流水が効果的に拡散していくことが判明した。図-15は、前図-14より算定した発生間隙水圧の増加分の分布状況を示したものであり、掘削に伴って発生する負の間隙水圧の絶対値が広範囲にわたって減少しており、間隙水圧は正の方向へ変動していることが明らかである。これによって、掘削抵抗はかなり減少するものと期待される。

さて、噴流水の圧力をさらに増加させると掘削抵抗の減少効果は進展していくと考えられる。図-16は、掘削速度を $v_0 = 3.88, 5.82$ および 7.76 cm/sec とした場合の掘削抵抗と噴流水の圧力との関係を示したものである。

図中、白印は掘削初期の場合、黒印は定常時における掘削抵抗を示したものである。図より明らかに、特に掘削初期における掘削抵抗は、噴射圧力の増加とともに著しく減少していくことが判明した。これは、別に行なった圧縮空気を噴射させて行った減少効果に比べて、噴流水を与えることはかなり効果があることを実証するものであり、噴射水圧の上昇とともに最大掘削抵抗および定常時の掘削抵抗を著しく低下させるものである。

6. 結 論

以上、細粒砂および粗粒れきに対する水中掘削抵抗が掘削速度の2次関数で表現されることを実験的に明らかにした。また、水中にあるための掘削抵抗の増分を減少させるための噴流水の効果についても検討した。以下に、得られた結果を要約する。

(1) 水中における砂れきの掘削抵抗および発生間隙水圧は、一般に、掘削直後において鋭い立ち上がりを見せるが、その後は一定値にまで低下する。また、掘削刃面上に作用する発生間隙水圧は最初わずかに正の値を示すが、その後は砂れき粒子のダイレイタンシーによる負圧が大きく記録された。

(2) 掘削に伴って発生する砂れき中の発生間隙水圧分布は掘削直後において全般的に負圧を示す。また、掘削によるすべり面と予想される領域では、負圧の絶対値は減少しており、これはダイレイタンシーによる体積膨張を引き起こしたことを実証するものである。

(3) 細粒砂において、掘削速度が約 10 cm/sec 以下の低速域においては、掘削抵抗および負の発生間隙水圧の絶対値はともに掘削速度に比例して増加することが判明した。

(4) 実験に供した試料砂れきについて、掘削抵抗 F を掘削刃の刃幅 b 、切削強度指数 e_s 、および掘削深さ z_0 の自乗の積で除した無次元積 $F/b e_s z_0^2$ が掘削速度の2次式で与えられることが、広範囲にわたる掘削速度域に対し明確にされた。

なお、掘削速度の自乗の項は低速域においてはきわめて小さく、フルード数が 1.0 をこえると次第に掘削抵抗に影響を及ぼしている。

(5) 掘削刃面に作用する負の発生間隙水圧水頭をその測定深さで除した値は、掘削速度の2次式で与えられることが、実験の結果判明した。これは、砂れきのせん断に伴う負の発生間隙水圧の消散過程における間隙水流の運動方程式および流体中の掘削刃の移動とともに動水圧の変化に対するエネルギー方程式によって構成されると仮定すると、よくその現象を説明することができる。

(6) 水中における砂れきの掘削抵抗を支配する要因分析の結果、掘削抵抗は掘削刃の刃幅、切削強度指数および掘削深さの自乗の積と、透水係数、重力の加速度および掘削深さの項を含む掘削速度の2次式との積に比例することが推察される。

(7) 細粒砂に対する実験の結果、掘削直後のピーク時においては、定常時と比較して、負の発生間隙水圧による掘削抵抗の増分が顕著に発生することが明らかとなった。一方、粗粒れきに対しては、れきの透水係数がかなり大きいために、負の発生間隙水圧は細粒砂ほど増大せず、水中掘削の特徴はそれほど表われていないことが判明した。しかし、慣性による影響については、細粒砂と比べて粗粒れきの方が高いことが認められた。

(8) 細粒砂に対して水中掘削抵抗を減少させるた

め、負の発生間隙水圧の絶対値を減少させ、正の方向へ変化させることを目的として、掘削刃の先端部より高圧水を噴射させるとかなり効果があることが実証された。

謝 辞：本研究を実施するにあたり終治ご指導をいただいた京都大学工学部教授 畠 昭治郎先生に厚く御礼申し上げるとともに、実験に際し多大の援助を受けた福井大学工学部入江研究室の諸氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 畠 昭治郎・室 達朗：金属の摩耗に及ぼす砂れき特性と水の影響について、土木学会論文報告集、第 206 号、pp. 95-110、1972 年 10 月。
- 2) 村山朔郎・畠 昭治郎：土の切削強度の新測定法、材料試験、4, 24, pp. 381-387、昭和 30 年 7 月。
- 3) 久保田敬一：浸透水と土の安定、山海堂、pp. 40-42、昭和 41 年。
- 4) Scott, R.F. : Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley, 1963, pp. 271-272.
- 5) Lindquist, E. : On the Flow of Water through Porous Soil, Rep 1st Cong. Large Dams, Stockholm, 81, 1933.
- 6) Uchida, S. : On the Non-linear Percolation at High Reynolds' Number, Proc. 1st Japan NCTAM, 437, 1951.
- 7) Wieghardt, K. : Experiments in Granular Flow, Annual Review Fluid Mechanics. (A) Vol. 7, 1975, pp. 89-114.
- 8) 室 達朗：水中における掘削抵抗の減少法について、第 10 回土質工学研究発表会講演集、pp. 937-940、昭和 50 年 6 月。

(1975.12.12・受付)