

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 77 June. 1969

水噴流による水中粘土の掘削について

石塚浩次・岩田尚生

運輸省港湾技術研究所



# 水噴流による水中粘土の掘削について

## 目 次

### 要 旨

1. ま え が き	4
2. 実験装置および実験方法	5
2.1 実 験 装 置	5
2.2 実 験 方 法	5
3. 供 試 試 料	5
4. 実験結果と考察	6
5. 結 論	17
6. あ と が き	17
参 考 文 献	17

## Excavation test of clay in water by water jet

Koji ISHIZUKA\*

Shyoshei IWATA\*\*

### Synopsis

There are many examples in applying water jet into dredging works, etc., but the effective utilizings of water jet and any experiments concerned with them have not been carried out under constant moving speed of jet nozzle and comparably soft soil was used.

To investigate the excavating effects, it is considered to examine the excavated volume of soil and depth of excavation, but in this preference, depths of excavation is mainly discussed.

The relation between depth of excavation and outlet pressure of water jet and the volum of water (dia. of nozzle) is expressed as follow.

Depth of excavation

$$(D) = C d^{1.5} P - D_0$$

where

d : Dia. of jet nozzle

P : Outlet pressure of water jet

C : Coefficient which varies with characteristics of soil

D<sub>0</sub> : Constant determined by nozzle moving speed and characteristics of soil

Dia. of nozzle for the experiment were 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 m/m  $\phi$ , and max. outlet pressure and speed of nozzle were 1.3 kg/cm<sup>2</sup> and 1.84 m/sec respectively.

---

\* Member, Dredger and Construction Equipment Laboratory

\*\* Senior Researcher, Dredger and Construction Equipment Laboratory

## 水噴流による水中粘土の掘削について

石塚 浩次\*

岩田 尚生\*\*

### 要 旨

水噴流を港湾工事に利用することは、数多くの例が見られるがその効果的な利用方法についてはまだ解明されておらず、研究例も少ない。本資料は水噴流による掘削作用について、実験的に解明を試みた結果を述べたものである。本資料における実験は、対象土質を比較的軟かい粘土試料を用い、ジェットノズルを定速度で移動させながら行なった。その場合の掘削効果を調べるには、掘削量および掘削深さを調べるのが考えられるが、本資料においては掘削深さについて主に調べている。その結果水噴流の供給圧力、流量の変化によって、土質一定の場合、掘削深さは実験的に次のように表わされることがわかった。

$$\text{掘削深さ}(D) = C d^{1.5} P - D_0$$

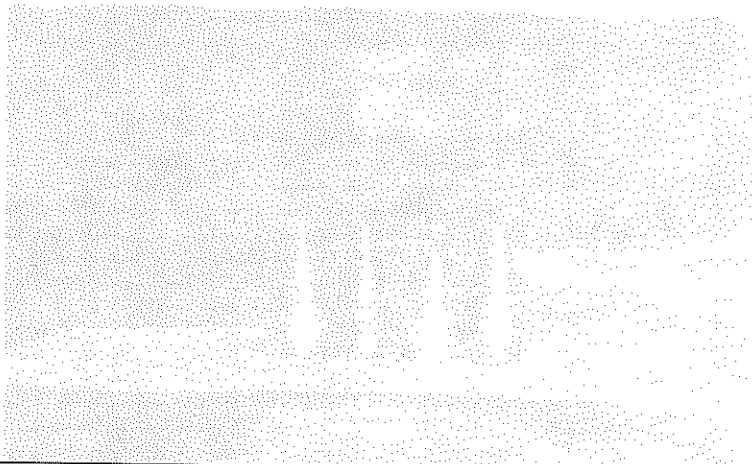
d : ジェットノズル直径

P : ジェットノズル供給圧力

C : 土質の性質による係数

D<sub>0</sub> : ノズル移動速度と土質による定数

この実験の範囲は供給圧力 1.0kg/cm、前後、ノズル径 4.0, 6.0, 8.0, 10.0mm、移動速度 1.84m/min の間で行なったものである。



\* 機材部 作業研究室研究員

\*\* 機材部 主任研究官

## 1. ま え が き

港湾工事において、水中で水噴流による掘削作用を利用した装置が多数用いられている。すなわち、水中での杭の貫入、土質調査におけるボーリング、ドラグサククション浚渫船のサククションヘッドに装備する掘削装置、また応用例としては浚渫船の泥船内につける攪拌装置等がある。近時においては硬土盤に水噴流によって溝をつけグラブ浚渫の作業を容易にする補助的な役割を行なわせる方法も考えられている。

このように種々の面で利用されている水噴流の掘削であるが、その効果の判定の尺度となる噴流の強さと土質の組合せに対する掘削量を知る方法や、掘削現象等の理論的取扱いについては、まだほとんど解明されておらず、今まで当研究所で実施した二、三の実験報告以外は実用的な文献資料は比較的少ない。このような現状の中で実際面の問題として、ポンプの圧力または流量を変える場合にポンプの馬力に対して掘削の効果はどのようになるか、というような疑問に対しても明確な解答を求めることはできない。本報告は上記のように港湾工事に必要な水噴流の掘削に関する実用的な資料を得るために、今後軟かい対象土質に対して調査研究するための予備的実験記録を取りまとめたものである。砂、砂利等の粒状物質、およびモルタル等の固結状態の物質については、文献-1(松田, 岩田), 文献-2(藤井, 守口)で発表されており、水噴流による掘削現象を傾向的にとらえ、簡単な考察を加え結論を得ている。そのため今回は対象土質に粘土試料を用い実験を行なった。粘土の場合はジェットノズルと試料面の相対位置を固定した状態で水噴流によ

る掘削を行なうと、上記文献で用いた土質に比較して、特に時間の要素が大きく影響して掘削深さ、掘削量の限界を見出すことが困難となるので、ノズルを定速度(1.84m/min)で移動させ実験を行なった。また実用面における水噴流の掘削装置による掘削効果を表わす方法としては、噴流用のポンプに投入した動力当りの掘削土量、掘削深さをもって判定することが考えられる。すなわち、

$$E_q = \frac{Q}{\gamma q_j h_j} \dots\dots\dots(1)$$

$$E_d = \frac{L}{\gamma q_j h_j} \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $E_q$ : 掘削土量に対するポンプ馬力比  
 $E_d$ : 掘削深さに対するポンプ馬力比  
 $Q$ : 掘削土量  $\gamma$ : 水の単位体積重量  
 $L$ : 掘削深さ  $q_j$ : ポンプ流量  
 $h_j$ : ポンプ揚程

これらの値について文献-1においては、砂などの粒状物質の場合、噴流の出口速度を大きくすること(噴流用ポンプ圧力を大きくすること)は不利という結果を得ている。一方圧力があまり小さいと全く掘削を行なわない限界もあり、文献-2のモルタル試料についての実験結果では、試料の一軸圧縮強度の1/2以上の圧力が必要であるという結論を得ている。しかし粘土の場合は粒状物質の砂、砂利とは異り、粒径に基づく微粒子間の結合をもつが、モルタル試料のように硬くないので上記文献等によって判断することはできない。これらは粘土の種類(土質)によっても違って来るが、実用域において掘削効果

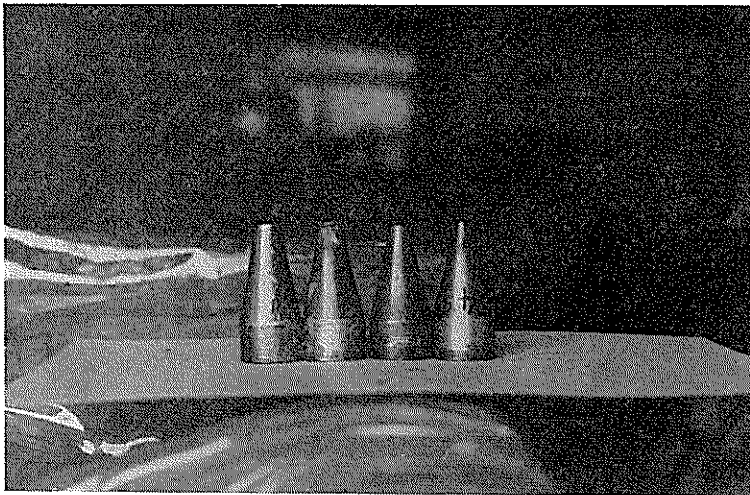


写真-1 使用ノズル

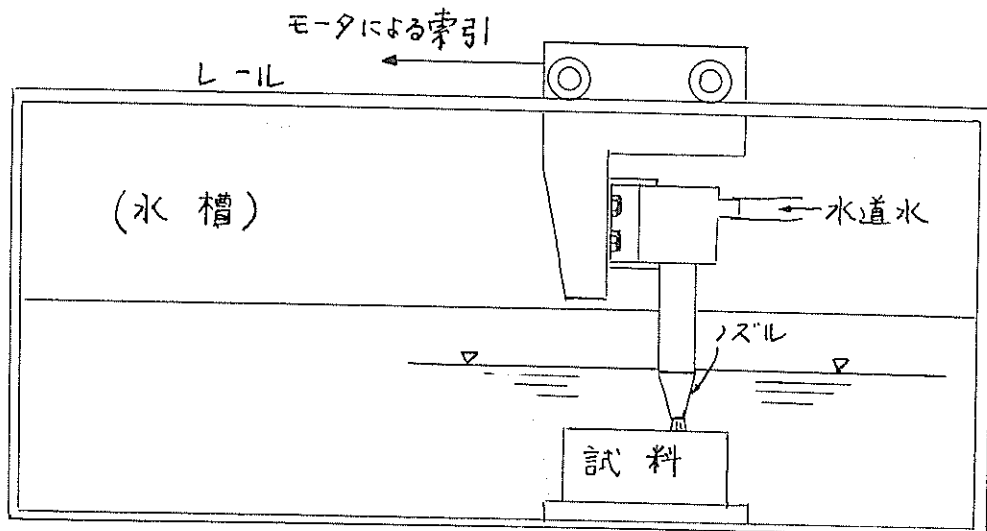


図-1 実験装置

をどのようにして表わすことができるかを傾向的に確かめる必要があるので今回の実験を行なった。

なお今回の実験は噴流の圧力と流量に対する掘削深さを主に調べ、掘削量については今後の研究によることにした。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

ノズルは4.0, 6.0, 8.0, 10.0mmφの径4種(流量係数約0.98)を用いノズルの走行はモータ駆動によるウインチにより定速度で移動するようにした。実験は3.7m×2.5m×0.6mの水槽の一部を使用し、噴流水は水道水をビニールホース(内径20mmφ)によりノズルに導びいている。ノズル供給圧力はこのビニールホースの途中でそう入したブルドンゲージによるが、噴流水の流量が多くなりホース内の速度が大きくなると管摩擦抵抗が大きくなり、そのままノズル入口の供給圧力として表わすことはできないので検定により補正した。実験装置を図-1、使用ノズルを写真-1に示す。

### 2.2 実験方法

水中で水噴流による掘削を行う場合、試料面とノズル出口との距離が掘削効果を調べる場合問題となるが、今回は噴流の中心軸流速度があまり出口速度と変わらない範囲に選び、各ノズル径とも距離を2.0cmに保って実験を行なった。また、一個の試料についてノズル径の変化、供給圧力の変化による掘削深さの違いを比較させる必要から、供給圧力を一定にしてノズル径を変えた場合とノズル径を一定にして供給圧力を変える二通りの実験を行なった。しかし供給圧力を各ノズル径について一定にすることは、上記のように噴流水を導くビニールホースの途中のブルドンゲージによっているため、できなかった。

## 3. 供試試料

実験に使用した粘土は、横浜本牧沖の海底粘土を用いた。試料の作成は粘土を一旦流動状態にまで軟かくし、貝殻等の不純物を除去した後、試料用に作成した木の箱に入れ、コンクリートブロック(4kg)の載荷により圧密を行なった。表-1に試料の大きさ、圧密荷重期間、および試料状態を示す。また混合試料の粒径加積曲線を図-2に示す。

表-1 供試試料

試料種別	試料寸法	圧密荷重	圧密期間	貫入深さ	含水比	真比重
粘土試料 (A)	30cm×24cm×19cm	12kg	2週間	3.0~10.0mm	103	2.7
〃 (B)	42×27×15	20	3〃	5.0~15.0	109	2.7
混合試料	42×32×15	40	3日	3.0~5.0	—	—

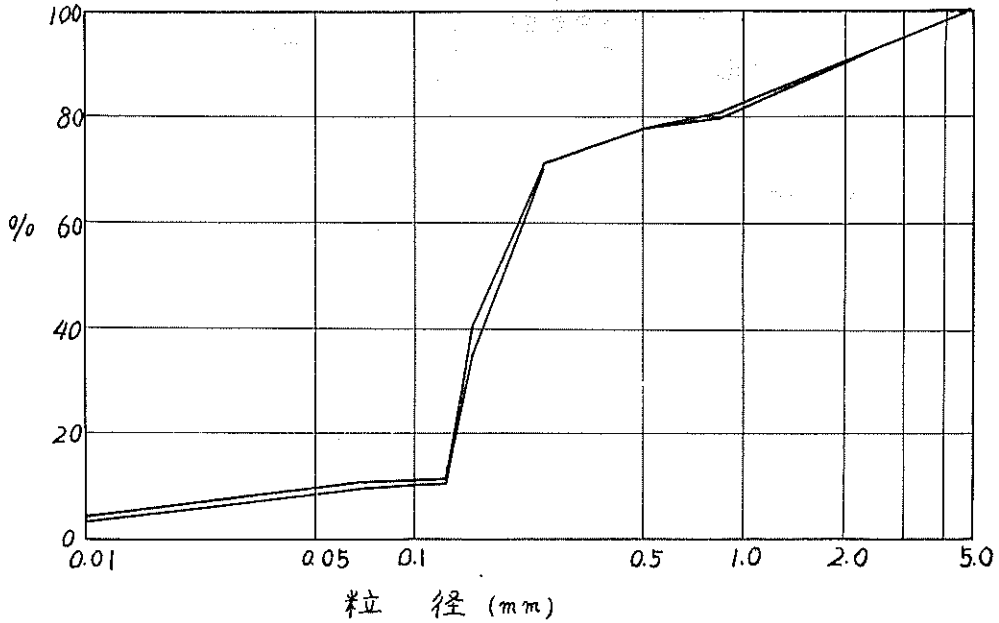


図-2 混合試料粒径加積曲線

試料の状態を調べるために用いた貫入棒は、粘土試料の場合は軟鋼棒 3.2m/mφ、重量 20g、混合試料については 4.0m/mφ、重量 34gのものであり 両方共先端の円錐角は約90°である。

#### 4. 実験結果と考察

実験結果は供試試料数の制限などもあり多少のばらつきはあったが、粘土に対する掘削現象を傾向的にとらえることができた。以下粘土試料および砂、砂利混合の粘

土試料について実験した結果を述べる。

まづ観察に基づく掘削現象について述べる。水噴流による粘土試料の掘削は粒状試料とは違い、土圧により崩れようとする影響が少ない。掘削跡も噴流の流れに沿ってできるが、ノズルの供給圧力、流量の変化により異なり、供給圧力が低い状態では試料表面近くに亀裂ができ、噴流が亀裂を押し広げる作用も見られる。写真-2, 3, 4に掘削後の断面の形、噴流の供給圧力の強弱による試料表面の状態を示す。

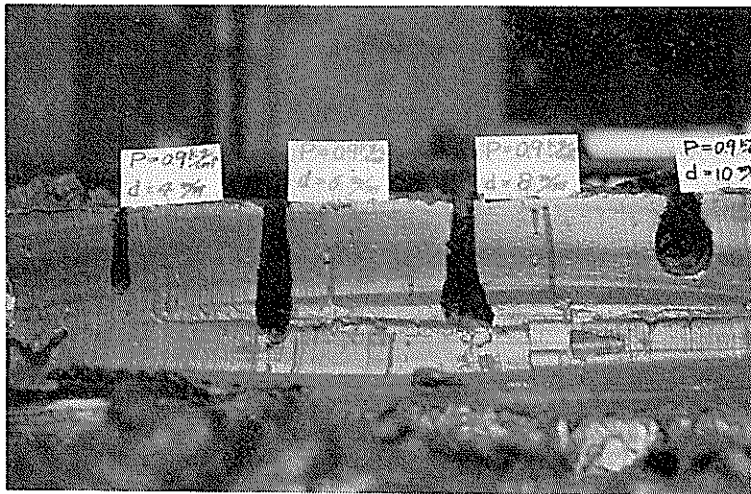


写真-2 掘削断面状態

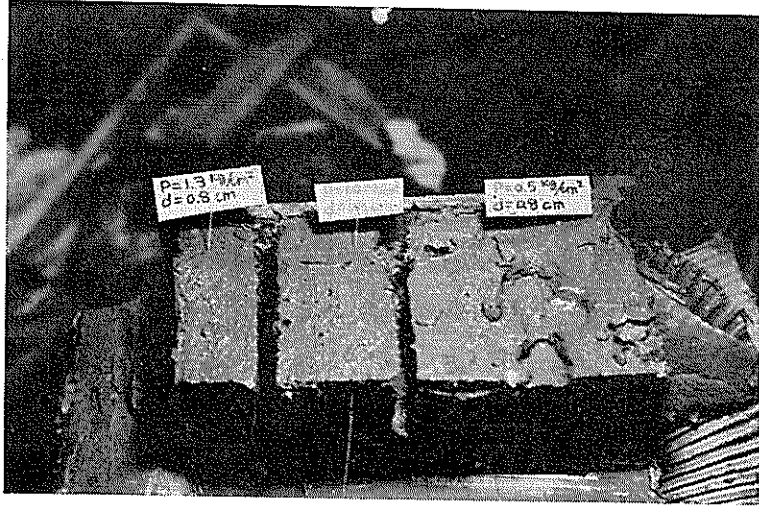


写真-3 掘削後状態

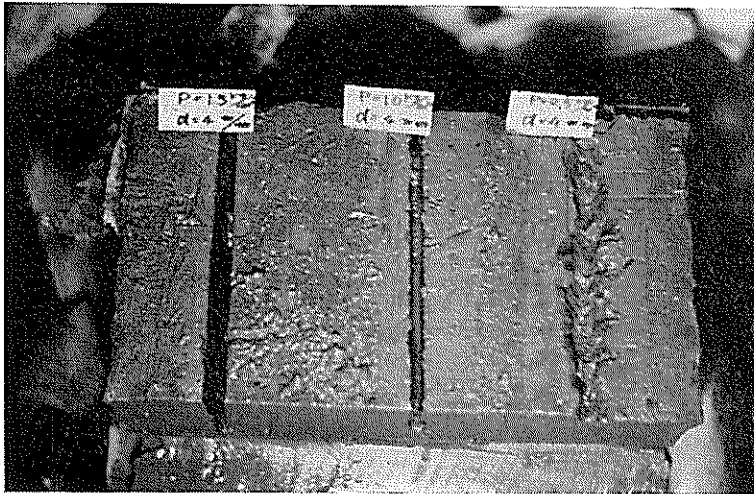


写真-4 掘削後状態

次に各試料についての実験条件および掘削深さの結果を表2, 3に示す。

表-2 供給圧力変化実験  
(1) 粘土試料 ノズル間隔 2.0cm

実験 No.	ノズル径	供給圧力	掘削深さ	実験 No.	ノズル径	供給圧力	掘削深さ
1	4mmφ	0.45kg/cm <sup>2</sup>	1.2~2.0cm	3	8mmφ	0.23kg/cm <sup>2</sup>	1.0~1.5cm
		1.01	3.7~3.9			0.51	4.4~4.6
		1.31	6.0~7.0			0.66	7.8~8.0
2	6	0.35	1.4~1.7	4	10	0.14	2.0~2.5
		0.76	5.5~7.0			0.32	3.9~4.5
		0.99	8.0~8.5			0.42	5.5~6.7



表-3 ノズル径変化実験

(1) 粘土試料 (B), ノズル間隔 2.0cm

(2) 混合資料, ノズル間隔 2.0cm

実験 No.	供給圧力	ノズル径	掘削深さ	供給圧力	ノズル径	掘削深さ
1	0.25kg/cm <sup>2</sup>	4m/mφ	1.3~1.7cm	0.25kg/cm <sup>2</sup>	4m/mφ	1.3~1.5cm
	0.20	6	1.6~1.9	0.20	6	2.1~2.5
	0.14	8	1.3~1.8	0.14	8	2.2~2.4
	0.08	10	0.4~0.6	0.08	10	1.5~1.9
2	0.59	4	1.7~2.0	0.59	4	3.5~3.9
	0.43	6	2.5~3.0	0.43	6	5.0~5.6
	0.30	8	2.5~3.0	0.30	8	5.3~5.4
	0.18	10	2.5~3.2	0.18	10	4.2~4.4
3	0.91	4	3.6~4.0	0.90	4	5.1~5.6
	0.69	6	5.3~5.5	0.69	6	7.2~8.0
	0.46	8	5.9~6.8	0.46	8	8.0~8.5
	0.29	10	3.5~4.3	0.29	10	7.2~8.0
4	1.31	4	5.1~5.8	1.26	4	8.0~8.5
	0.99	6	7.9~8.8	0.92	6	10.0~10.3
	0.66	8	5.2~6.5	0.61	8	10.5~12.0
	0.41	10	7.5~9.0	0.39	10	9.0~9.6

表に示すようにノズル供給圧力は1.0kg/cm<sup>2</sup>とかなり低い値で実験を行なったが、これは試料の土厚が少ないことから供給圧力を上げると試料底部の影響がでてくるために限定した。表-2, 3の実験結果に基づき掘削深さが供給圧力, 流量の変化によりどのように表すことができるか調べてみる。掘削量は文献-1, 文献-3等によれば、ノズル出口の運動量に比例することを述べている。すなわち

$$\text{掘削量}(Q) \propto (mv)^n \dots \dots \dots (4.1)$$

文献-1, 文献-3とも粒状試料であるが、粘土試料についても(4.1)式の関係が成立つものと仮定する。ここでノズルを定速度で移動させて掘削を行なう場合のノズル出口の持つ運動量は次のように表わせる。

$$mv = \frac{\gamma q}{g} t \cdot v \dots \dots \dots (4.2)$$

- q: ノズル出口の単位時間の流量
- γ: 水の単位体積重量
- g: 重力の加速度
- v: 水噴流のノズル出口速度

tはノズル移動速度(V)=constのときの試料面の受ける噴射時間で、噴流の運動量がノズル出口からの距離に関係なく一定であるのでノズル出口で考えると、ノズル径によって

$$t = \frac{d}{V} \dots \dots \dots (4.3)$$

d: ノズル径, V: ノズル移動速度

(4.2)式に(4.3)式を代入して整理すると

$$mv = \frac{\pi}{2} d^3 p \times \frac{1}{V} \dots \dots \dots (4.4)$$

したがって(4.1)式との関係から

$$Q = k \left\{ \frac{\pi}{2} d^3 p \frac{1}{V} \right\}^n \dots \dots \dots (4.5)$$

k: 試料の性質により決まる比例係数  
 によって表わすことができる。掘削量は掘削断面に試料の長さを乗じて表わすことができ、単位長さをとれば掘削断面積をもって比較することができる。掘削断面の形は写真-2で示すように噴流の広がりによって現われ、供給圧力, ノズル径, ノズル移動速度等の関数となるが、

ここでは便宜上掘削量を次のように表わす。

$$\text{掘削量}(Q) = \text{掘削深さ}(D) \times \text{掘削巾}(B)$$

$$\times \text{単位掘削長さ}(l) \dots\dots\dots (4.6)$$

ここにおいて掘削巾Bは、掘削断面の軌跡を掘削深さLまで積分して求められるときの掘削断面積を掘削深さで割ったときの値。

(4.5), (4.6) より掘削深さは次の式になる。

$$D = \frac{K}{B} \left\{ \frac{\pi}{2} \frac{d^3 p}{V} \right\}^n \dots\dots\dots (4.7)$$

ノズル移動速度(V)一定のとき横軸に  $d^3 p$  をとって掘削深さを表わしてみると図-3, 4, 5 のようになり、一次的に変化する。従って  $n=1$ 。また掘削の起らない限界がある。

ノズル移動速度一定 (1.84 m/min)

粘土試料(A)

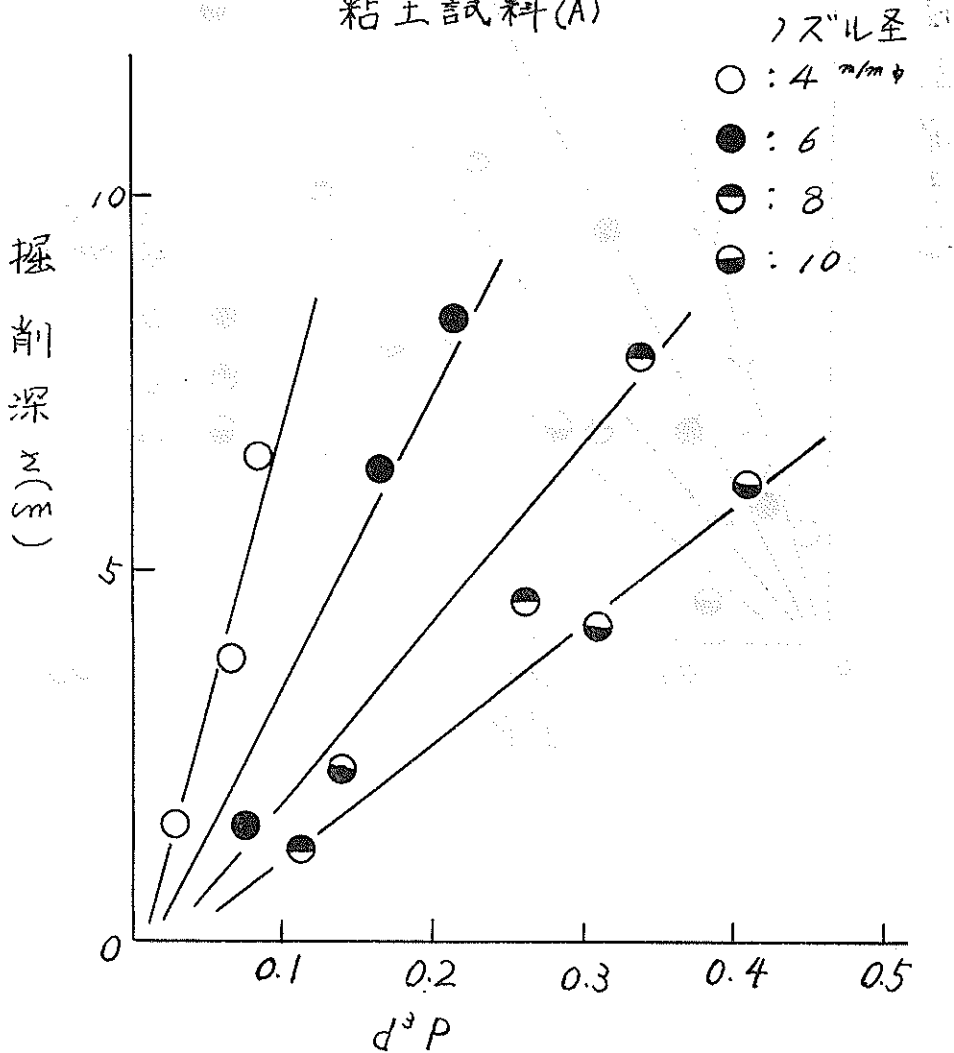


図-3 運動量掘削深さ

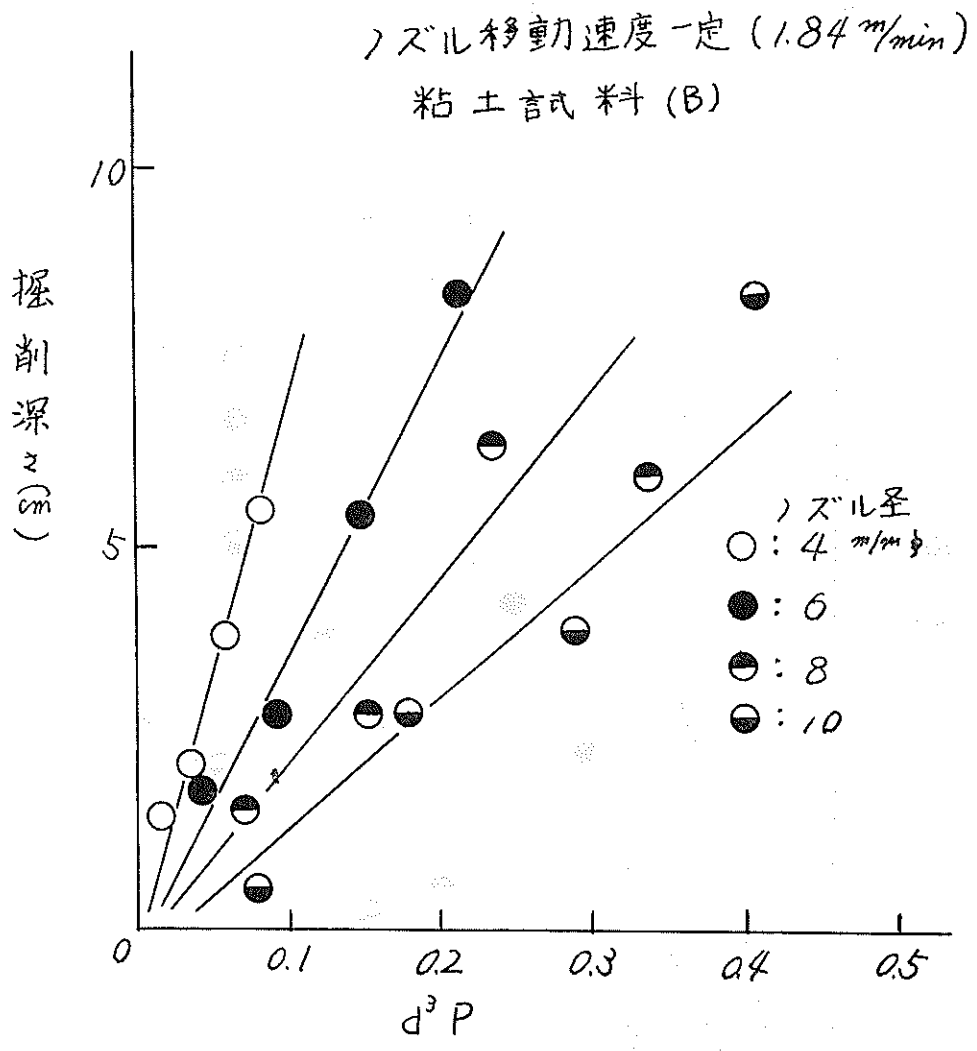


図-4 運動量—掘削深さ

ノズル移動速度一定(1.84 m/min)

混合試料

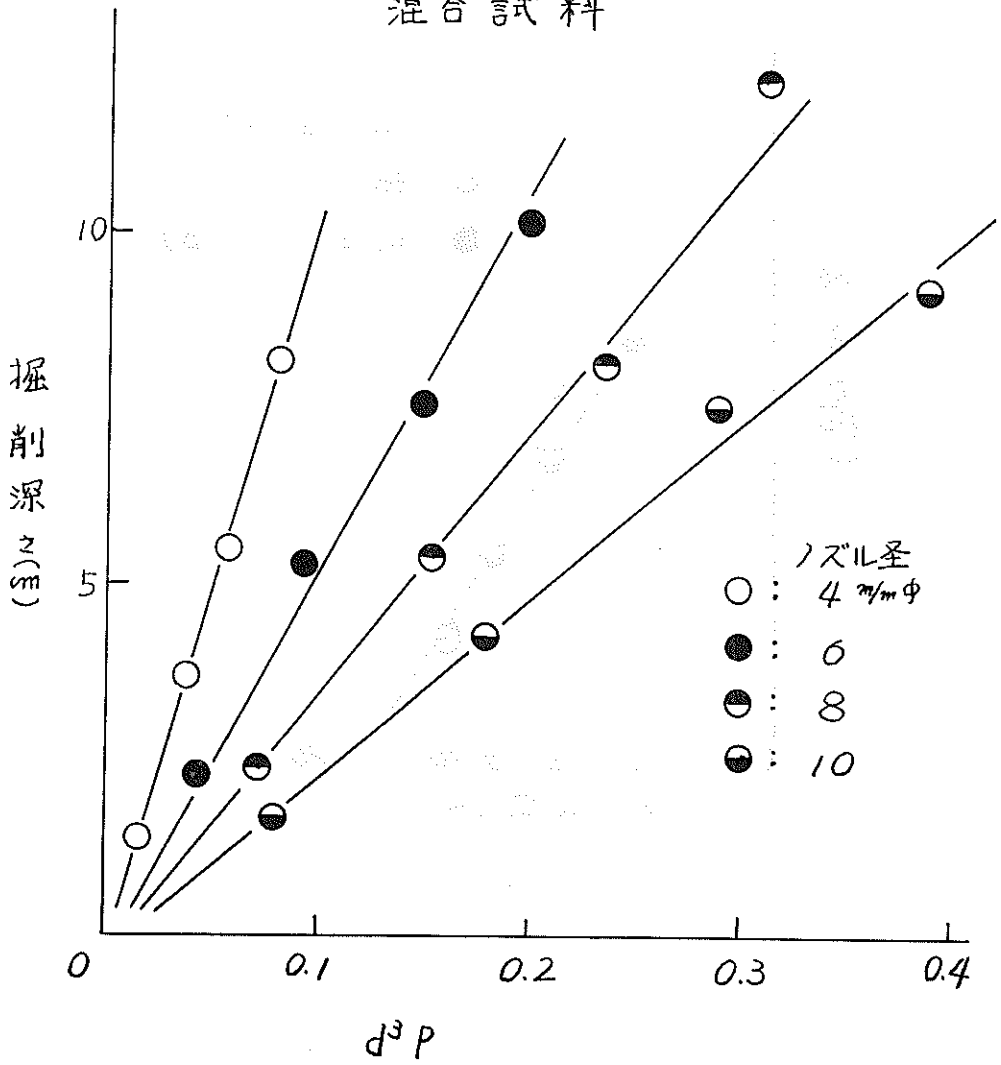


図-5 運動量—掘削深さ

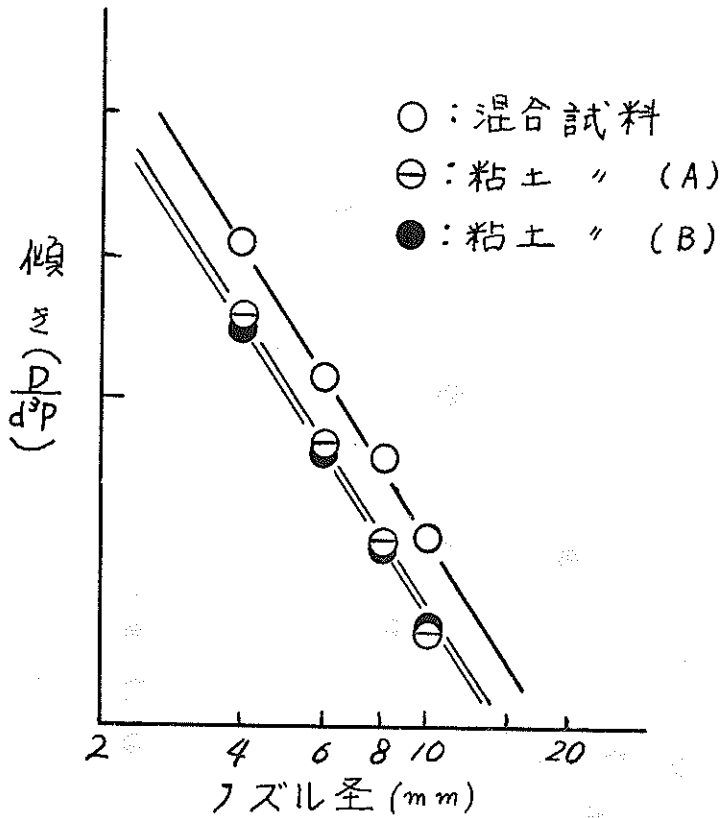


図-6 ノズル径による傾き

すなわち図-3, 4, 5は次式の関係になることを示す。

$$D = m d^{3p} - D_0 \dots \dots \dots (4.8)$$

m: 比例係数

$D_0$ : ノズル移動速度と土質により決まる定数  
上式において  $D_0$  を各ノズル径について一定とすると、  
比例係数は次式になる。

$$m = \frac{D + D_0}{d^{3p}} \dots \dots \dots (4.9)$$

この比例係数を図-3, 4, 5のノズル径ごとの傾きをと  
って調べてみると図-6に示すように  $m = C d^{-1.5}$  の関  
係になっている。この関係を(4.9)式に代入し、

$$m = \frac{D + D_0}{d^{3p}} = \frac{D}{d^{3p}} + \frac{D_0}{d^{3p}} = C d^{-1.5} \dots \dots \dots (4.10)$$

$$\therefore \frac{D}{d^{3p}} = C d^{-1.5} - \frac{D_0}{d^{3p}} \dots \dots \dots (4.11)$$

が求まる。また(4.7)式から

$$\frac{D}{d^{3p}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{K}{B} \cdot \frac{1}{V} \dots \dots \dots (4.12)$$

$$\therefore \frac{\pi}{2} \cdot \frac{K}{B} \cdot \frac{1}{V} = C d^{-1.5} - \frac{D_0}{d^{3p}} \dots \dots \dots (4.13)$$

したがって掘削深さ(D)は

$$D = \left( C d^{-1.5} - \frac{D_0}{d^{3p}} \right) d^{3p} \dots \dots \dots (4.14)$$

$$= C d^{1.5p} - D_0 \dots \dots \dots (4.14)$$

Cは土の性質に関する係数  
の関係になる。すなわち  $V = \text{const}$  のとき 掘削深さは  
(4.14)式によって表わされる。この関係によってノズル  
供給圧力と掘削深さの関係を調べたものが図-6, 7,  
8で、供給圧力に一次的に変化する。

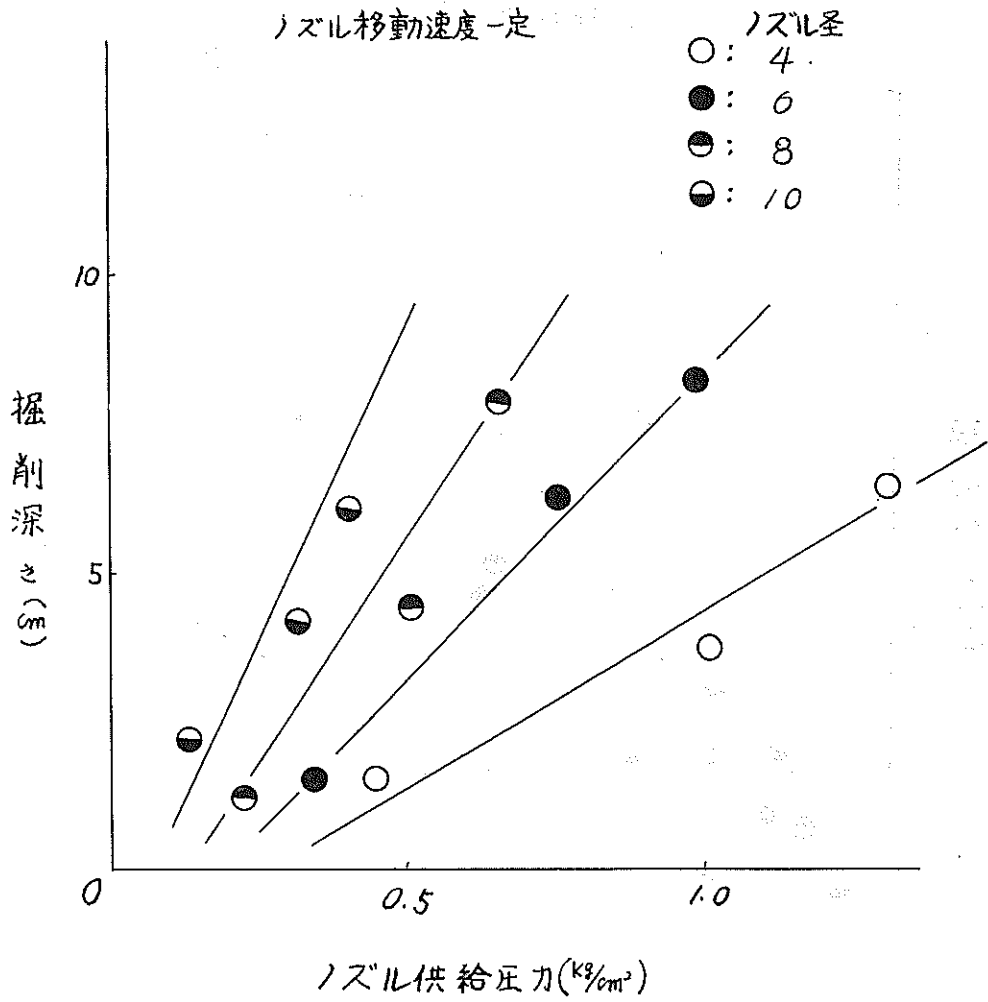


図-7 ノズル供給圧力による掘削深さの変化

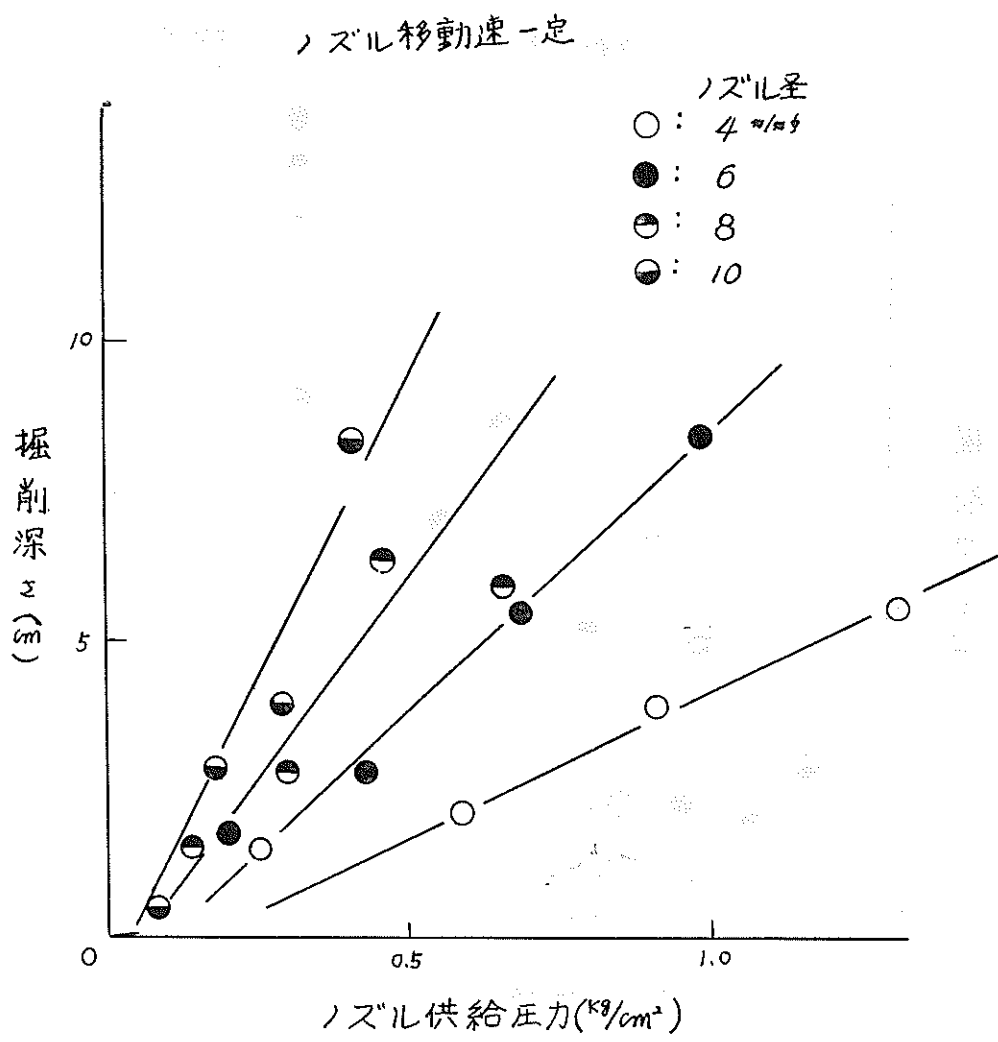


図-8 ノズル供給圧力による掘削深さの変化

ノズル移動速度一定

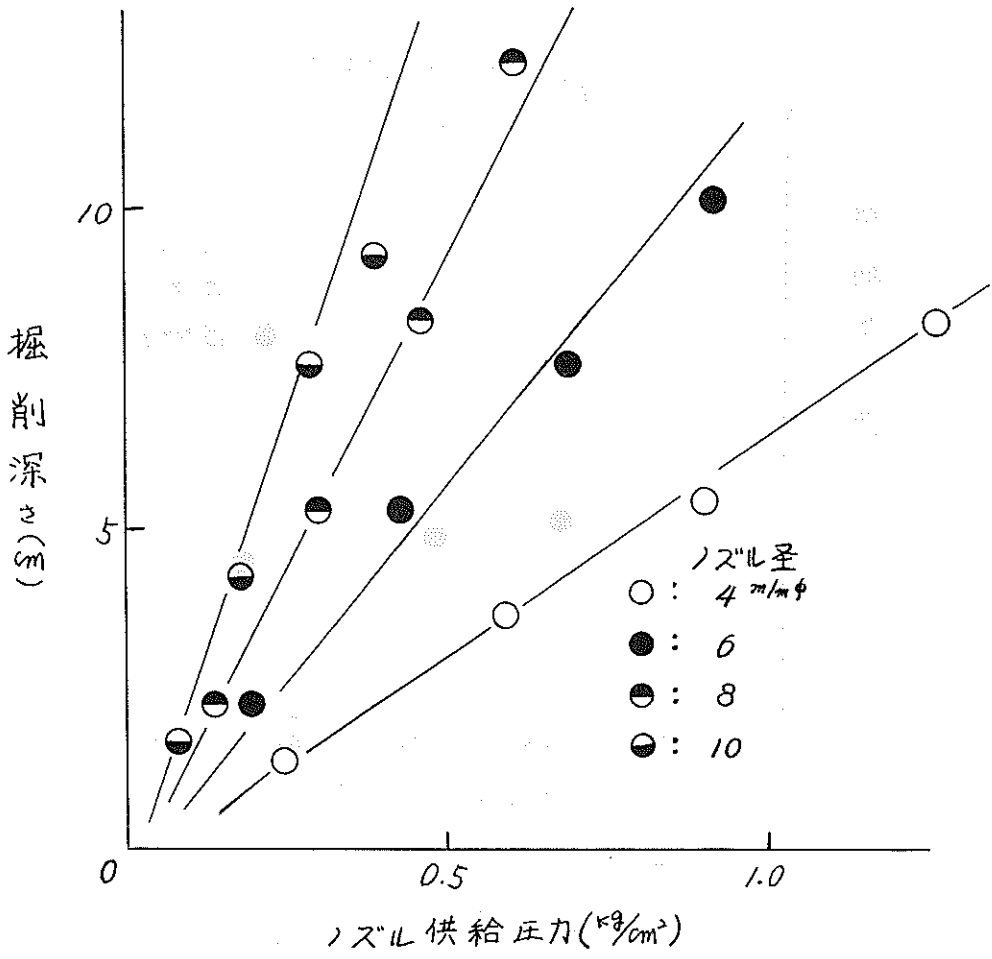


図-9 ノズル供給圧力による掘削深さの変化



次にノズル移動速度による影響は(4.13)式から

$$\frac{1}{V} = (cd^{1.5} - \frac{D_0}{d^3 p}) \frac{2 \cdot B}{\pi \cdot K} \dots\dots(4.15)$$

の関係によって表わされるが、ノズル移動速度による掘削深さの変化についての実験は、それほど実験してなく補充的に実験した結果を図-10に示す。

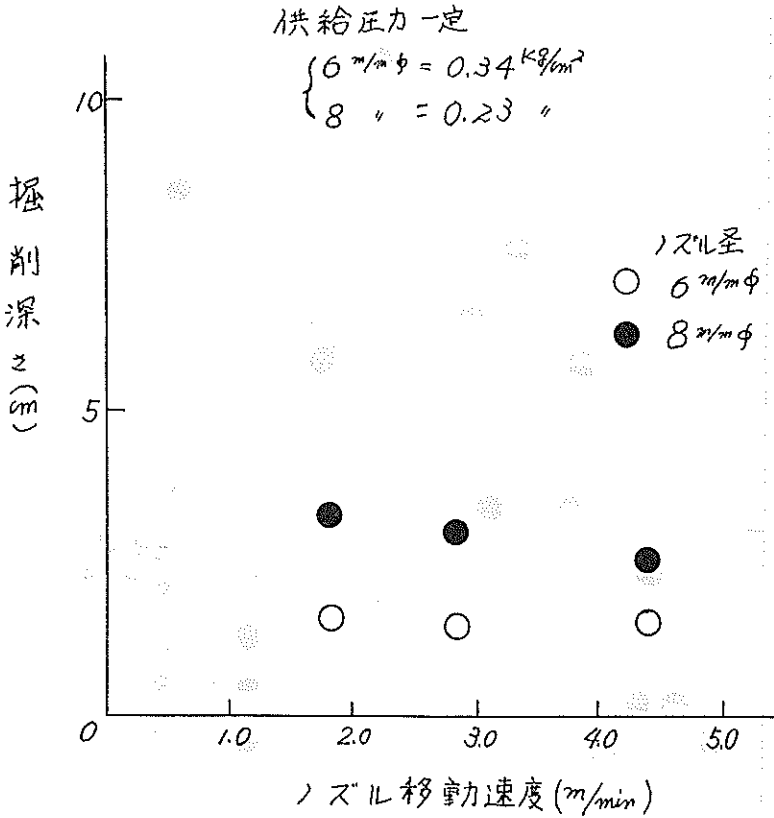


図-10 ノズル移動速度による影響

図-10は(4.15)式において掘削巾(B)がノズル径dに一次的に比例したの値を示すが、実験数が少ないので明らかではない。

以上の結果に基づいて  $V = \text{const}$  のときの掘削深さに対するポンプ馬力比を調べてみると次のようになる。(2)式から

$$\begin{aligned} E d &= \frac{D}{\gamma q_j h_j} \\ &= \frac{cd^{1.5} P - D_0}{\frac{\gamma q_j h_j}{75}} = \left( C \frac{d^{1.5} p}{\gamma q_j h_j} - \frac{D_0}{\gamma q_j h_j} \right) 75 \dots\dots(4.16) \end{aligned}$$

第2項は小さい値なので省略すると、(4.16)式は

$$\begin{aligned} E d &= 75 C \frac{d^{1.5} p}{\gamma q_j h_j} \\ &= A \frac{1}{(dp)^{\frac{1}{2}}} \quad (\because q_j h_j = d^2 p^{1.5}) \dots\dots(4.17) \end{aligned}$$

A: 定数

また流量Qは

$$\begin{aligned} Q &= A v = \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2gH} \\ &= \frac{\pi}{4} d^2 \times \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} \sqrt{P} \\ &= \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} p^{\frac{1}{2}} \dots\dots(4.18) \end{aligned}$$

のように表わされ、(4.18)から

$$d = \beta \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{P^{\frac{1}{3}}} \dots\dots(4.19)$$

β: 定数

(4.19)式を(4.17)式に代入すると

$$Ed = A_0' \frac{1}{\left( \frac{Q_{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{1}{4}}} \times P \right)^{\frac{1}{2}}} \\ = A_0' \frac{1}{Q_{\frac{1}{2}} \times P^{\frac{3}{8}}} \dots \dots \dots (4.20)$$

となる。

## 5. 結 論

対象土質を比較的軟かい粘土について実験的に調べてみたが、試料数の不足、試料および各ノズルについて噴流の性質について調べていないこともあり定量的にはわからなかったが、傾向的に次のことがわかった。

- 1) 水噴流による粘土試料の掘削について、ノズルを定移度で移度させたときの掘削深さは実験範囲の土質に対して次のように表わせる。

$$D = cd^{1.05}p - D_0$$

- 2) 上記の関係から掘削深さのポンプ馬力比は

$$Ed = A_0' \frac{1}{Q_{\frac{1}{2}} \times P^{\frac{3}{8}}}$$

となり、水噴流で粘土等の土質を掘削する場合は供給圧力を上げて使用することは、流量を増して使うことより不利になる。

## 6. あとがき

水噴流によるノズル移動のときの掘削深さについて以上のような結論が得られたが、ノズル径、供給圧力の範囲を広げた場合については今後更に研究する必要がある。また、土質との関係、掘削量、移動速度との関係について今後更に研究して行く予定である。

## 参 考 文 献

1. “ジェット掘削に関する研究”  
鉛直ジェットによる海底土砂の切崩について  
港湾技術研究所報告 3 巻 5 号  
松田 任, 岩田尚生
2. “高圧噴流の構造に関する実験結果, およびモルタル試料掘削実験結果について”  
港湾技術研究所資料 No. 60  
藤井喜一郎, 守口照明, 近藤 基
3. “排土板とジェット組合せによる地均し力におよぼす効果について”  
港湾技術研究所報告 7 巻 1 号  
早乙女保二, 石塚浩次  
(1969. 4. 5 受付)

港湾技研資料 No. 77

1969・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 大洋印刷産業株式会社  
東京都千代田区丸ノ内2-20