

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

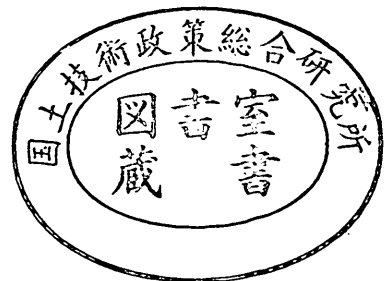
---

VOL. 23

NO. 2

JUNE. 1984

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第23巻 第2号 (Vol. 23, No. 2), 1984年6月 (June 1984)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力 (第2報)  
——現地観測波圧データの解析——……………高橋重雄・谷本勝利…………… 3  
(Uplift Forces on a Ceiling Slab of Wave Dissipating Caisson with  
a Permeable Front Wall (2nd Report)—Field Data Analysis—  
……………Shigeo TAKAHASHI and Katsutoshi TANIMOTO)
2. 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法……………加藤一正・吉松 晃……………27  
(A New Method of Three-Dimensional Empirical Eigenfunction Analysis for  
Contour Maps ……………Kazumasa KATOH and Akira YOSHIMATSU)
3. 海域底泥中のリンの挙動モデルについて……………堀江 毅・細川恭史……………49  
(Modelling of the Behaviors of Phosphorus in Sea Mud  
……………Takeshi HORIE and Yasushi HOSOKAWA)
4. 砂地盤における地中杭の横抵抗に関する実験的研究……………荘司喜博……………75  
(Experimental Study on Lateral Resistance of a Pile with Embedded  
Head in Sand ……………Yoshihiro SHOJI)
5. 波の繰返しを受ける防波堤基礎地盤の安定性に関する研究 (第1報)  
——過剰間隙水圧の挙動解析——……………善 功企…………… 181  
(Study on the Stability of Subsoil under Breakwaters Subjected to Cyclic  
Wave Loading (1st Report)  
—Analysis on Wave-Induced Excess Pore Water Pressure—  
…………… Kouki ZEN)
6. 連続水ジェットによる岩盤掘削機構……………岩崎峯夫・秋園純一…………… 207  
(A Consideration of Rock Excavation Mechanism with Water Jets  
…………… Mineo IWASAKI and Junichi AKIZONO)

## 6. 連続水ジェットによる岩盤掘削機構

岩 崎 峯 夫\*  
秋 園 純 一\*\*

### 要 旨

連続水ジェットによる岩の掘削に関しては、既に多くの研究がなされている。けれども、これらの研究は、水ジェットの条件（圧力、流量など）と岩石の種類と掘削深さを実験的に関係づけたものが多く、掘削機構に関する研究は非常に少ない。この掘削機構を明らかにするために、岩盤表面に作用する水ジェット圧力を測定した。この測定には、周波数10kHzの応答性をもつ圧力計測システムを用いた。この結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 作用圧力は、静的成分と動的成分とからなっている。
- 2) 動的成分の周波数は、100Hz～500Hzに集中している。
- 3) 動的成分は、試料—ノズル間距離の関数であり、極大値を持っている。

これらの結果と、モルタル試料掘削実験の結果を比較すると、この動的成分が掘削に最も関係していることが明らかとなった。そこで、この動的成分と、単位時間あたりの掘削深さが比例するとして、掘削過程をシミュレーションした。このシミュレーション結果は、モルタル試料掘削実験結果とほぼ一致した。この結果、モルタルの掘削は、作用圧力の動的成分により、おもに行われることが明らかとなった。

---

\* 機材部 作業船研究室長

\*\* 機材部 主任研究官

## 6. A Consideration of Rock Excavation Mechanism with Water Jets

Mineo IWASAKI\*

Junichi AKIZONO\*\*

### Synopsis

This paper presents a mechanism of rock excavation with water jets. To investigate the action of the jets, a new pressure measuring system is introduced. The system can measure vibrating pressure up to 10kHz. Measurements of pressure loading on a rock surface with water jets were carried out using the system. The character and the spectrum of water jets are made clear by those measurements. The results of the measurements are as follows.

- 1) The pressure of a rock surface is a combination of the vibrating pressure and the static pressure
- 2) The frequency range of the vibrating pressure is from 100Hz to 500Hz.
- 3) The vibrating pressure is a function of the stand-off distances and has a maximum point.

Compared with artificial sandrock excavation tests, there are good correlations between the vibrating pressure and excavated depth measurements as a function of the stand-off distance.

It is concluded that rocks are excavated mainly by the vibrating pressure of water jets.

---

\* Chief of Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

\*\* Senior Research Engineer, Machinery Division

## 目 次

要 旨	207
1. ま え が き	211
2. 実 験 装 置	212
2.1 水ジェットポンプ	212
2.2 圧力計測装置	212
3. 実 験 内 容	213
4. 実 験 結 果	213
5. 考 察	216
5.1 掘削現象の主要因の推定	216
5.2 掘削過程のシミュレーション	217
6. 結 論	219
参 考 文 献	220

## 1. ま え が き

水ジェットによる切断、掘削などを含め、jet cutting と称される研究分野がある。jet cutting に関する研究は、古くから行われており、主要な研究論文の要旨がまとめられている文献<sup>1)</sup>には、約800の論文が記述されている。また、同文献には、過去から最近の jet cutting に関する研究についてまとめられ、現在の jet cutting の技術、研究のレベルが記述されている。この文献によると、jet cutting の方式は、3方式に大別される。

### a) 連続ジェット

これは、ジェットを目標物に連続的に作用させる方式のもので、本研究で用いている方式でもある。同文献によると、連続ジェットは、continuous steady jet すなわち定常的なジェット流を発生し、掘削溝を、流れにより表面に生じるせん断力によって削る (shearing out a slot) と記述されている。

### b) 不連続ジェット

連続ジェットは、目標物のジェット作用中心点にいわゆる次式で表される stagnation pressure を発生させる。

$$p = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (1)$$

ただし、 $\rho$  は、水の密度、 $u$  は、ジェットの速さである。

もし、水塊 (liquid slug) が目標物に衝突すると考えると、ウォーターハンマの考え方から次の圧力が発生する。

$$p = \rho c u \quad (2)$$

ただし、 $c$  は、水中の音速である。

この圧力は、衝撃的に作用し、同じ流速のジェットであれば、連続ジェットの数倍の圧力になる。この方式の掘削は、連続打撃 (a series of blows) により生じると考えている。この方式は、ノズルと目標物の間に、機械的に穴付円板を回転させるか、星形円板を回転することにより行われている。そして、この方式は、仕上げを必要としない岩、石炭の掘削のどのような場合にも連続ジェットより良いと記述されている。

### c) パルスジェット

これは、アキュムレータにエネルギーを蓄積しておいて、一時に、水ジェットのエネルギーに変換する方式のもので、特に高い圧力を発生させる場合に用いられている。この方式の掘削は、式(2)により発生する衝撃圧と考えられている。

連続ジェットによる掘削の研究は、非常に多く行われている。けれども、そのほとんどは、ジェット掘削のいろいろのパラメーターと掘削深さを関係づける実験式を求めているものである。このパラメータは、ノズル試料間距離、ジェット流速あるいは圧力、掘削時間、ノズル移動速度である。そして、これらの式は、多かれ少なかれ、実験定数を含んでいる。これらの論文の数は、文献<sup>1)</sup>によると28編におよんでいる。

掘削機構に関する研究は少なく、Mohaupt 等<sup>2)</sup>は、ジェットのエネルギーと破壊により吸収されるエネルギーが等しくなるということにより掘削機構モデルを提案している。Crow<sup>3)</sup>は、ジェットの水の流れにより生じる岩盤表面のせん断力により、粒子が引張られて掘削されると考え、ミクロ的には、岩盤表面の局部における stagnation pressure により掘削されるという考えを提案している。Hashish<sup>4)</sup>等は、ジェットにより生じる力と運動量を基礎に掘削モデルを提案している。Rehbinder<sup>5)</sup>は、多孔性岩の掘削メカニズムとして、ダーシーの法則を基礎とした掘削モデルを提案している。ア・エム・チャプカ<sup>6)</sup>は、連続ジェットを水滴の集まりと考え、水滴を球状と考え、ヘルツの球体と平面の接触理論を用いて掘削モデルを提案している。この理論は、非常に大きな圧力を発生することになり、それにより掘削が生じると考えるものである。

これらの掘削モデルが現在提案され、実験値と比較されているものである。

岩盤の掘削機構が単純でないことは、次の例でも明らかである。文献<sup>7)</sup>によると、水ジェット圧力50kgf/cm<sup>2</sup>で掘削される岩に、ノズルを押し付け水が噴出しないうようにして、250kgf/cm<sup>2</sup>の静圧を作用させても、その岩は、破碎も掘削もされなかったと報告されている。また、不連続ジェットにおいて、式(2)による作用圧が発生するには水中の音速近くジェット流速が必要と考えられるが、そのような高速でない場合でも、式(2)を用いて不連続ジェットが連続ジェットよりも効果があると説明することには疑問がある。また、連続ジェットと不連続ジェットの掘削機構が異なると考えることにも疑問を抱かざるを得ない。

上述の連続水ジェットの実験式においても、Feenstra<sup>8)</sup>は、掘削が生じる水ジェット圧力を、岩の引張強度の5倍であると報告しているし、Cooley<sup>9)</sup>は、岩の圧縮強度の20~25%であると報告している。また、Mellor<sup>10)</sup>は、彼の実験中には、そのような圧力が発見できなかったと報告している。

以上のことからわかるように、さまざまな提案、考え

方があり、水ジェット掘削のメカニズムは、まだ十分明らかにされていないと考えられる。また、前述の研究においては、水ジェット作用圧力の波形までは検討されていない。

このようなことから、本研究は、作用圧力の波形を計測、分析することにより掘削メカニズムを明らかにしようとして実施された。

## 2. 実験装置

### 2.1 水ジェットポンプ

使用した水ジェットポンプは、10段タービンポンプで常用吐出圧力40kgf/cm<sup>2</sup>、吐出流量690l/min、駆動電動機出力75kWである。ノズルは、出口径13mmを用いた。これは、吐出圧力40kgf/cm<sup>2</sup>に調整するためであり、参考として、9mm、11mmも用いた。水槽の寸法は、直径5m、深さ5mの円形水槽である。図-1に、実験装置全体図を示す。

### 2.2 圧力計測装置

ジェットによる掘削メカニズムを明らかにするために、作用圧力を計測することにした。前述の論文での圧

力の測定は、周波数応答の低い計測器で行われている。そこで、本実験においては、高い周波数応答を有する圧力測定システムを作り作用圧力波形を計測した。

図-2に、岩盤表面圧力測定トランスデューサを示す。このトランスデューサは、応答周波数50kHzで、小型ダイヤフラム式のステンレス製である(図-3参照)。

この圧力トランスデューサは、鉄板の表面に受圧面を同一平面になるように取付けられ、受圧面は、鉄板表面に露出している。これを図-1に、模擬岩盤として示している。さらに、水ジェットの導水管の圧力を測定するために、導水管に圧力計を取付けた。

これらの圧力トランスデューサの出力は、動ひずみ計を介してデータレコーダに記録した。

動ひずみ計の応答周波数は、60kHzで、データレコーダの応答周波数は、10kHzである。したがって、本システム全体の応答周波数は、10kHzということになる。

データレコーダに記録されたデータは、マイクロコンピュータ(if800-model 30)のA-D変換装置を通し、マイクロコンピュータで処理した。A-D変換プログラム及び処理プログラムは、同マイクロコンピュータ付属の

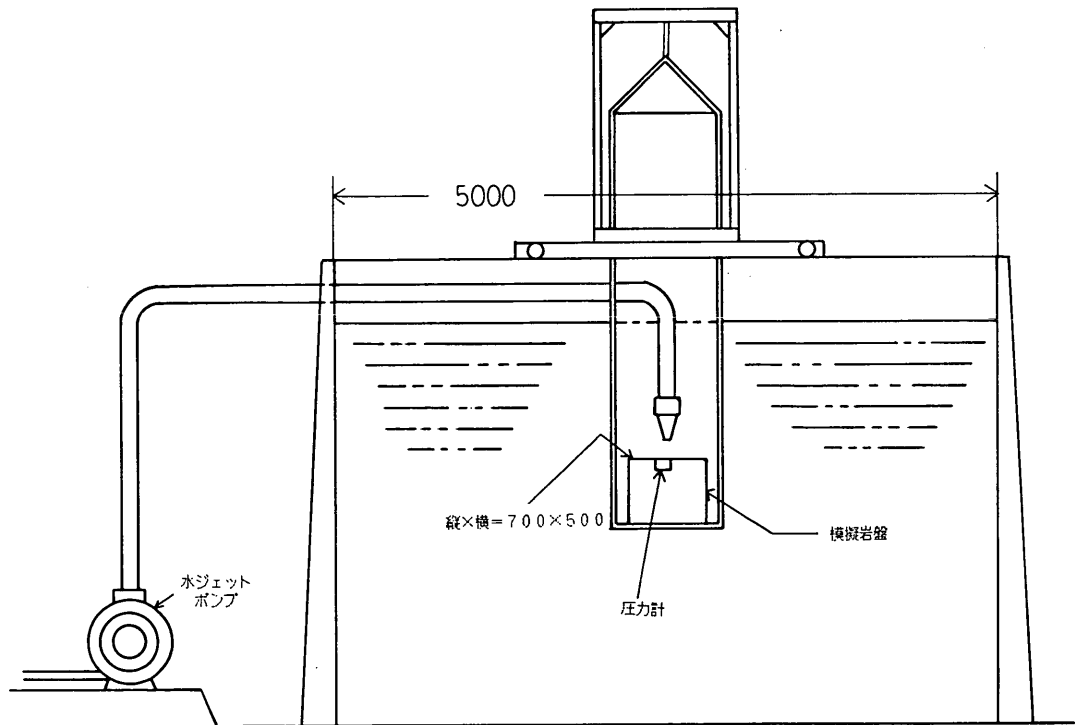


図-1 実験装置全体図

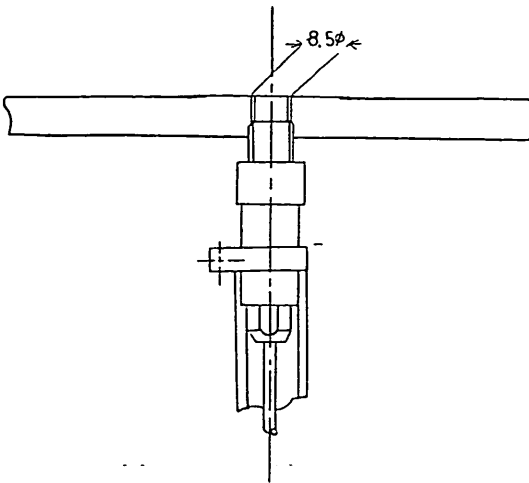


図-2 模擬岩盤表面の圧力計

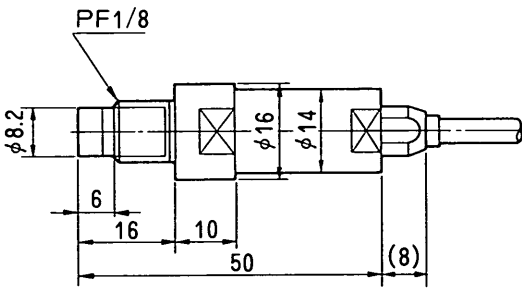


図-3 使用した圧力計の寸法

BASIC インタプリタで実行すると遅すぎる。そこで、A-D変換部は機械語、処理部は BASIC 言語で作成し、それぞれアセンブラ及びBASICコンパイラでコンパイルし、それらをリンクして1つのプログラムにして実行した。A-D変換は、12bit で表される1データを、毎秒4,320個の速さで、1,024個サンプリングすることができる。他方、データレコーダは、毎秒38cm/sのテープ速度でデータ収録を行った。再生は、38cm/s からその1/2, 1/4, 1/8 の速度で行うことができ、実質、毎秒4,320×8個のサンプリングが可能である。

処理プログラムは、A-D変換したデータ1,024個をフィルターを通さないで、FFT(高速フーリエ変換)で処理し、パワースペクトル密度、作用圧力の静的成分のパワー、動的成分のパワー、最大圧力、最小圧力、平均圧力、頻度分布及び波形を求めるものである。パワースペクトル密度、波形と頻度分布は、CRTに図化し、ハー

ドコピーをとれるようになっている。

### 3. 実験内容

ノズル径13mmのモルタル掘削実験結果が既に発表されている<sup>11)</sup>ので、本実験ではノズル径13mmを主に用いたが、参考のために、11mm、9mmについても圧力測定を実施した。

圧力の測定は、前述の圧力トランスデューサ付の鉄板をノズルと直角に配置し、ノズルと圧力トランスデューサの距離を変えて行った。本報告においては、以後この距離をノズル試料間距離と記述することにする。この距離は、5cm、10cm、15cm、20cm、25cmの5種類とした。

### 4. 実験結果

前述の処理プログラムで処理した結果を図-4から図-8および表-1に示す。図は、ノズル径13mmのものであるが、他のノズル径のものも同じ傾向を示したので省略する。

この処理におけるパワーとは、圧力波形の2乗平均値であり、次のようにして計算される。

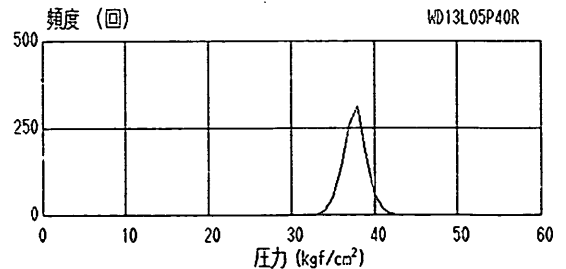
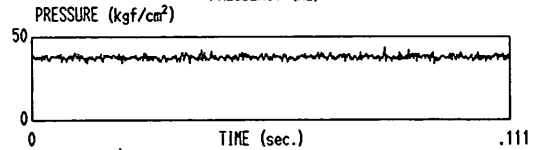
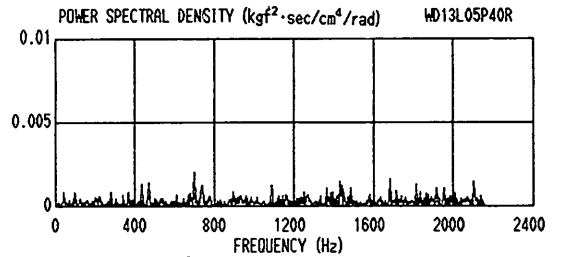


図-4 ノズル径13mm、ノズル試料間距離5cmの実験結果



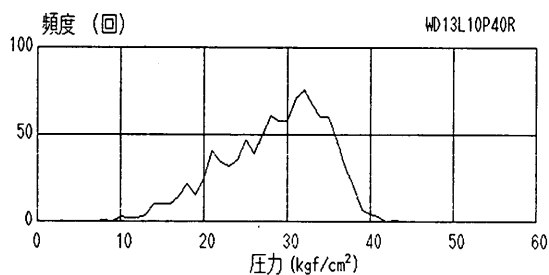
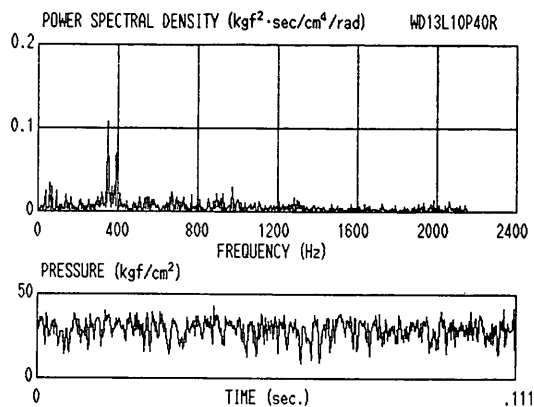


図-5 ノズル径13mm, ノズル試料間距離10cm  
の実験結果

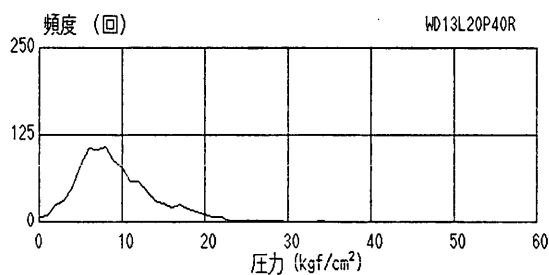
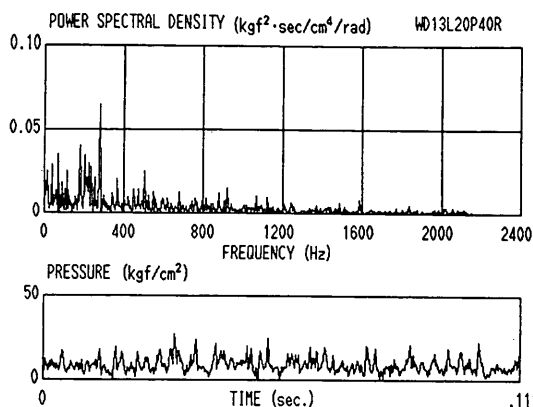


図-7 ノズル径13mm, ノズル試料間距離20cm  
の実験結果

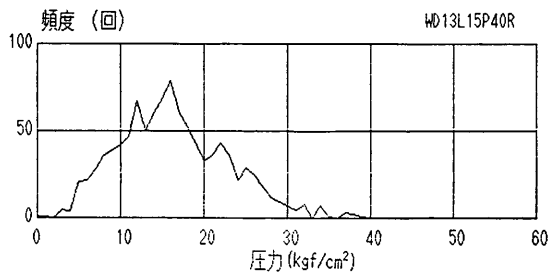
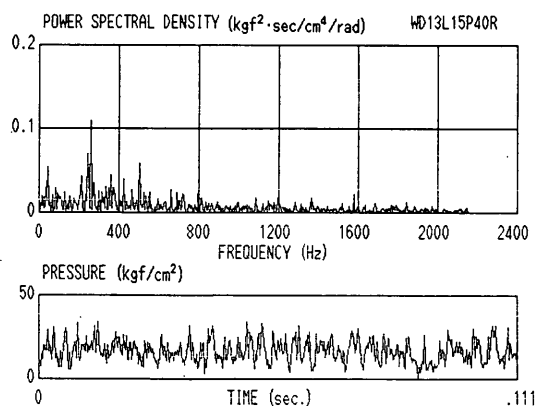


図-6 ノズル径13mm, ノズル試料間距離15cm  
の実験結果

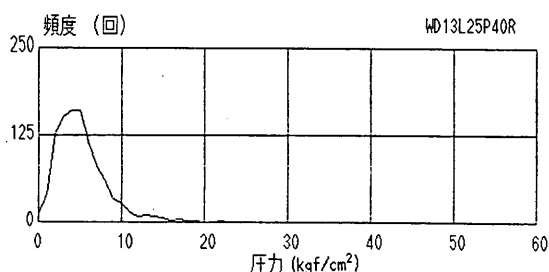
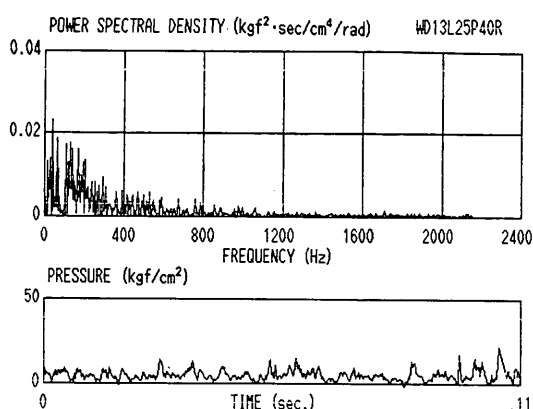


図-8 ノズル径13mm, ノズル試料間距離25cm  
の実験結果

連続水ジェットによる岩盤掘削機構

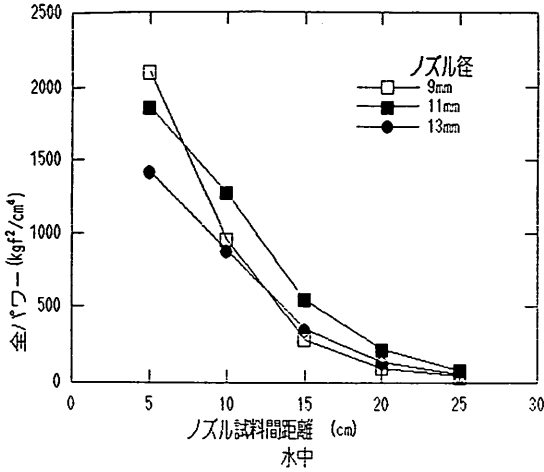


図-9 全パワーとノズル試料間距離の関係

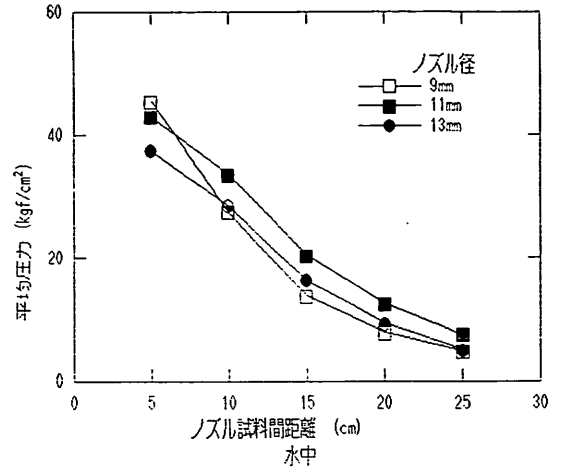


図-12 平均圧力とノズル試料間距離の関係

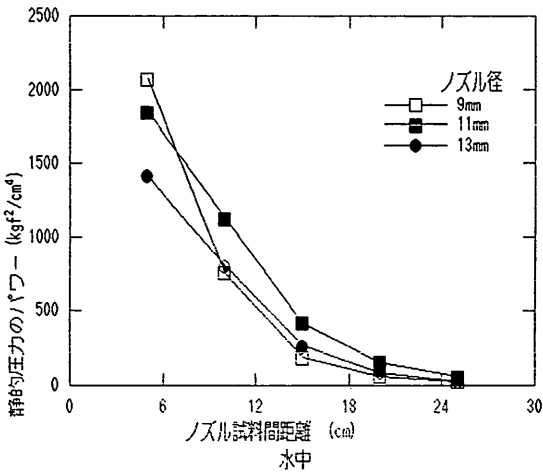


図-10 静的圧力のパワーとノズル試料間距離の関係

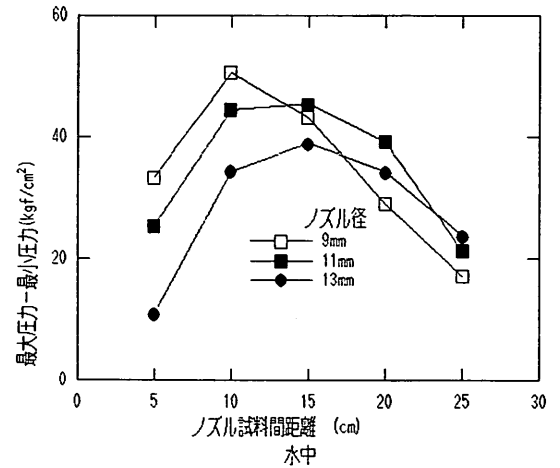


図-13 最大圧力-最小圧力とノズル試料間距離の関係

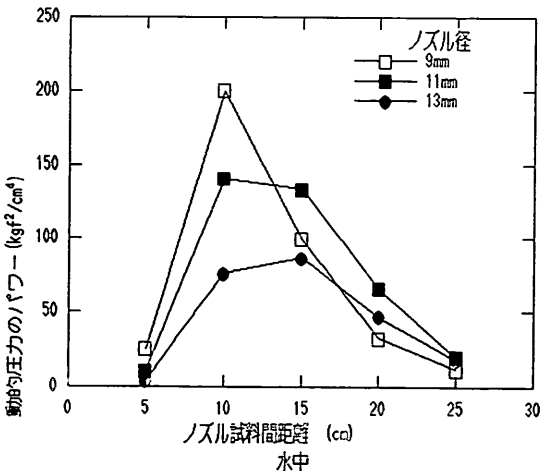


図-11 動的圧力のパワーとノズル試料間距離の関係

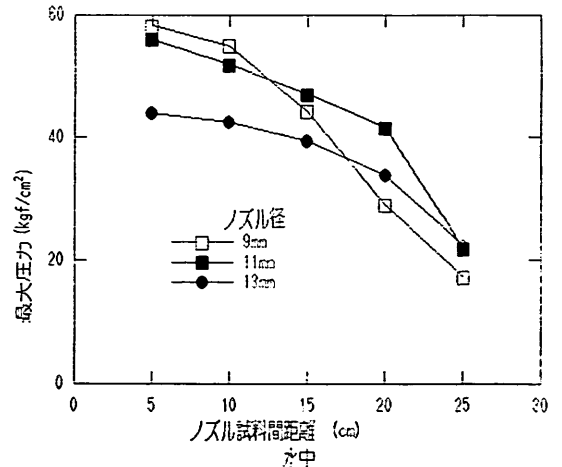


図-14 最大圧力とノズル試料間距離の関係

表-1 実験データ処理結果

ノズル径と管内圧力	ノズル試料間距離 (cm)	最大圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	最小圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大圧力—最小圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静的圧力のパワー (kgf <sup>2</sup> /cm <sup>4</sup> )	動的圧力のパワー (kgf <sup>2</sup> /cm <sup>4</sup> )	全パワー (kgf <sup>2</sup> /cm <sup>4</sup> )
9 mm 49kgf/cm <sup>2</sup>	5	58.2	24.7	33.5	45.6	2,077.5	25.4	2,102.9
	10	55.0	4.4	50.6	27.5	758.9	200.0	958.9
	15	44.3	1.1	43.2	13.7	188.5	99.6	288.1
	20	29.0	-0.2	29.2	7.8	61.1	32.5	93.6
	25	17.3	0.1	17.2	4.9	24.3	11.6	35.9
11mm 46kgf/cm <sup>2</sup>	5	56.0	30.5	25.5	43.0	1,848.5	10.6	1,859.1
	10	51.9	7.4	44.5	33.7	1,133.5	140.6	1,274.1
	15	47.1	1.7	45.4	20.4	417.8	133.2	551.0
	20	41.6	2.4	39.2	12.5	155.8	66.5	222.3
	25	21.9	0.5	21.4	7.5	55.8	20.0	75.8
13mm 39kgf/cm <sup>2</sup>	5	44.1	33.1	11	37.6	1,415.4	3.6	1,419.7
	10	42.6	8.2	34.4	28.5	809.7	76.3	886.0
	15	39.4	0.5	38.9	16.3	266.6	87.0	353.6
	20	34.0	-0.3	34.3	9.3	87.1	47.0	134.1
	25	22.3	-1.5	23.8	5.1	26.0	18.5	44.5

周期  $T$  でくり返す関数  $p(t)$  は、次のように表すことができる。

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (3)$$

ただし、 $\omega_0 = 2\pi/T$ 、 $C_n$  は複素振幅である。

このとき、二乗平均値  $\bar{p}^2$  は、次式で与えられる。

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt = C_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} |C_n|^2 \quad (4)$$

また、静的圧力のパワーは、平均圧力のパワーであり式(4)の  $C_0^2$  である。動的圧力のパワーは、式(4)の最後の項で表されるものである。

また、パワースペクトル密度  $W(\omega_n)$  は、次のように表される。

$$W(\omega_n) = \frac{2|C_n|^2}{\omega_0} \quad (5)$$

これらの3枚組の図は、上から、パワースペクトル密度、波形、圧力の頻度分布を表している。

これらから、振動の主な周波数は、ノズル試料間距離が大きくなると小さくなる傾向がみられ、数100Hzである。また、波形、頻度分布から明らかなように、ノズル試料間距離が近いと、圧力の振動が非常に少ないことを図は示している。

さらに、表-1に表されたそれぞれの値を縦軸に、横軸をノズル試料間距離にとって図化した。これを図-9~図-14に示す。これらの図からわかるように、平均圧力、

最大圧力、全パワー、静的圧力のパワーは、ノズル試料間距離が大きくなると小さくなる。けれども、動的圧力のパワーと最大圧力—最小圧力は、あるノズル試料間距離で最大になる。すなわち、極大値を有している。これは、前述のように、ノズル試料間距離が近いと、圧力の振動が非常に少ないことによる。

## 5. 考 察

### 5.1 掘削現象の主要因の推定

水ジェットによる掘削機構を明らかにするために、本実験と同じ装置によるモルタルの掘削実験で得られた結果<sup>11)</sup>と本実験の結果を比較することにする。

図-15は、ノズルを固定した場合の掘削実験結果で、ノズル径が13mm、圧力が40kgf/cm<sup>2</sup>、ジェット噴射時間1分の条件での圧縮強度4種類における、掘削深さとノズル試料間距離の関係を表したものである。図-16は、図-15の圧縮強度65kgf/cm<sup>2</sup>の試料の時間経過における掘削深さとノズル試料間距離の関係を表したものである。

図-15は、掘削初期の単位分あたりの掘削速度を表しているように考えることができる。この図によると、ノズル試料間距離が近いと、この掘削速度が小さいことを示している。図-15の圧縮強度34kgf/cm<sup>2</sup>の試料は、他の強度の試料と一見異なっているように思われるが、次のように理解することができる。すなわち、この試料が

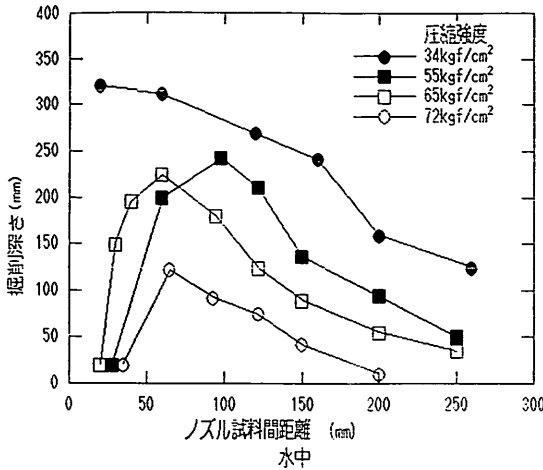


図-15 圧縮強度の異なるモルタル試料の掘削時間1分の場合の掘削実験結果(藤井<sup>11)</sup>ほかによる)

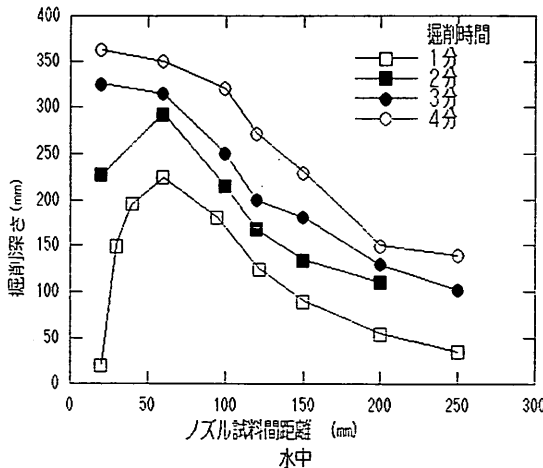


図-16 圧縮強度 65kgf/cm<sup>2</sup> 試料のノズル試料間距離、掘削時間と掘削深さの実験結果(藤井<sup>11)</sup>ほかによる)

弱いために、他の試料より掘削速度が速く、1分経過後の状態は、図-16の4分経過後の状態と同じであると考えることができる。したがって、この試料においても、掘削のごく初期においては、ノズル試料間距離が近いと掘削されにくいと考えるのが妥当である。

結局、一般的な掘削深さとノズル試料間距離の関係の時間経過は、時間きざみを小さくすれば、図-16の進行パターンを示すものと考えることができる。

以上から、ノズル試料間距離が近いと、単位秒あたり

の掘削速度は、小さいと言える。

本実験により得られた量(最大圧力、平均圧力、パワーなど)のうち、どの量が掘削速度に関係しているか調べることにする。すなわち、図-16の1分のデータのパターンと類似のパターンを図-9~図-14の間で捜すと、最大圧力-最小圧力か動的圧力のパワーであることがわかる。これらの量は、図-4~図-8からわかるように、圧力振動と大きく関係している。したがって、掘削速度、すなわち掘削に大きく寄与しているものは、圧力振動であると推定される。

### 5.2 掘削過程のシミュレーション

以上で述べた推定の妥当性を調べるため掘削過程のシミュレーションを実施した。

このシミュレーションは、次の仮定を行っている。

a) 掘削速度は、掘削している面に作用しているジェット圧力の動的成分のパワーに比例する。

b) ジェット作用圧力の動的成分のパワーは、ノズルと掘削面との距離の関数で表されるものとし、その関数は、図-17で表されるものとする。ただし、図-17に示した関数は、図-11のノズル径13mmのデータをフーリエ級数補間と線型補間を組合せて補間して得たものである。また、図-11は、鉄板上に作用する圧力を測定して得られたもので、掘削された状態から得られたものでないけれども、掘削された状態でも成立すると仮定した。したがって、図-17の横軸は、ノズル試料間距離からノズル掘削面までの距離に書き換えている。

以上の仮定を式で表すと次のようになる。

$$V_e = K(\sigma_c) \cdot f(x) \quad (6)$$

ただし、 $V_e$ は、掘削速度、 $f(x)$ は、作用圧力の動的成分のパワーで、図-17で表されるもの、 $x$ は、ノズルと掘削面の距離である。 $K(\sigma_c)$ は、比例定数で、その値は、試料の圧縮強度  $\sigma_c$  の関数で、以後掘削係数と呼

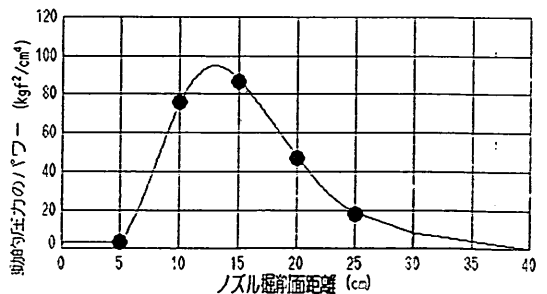


図-17 シミュレーションに用いた関数  $f(x)$

ぶことにする。

したがって、掘削時間  $t$  での掘削深さ  $D(t)$  および距離  $x$  は、次式で表すことができる。

$$D(t) = \int_0^t V_e dt \quad (7)$$

$$x = x_0 + D(t) \quad (8)$$

ただし  $x_0$  は、ノズル試料間距離である。

式(7)、(8)を用いて、時間きざみ 2 秒で計算した結果を

図-18～図-21に示す。図中の数字は、ノズル試料間距離を示す。また、図-22に試料圧縮強度  $34\text{kgf/cm}^2$  のモルタル掘削結果<sup>11)</sup>に本計算結果を重ねたものを示す。この結果をもとに、モルタル実験結果の図-15と図-16に対応する図-23と図-24を作成した。また、この計算に用いた掘削係数  $K(\sigma_c)$  を図-25に示す。この係数は、式(7)、(8)により、この係数を変えていろいろ計算を行い、最も実験結果とよく合う値を用いた。

この計算結果においては、ノズル試料間距離が大きい場合に、計算値が高くなっており、また、図-25において圧縮強度  $72\text{kgf/cm}^2$  の掘削係数が直線上からずれているなど、若干不具合な点も残されている。これは、この計算の仮定において、掘削中の掘削形状変化およびもどり水の影響が無視されていること。掘削作用として、パワーの動的成分のみ考えていることなどが原因ではないかと考えられる。

しかしながら、計算値と実験値は、全体として良い一致を示している。したがって、この結果から、ジェットの振動圧力が掘削の主原因と考えることができるであら

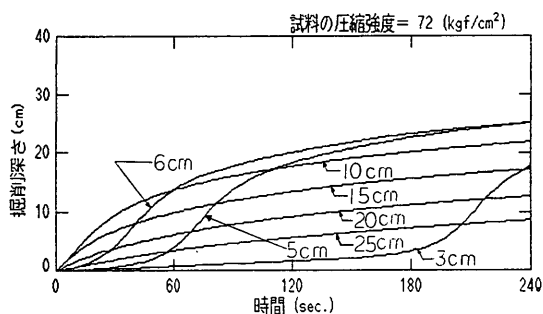


図-18 圧縮強度  $72\text{kgf/cm}^2$  試料の計算結果

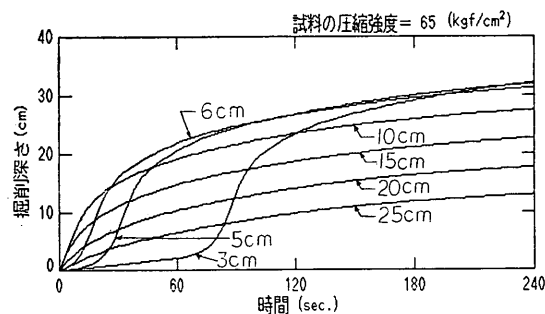


図-19 圧縮強度  $65\text{kgf/cm}^2$  試料の計算結果

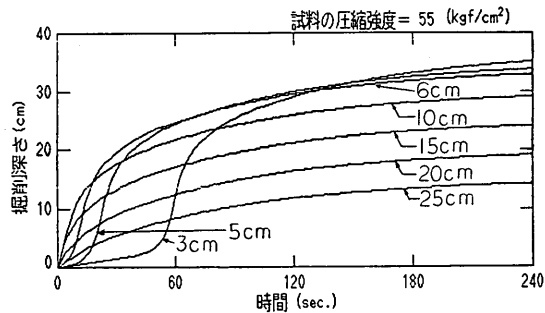


図-20 圧縮強度  $55\text{kgf/cm}^2$  試料の計算結果

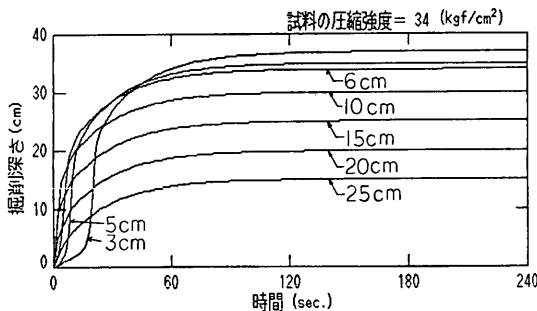


図-21 圧縮強度  $35\text{kgf/cm}^2$  試料の計算結果

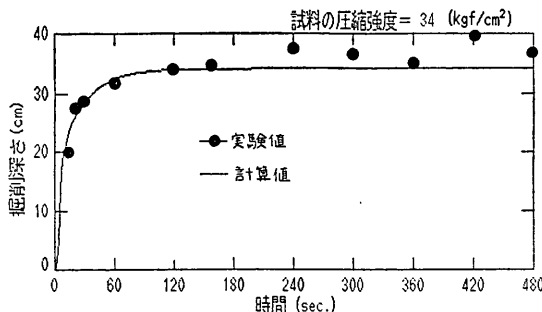


図-22 ノズル試料間距離 6 cm, 圧縮強度  $34\text{kgf/cm}^2$  試料の実験値と計算値の比較

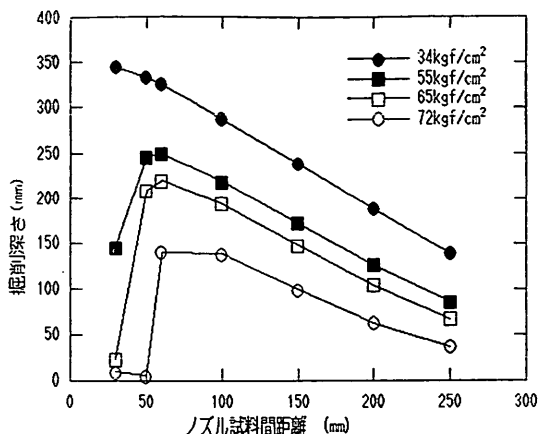


図-23 圧縮強度の異なるモルタル試料の掘削時間1分の場合のシミュレーション結果

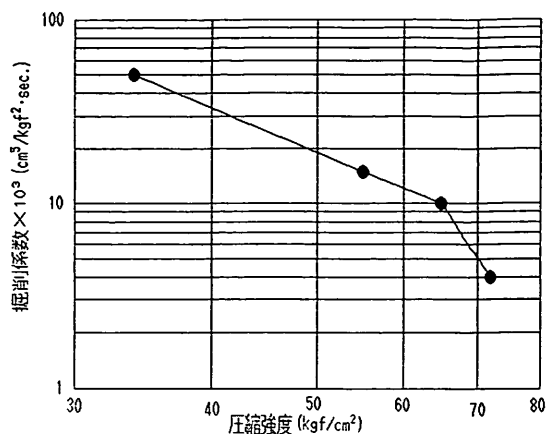


図-25 シミュレーションに用いた掘削係数

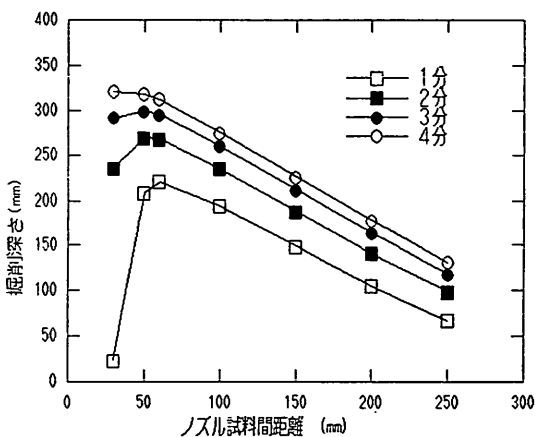


図-24 圧縮強度 65kgf/cm<sup>2</sup> 試料のノズル試料間距離、掘削時間と掘削深さのシミュレーション結果

う。このように考えると、水ジェットによる掘削のメカニズムは、振動する作用圧力による岩の疲労破壊、または、圧力水が岩の表面から内部に入り、表面の圧力低下時に、表面の粒子をもち上げる作用によるものであろうと推論される。

また、水ジェットの能力を表すパラメータとして、水ジェットの圧力振動を示すもの、例えば、圧力の動的成分のパワーがより適切であると考えられる。

## 6. 結 論

以上の結果から、次のことが明らかにされた。

水ジェットの作用圧力を動的な成分と静的な成分に分けると、静的成分は、ノズル試料間距離が大きくなると小さくなる。けれども、動的成分は、あるノズル試料間距離で最大になる。すなわち、極大値を有している。また、この動的成分の周波数は、数100Hzである。

掘削速度をこの動的成分のパワーに比例するとして、モルタル試料の掘削過程を計算すると、掘削実験結果とはほぼ一致する。したがって、掘削の主原因は、水ジェットの振動圧力の作用であると推定され、水ジェットの能力を表すパラメータとして、水ジェットの圧力振動を示すもの（動的成分のパワー等）がより適切であると推測された。

また、このように考えれば、不連続ジェットはノズルを試料に近づけても振動圧力を発生できるので、連続ジェットより大きな動的圧力のパワーを生じることができる。したがって、不連続ジェットが連続ジェットより常に有効であることが、ジェットの流速が音速に比べて小さい場合でも説明できる。また、連続ジェットも不連続ジェットも振動圧力を生じさせるという点では同じであり、両ジェットの掘削機構は同じであろうと推定できる。

しかし、なぜ水ジェットの作用圧力が振動し、その周波数が数100Hzになるのかは、十分明らかにされていない。また、振動圧力により掘削されるとして、二つの掘削機構が推測されたが、これらについては実験的に証明されていない。けれども、本研究は、水ジェット掘削機構の解明のいとぐちを明らかにしたと思われるので、今後の水ジェットによる岩盤掘削の研究に少しでも参考になれば幸いである。 (1984年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) Robin Brown : Jet Cutting Technology, a review & bibliography, BHRA Fluid Engineering, 1980, 188p.
- 2) U.H. Mohaupt and D.J. Burns : Machining with continuous fluid jets at pressures of 2 to 7 kbar, Proc. 1st Int. Symp. on Jet Cutting Tech., 1972, pp. G4, 37~G4, 48.
- 3) 前出1)p. 11.
- 4) M. Hashish and M. P. Duplessis : The application of a generalized jet cutting equation. 4th Int. Symp. on Jet Cutting Technol., 1978, pp. F1, 1~F1, 16.
- 5) G. Reh binder : Some aspects on the mechanism of erosion of rock with a high speed water jet, 3rd Int. Symp. on Jet Cutting Technol., 1976, pp. E1, 1~E1, 20.
- 6) ア・エム・チャブカ : 水力破碎の最適パラメータ選たくに関する理論的基礎, 水力採炭と水力輸送(上巻), 東京大学出版会, 1961, pp. 104~121.
- 7) ベ・イ・ゲロンティエフ : 高圧水流とそれによる岩石破碎過程の実験的研究, 水力採炭と水力輸送(上巻), 東京大学出版会, 1961, pp. 69~76.
- 8) 前出1) p. 14.
- 9) 前出1) p. 14.
- 10) 前出1) p. 14.
- 11) 藤井喜一郎・守口照明・近藤基 : 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, 港研資料 No. 60, 1968, pp. 1~43.