

港 湾 技 研 資 料

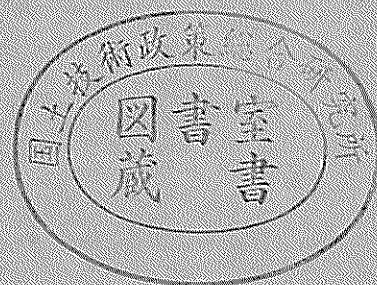
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 327 Sept. 1979

超高压水ジェット併用さく岩機の掘削性について

東 海 林	秀	幸
中 島	忠	男
岩 崎	峯	夫
秋 園	純	一
轟	達	夫

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 実 験 概 要	4
2.1 試 料	4
2.2 ノ ズ ル	4
2.3 超高压水ジェット発生装置	4
2.4 水ジェット併用さく岩機	4
2.5 実 験 方 法	7
3. 実験結果および考察	7
3.1 単一水ジェットによる水中および空中での掘削実験	7
3.2 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験	11
3.3 水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験	14
4. 結 論	18
5. あ と が き	18
謝 辞	19
参 考 文 献	19
記 号 一 覧 表	19

Drilling and Cutting Performance of Water Jet Drill

Hideyuki SHOJI*
Tadao NAKAJIMA**
Mineo IWASAKI***
Jun-ichi AKIZONO**
Tatsuo TODOROKI**

Synopsis

This paper presents the results of the study on drilling and cutting performance of the drill jointly equipped with water jet for mortar blocks by changing the parameters such as diameter of nozzles, jet pressure, traversing rate, bit rotation speed and preset drilling rate. The maximum jet pressure, the maximum flow rate used in the performance were 2000 kgf/cm², 48 l/min respectively. Throughout the experiment, actual drilling rate and cutting depth were mainly investigated.

It is revealed that the water jet can improve actual drilling rate by several times as fast as that of conventional drill and the actual drilling rate approaches to the preset drilling rate as the bit rotation speed increases. Further, the results show the cutting depth also increases as the jet pressure increases.

* Former Senior Research Engineer, Machinery Division
** Member of the Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division
*** Chief of the Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

超高压水ジェット併用さく岩機の掘削性について

東海林 秀 幸*
中 島 忠 男**
岩 崎 峯 夫***
秋 園 純 一**
轟 達 夫**

要 旨

試料として0.70m×0.70m×0.40mのモルタルブロックを選び、最大圧力2000kgf/cm²の超高压水ジェットによる水中および空中での掘削能力、ならびに通常のさく岩機にそのような超高压水ジェットを併用した場合の掘削能力およびせん孔能力について、ノズル径、水ジェット圧力、ビット横移動速度、ビット回転数、設定せん孔速度などの実験条件を変えて、掘削実験およびせん孔実験を行なった。その結果、つぎのようなことが明らかになった。

- (1) 単一水ジェットによる水中および空中での掘削実験では、ノズル試料間距離が少なくとも約10倍以内であれば水中掘削と空中掘削における掘削能力に大きな差はない。
- (2) 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験では、単一水ジェットによる横移動掘削実験と同様に水ジェット圧力が高く、かつビット横移動速度が小さいほど掘削されやすい。
- (3) 水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験では、水ジェット圧力が一定の場合、ビット回転数が高くなるほどせん孔されやすく、しかも実測せん孔速度は設定せん孔速度に収束していく。

1. まえがき

港湾工事において、花こう岩や安山岩など硬岩類の岩盤しゅんせつを効率よくかつ安全に行うことは、港湾関係当事者の長年の夢であり、そのような状況は少しも変わっていないというのが今日の岩盤しゅんせつにおける現状であろう。とくに近年における種々の環境問題の台頭を考えると、もっとも効率的な岩盤破砕法とはいえ、発破の港湾における使用は望むべくもない。しかしながら、将来の大規模岩盤しゅんせつや大水深での岩盤しゅんせつの根強い要請から、重錘、ポンプ船のカッター、100t前後のグラブなどによる従来からの機械的方法に代わる効率的な方法が早急に望まれている。そのような要請から生まれた水ジェットによる岩盤掘削法も、昨今では離島におけるさんご礁を対象とした砕岩船の開発要請から大馬力水ジェットによるさんご礁破砕実験^{1,2)}が行われるなど実用化にきわめて近い段階にきている。

この水ジェットによる掘削法の歴史をふりかえってみると、古くは中圧大流量の水力採炭に始まり、以来、鋼材の開発や設計法の進歩などによって連続水ジェットで

は15000気圧、パルス水ジェットでは50000気圧以上の水ジェットが得られるまでになっており、そのような圧力上昇にともなって掘削対象物は石炭から岩石へ、さらに金属までに及んでいる。

このような現状にある水ジェットによる掘削法の利点としては、

- 1) 水ジェットの流体力によって掘削するので機械的な掘削法などにおける刃先の摩耗がない。
- 2) 反力が小さいので掘削装置における掘削部分の剛性は小さくてよい。
- 3) 連続掘削が可能である。
- 4) 重錘に比べてしゅんせつ区域の海底形状に関係なく掘削できる。
- 5) 水ジェットの圧力および流量の選択によって対象岩の範囲を変えられる可能性がある。

などがあげられる。このように水ジェットによる掘削法は広範な利点を持っている。したがって、このような水ジェットによる掘削法を岩盤掘削のみならず、既存の港湾工事事用機械、あるいは新たな港湾工事事用機械に応用して

* 前機材部 主任研究官

** 機 材 部 作業船研究室

*** 機 材 部 作業船研究室長

いくことは、今後の港湾技術の発展に大いに役立つものと期待される。そこで今回それらの一例として、通常のさく岩機に超高圧水ジェットを併用し、その掘削特性を調べたのでここに報告する。

2. 実験概要

本報告における実験は、おもに単一水ジェットによる水中および空中での掘削実験、水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験、ならびに水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験に分けられる。以下にそれらの実験に使用した試料や装置、および実験方法などを示す。

2.1 試料

試料は、たて 0.70m、横 0.70m、高さ 0.40m のモルタルブロックである。おもな仕様をつぎに示す。

セメント：砂 = 1：2
 砂の最大粒径 3mm 以下
 シュミットハンマーによる
 推定圧縮強度 320kgf/cm²

2.2 ノズル

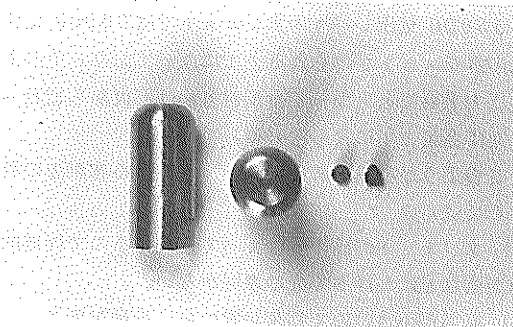


写真-1 ノズル

実験に使用したノズルは写真-1に示すような大形ノズルと小形ノズルの2種類である。いずれのノズルも絞り部から円筒部はダイヤモンド製である。大形ノズルは単一水ジェットによる掘削実験に使用し、小形ノズルは水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験、ならびに水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験に使用した。

2.3 超高圧水ジェット発生装置

超高圧水ジェットの発生装置は、表-1におもな仕様を示すような複動式増圧機である。試料がモルタルであったため最大圧力は4000kgf/cm²と2000kgf/cm²のうちから2000kgf/cm²を採用した。油圧と高圧水のフローチャートを図-1に示す。水ジェット圧力は図

中のリリーフバルブと油圧ポンプの流量を調整することによって任意に設定できる。

表-1 増圧機的主要諸元

最大圧力(kgf/cm ²)	4000	2000
最大流量(l/min)	24	48
最大消費馬力(PS)	300	300
増圧比(-)	20:1	10:1
最大使用ノズル径(mm)	0.85	1.50
ノズル材質	工業用ダイヤモンド	
駆動方式	油圧駆動	

2.4 水ジェット併用さく岩機

おもな仕様を表-2に示す。写真-2に外観を示す。

表-2 水ジェット併用さく岩機的主要仕様

型式	JDS-500
超高圧水ジェット圧力	max 2000kgf/cm ²
ビット回転数	max 500rpm
ビットストローク	500mm

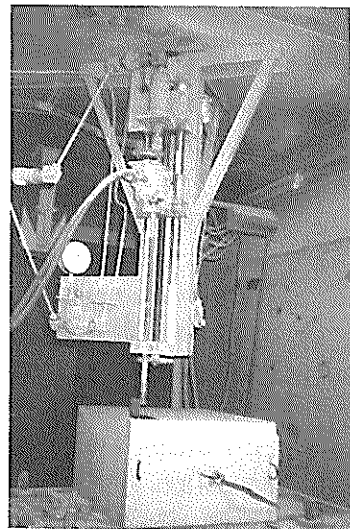


写真-2 水ジェット併用さく岩機外観

図-2はその油圧回路図である。高圧水は、写真-2中、左側からユニバーサルジョイント2個を通り、スイベルジョイントからビット付ロッドの内部を通してビットへと導かれる。ビットは、ノズル取付用の穴を2箇所有し、写真-1に示した小形ノズルが取り付けられるようになっている。ビットの形状はパーカッション用で、ビットチップはタングステンカーバイトである。小形ノズルをさく岩機用ビットに取り付けた場合の主要寸法を図-3

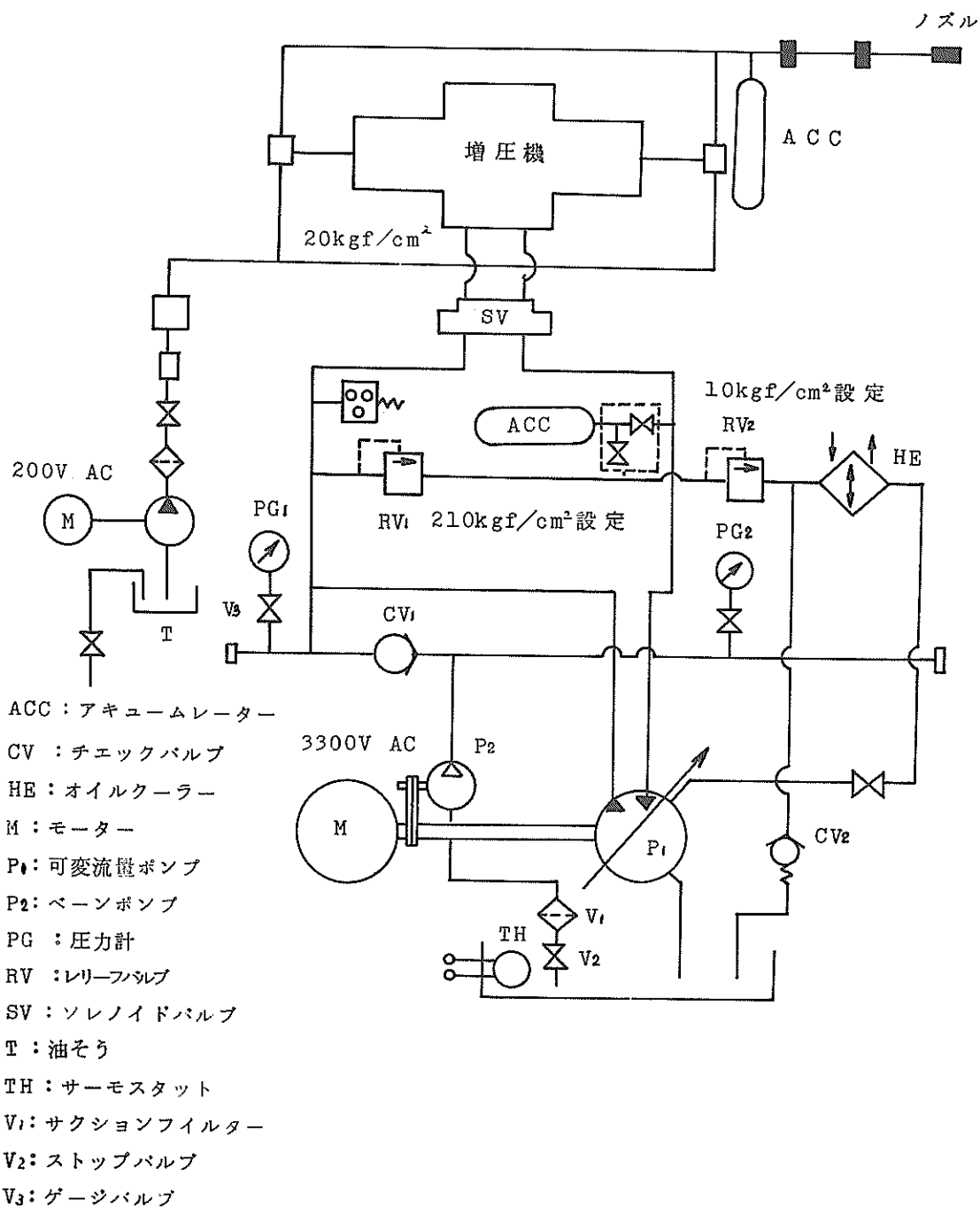


図-1 油圧および高圧水のフローチャート

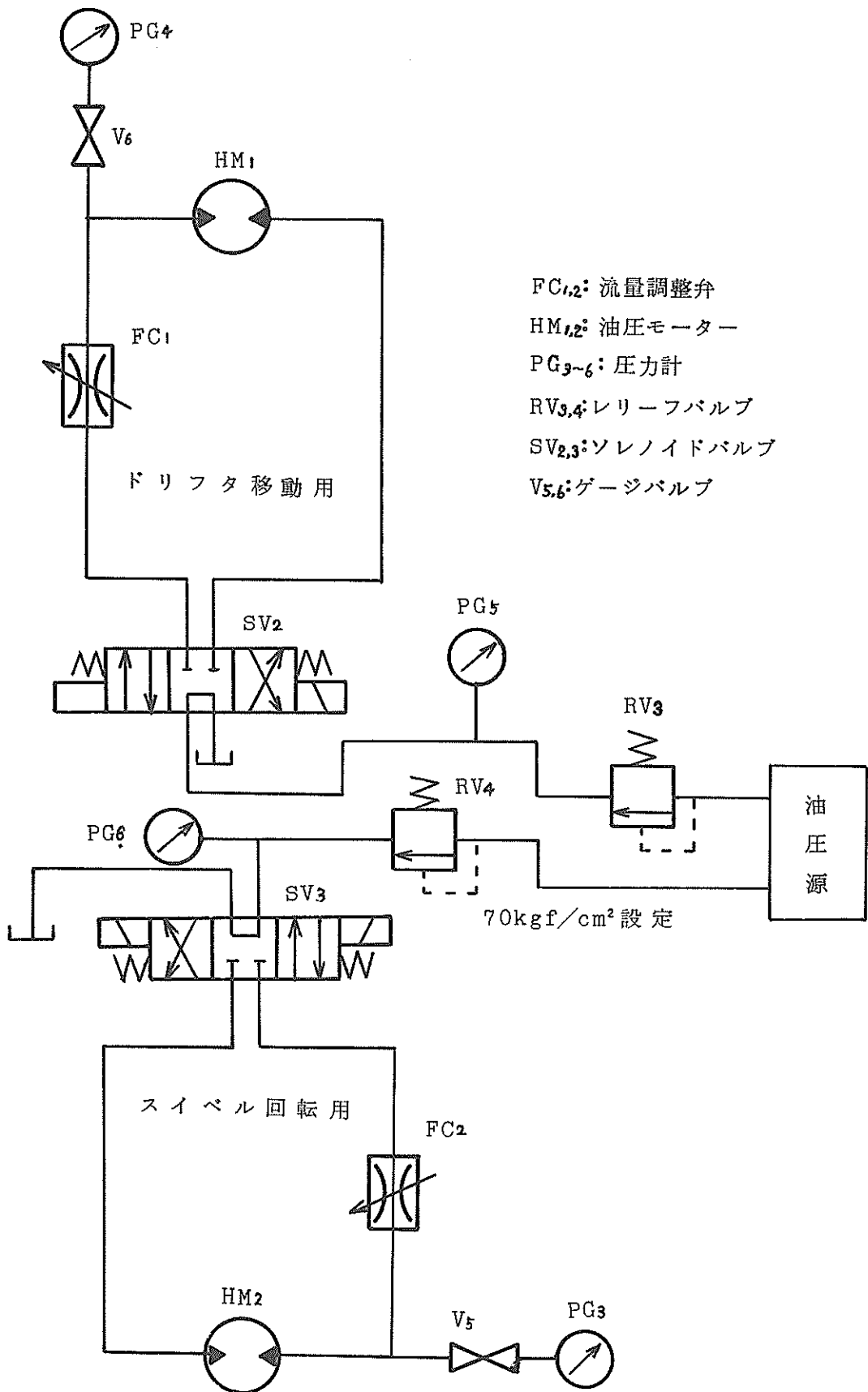


図-2 水ジェット併用さく岩機油圧回路

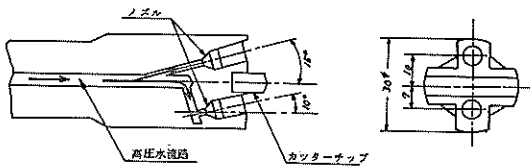


図-3 水ジェット併用さく岩機用ビットへのノズル取付寸法

に示す。この装置におけるビット回転数は図-2中の流量調整弁FC-2により、掘進速度は流量調整弁FC-1によってそれぞれ制御できる。油圧源は、図-1の高圧モータに接続したベンポンプである。この装置によれば、2つの水ジェットによって掘削しつつビットに回転や掘進力を与えるので、その時に掘削溝底部に応力集中が生じることになり³⁾、容易にビット径までせん孔される。したがって空気式打撃型さく岩機と比べると、トルクと掘進力が小さくてすむことが期待できる。また通常のさく岩機は、圧縮空気を利用してビットを回転しながら打撃するので、騒音がひどくビットが摩耗しやすいのに対し、この装置は、ビットの回転と掘進を油圧ポンプによって油圧駆動しているので作動が滑らかであるばかりでなく、ビットの摩耗が軽減されるなどの利点がある。

2.5 実験方法

(1) 単一水ジェットによる水中および空中での掘削実験

水中および空中での掘削能力の差は同一条件で比較しなければならないので、試料を小形タンク内に設置し満水まで注水後、ノズル径、水ジェット圧力、ノズル横移動速度、ノズル試料間距離などの実験条件を適当に変えながらまず水中掘削実験を行ない、水中掘削実験終了後ただちにタンク内の水を排水して同一の実験条件で空中掘削実験を行なった。空中掘削実験終了後、試料をタンク内から出して掘削能力を表わす指標としての掘削深さを測定した。なお実験条件のうちノズル横移動速度は、試料の入ったタンクを台車の上に載せ、その台車を移動させた時の移動速度とした。

(2) 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験

写真-1に示した同じ大きさの小形ノズル2個をさく岩機用ビットに取り付けてビット試料間距離10mmに固定し、ノズル径、水ジェット圧力、ビット横移動速度、ビット回転数などの実験条件を適当に変えながら単一水ジェットによる水中および空中での掘削実験と同様の要領で掘削実験を行なった。掘削実験終了後、掘削能力を表わす指標として掘削深さを測定した。

(3) 水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験

ビット試料間距離はほとんど零とし、ノズル径、水ジェット圧力、ビット回転数、設定せん孔速度などの実験条件を適当に変えながら、1分間のせん孔実験を行った。ただし試料を1分間で貫通すると予想された場合は、貫通を避けるためせん孔時間は1分以内とした。せん孔実験終了後、せん孔能力を表わす指標としてのせん孔速度を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 単一水ジェットによる水中および空中での掘削

水中および空中における水ジェットの掘削能力についていままで検討された例が少ないので、まず、ノズル径、水ジェット圧力、ノズル横移動速度、ノズル試料間距離などの実験条件を変えて、同一実験条件における水中掘削および空中掘削の掘削能力の差について調べた。

従来の水ジェットによる掘削は、おもに陸上土木工事への応用が考えられてきたので、今までに発表されたデータは空中での実験結果が大部分である。港研で過去に発表された超高圧水ジェットによる岩盤掘削⁴⁾も空中で実施したものである。水ジェットの特性は、水中で噴射した場合と空中で噴射した場合とは変わってくる。水中および空中での超高圧水ジェットの特性についての解析と実験結果はまだ発表されていないが、いままでの水中および空中での低圧水ジェットの特性の差をまとめればつぎのようになる。

水中における水ジェットには、ノズル径の6倍から10倍の長さの初期区が存在し、さらに無次元数で整理される主要区が存在する⁵⁾。つまり、掘削能力に関連の深い衝突圧力は、ノズル径の6倍から10倍まではノズル出口圧力に等しく、それ以上の距離になると距離の2乗に反比例して減少する。一方、空中における水ジェットは、衝突圧力はノズル径の60倍から100倍まではノズル出口圧力に等しく⁴⁾、それ以上の距離では距離に反比例して減少する。このような特性の差異は水ジェット周辺の流体に基づくのであるが、空中における水ジェットは減衰しにくく、水中における水ジェットは減衰しやすいといえよう。

さて、以上述べてきた水中および空中における低圧水ジェットの特性を考慮に入れながら、超高圧水ジェットによる水中および空中での掘削能力の差異について検討してみた。掘削能力を表わす指標として掘削溝の平均掘削深さをとり、以後、単に掘削深さと呼ぶことにすれば、ノズル横移動速度と掘削深さとの関係は図-4のようになる。この図から、全く同一実験条件での水中掘削および空中掘削による掘削深さの差はほとんどないことがわ

	D_n (mm)	P_n (kgf/cm ²)	H (mm)
○ W	1.5	1720	18
● A	≒	≒	≒
◇ W	1.0	2280	110
◆ A	≒	≒	≒
△ W	0.8	2390	25
▲ A	≒	≒	≒
△ W	≒	≒	50
▲ A	≒	≒	≒

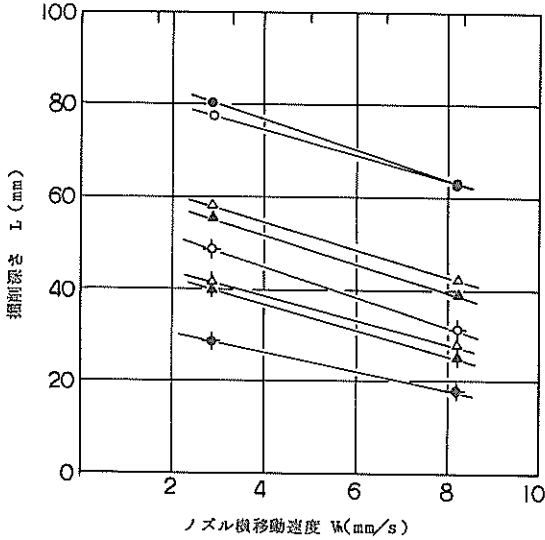


図-4 ノズル横移動速度と掘削深さとの関係

かる。しかし全体としてみると、水中掘削の方が空中掘削よりも掘削深さはわずかに深い。ノズル横移動速度に

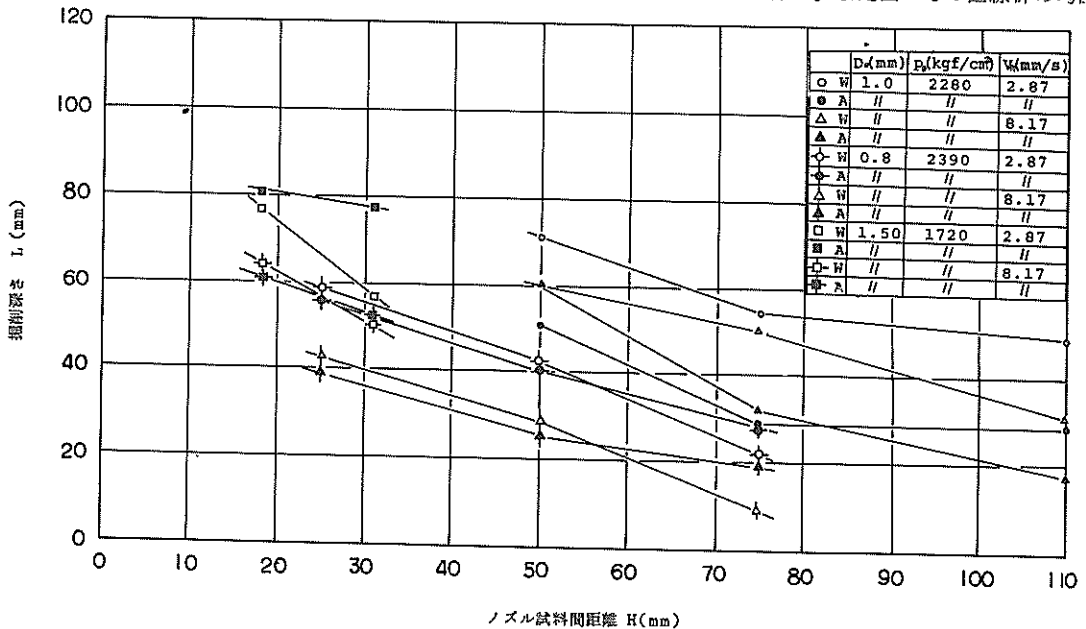


図-5 ノズル試料間距離と掘削深さとの関係

対する掘削深さの変化をみてみると、水中掘削および空中掘削のいずれも掘削深さはノズル横移動速度の増加につれて減少する。今回の実験は、水中における掘削と空中における掘削の掘削能力の差を調べるのがおもな目的であったため2種類のノズル横移動速度で実験したが、花こう岩を対象とした実験から、掘削深さはノズル横移動速度の平方根に反比例する⁴⁾ことが知られている。

つぎに、ノズル試料間距離と掘削深さとの関係を図-5に示す。前述の水中および空中における低圧水ジェットの特長から考えて、ノズル試料間距離が大きくなるにしたがって水ジェットによる掘削能力の差も大きくなると考えられたが、実験結果には明確な差は現れなかった。たとえばノズル径1.0mmのノズルでは、ノズル試料間距離110mmまで水中掘削の方が空中掘削よりも深く掘削されたのに対し、ノズル径0.80mmのノズルでは、ノズル試料間距離が50mm以上になると空中掘削の方が水中掘削よりも深く掘削された。しかしいずれにしても図-5全体から、少なくともノズル径の約10倍以内であれば、水中掘削と空中掘削における掘削能力には大きな差はないといえよう。

参考までに、試料を静止させ60秒間水ジェットを噴射した場合の掘削深さを調べた。ノズルを直結したパイプの剛性が小さかったため、ノズルが左右に振れたりして完全に静止した場合の結果は得られなかったが、その結果を図-6に示す。ノズル横移動のある場合よりも、水中掘削および空中掘削のいずれも同一ノズル試料間距離における掘削深さは深い。また図-6の直線群の勾配が

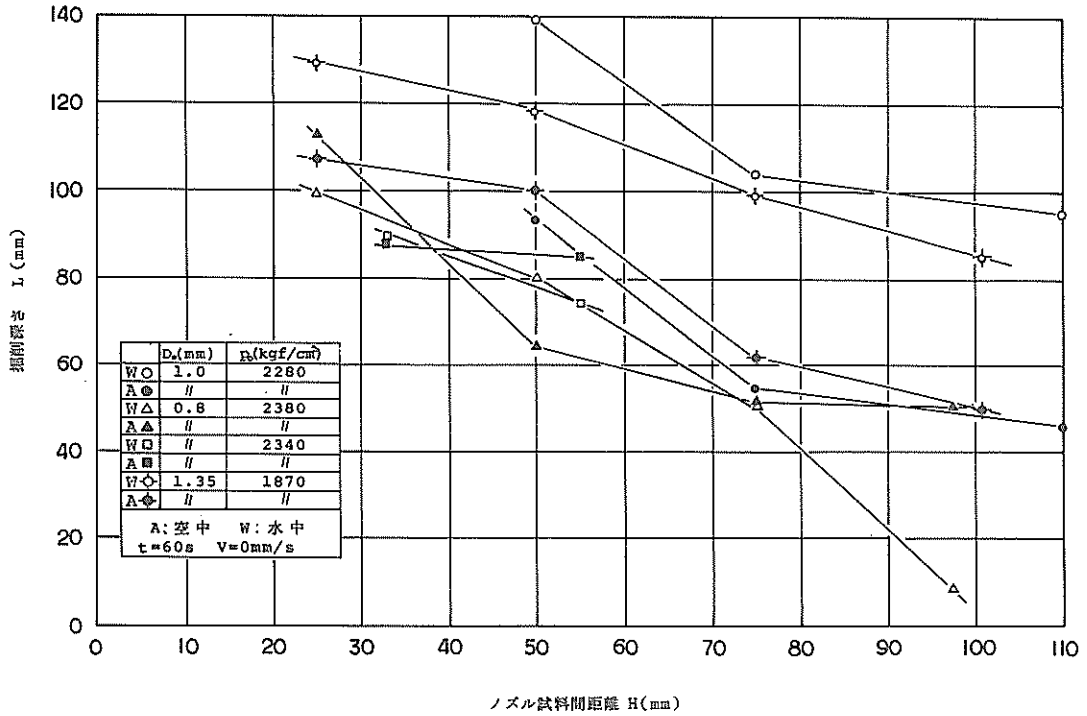


図-6 静止ノズルにおけるノズル試料間距離と掘削深さとの関係

図-5のそれと比べて急であることから、ノズル横移動のある場合よりも掘削深さに対するノズル試料間距離の影響が大きいことがわかる。60秒の噴射では、花こう岩が数十秒で飽和する⁴⁾ことから考えて掘削深さは飽和していると考えられるので、図-6の結果は限界に近い値であるといえよう。

以上述べてきた一連の実験結果から、水中掘削と空中掘削による掘削能力にはほとんど差がないことが明らかとなったので、掘削深さに関する実験式を求めてみた。過去に、花こう岩を対象とした空中における超高压水ジェットによる岩盤掘削実験⁴⁾の結果からつぎのような実験式が提案されている。

$$L = \frac{1}{6} \left(\frac{p_0}{\sigma_0} - 0.5 \right) D_0^2 \left(\frac{V_0}{V_n} \right)^{0.5} \left(\frac{D_0}{H} \right)^{0.4} N^{0.7} \quad (1)$$

ただし各変数の名称と単位は

- L : 掘削深さ (mm)
- p_0 : 水ジェット圧力 (kgf/cm²)
- σ_0 : 試料圧縮強度 (kgf/cm²)
- D_0 : ノズル径 (mm)
- V_0 : 水ジェットのノズル出口流速 (m/s)
- V_n : ノズル横移動速度 (mm/s)
- H : ノズル試料間距離 (mm)
- N : 掘削回数 (-)

である。本報告での掘削実験の試料はモルタルのみであるが、(1)式において定数1/6を除いて、かつ $N=1$ とした場合の右辺と掘削深さの実験結果を両対数方眼紙にプロットすれば図-7のようになる。すると(1)式の定数1/6は1/20と置き換えられて本報告での掘削実験結果は

$$L = \frac{1}{20} \left(\frac{p_0}{\sigma_0} - 0.5 \right) D_0^2 \left(\frac{V_0}{V_n} \right)^{0.5} \left(\frac{D_0}{H} \right)^{0.4} \quad (2)$$

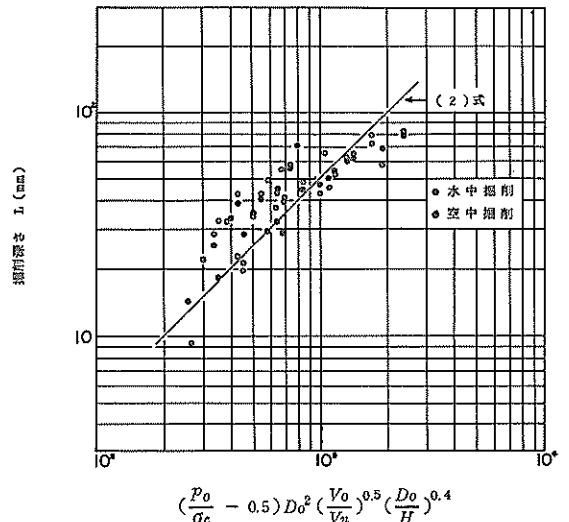


図-7 掘削深さにおける実験式と実験結果との関係

でまとめられる。ただし(2)式における右辺の定数が花こう岩の場合と比べて小さくなっているが、モルタルの圧縮強度は花こう岩のそれよりも小さいので(2)式における圧力項は大きくなり、モルタルの方が花こう岩よりも掘削される傾向となる。(2)式をもとにしてある水ジェットエネルギーでの最大掘削深さを求めるための条件を求めると

$$p_0 = 1.5 \sigma_0 \quad (3)$$

となる⁴⁾。すなわち、モルタルの圧縮強度の1.5倍の圧力で掘削するとともに効率的となり、そのときの掘削深さは(2)式における圧力項の値を1.0とすれば求められ

る。なおノズル径は、水ジェットエネルギーと圧力および流量の関係から決定できる。

最後に、掘削深さと水馬力の関係を実際の実験結果に基づいて検討してみた。モルタルあるいはコンクリートを対象とした水ジェットによる掘削実験としては、本報告における300PS程度での水中および空中での掘削実験のほか、大馬力の掘削実験として昭和52年度に港研で行った1000PS程度での空中実験¹⁾、ならびに、昭和53年度に第四港湾建設局で行なわれた2000PS程度での水中掘削実験²⁾がある。それらの結果の一覧表を表-3に示す。写真-3、写真-4および写真-5は、第四港湾

表-3 単一水ジェットによる水中および空中での掘削実験結果一覧表^{1,2)}

実験場所 および年度	ノズル径 D_0 (mm)	実験状態	水ジェット圧力 p_0 (kgf/cm ²)	流 量 Q (ℓ/min)	馬 力 P_w (PS)	ノズル試料 間 距 離 H (mm)	ノズル横 移動速度 V_n (mm/s)	掘 削 深 さ L (mm)
港 研 屋 内 (昭和 53年 度)	0.80	水中	2,390	20.0	106.2	25	2.87	58.4
	"	空中	"	"	"	"	"	56.1
	"	水中	"	"	"	"	8.17	42.5
	"	空中	"	"	"	"	"	39.1
	"	水中	"	"	"	50	2.87	41.4
	"	空中	"	"	"	"	"	40.6
	"	水中	"	"	"	"	8.17	28.6
	"	空中	"	"	"	"	"	25.0
	1.00	水中	2,280	26.67	135.1	110	2.87	49.1
	"	空中	"	"	"	"	"	28.7
	"	水中	"	"	"	"	8.17	32.0
	"	空中	"	"	"	"	"	18.0
	1.50	水中	1,720	30.0	114.7	18	2.87	77.1
	"	空中	"	"	"	"	"	80.7
	"	水中	"	"	"	"	8.17	64.1
	"	空中	"	"	"	"	"	63.6
港 研 屋 外 (昭和 52年 度)	7.80	空中	380	782	661	40	2.88	137.3
	"	"	370	772	622	"	"	176.4
	"	"	470	870	894	"	"	175.3
	"	"	490	888	968	"	"	222.7
	"	"	350	751	584	"	"	175.3
	"	"	300	695	464	"	"	126.2
	"	"	290	683	441	"	"	123.4
同鉄筋 上入料	7.80	空中	470	870	909	"	"	157.9
	"	"	480	879	938	"	1.44	301.2
四 建 屋 外 (昭和 53年 度)	1.25	水中	420	2,113	1,972	50	2.8	700
	"	"	"	"	"	"	4.2	575
	"	"	"	"	"	"	静止	720
	"	"	"	"	"	"	"	600
	"	"	"	"	"	"	"	650

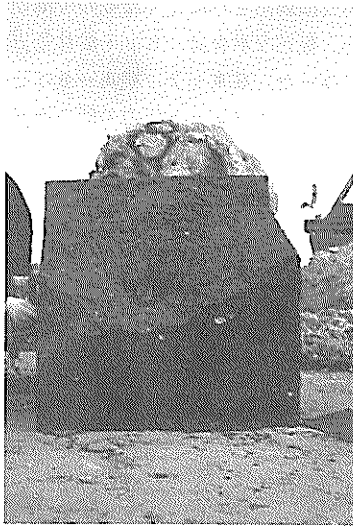


写真-3 掘削実験後の試料 (1)

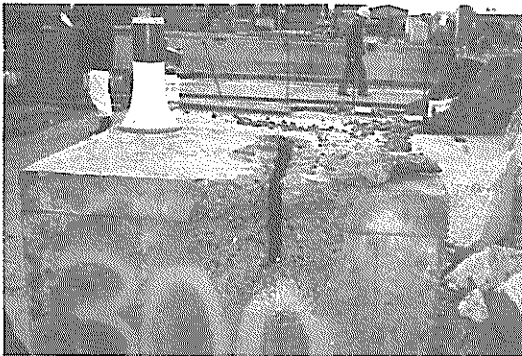


写真-4 掘削実験後の試料 (2)



写真-5 掘削実験後の試料 (3)

建設局で行われた掘削実験での掘削後の試料である。これら以上の結果を横軸に水馬力を取り、たて軸に掘削深さをとって示したものが図-8である。ただし水ジェット圧力以外の実験条件、すなわちノズル試料間距離、ノ

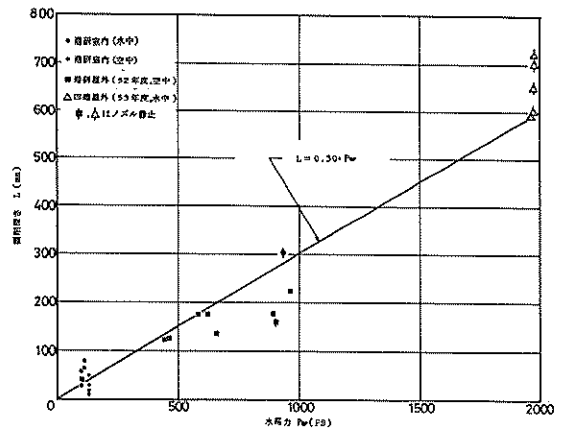


図-8 水馬力と掘削深さとの関係

ズル横移動速度などが極端に異なっていなかったので掘削実験の結果はいずれもほぼ同様に扱えるとして図中に示した。この結果から、掘削深さ L は水馬力 P_w に対して $L = 0.30 P_w$ と表わされた。このように2000PSほどの実用馬力レベルにおいても、掘削深さは水馬力に対してほぼ比例関係を保っているということは、今後の水ジェットによるモルタルあるいはコンクリートなどの掘削を考える上で考慮すべき点といえよう。

3.2 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験

海底半無限岩盤に単一水ジェットを噴射した場合、掘削溝はすかし溝となることも予想される。その後、後処理工法としてグラブあるいはカッタなどによる工法を用いることを考えると、グラブあるいはカッタなどの刃先が食込めるだけの掘削幅が必要であろう。単一水ジェットで幅広く掘削するには、大口径ノズルを用いるか、1回の掘削ごとにノズルの位置をずらして何回か繰り返し掘削を行なわなければならない。大口径ノズルを用いると必然的に大馬力にならざるを得ないので、経済性という観点からはあまり得策とはいえない。ノズルの位置をずらすためには、ノズルの保持装置の精度を高め、かつ水中で直視しなければならないなどの問題がある。

これらの問題を解決する方法として、2個のノズルを回転軸から取り付け、回転しながら横移動させて掘削するという方法が考えられる。このようにすると、回転によってノズル横移動速度が大となるので掘削深さは浅くなるが、幅広い掘削溝が得られることとなる。そこで水ジェット併用さく岩機を用いて横移動掘削実験を行なった。写真-6は水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験の様子を示したものである。図-9はノズル径0.95mmを用いた場合の掘削プロフィール例である。掘削実験後

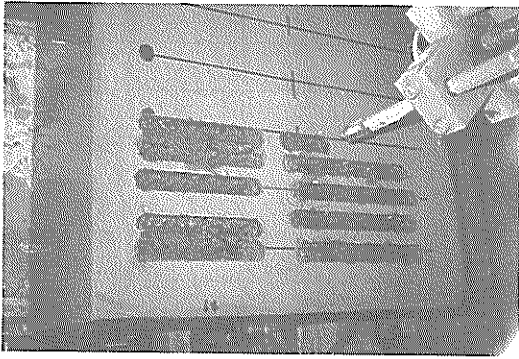


写真-6 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験の様子

きいほど均一に掘削されにくくなるので掘削溝底面は凹凸となった。極端な場合は、ビット横移動方向にら施状の掘削溝が残った。写真-7, 写真-8はその代表的な例である。しかも水ジェット圧力の低いほどその傾向は強かった。一方, 水ジェット圧力が高くてもノズル径が大きい場合では, 流量が2等分しにくいので図-9の掘削断面を見るとわかるように掘削溝の中央部は深く, 掘削溝の左右が浅く掘削された場合があった。なおモルタルの粗骨材は, 図-9や写真-9に見られるように掘削されなかった。ビット回転数と掘削深さとの関係は図-10のようになる。水ジェット圧力の低い場合には掘削深さはビット回転数の影響を受けるようでもあるが, 全体としてみれば掘削深さはビット回転数にほとんど影響され

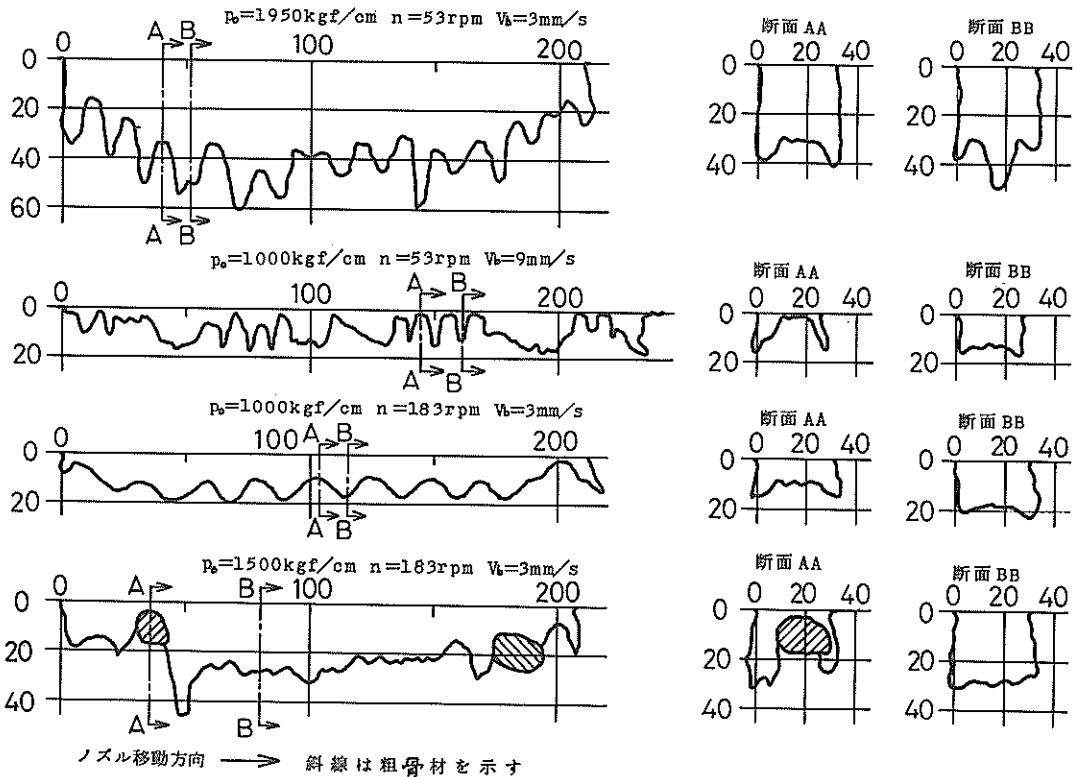


図-9 水ジェット併用さく岩機による掘削プロフィール例

の試料を調べると, 試料表面における掘削溝の幅は実験条件にほとんど関係なく約30mmではほぼビット径に等しく一定であった。このことから掘削溝の幅は, ノズル試料間距離が一定であるならビット径によってほぼ決定されてしまうことがわかる。しかしながら掘削溝内部の形状は, ビット回転数とビット横移動速度によって著しい影響を受けた。すなわちビット回転数が高回転数でビット横移動速度が小さいほど掘削溝は平坦となっていくが, 一方, ビット回転数が低回転数でビット横移動速度が大

ないといえる。ビット回転数は, ある掘削箇所あるいはその近傍を何回繰り返して掘削したかということ, つまり掘削回数を意味する。ビット横移動速度はノズルの回転速度, すなわちノズル横移動速度に比べてきわめて小さいので無視して考えると, ビット回転数はまたノズル横移動速度をも意味する。つまり,

$$N \propto n \quad (4)$$

$$V_n \cong \frac{2\pi n}{60} \times r_n \quad (5)$$

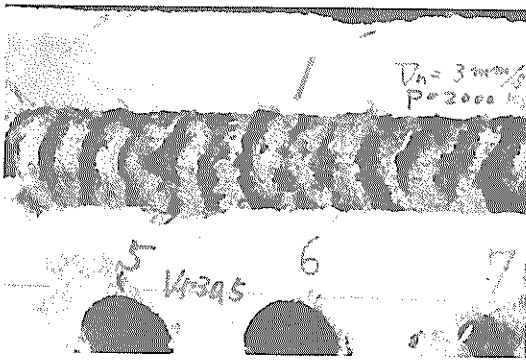


写真-7 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験後の掘削溝 (1)

($p_0 = 2000 \text{ kgf/cm}^2$, $V_b = 9 \text{ mm/s}$,
 $n = 53 \text{ rpm}$)

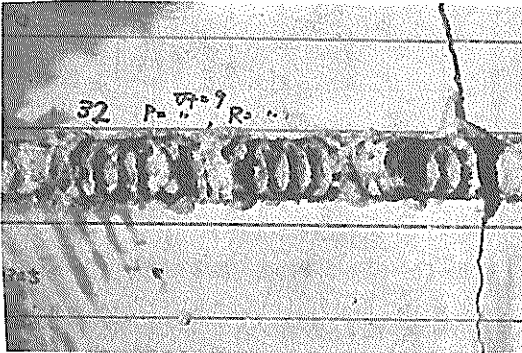


写真-8 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験後の掘削溝 (2)

($p_0 = 1000 \text{ kgf/cm}^2$, $V_b = 9 \text{ mm/s}$,
 $n = 53 \text{ rpm}$)

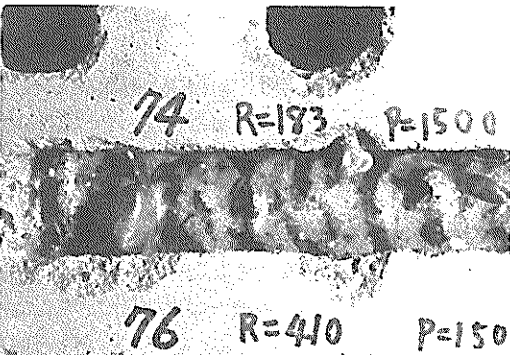


写真-9 水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験後の掘削溝 (3)

($p_0 = 1500 \text{ kgf/cm}^2$, $V_b = 3 \text{ mm/s}$,
 $n = 183 \text{ rpm}$)

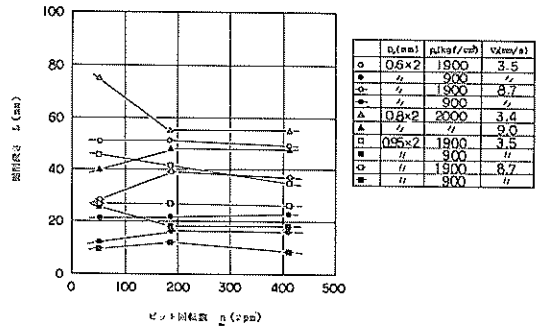


図-10 ビット回転数と掘削深さとの関係

である。ただし各変数の名称と単位は

N : 繰り返し掘削回数 (-)

n : ビット回転数 (rpm)

V_n : ノズル横移動速度 (mm/s)

r_n : ビット回転軸からノズルまでの距離 (mm)

である。(4), (5)式と(1)式から

$$L \propto \left(\frac{1}{V_n}\right)^{0.5} \times N^{0.7} \propto \left(\frac{60}{2\pi n r_n}\right)^{0.5} \times n^{0.7}$$

$$= \left(\frac{60}{2\pi r_n}\right)^{0.5} \times n^{0.2} \quad (6)$$

となるが、図-10は掘削深さがビット回転数 n にほとんど無関係であることを示している。今回の実験のようにノズル横移動速度が非常に大きい場合は、ノズル横移動速度および掘削回数の指数はほとんど等しいであろうと考えられる。一方、掘削深さがビット回転数にほとんど無関係であることについて、エネルギーという点から考えてみる。いまビット横移動方向単位長さ(ここでは1mmを考える)当りの供給水ジェットエネルギー E を考えると、 E は

$$E = \frac{(p_0 \times 10^4) \times \left(\frac{Q}{60} \times 10^{-3}\right)}{V_b} = \frac{p_0 Q}{6V_b} \quad (7)$$

と表わされる。

ただし各変数の名称と単位は

E : ビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギー (kgf・m)

p_0 : 水ジェット圧力 (kgf/cm²)

Q : 流量 (l/min)

V_b : ビット横移動速度 (mm/s)

である。図-10は、ノズル径、水ジェット圧力、ビット横移動速度が一定であれば掘削深さはビット回転数にほとんど関係がないことを示しているのであるが、(7)式

からノズル径、水ジェット圧力、ビット横移動速度が一定であるということは、ビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギーが一定であるということになる。つまり図-10は、ビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギーが一定であるなら掘削深さはビット回転数に依存しないこと、いかえれば、掘削深さはビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギーによって決まるということを示している。したがってこのビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギーと掘削深さは何らかの対応関係があると考えられる。そこでこのビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギーと掘削深さとの関係を求めてみたものが図-11である。馬力によって勾配は異なるようでもあるがはっきりしない。いずれにしても、掘削深さはビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギーに対して単調に増加していくようである。

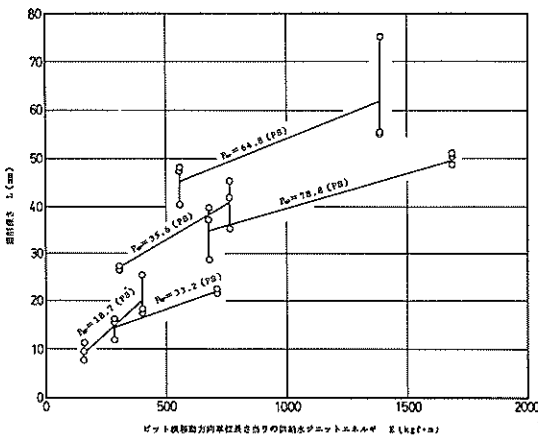


図-11 ビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギーと掘削深さとの関係

水ジェット圧力と掘削深さとの関係は、図-12のようになる。明らかに水ジェット圧力の増加にともないより深く掘削されるようになる。これは単一水ジェットによる掘削と同様な傾向である。単一水ジェットによる掘削

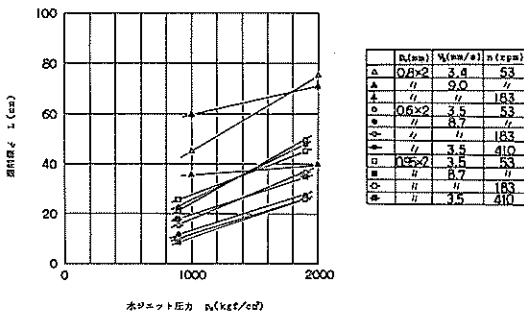


図-12 水ジェット圧力と掘削深さとの関係

では、掘削深さは水ジェット圧力に対して正比例となるが、2個のノズルを用いると流量が均一に二分されにくく、そのために掘削プロフィールが変化し、正比例関係が得られないのであろう。このことは、図-9の掘削プロフィール例から理解されよう。とくに水ジェット圧力が高圧の場合において、2個のノズル径が等しいにもかかわらず掘削溝の中央部がより深く掘削されるのは、高圧の場合にはそれぞれのノズルにおける流量が異なると考えられる。それぞれのノズルにおける流量差を減少させるにはノズルの流路の抵抗を等しくすればよいが、そのためにはノズルの機械加工に工夫が必要であらう。

図-13にビット横移動速度と掘削深さとの関係を示す。

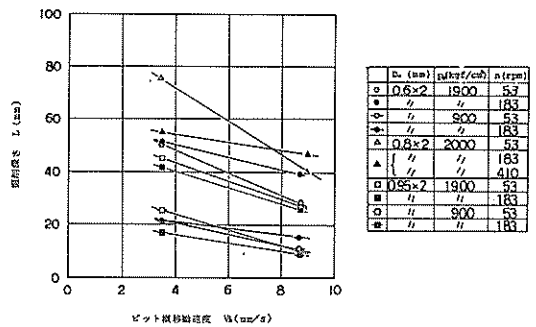


図-13 ビット横移動速度と掘削深さとの関係

ビット横移動速度の増加にともない掘削深さが減少していくことは、単一水ジェットによる掘削の場合と同様である。ビット横移動速度に対してビット回転数が相対的に低いと掘削溝は浅くなるばかりでなく、掘削溝底面も凹凸状になる傾向がある。したがって平坦に掘削するためには、ビット横移動速度が大きい場合ほどビット回転数を高くする必要がある。

3.3 水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験

港湾工事では、岩盤や海洋構造物などにせん孔作業する必要が生じる場合がある。気象条件や海象条件の悪い場所や場合のせん孔作業では、とくに能率よいせん孔作業ということが望まれる。この能率よいせん孔作業ということを支配するものは、いうまでもなくさく岩機のせん孔速度である。通常のさく岩機は機械力に依存しているために、どうしてもビットの摩耗やせん孔速度という点などから難がある。以上のような難点を同時に解決しようというのが水ジェット併用さく岩機である。すなわち、さく岩機の機械力に加えて、水ジェットによる掘削力、ずり出し作用、潤滑効果などの助けを借りて高せん孔速度を得ると同時に、ビットの摩耗の軽減を図ろうというものである。

せん孔実験にあたり、せん孔方向はずり出しにもっとも厳しい鉛直下向きとした。モニターテレビでせん孔実験中の様子を観察したところ、ビットが試料中に没入してからしばらくは水ジェットの影響が孔より激しく噴出し、せん孔が進むにしたがって噴出する水柱高さは徐々に下がっていった。せん孔後の孔の底に沈殿したずりの厚さは、20 cm以上せん孔した場合で約0.5~1.0 cmであったので、水ジェット併用さく岩機のずり出しは容易であるといえよう。せん孔後の孔の状況を調べたところ、せん孔径は入口で32mmであり、内部ではいくぶん広くせん孔されていた。写真-10 および写真-11 はノズル径 0.9 5mm を用いた場合のせん孔後の試料である。

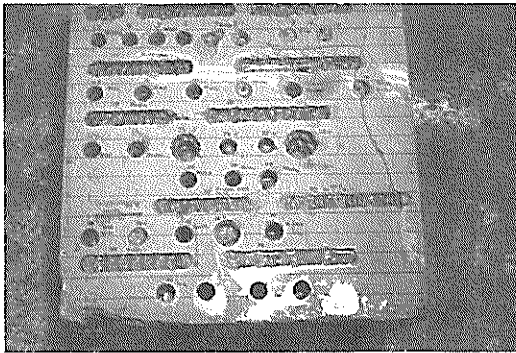


写真-10 水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験後の試料 (1)

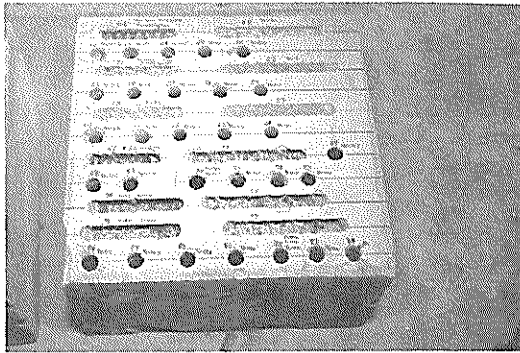


写真-11 水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験後の試料 (2)

ビット回転数と実測せん孔速度との関係をノズル径0.60 mm および0.9 5mm の場合について図-14 および図-15 に示す。図中 v_f は設定せん孔速度を表わし、2.3 で述べた掘進速度のことである。いずれのノズルの場合においても、設定せん孔速度が7.1 cm/min のような低い値であると実測せん孔速度はビット回転数に影響されず、設定せん孔速度、もしくは設定せん孔速度をいくぶん上回った値と

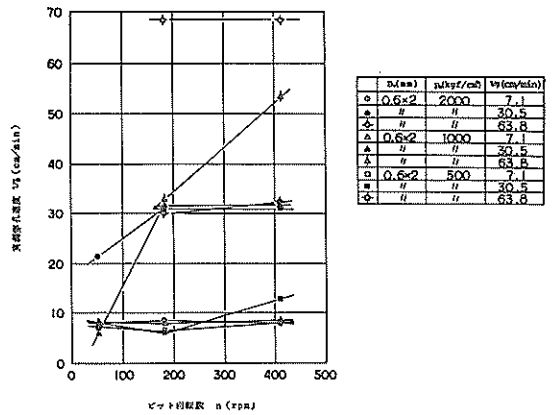


図-14 ビット回転数と実測せん孔速度との関係 (ノズル径 0.60mm)

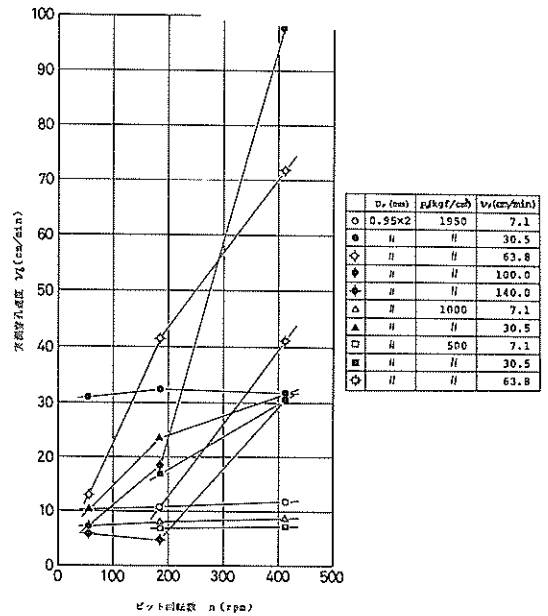


図-15 ビット回転数と実測せん孔速度との関係 (ノズル径 0.9 5mm)

なった。ここで設定せん孔速度以上に実測せん孔速度が大きくなったのは、せん孔実験終了時にビットの掘進と増圧機の運転を停止させた後も、アキュムレータで蓄積された高圧水がノズルから噴出されて孔底の中央部を掘削するからである。設定せん孔速度を徐々に大きくするにつれて設定せん孔速度と実測せん孔速度の差は大きくなる。とくにビット回転数が低い場合にその差は顕著である。これは、駆動用油圧モータトルクが最大6 kgf・m というように低い値に設定してあるために、ビット回転数が低い場合のせん孔実験では、ビットの回転と掘進が停止したりして後退と掘進を数回繰り返さなければならなかったことなどによる。しかしながら、ビット回転数が高くなるに

つれてノズル径 0.6 0mm および 0.95mm のいずれの場合においても実測せん孔速度は設定せん孔速度に収束していく傾向となる。

実測せん孔速度を水ジェット圧力に対して示したものが図-16 および図-17 である。設定せん孔速度が小さければ水ジェット圧力による実測せん孔速度の影響はなく、実測せん孔速度は設定せん孔速度をいくぶん上回った値となる。

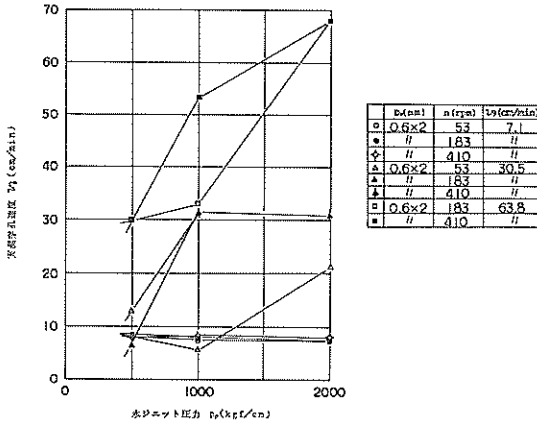


図-16 水ジェット圧力と実測せん孔速度との関係 (ノズル径 0.6 0mm)

しかし設定せん孔速度が大きくなるにつれて実測せん孔速度は水ジェット圧力の影響を受けるようになる。水ジェット圧力は水ジェットの掘削能力に深く関係するので、設定せん孔速度が大きいほど水ジェット圧力に依存するところが大きいことを示している。なお水ジェット圧力が高くなるにつれて実測せん孔速度が設定せん孔速度に収束していく傾向となるのは、ビット回転数と実測せん孔速度との関係と同様である。ただし図-17 中において水ジェット圧力が高圧であっても実測せん孔速度が減少している点は、前述したように油圧モータのトルク不足のために、せん孔実験中、ビットの回転や掘進が停止したことによる。水ジェット併用さく岩機のせん孔過程は、まず水ジェットによって掘削され、同時にカッタチップの回転と掘進力による掘削溝周辺に誘起される応力集中によってビット径までせん孔される。したがって水ジェットによる掘削溝からビット径までせん孔されるためには、その時の水ジェットにおける掘削能力に応じた一定以上のトルクが必要である。この場合、油圧モータのトルクが足りなければビットの回転は停止することになる。実測せん孔速度は、基本的には水ジェットの掘削能力によって支配されると考えられるので、水ジェット圧力が低い場合には設定せん孔速度を小さくすることによって、つまり水ジェットの繰り返し掘削により掘削深さを大きくすることによってビ

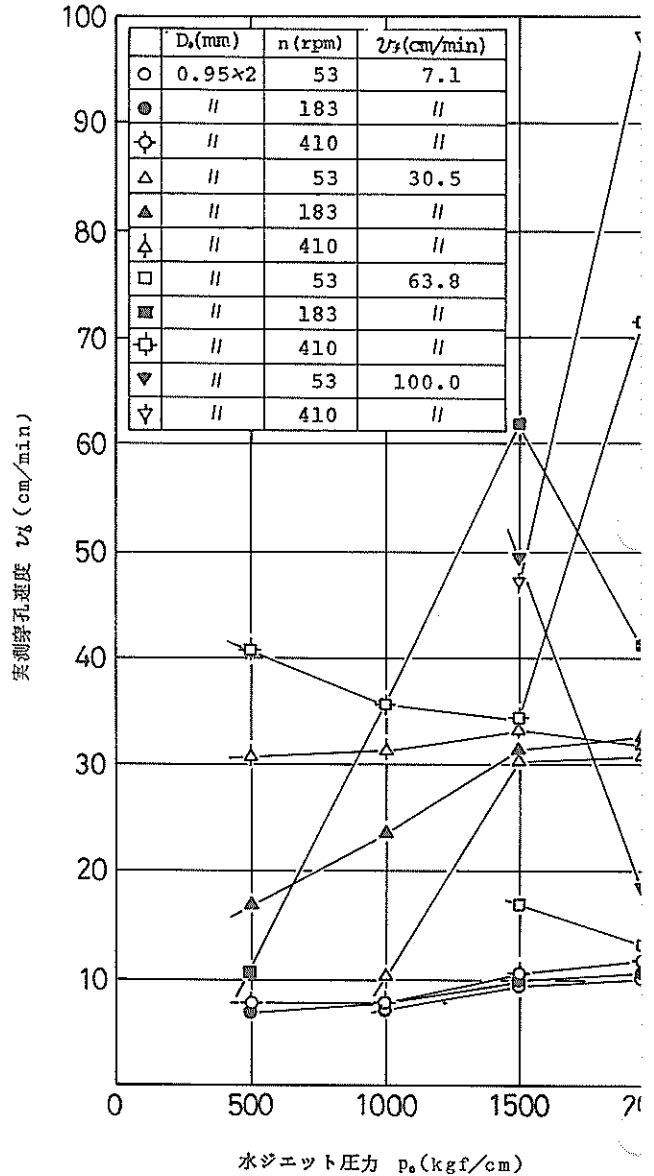


図-17 水ジェット圧力と実測せん孔速度との関係 (ノズル径 0.95mm)

ットの回転によるせん孔が可能になると考えられる。しかしながら、その際、ビットの回転数が低かったり、その時の設定せん孔速度に比べて水ジェット圧力が低ければ、ビットと試料間の摩擦トルクの増大を招き、極端な場合はビットの回転が停止することになると考えられる。すなわち実測せん孔速度は、水ジェットの掘削能力と設定せん孔速度およびビットのトルクの相対的なバランスのもとに決定されると考えられる。したがって水ジェットの掘削能力がじゅうぶんであるならば、そのときの設定せん孔速度におけるビットのせん孔能力に見合うようなトルクを

与えることによって、実測せん孔速度は設定せん孔速度に収束することになると考えられる。

以上のような考えに基づき、ノズル径 0.95mm のせん孔実験結果を横軸に設定せん孔速度、たて軸に実測せん孔速度を取り、水ジェット圧力およびビット回転数をパラメータとして再整理したものが図-18 である。45°の線上に載っていれば、その場合の水ジェットの掘削能力をじゅうぶんに発揮したビット回転数および設定せん孔速度が得られることになる。すなわち水ジェット圧力に対する適当なビット回転数、設定せん孔速度が決定できる。

最後に、一定水馬力を与えた場合、流量と水ジェット圧力のどちらを増大させると実測せん孔速度が増加することになるかを検討した。すなわち大きなせん孔速度を得るためには低圧で大口径ノズルを用いるのがよいか、あるいは高圧で小口径ノズルを用いるのがよいかを検討した。

このことを検討するために、せん孔実験結果の中から効率的であると考えられる実験条件としてビット回転数 $n = 183 \text{rpm}$ 、 410rpm の 2 種類、設定せん孔速度 $v_f = 30.5 \text{cm/min}$ 、 63.8cm/min の 2 種類を選び、ノズル径 0.60mm および 0.95mm のノズルにおけるせん孔実験結果をみかけの最大水馬力に対してプロットしたものが図-19 である。ただしみかけの最大水馬力は次式によって算出した。

$$P_{wmax} = \frac{p_{0max} \cdot Q_{max}}{450} \quad (8)$$

ただし各変数の名称と単位は

P_{wmax} : 最大水馬力 (PS)

p_{0max} : 最大水ジェット圧力 (kgf/cm²)

Q_{max} : 最大流量 (l/min)

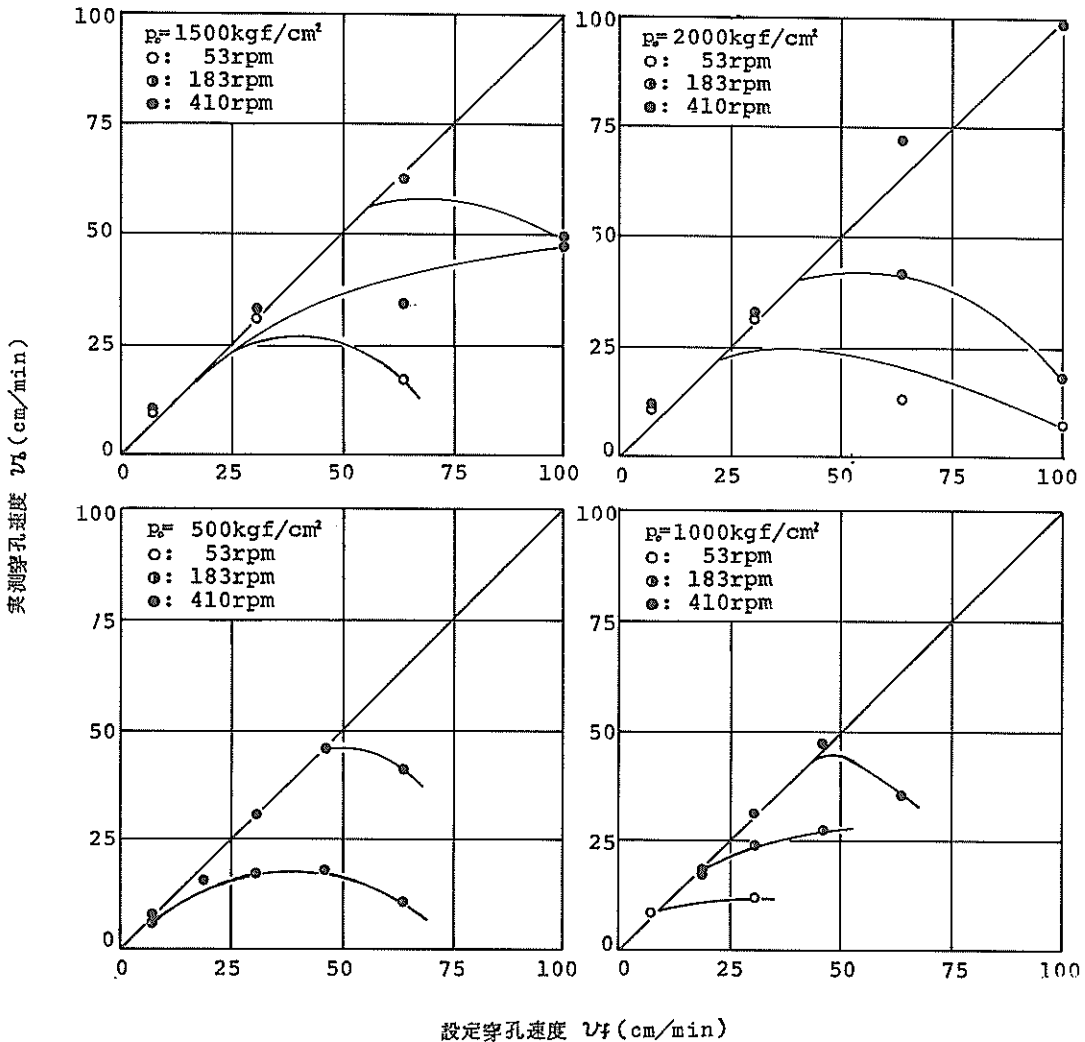


図-18 実験条件と実測せん孔速度との関係

	D_0 (mm)	n (rpm)	V_0 (cm/min)
○	0.6	183	30.5
○	0.95	11	11
●	0.6	11	63.8
●	0.95	11	11
◇	0.6	410	30.5
◇	0.95	11	11
+	0.6	11	63.8
+	0.95	11	11

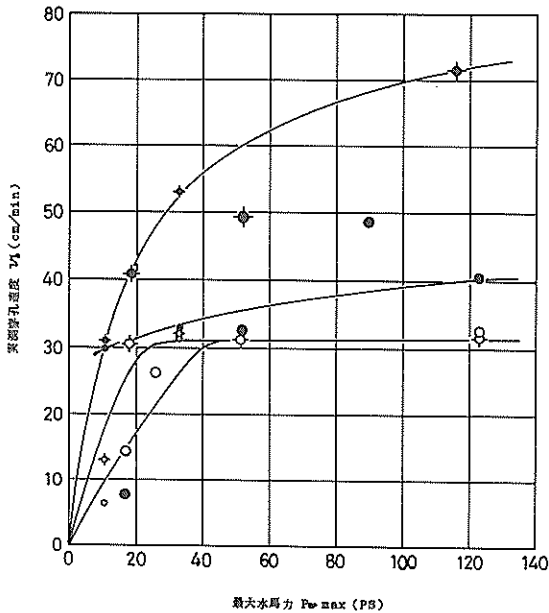


図-19 最大水馬力と実測せん孔速度との関係

この図から、実測せん孔速度はみかけの最大水馬力 $P_{w \max}$ の増大につれて設定せん孔速度に収束していく傾向がみられる。また、実験条件がまったく同じであるならば実測せん孔速度はみかけの最大水馬力 $P_{w \max}$ の影響を受けるが、ノズル径にはほとんど影響されないとはいえよう。ただし水ジェット圧力が極端に低い場合は、必要破壊圧力の考えからこの限りではないといえよう。なお、図中同一実験条件の曲線からきわめて逸脱している点は、せん孔実験中、油圧モータトルクの不足などからビットの回転が停止したものである。

4. 結 論

今回の一連の実験から、つぎのようなことが明らかになった。

単一水ジェットによる水中および空中での掘削実験については

- (1) 水中掘削と空中掘削では、ノズル試料間距離が少なくともノズル径の約10倍以内であれば掘削能力に大きな差はない。
- (2) 今回のモルタルを対象とした掘削実験結果での掘削

深さに関する実験式は、花こう岩における実験式の定数を変えてつぎのように表わされた。

$$L = \frac{1}{20} \left(\frac{P_0}{\sigma_0} - 0.5 \right) D_0^2 \left(\frac{V_0}{V_n} \right)^{0.5} \left(\frac{D_0}{H} \right)^{0.4}$$

またモルタルあるいはコンクリートを対象とした今までの掘削実験結果から、水馬力と掘削深さとの関係は $L = 0.30 P_w$ と表わされた。

水ジェット併用さく岩機による横移動掘削実験については

- (1) 掘削溝底面は、ビット回転数が高かつビット横移動速度が小さいほど平坦となっていく。反面、ビット回転数が低かつビット横移動速度が大きいほど凹凸となっていく。極端な場合は、ビットの横移動方向にら施状の掘削溝が残る。しかも水ジェット圧力の低いほどその傾向は強くなる。
- (2) 掘削深さは、単一水ジェットによる掘削と同様、水ジェット圧力が高かつビット横移動速度が小さいほど深くなる。またある一定ビット回転数以上であれば、掘削深さはその影響を受けない。

水ジェット併用さく岩機によるせん孔実験については

- (1) 実測せん孔速度は、水ジェットの掘削能力と設定せん孔速度およびビットのトルクの相対的なバランスのもとに決定されることが考えられる。したがってある水ジェット圧力のもとでは、ビット回転数が高くなるにつれて実測せん孔速度は設定せん孔速度に収束していく。
- (2) 同一の実験条件であるならば、実測せん孔速度はみかけの最大水馬力の増大とともに設定せん孔速度に収束していく。またその場合、実測せん孔速度はノズル径にほとんど依存しない。ただし水ジェット圧力が極端に低い場合はこの限りでない。

5. あとがき

水ジェットによる掘削法は、まえがきにも述べたとおり広範な利点を持っているが、その掘削法をさく岩機に併用することにより、さく岩機の機械的掘削能力を格段に向上させることができることがわかった。たとえば、今回のモルタルの最大実測せん孔速度は約100 cm/minであったが、これは通常のさく岩機と比べると数倍程度である。水ジェットの併用がいかにその機械的能力を向上させるかがわかる。

したがって、今後とも水ジェットによる掘削法を岩盤しゅんせつはいうに及ばず、他の既存の港湾工用機械あるいは新たな港湾工用機械などにも積極的に応用していきたいと考えている。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、いろいろな御協力をいただいた第二港湾建設局機械課、調査設計事務所、ならびに横須賀港工事事務所の関係者各位に厚く御礼申し上げます。なお第四港湾建設局下関機械整備事務所からは貴重なデータの提供をいただき、ここに厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中島忠男・小岩苔生・岩崎峯夫・石塚浩次・東海林秀幸；高圧水ジェットによる珊瑚礁岩の掘削性について、港湾技術研究所報告17巻3号，1978年，pp. 91~120
- 2) 第四港湾建設局下関機械整備事務所；高圧水ジェットによるサンゴ礁岩の破碎実験について，1979年
- 3) 高木喜内；岩石用ウォータージェットせん孔機の開発，建設の機械化，1976年3月
- 4) 東海林秀幸；超高圧水ジェットによる岩盤掘削，昭和53年度港湾技術研究所講演会講演集，1978年12月，pp. 243~277
- 5) 藤井喜一郎・守口照明・近藤基；高圧の噴流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
- 6) 柳井田勝哉・大橋昭；気中高速噴流特性に関する研究，日本鉱業会誌，Vol. 93，1977年6月，pp. 423~429

記号一覧表

D_0	：	ノズル径 (mm)
E	：	ビット横移動方向単位長さ当りの供給水ジェットエネルギー (kgf·m)
L	：	掘削深さ (mm)
n	：	ビット回転数 (rpm)
N	：	掘削回数 (-)
p_0	：	水ジェット圧力 (kgf/cm ²)
p_{0max}	：	最大水ジェット圧力 (kgf/cm ²)
P_w	：	水馬力 (PS)
P_{wmax}	：	最大水馬力 (PS)
Q	：	流量 (l/min)
Q_{max}	：	最大流量 (l/min)
r_n	：	ビットの回転軸からノズルまでの距離 (mm)
t	：	掘削時間 (s)
v_b	：	実測せん孔速度 (cm/min)
v_f	：	設定せん孔速度 (cm/min)
V_b	：	ビット横移動速度 (mm/s)
V_n	：	ノズル横移動速度 (mm/s)
V_0	：	水ジェット流速 (m/s)
σ_c	：	試料圧縮強度 (kgf/cm ²)

港湾技研資料 No. 327

1979. 9

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 株式会社 東京プリント