

港湾技研資料

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

No. 457 June, 1983

超高圧水ジェット併用カッタによるモルタルの掘削

中 島 忠 男
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. 実験装置概要	3
2.1 超高压水ジェット発生装置	3
2.2 超高压水ジェット併用カッタ	3
2.3 超高压水ジェット併用カッタによる岩盤掘削装置	4
3. 実験概要	6
3.1 試 料	6
3.2 実験内容および実験方法	6
3.3 諸量の測定方法	6
4. 実験結果および考察	10
4.1 掘削後のモルタル試料	10
4.2 諸量間における相互関係	10
4.3 超高压水ジェット併用カッタの掘削能力に対する改善効果	18
5. 結 論	18
6. あとがき	19
参 考 文 献	19
記 号 一 覧 表	19

**Cutting Performance of Rotary Cutter Jointly Equipped with
Super High Pressure Water Jets**

Tadao NAKAJIMA *
Tatsuo TODOROKI **

Synopsis

This paper discusses cutting performance of the cutter jointly equipped with super high pressure water jets for mortar blocks when the parameters such as traversing rate and preset depth of cut were variously changed.

The maximum jet pressure and the maximum flow rate used in the performance were 1900 kgf/cm², 48l/min respectively. Throughout the experiment, actual volume of cut, cutting resistance and relationships among them were mainly investigated.

It is revealed that volume of cut by the cutter has increased about 42% than that by jets alone if only little mechanical power, which corresponds to 0.5% of jets' power, had added to the jets' power.

* Senior Research Engineer, Machinery Division

** Member of the Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

超高压水ジェット併用カッタ によるモルタルの掘削

中 島 忠 男*
轟 達 夫**

要 旨

今までにない試みとして回転式超高压水ジェット併用カッタを考案、試作し、そのカッタを用いてモルタル試料に対する掘削実験を行い、その効果について調べた。その結果、水ジェットの供給エネルギーの0.5倍のカッタ駆動エネルギーを付加した場合に、掘削量は、水ジェット単独の場合と比べて約42%の増加を示し、水ジェットエネルギーにわずかの機械エネルギーを付加するだけで水ジェットの掘削能力は大幅に改善されることが確かめられた。

1. まえがき

当所では、従来からの発破工法や重錘、ポンプ船のカッタなどの機械的な岩盤掘削工法に代わり得る新しい安全かつ効率的な岩盤掘削工法の開発という時代的要請のもとに、水ジェットによる岩盤掘削法の研究を進めている。

当所では過去において、圧力40 kgf/cm²程度、流量625 l/minの低圧水ジェットによるモルタルの掘削実験^{1)~3)}、圧力3,000 kgf/cm²前後、流量24 l/minの超高压水ジェットによる花こう岩の掘削実験⁴⁾、並びに圧力450 kgf/cm²、流量1,000 l/minの大馬力水ジェットによるさんご礁岩の掘削実験⁵⁾などを実施してきた。

これらの実験は、いずれも水ジェット単独によるものであるが、水ジェット単独による掘削法では、破碎に使われるエネルギーの効率は低いといわれており、そのために、これらの実験に用いられてきた水ジェットは、必然的に高压化および大馬力化の傾向をとってきた。

一方、従来の機械的な掘削法では、破碎に使われるエネルギーの効率という点では水ジェット単独による掘削法と比べて良いが、装置の故障や耐摩耗性の点で難がある。

したがって、当所では去る昭和54年には両者の長所および短所を相補う形で、さく岩機用ビットと超高压水ジェットを併用してモルタルの穿孔実験⁶⁾を行い、水ジェットを併用することによって穿孔能力が向上することを確認している。このように水ジェットと何らかの機械的方法を併用していくことは、今後、水ジェットによる岩盤掘削法を実用化していく上での採るべき1つの方法

と考えられる。

そこで、今回超高压水ジェット併用カッタを試作し、それを用いてモルタルの掘削実験を行い、その効果について調べた。

2. 実験装置概要

実験装置は、主として超高压水ジェット発生装置および岩盤掘削装置とから構成される。岩盤掘削装置は、前回の穿孔実験に用いた超高压水ジェット併用さく岩機を改造したものであり、この装置には新たに製作した超高压水ジェット併用カッタを取り付けた。

2.1 超高压水ジェット発生装置

超高压水ジェットの発生装置は、複動式増圧機といわれるプランジャータイプのもので、左右どちらにピストンが移動しても連続的に超高压水を発生させることができる。表-1は、その仕様を示す。

表-1 増圧機的主要仕様

最大圧力	2000 kgf/cm ²
最大流量	48 l/min
最大消費馬力	300 PS
増圧比	10 : 1
駆動方式	油圧駆動

2.2 超高压水ジェット併用カッタ

このカッタは、前回の超高压水ジェット併用さく岩機用ビットによる穿孔実験に用いたビットからヒントを得て、ポンプ式浚渫船のカッタをイメージに描いて試作したものである。

* 機材部 主任研究官

** 機材部 作業船研究室

図-1に、その形状および寸法を示す。並びに写真-1に、その外観を示す。図-1に示すようにこのカッタは、カッタ中心線に対して10°、30°および45°と角度が異なりかつ位置も異なる3個のノズル取付穴を有している。掘削実験の条件に応じて、写真-2に示すような小形ノズルが任意の取付位置および個数に取り付けられるようになっている。刃数はカッタの大きさに基づく制約から2枚とし、またカッタ刃のすくい角は15°、ねじれ角は5°である。掘削実験において試料に当たるカッタ刃の前面は、耐磨耗性を向上させるために超硬合金（タングステンカーバイト）のカッタチップが付いている。なお、

このカッタ自体の材質は、SCM3である。

2.3 超高压水ジェット併用カッタによる岩盤掘削装置

この装置は、超高压水ジェット併用さく岩機を今回の掘削実験用に改造したものである。おもな改造点は、カッタを回転させるための油圧モータの出力の増強、並びに構成部材の堅ろう化を図り、カッタロッドの中心線と水平線とのなす角が40°となるように装置全体を傾けたことである。図-2および写真-3は、その形状および外観である。

2.1で述べた複動式増圧機によって発生された超高压水は、ステンレス製高压パイプを介してユニバーサルジ

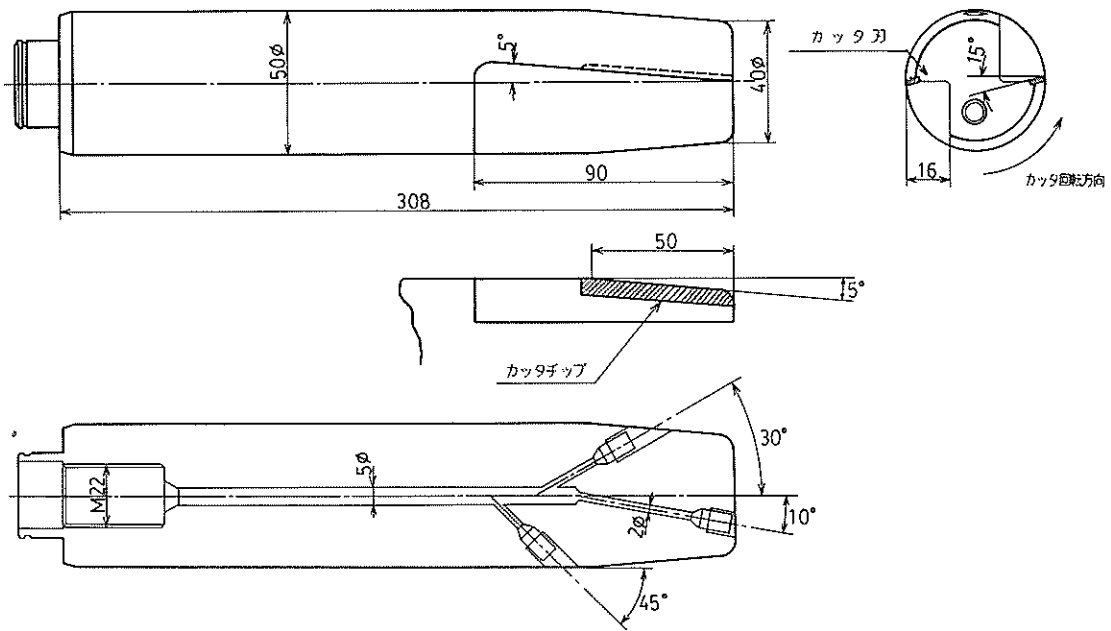


図-1：超高压水ジェット併用カッタの形状および寸法

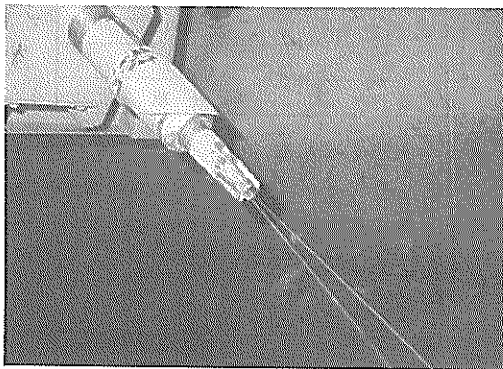


写真-1：超高压水ジェット併用カッタの外観

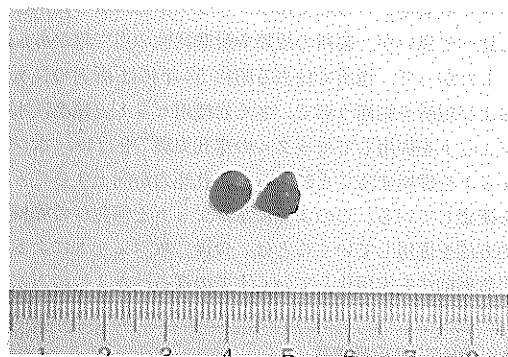


写真-2：小形ノズル

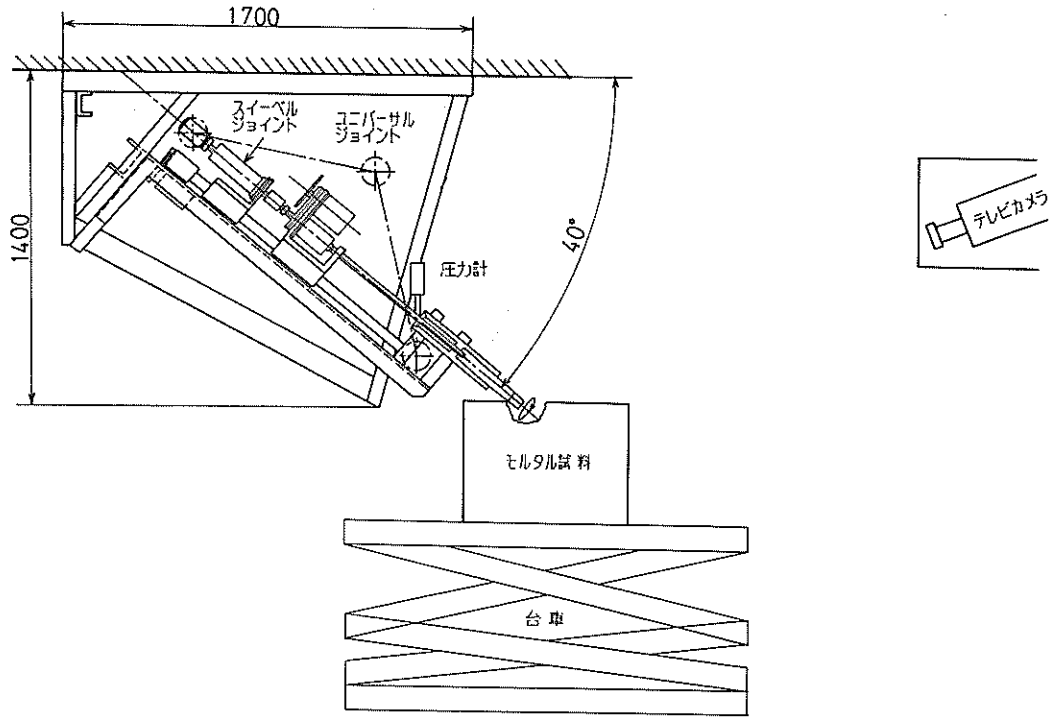


図-2：超高压水ジェット併用カッタによる岩盤掘削装置



写真-3：超高压水ジェット併用カッタによる岩盤掘削装置

ョイント、スィーベルジョイントおよびロッドを経て、ロッド先端に取り付けられている超高压水ジェット併用カッタへと導かれる。超高压水ジェット併用カッタまで導かれた超高压水は、複数のノズルによって超高压水ジェットに変換させられる。またロッドは、ギアを介して油圧モータに連結されており油圧モータにより回転させられる。そして、ロッドの回転数は油量調製弁により制

御される。

この装置は、以上のようにして得られた超高压水ジェットによる掘削力と超高压水ジェット併用カッタの回転力によって、試料を連続的に効率よく掘削しようというものである。ただし、この装置の駆動馬力は1PS程度であるので水ジェットを使用しないでこの装置単独によって試料を掘削することはほとんど不可能である。

この装置の単独水ジェットによる掘削法と比べた場合の利点としては、上記の掘削能力の改善の他に、

- 1) 水ジェット単独による掘削法におけるノズルと試料間距離の設定の問題を解消できる。
- 2) 単位体積当たりの掘削に必要なエネルギーを低減できる。
- 3) 掘削面が広く回転式なので水ジェット単独による掘削法と比べて水ジェットの逆流や衝突をかなり回避できる。
- 4) 回転式なのでカッタによるずり出しが容易である。
- 5) 水ジェット併用なのでカッタの摩耗が軽減できる。などがあげられる。

表-2は、この装置のおもな仕様である。

表-2 超高压水ジェット併用カッタによる
岩盤掘削装置の主な仕様

型 式	JDS - 500
水ジェット圧力	max 2000 kgf/cm ²
流 量	max 48 l/min
カッタトルク	max 25 kgf-m
カッタ回転数	max 315 rpm
カッタストローク	約 140 mm

3. 実験概要

3.1 試 料

掘削実験に用いた試料は、縦0.70m、横0.70m、高さ0.40mのモルタルブロックである。このモルタルブロック試料のおもな仕様を表-3に示す。

表-3 モルタル試料の仕様

セメント：砂	1 : 2
水セメント比	44.2 %
圧縮強度	174 kgf/cm ²
静的ヤング率	1.81×10^5 kgf/cm ²
ポアソン比	0.21
弾性波速度	3381 m/s

3.2 実験内容および実験方法

実験に当たっては、図-1のカッタにおける取付穴のうち、予備的な掘削実験においてもっとも効率的な掘削を示したところのロッド中心線に対する角度が10°および30°のものを2個使用し、残りの45°のものについてはプラグをして次のように行った。

図-2および写真-4に示すように移動台車上にモルタルブロック試料を載せ、表-4に示す実験条件一覧表の中から所定の実験条件を選び出して設定した後、台車を横移動させる。そして、カッタを回転させつつ、超高压水ジェットを噴射させる。すると超高压水ジェットは、モルタル試料面に対して図-3に示すようなトロコイド曲線を描きながらモルタル試料を掘削していくことになる。同時に、モルタル試料はカッタの回転力によっても掘削されていく。この掘削実験中、水ジェット圧力、カッタ回転数並びにカッタ先端にかかる水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクはペンレコーダに連続的に記録される。掘削実験終了後、試料側面にアクリル板を当てがい、粘土で水がもれないようにした上で、あらかじめメスシリングで測定してあった水を掘削箇所へ流し込めば、その量から所定の実験条件に対する掘削体積が得られる。なお、これまでの水ジェット単独による掘

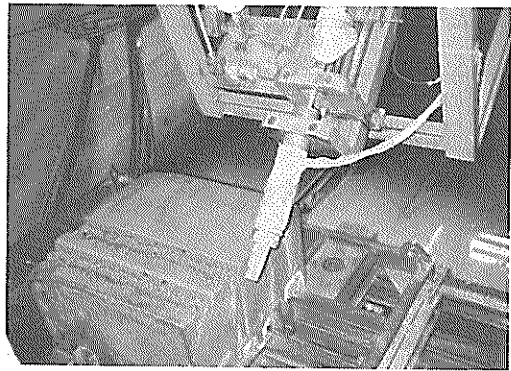


写真-4 超高压水ジェット併用カッタによる
モルタルブロックの掘削実験の様子

表-4 実験条件一覧表

水ジェット圧力	max 1900 kgf/cm ²
カッタ移動速度	3.99 ~ 14.49 mm/s
カッタ回転数	65 rpm
掘削厚	0, 5, 10, 15, 20, 25 mm
ノズル径	0.8 mm

削実験では、線の掘削であることからほとんどの場合水ジェットの掘削能力を掘削深さによって評価してきた。これに対し、今回の掘削実験では、面的掘削であることから掘削能力を掘削体積によって評価することにした。

3.3 諸量の測定方法

掘削実験中のカッタの先端には、横移動方向から受ける水平反力、鉛直方向から受ける鉛直反力、ロッドの長手方向から受けるスラスト反力が働く。これらは、次のようにして測定した。

図-4に示すように、カッタを支持する外筒部に水平反力、鉛直反力およびスラスト反力それぞれの測定用のひずみゲージを向かい合わせに接着し、コードを介して動ひずみ計およびペンレコーダへと導けば、これらのひずみはペンレコーダに連続的に記録される。これらの測定ひずみから、まず水平反力および鉛直反力は次のようにして求められる。

いまカッタの先端にかかる水平反力を R_h (R_h は図-4においては紙面に垂直)、水平反力測定用ひずみゲージの接着箇所を外筒の端からの長さを L_3 、所定の実験条件に対するカッタの外筒からの突き出し長さを L_1 、並びに外筒の支持台からの突き出し長さを L_2 とすれば、水平反力測定用のひずみゲージの位置に生ずる曲げモーメント M は

$$M = R_h (L_1 + L_3) \quad (1)$$

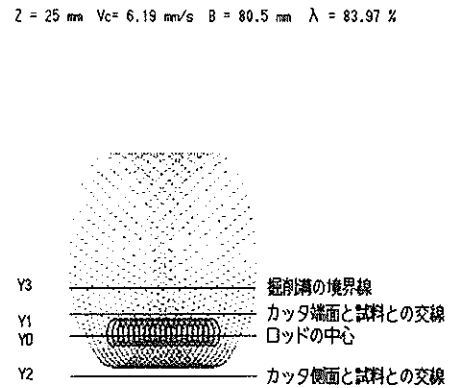
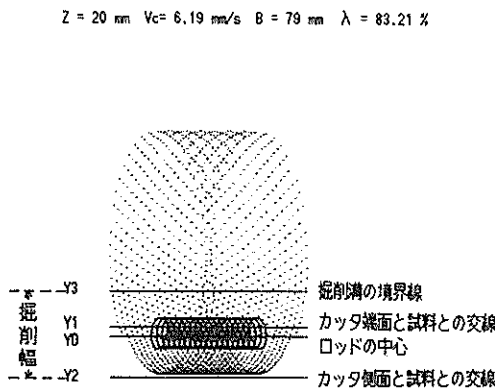
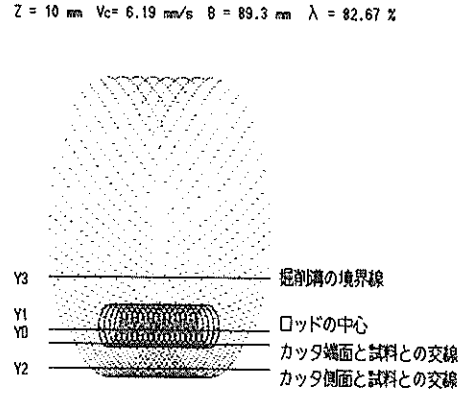
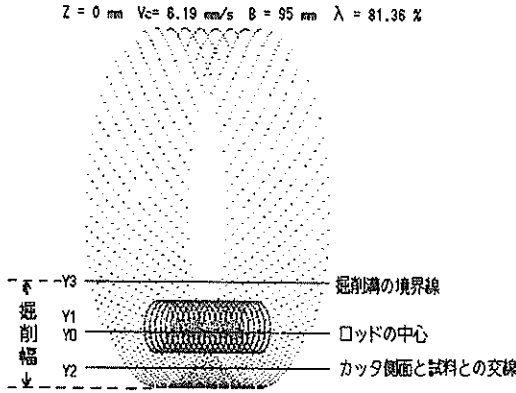


図-3：超高压水ジェット併用カッタによる水ジェットの掘削パターン

である。一方、材料力学における応力とひずみの関係から、

$$\sigma = E \varepsilon$$

であるので、これを次のように変形して(1)式を代入すると、

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M}{E Z_m} = \frac{R_h (L_1 + L_3)}{E Z_m} \quad (2)$$

と表される。したがって、

$$R_h = \frac{E Z_m}{L_1 + L_3} \cdot \varepsilon \quad (3)$$

として水平反力 R_h が求められることになる。

ただし σ : 曲げ応力

E : 縦弾性係数

ε : ひずみ

Z_m : 外筒の断面係数

ここで、(3)式のひずみ ε には、ペンレコーダの記録から得たひずみ ε_R を求め、4ゲージ法による測定であるのでその $\varepsilon_R/4$ を代入してやれば、水平反力 R_h が求められることになる。なお鉛直反力 R_v についても、ひずみゲージの外筒の端からの長さ L_3 が同じであるので、水平反力 R_h と同様に(3)式によって算出することができる。

スラスト反力は、スラスト反力を R_{th} とすれば、

$$\sigma = \frac{R_{th}}{S} = E \varepsilon$$

の関係から

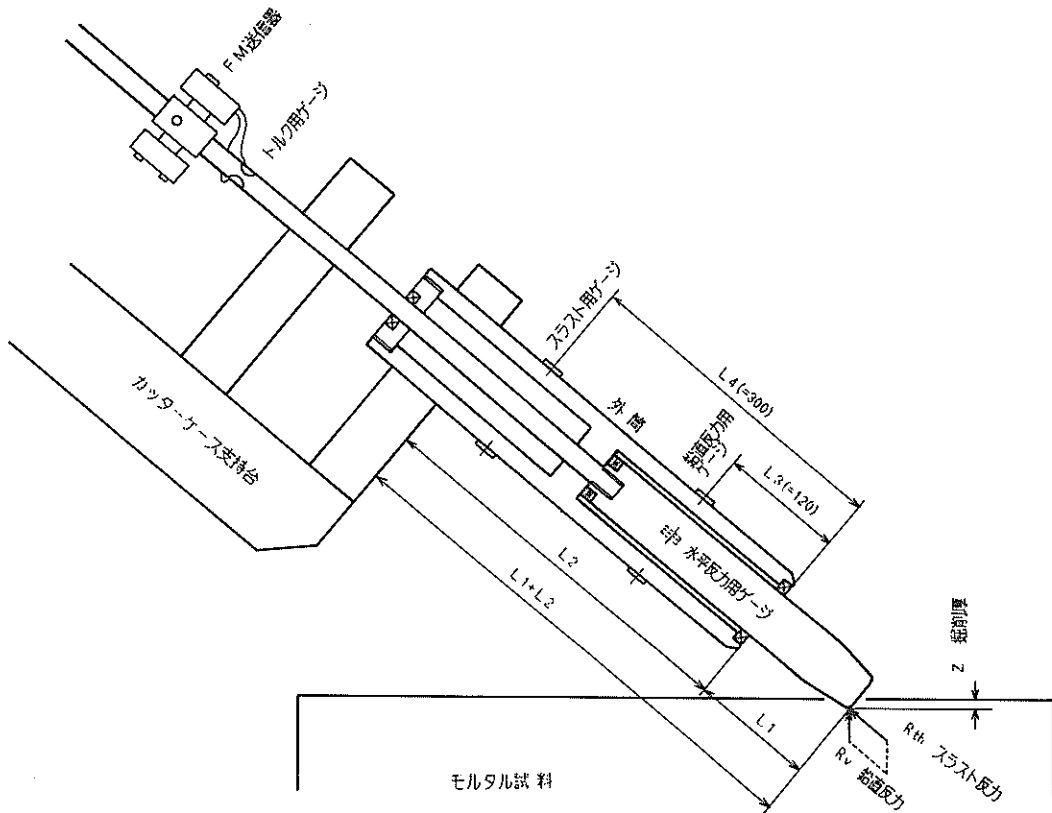


図-4：反力およびトルクの測定法

$$R_{ik} = S E \epsilon$$

(4)

$$T = 2 G Z_p \cdot \epsilon$$

(5)

となる。

ただし S : 外筒の断面積

(4)式の ϵ に、ペンレコーダから得たひずみを ϵ_R 、外筒のポアソン比を ν として $\epsilon_R/2(1+\nu)$ を代入すれば、スラスト反力 R_{ik} が求められることになる。

一方、掘削実験中のトルクは、回転中の軸から検出しなければならないので、非接触の測定法である FM テレメータによって測定した。図-4 に示すようにロッド中心軸に対して左右 45° 方向に2枚ずつ相向かい合わせにトルク測定用のひずみゲージを接着するとともに FM 送信器をロッドに取り付けると、そこで検出したひずみは FM 電波に載って受信器に送られ、前述の水平反力、鉛直反力およびスラスト反力と同様にペンレコーダに連続的に記録される。するとカッタのトルク T は、

$$\epsilon = \frac{\tau}{2G} = \frac{1}{2G} \cdot \frac{T}{Z_p}$$

から、

で求められる。

ただし G : せん断弾性係数

Z_p : ねじり断面係数

τ : せん断応力

(5)式の ϵ に、ペンレコーダから得たひずみを ϵ_R として $\epsilon_R/4$ を代入すればトルク T が求められる。

カッタの回転は、ロッドに鉄の小片を接着し、1回転するごとにその小片を磁氣的に感知できる電磁式回転検出器(小野測器 MP 910 (MP-9)型)を経て、ペンレコーダに連続的に記録される。

水ジェット圧力は、写真-3 および図-2 に示される位置に圧力計および圧力変換器が取り付けられており、テレビカメラでモニターができると同時に、他の諸量と同様にペンレコーダに連続的に記録される。

図-5 および図-6 は、このようにして測定した水平反力、鉛直反力、スラスト反力、トルク、回転数および水ジェット圧力の測定記録の一例である。

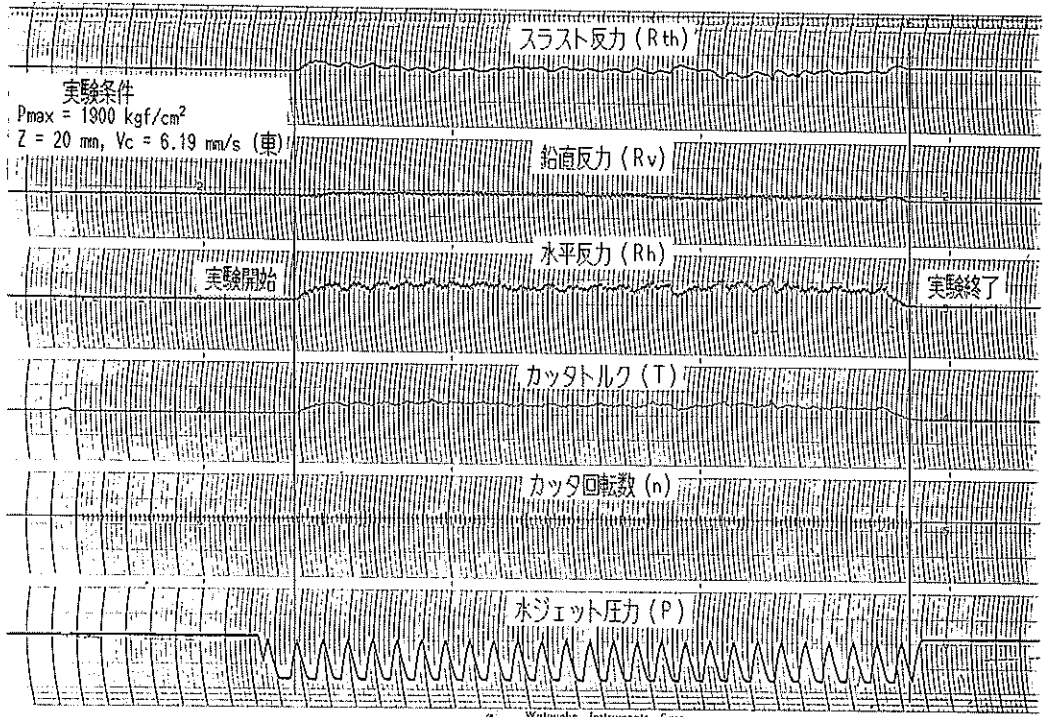


図-5：諸量の測定記録の例 (1)

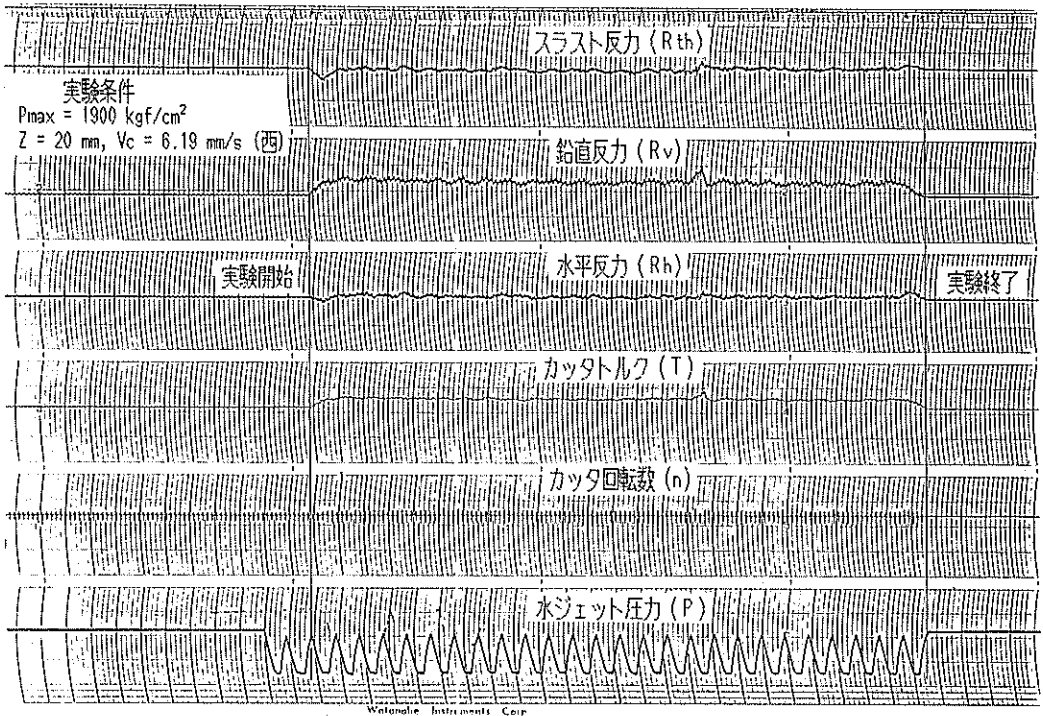


図-6：諸量の測定記録の例 (2)

4. 実験結果および考察

4.1 掘削後のモルタル試料

写真-5および写真-6は、掘削実験後の試料である。これらの写真からわかるように、約8~10 cmの掘削幅で数 cmの深さの平行な溝が掘削される。カッタが試料に直接当たらない掘削箇所は、水ジェットによるらせん状の掘削跡がはっきりと認められ、しかも鋭い突起状の掘削跡を呈する。一方、カッタが試料に直接当たった箇所では、このような鋭い突起状の掘削跡はカッタによって取り除かれることになるので、概して平坦な掘削跡を呈する。

掘削跡の外観は、らせんの向きが違うことを除けばカ

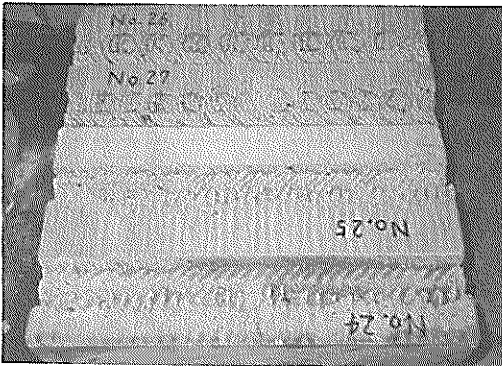


写真-5：掘削実験後の試料 (1)

No.24	: Z = 10mm,	$V_c = 4.34$ mm/s (東)
No.25	: Z = 10mm,	$V_c = 14.49$ mm/s (東)
No.26	: Z = 10mm,	$V_c = 10.83$ mm/s (西)
No.27	: Z = 10mm,	$V_c = 14.44$ mm/s (西)

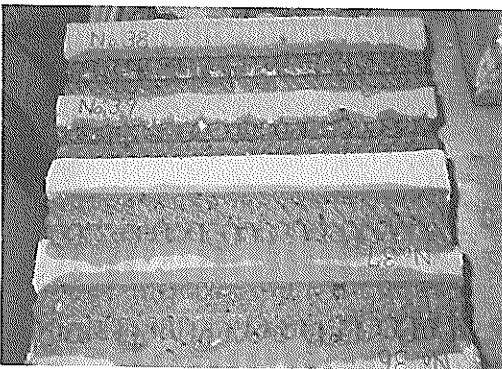


写真-6：掘削実験後の試料 (2)

No.36	: Z = 5mm,	$V_c = 6.19$ mm/s (東)
No.37	: Z = 0mm,	$V_c = 6.19$ mm/s (西)
No.38	: Z = 10mm,	$V_c = 3.99$ mm/s (西)
No.39	: Z = 20mm,	$V_c = 6.19$ mm/s (東)

ッタ移動速度や掘削厚などの掘削条件の違いによって顕著な差は認められない。

なお、カッタが回転するので、取付角のより大きいほうのノズルから噴射されたいくぶんかの水ジェットは掘削溝へ噴射されず無駄となる。そこで、水ジェットの全体のエネルギーに対する掘削溝に当たった水ジェットのエネルギーの比率を、水ジェットの有効噴射比 λ として掘削厚ごとに算出し百分率で表すと、図-3中に示すように81~84%程度であった。したがって水ジェットは、おおむね有効に掘削溝に噴射されていることがわかる。

4.2 諸量間における相互関係

(1) 水ジェットエネルギー~掘削体積

今回の掘削実験では、エネルギーに関するパラメータとしては水ジェット圧力のみであるが、水ジェットの最高圧力 $P_{max} = 1900$ kgf/cm²で一定としたので、カッタ横移動方向単位長さ当たり与えられた水ジェットのエネルギーという概念の量を供給水ジェットエネルギーとして定義⁵⁾、これを用いて整理した。

水ジェットの動力 H_j は、理論的には次式で求められる。

$$H_j = P \cdot Q = P \cdot AV_j = A \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} P^{1.5} \\ = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} d^2 P^{1.5} \quad (6)$$

ただしA：ノズルの流路面積

d：ノズル径

g：重力加速度

P：水ジェット圧力

Q：水ジェット流量

V_j ：水ジェット流速

γ ：水の比重量

π ：円周率

すると、供給水ジェットエネルギー E_j は、次式で表される。

$$E_j = \frac{H_j}{V_c} \quad (7)$$

ただし V_c ：カッタ移動速度

横軸に供給水ジェットエネルギーをとり、縦軸に掘削体積をとって、供給水ジェットエネルギーに対する掘削体積の変化を示したものが図-7である。図中における直線は掘削厚ごとに最小自乗法によって求めたものである。全体的に見て、ばらつきはあるが供給水ジェットエネルギーの増加とともに掘削体積も増加するというような比例関係にあることがわかる。

掘削体積とエネルギーの関係は、単位掘削体積当たり必要とした水ジェットエネルギーという概念である比エネルギー (specific energy) という量を用いて整理されること

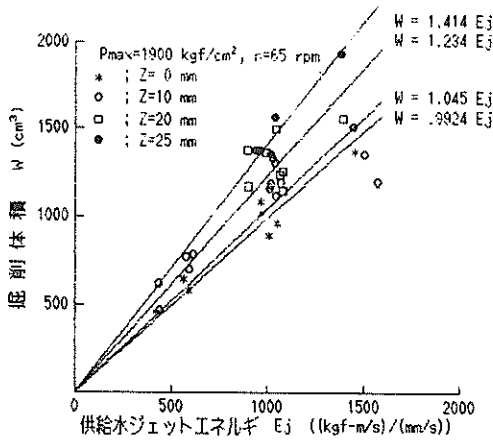


図-7：供給水ジェットエネルギーに対する掘削体積の変化

が多い。この比エネルギーは次式によって定義されている⁷⁾。比エネルギーを E_{sp} とすれば、

$$E_{sp} = \frac{H_j}{\frac{d}{dt} W} = \frac{H_j}{W/t} = \frac{H_j}{W/(l/V_c)}$$

$$= \frac{H_j \cdot l}{W \cdot V_c} = \frac{l \cdot E_j}{W} \quad (8)$$

となる。

ただし l : カットの移動長さ、もしくは試料の幅

t : 掘削時間

W : 掘削体積

したがって $W/E_j = l/E_{sp}$ となり、これは、図-7において直線の傾きを意味する。つまり、図-7における直線の傾きをカット移動長さ l で割れば、比エネルギーの逆数ということになる。この比エネルギーの逆数は、4.3で後述するが掘削効率 (cutting efficiency) と呼ばれている⁷⁾。今回の掘削実験では、カットの移動長さ l は試料の幅であり、一定である。したがって、図中の直線の傾きを比較することにより、掘削厚が増大するにつれての比エネルギー、すなわち単位掘削体積当たりに必要なエネルギーは少なくなっていくことがわかる。そこで、横軸に掘削厚をとり、縦軸に比エネルギーをとって、掘削厚に対する比エネルギーの変化を示したものが図-8である。この図から、比エネルギーは掘削厚の増大とともに漸減していくことがわかる。つまり、掘削厚の増大とともに単位掘削体積当たりに必要な水ジェットエネルギーはわずかながら減少していくことがわかる。

なお、図-8には、過去に当所で行った1,000 PS水ジェットによるさんご礁岩およびコンクリートの掘削実

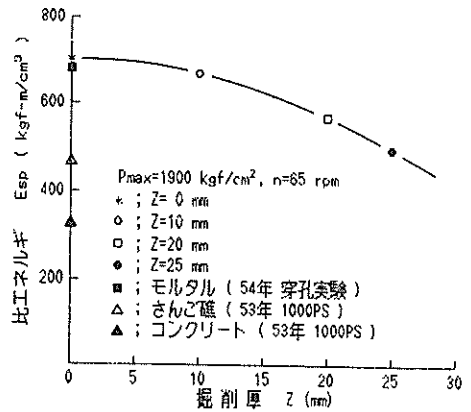


図-8：掘削厚に対する比エネルギーの変化

験、並びに超高压水ジェット併用さく岩機の穿孔実験から求めたモルタルの比エネルギーも参考までに示した。モルタルについては同じ超高压水ジェットの発生装置を用いているので、掘削厚 $Z = 0$ mm、すなわち水ジェット単独による掘削と見なした今回の比エネルギーとほとんど同値である。ただし、この穿孔実験から求めた比エネルギーは最高穿孔速度を示した値から求めたものであり、他の場合はこの値よりも比エネルギーは大きくなる。したがって今回の実験結果から得られた比エネルギーは前回の穿孔実験における比エネルギーよりも小さいことになる。ゆえにこのような点からも、今回の超高压水ジェット併用カッタによる掘削能力の改善効果を知ることができる。また、1,000 PS水ジェットによるさんご礁岩およびコンクリートの掘削実験から求めたさんご礁岩およびコンクリートの比エネルギーがいずれも超高压水ジェットによるモルタルの比エネルギーよりもかなり下回っていることは、水ジェット圧力および流量が大きく異なること、並びに試料および装置の大きさが異なるので寸法効果が考えられることなどの理由でエネルギー効率が良いものと推定される。

(2) 供給水ジェットエネルギー～各種反力

供給水ジェットエネルギーと水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクとの関係を、それぞれ図-9～図-12までに示す。全体的に見て、掘削厚の増大とともに水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクともそれぞれ増大の傾向を示しているが、供給水ジェットエネルギーに対してはトルクを除くこれらの反力は特定の傾向を示していない。ただしトルクに限っては、供給水ジェットエネルギーの増大とともに掘削厚ごとにはっきりと漸減の傾向を示しており、水ジェットの圧力や流量を増

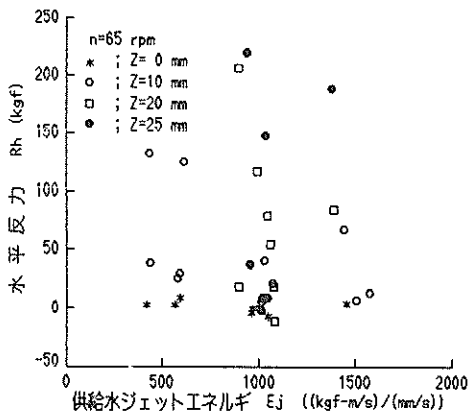


図-9：供給水ジェットエネルギーと水平反力の関係

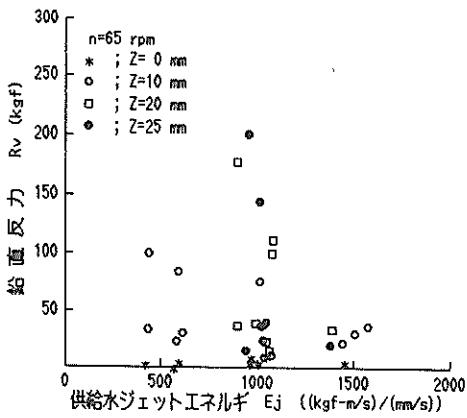


図-10：供給水ジェットエネルギーと鉛直反力の関係

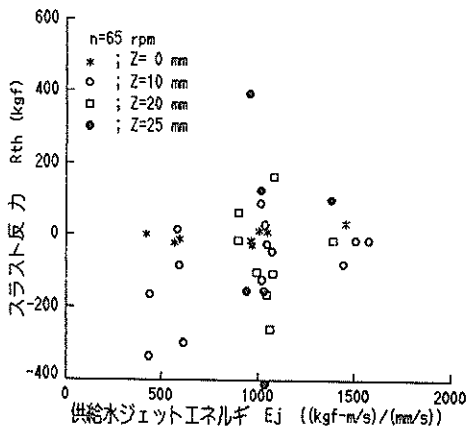


図-11：供給水ジェットエネルギーとスラスト反力の関係

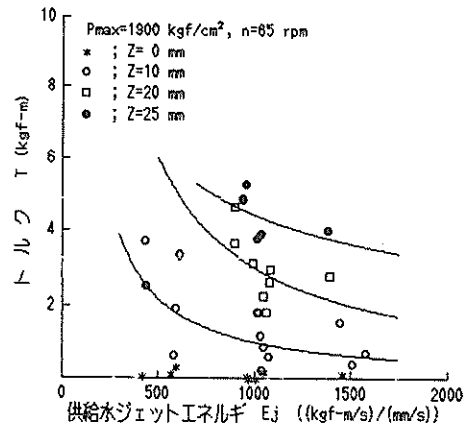


図-12：供給水ジェットエネルギーとトルクの関係

大するか、カッタの移動速度を遅くするか、あるいは掘削厚を小さくすれば、カッタの負担が減じられることがわかる。

ところで、供給水ジェットエネルギーは(7)式に示すように $E_j = H_j/V_c$ で表されるが、水ジェットの動力 H_j は4.2の(1)項で述べたようにほぼ一定と考えられるので、供給水ジェットエネルギーに対する各種反力の変化はカッタ移動速度に依存する。4.2の(5)項で述べるように、スラスト反力は、カッタ移動速度の増大とともに押付力として増大していく傾向にあり、厳密には、供給水ジェットエネルギーに対するスラスト反力は、カッタ移動速度に対する上述の傾向とは逆になるものと思われる。

(3) 各種反力～掘削体積

図-13～図-16までに、掘削体積と水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクの関係を示す。掘削厚 Z が0 mm のときは、当然ながら水平反力、鉛直反力およびトルクそれぞれの反力は零となるので、おのこの

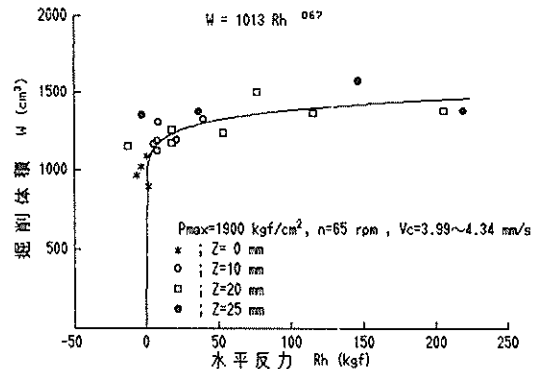


図-13：水平反力と掘削体積の関係

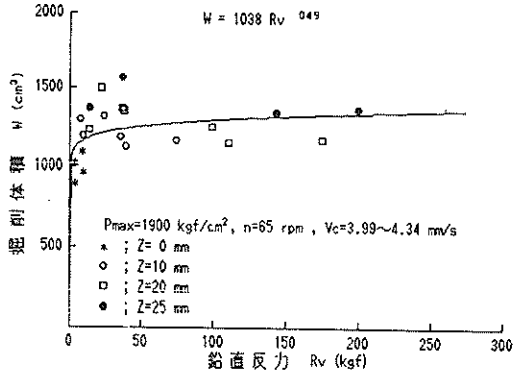


図-14：鉛直反力と掘削体積の関係

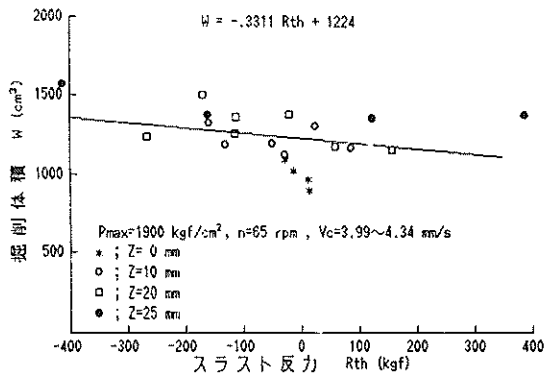


図-15：スラスト反力と掘削体積の関係

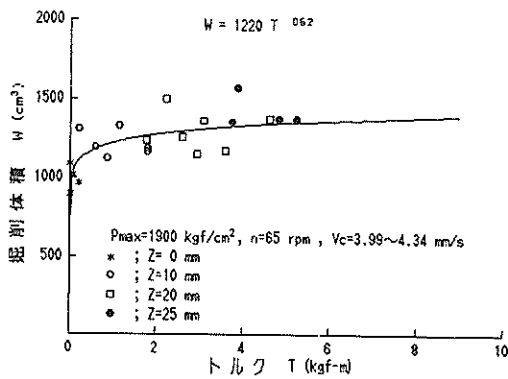


図-16：トルクと掘削体積の関係

反力が零のときの掘削体積は、水ジェット単独による場合の掘削体積ということになる。したがって、それを上回った分の掘削体積は、カッタ併用による効果と考えることができる。スラスト反力を除けば、水平反力、鉛直反力およびトルクの増大とともに掘削体積は漸増の傾向を示す。

なお図中の曲線は、非線形最小自乗法によって近似し

たものである。また、スラスト反力は、掘削体積に対してあえて最小自乗法によって近似すれば直線となるが、掘削体積に対して強い相関を示していないことがわかる。

ここで、4.1で述べた供給水ジェットエネルギーと同じ概念で供給機械エネルギーというものを定義すると、供給機械エネルギーは、回転動力と送り動力の和を機械動力とし、それをカット速度で除することによって次のように表される。

$$E_m = \frac{H_m}{V_c} = \frac{T \cdot \omega + R_h \cdot V_c}{V_c} \quad (9)$$

ただし E_m ：供給機械エネルギー

H_m ：機械動力

T ：トルク

R_h ：水平反力

ω ：カッタの回転角速度

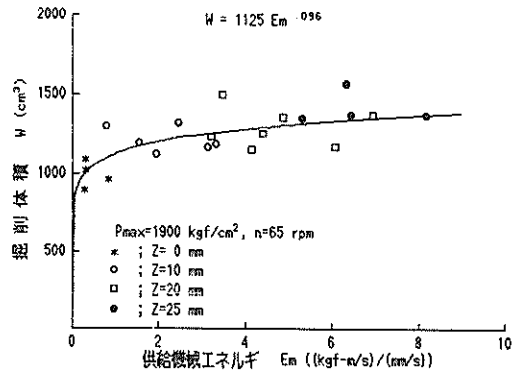


図-17：供給機械エネルギーと掘削体積の関係

図-17は、このようにして求められた供給機械エネルギーと掘削体積との関係を示したものである。定義の上からも、図-13～図-16までに示した水平反力、鉛直反力およびトルクと同様な傾向を示している。

(4) 掘削条件～掘削体積

図-18は、カッタ移動速度に対する掘削体積の変化を示したものである。図中、(東)とあるのはカッタが試料に対して切上げ掘削を行う方向に試料を移動させた場合を意味し、(西)とあるのは切下げ掘削を行う方向に試料を移動させた場合を意味している。図中の曲線は非線形最小自乗法によってカッタ移動速度と掘削体積の関係を近似したものであり、掘削体積はカッタ移動速度に対してほぼ反比例していることがわかる。

またこの図から、西方向からの掘削厚 $Z=10\text{mm}$ の場合の切下げ掘削における曲線は、東方向からの掘削厚 $Z=0\text{mm}$ の場合の曲線と一致しており、カッタによる掘削の効果がほとんどないことがわかる。

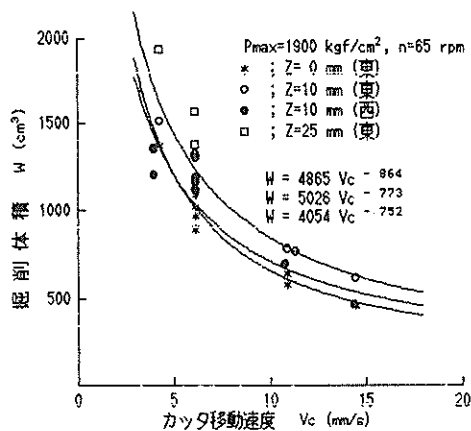


図-18： カッタ移動速度に対する掘削体積の変化

これに対し、同じ掘削厚 $Z=10\text{mm}$ であっても東方向からの切上げ掘削では、カッタによる掘削の効果が切下げ掘削の場合と比べると明らかに大きいことがわかる。

これは、図-19に見られるように切上げ掘削と切下げ掘削とは水ジェットによるモルタル試料の掘削箇所に対するカッタ刃の当たり方が異なり、そのためカッタによる切崩しの効果に差異があるためと考えられる。

つまり、切上げ掘削では、モルタル試料が水ジェットによって掘削された後、カッタ刃はその掘削箇所を切崩すように効果的な方向に作用するのに対し、切下げ掘削では、カッタ刃は掘削箇所を押し付けるように作用するというような掘削のメカニズムの差異によるものと思われる。

図-20は、掘削厚と掘削体積との関係をカッタ移動速度ごとに表したものである。同じカッタ移動速度であれば、掘削体積は掘削厚に対して比例して増加していくことがわかる。また、カッタ移動速度 $V_c=6.19\text{mm/s}$ にお

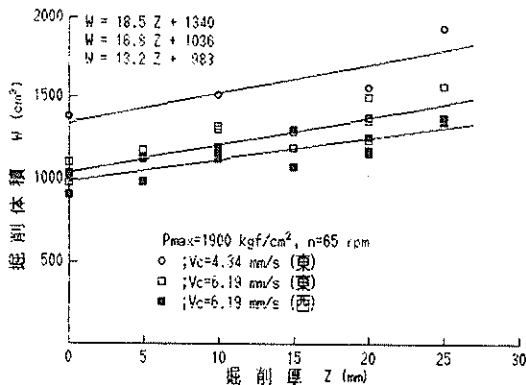


図-20： 掘削厚に対する掘削体積の変化

ける切上げ掘削の場合と切下げ掘削の場合を比較すればわかるように、同じカッタ移動速度でも、切上げ掘削と切下げ掘削では前述したように明らかな有意差がある。

(5) 掘削条件～各種反力

図-21～図-24までに、カッタ移動速度に対する水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクの関係を示す。これらの図はいずれもばらつきが多く、これらの図を見る限り、いずれの反力もカッタ移動速度に対して特定の関係を示していない。しかし、図-23および掘削厚に対するスラスト反力の変化を示した図-27の切上げ掘削時の場合を見るとわかるように、スラスト反力は、カッタ移動速度の増加とともに押付力として増大していく傾向にある。またトルクは、4.2の(1)項で述べたように供給水ジェットエネルギーの増加とともに漸減する傾向にあり、水ジェット動力はほぼ一定であるので、トルクは、厳密にはカッタ移動速度に対しては漸増していくものと考えられる。

なお、水平反力および鉛直反力のカッタ移動速度に対する変化は、図-21および図-22だけでなく、図-25

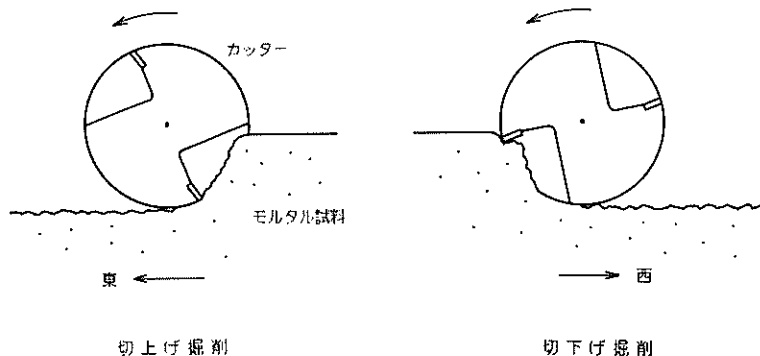


図-19： 切上げ掘削と切下げ掘削

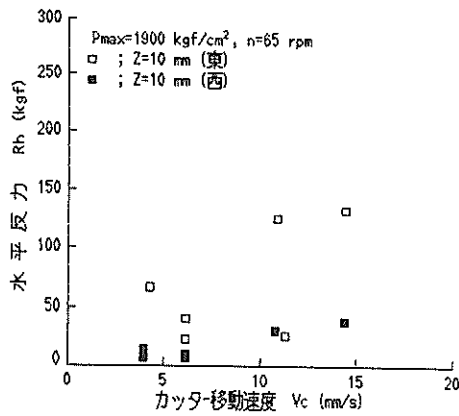


図-21： カッタ移動速度に対する水平反力の変化

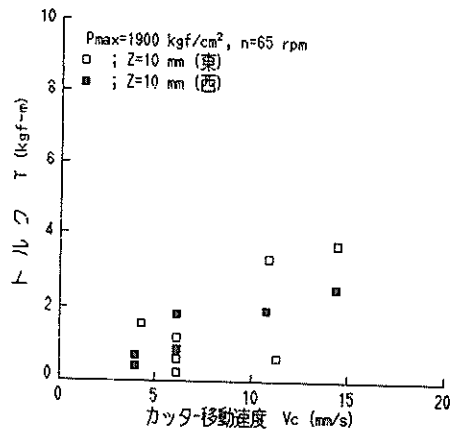


図-24： カッタ移動速度に対するトルクの変化

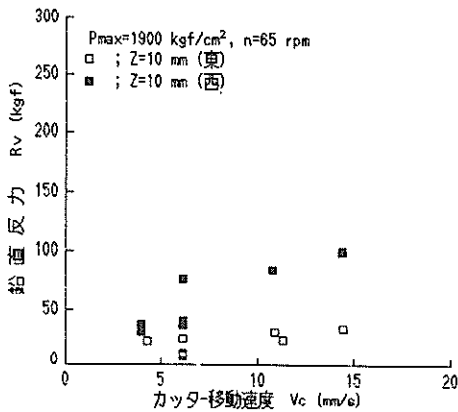


図-22： カッタ移動速度に対する鉛直反力の変化

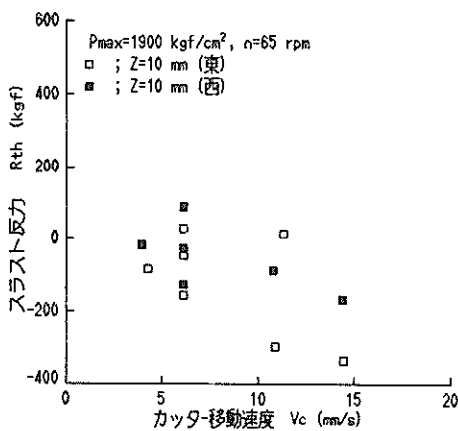


図-23： カッタ移動速度に対するスラスト反力の変化

および図-26の切上げ掘削の場合を見るとわかるように、カッタ移動速度 $V_c = 4.34$ mm/s および $V_c = 6.19$ mm/s の場合における差はない。したがって、水平反力および鉛直反力は、カッタ移動速度に対しては特定の関係を示さないと見える。また、これまでの石炭のバイトによる掘削⁶⁾、ポンプ船のカッタによる掘削⁹⁾などでも、実用の掘削速度の範囲では、水平反力および鉛直反力はその影響を受けないことが知られている。

つぎに切上げ掘削と切下げ掘削について比較してみる。掘削厚 $Z = 10$ mm の場合における水平反力および鉛直反力をみると、水平反力は、図-21に見られるように切上げ掘削のほうが切下げ掘削よりも大きい値を示している。これに対し、鉛直反力では、図-22に見られるように切上げ掘削よりも切下げ掘削のほうが大きい値を示している。これは、前述したように、掘削メカニズムの差異によるものと考えられる。

スラスト反力においても、図-23に見られるようにはっきりした傾向ではないが、切上げ掘削のほうが切下げ掘削よりも絶対値としてはいくぶん高めの値を示している。

なお、トルクにおいては、図-24に見られるとおり切上げ掘削と切下げ掘削ではほとんど差がないといえる。

このような切上げ掘削および切下げ掘削における水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクの変化は、図-5および図-6の測定記録を見ても明らかである。つまり、図-5および図-6から、水平反力は切下げ掘削よりも切上げ掘削のほうにおいて高く、鉛直反力は切上げ掘削よりも切下げ掘削において高い値を示すこと、スラスト反力は切上げ掘削よりも切下げ掘削において絶対値としては高い値を示すこと、またトルクに限っては

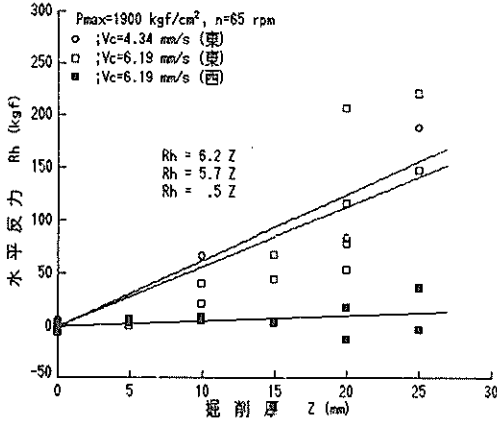


図-25：掘削厚に対する水平反力の変化

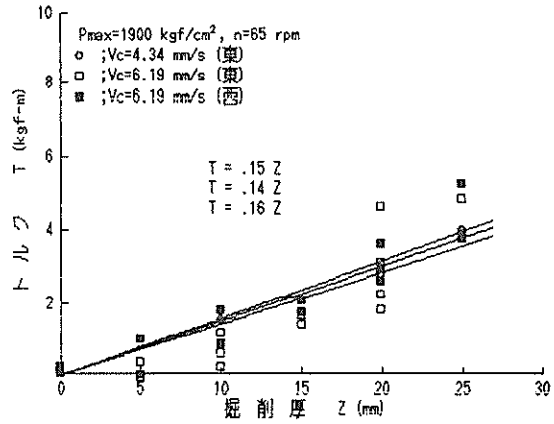


図-28：掘削厚に対するトルクの変化

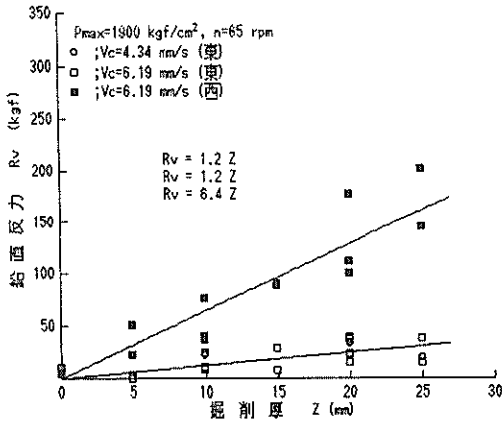


図-26：掘削厚に対する鉛直反力の変化

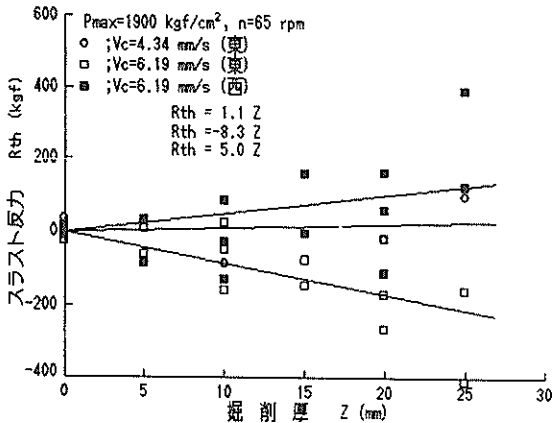


図-27：掘削厚に対するスラスト反力の変化

切上げ掘削と切下げ掘削において顕著な差が見られないことがわかる。

図-25～図-28までに、掘削厚に対する水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクの変化を示す。図-25に見られるように掘削厚に対する水平反力の変化はばらつきがあるにしても切上げ掘削では掘削厚の増大とともに水平反力も増大していくのに対し、切下げ掘削では水平反力はほとんど零であることがわかる。

一方、図-26の掘削厚に対する鉛直反力の変化を見ると、切上げ掘削よりも切下げ掘削の場合に掘削厚に比例して鉛直反力は増大していくのに対し、切上げ掘削の場合はほとんど零である。

ところで、バイトなどによる石炭切削の場合の最大主切削抵抗と切込み深さの関係は、

$$F_{max} = a \delta^b \quad (10)$$

なる形で表されるといわれている⁸⁾。

ただし F_{max} ：最大主切削抵抗

a ：切削係数

b ：切削指数

δ ：切込み深さ

また、各種岩石についてのバイトによる切削実験結果では、約0.25～0.5mmの限界切削厚というものが存在し、それ以下では平均主切削抵抗および背分力とも(10)式に従い、それ以上では、

$$F = A \delta + B \quad (11)$$

なる形で表されるとしている¹⁰⁾。

ただし F ：平均主切削抵抗もしくは背分力

A, B ：常数

今回の掘削実験では、掘削厚を切込み深さと見なして考えれば、水平反力および鉛直反力とも(11)式に従っているといえる。なお、当所において過去に行ったモルタルの掘削実験¹²⁾でも(11)式に従うことが確かめられている。

図-27は、掘削厚に対するスラスト反力の変化を示したものである。切上げ掘削と切下げ掘削では向きが違いますが絶対値としては掘削厚の増加とともに増大していくことがわかる。

図-28は、掘削厚に対するトルクの変化を示したものであるが、水平反力および鉛直反力と同様にトルクは、掘削厚に対してほぼ比例して増大していく。ただし、切上げ掘削および切下げ掘削における差は、ほとんどない。

ここで水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクが掘削実験中どの程度変動するかの目安として、次のような量を変動比と定義する。すなわち変動比を ξ とすると、

$$\xi = \frac{|X|_{\max}}{|X|_{\text{mean}}} \quad (12)$$

である。

ただし $|X|_{\max}$: 測定量の絶対値の最大値

$|X|_{\text{mean}}$: 測定量の絶対値の平均値

図-29～図-32は、このようにして求めた水平反力、鉛直反力、スラスト反力およびトルクの変動比を掘削厚に対してプロットしたものである。

水平反力変動比は、図-29を見るとわかるように切下げ掘削においては掘削厚とともに漸減の傾向を示すが、切上げ掘削においてはばらつきはあるものの増大の傾向を示す。これに対し鉛直反力変動比は、図-30に見られるように、切上げ掘削と切下げ掘削では切上げ掘削のほうが変動がわずかに大きいことを除けば、掘削厚に対してはばらつきはあるもののほぼ一定である。スラスト反

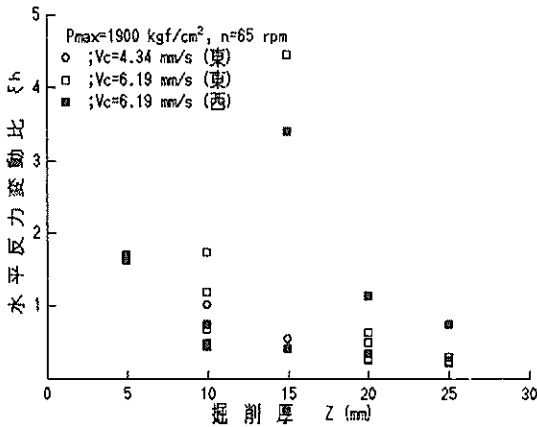


図-29 : 掘削厚に対する水平反力変動比の変化

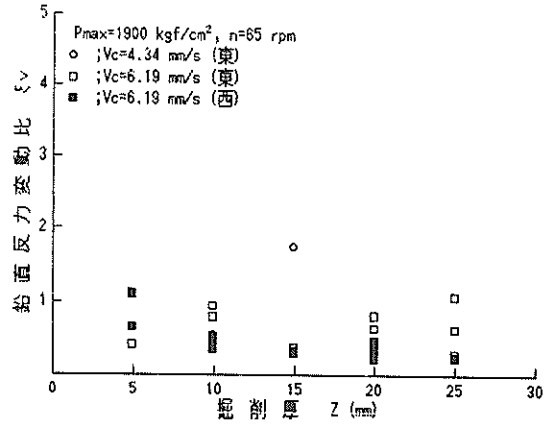


図-30 : 掘削厚に対する鉛直反力変動比の変化

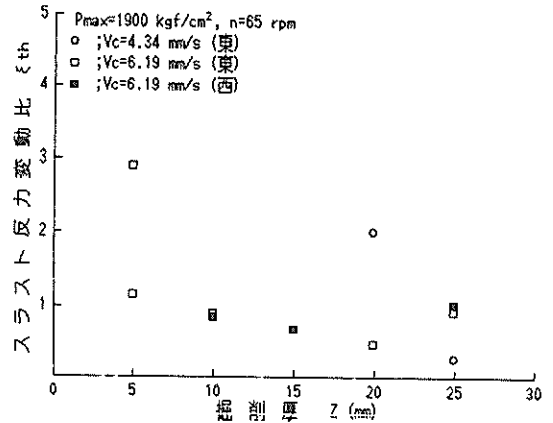


図-31 : 掘削厚に対するスラスト反力変動比の変化

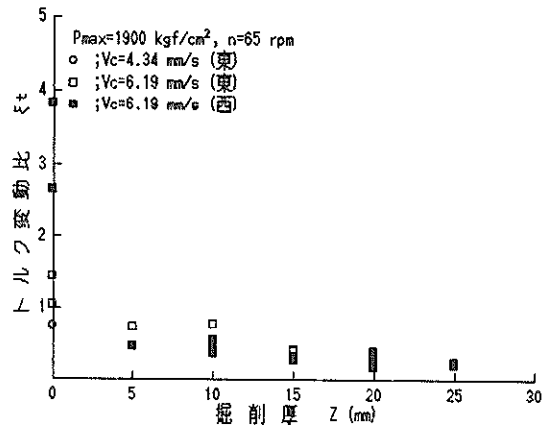


図-32 : 掘削厚に対するトルク変動比の変化

力変動比は、図-31に見られるように掘削厚に対してはばらつきが大きく明確な関係を示していない。トルク変動比は、図-32に見られるように掘削厚に対しては漸減の傾向を示し、ばらつきも少なく安定していくことがわかる。また切上げ掘削と切下げ掘削ではその差もないといえる。

4.3 超高压水ジェット併用カッタの掘削能力に対する改善効果

超高压水ジェット併用カッタの掘削能力に対する効果を以下に示すような量を考えて調べた。

供給水ジェットエネルギーに対する供給機械エネルギーの比を百分率で表し、これを供給エネルギー比と定義する。すると供給エネルギー比は、次のように表される。

$$\zeta = \frac{H_m/V_c}{H_j/V_c} \times 100 = \frac{E_m}{E_j} \times 100 \quad (13)$$

また比エネルギーの逆数は掘削効率(cutting efficiency)といわれ、次式で定義されている⁷⁾。すなわち掘削効率 η は

$$\eta = \frac{1}{E_{sp}} = \frac{W}{E_j \cdot l} \quad (14)$$

である。

ここで、掘削厚 $Z = 0$ mmのときの掘削効率を水ジェット単独による掘削効率と見なし、掘削厚 $Z = 0$ mm以外、つまり水ジェットとカッタ併用時における掘削効率を掘削厚 $Z = 0$ mmのときの掘削効率に対する百分率で表し、掘削効率比と定義する。すると掘削効率比 η_r は、

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} \times 100 \quad (15)$$

となる。

ただし η ：掘削厚 $Z = 0$ mm以外のカッタ使用における掘削効率

η_0 ：掘削厚 $Z = 0$ mmにおける掘削効率

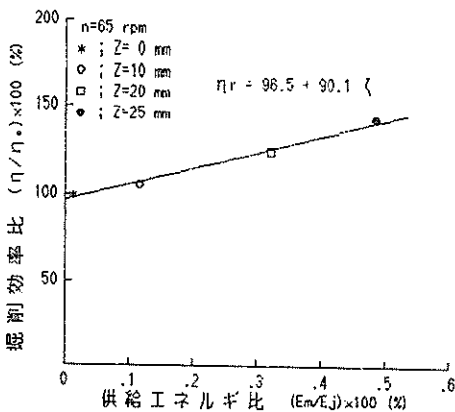


図-33：供給エネルギー比と掘削効率比の関係

図-33は、このようにして横軸に供給エネルギー比、縦軸に掘削効率比をとって、水ジェットとカッタを併用することの効果を表したものである。図-33によれば、供給エネルギー比約0.5%で掘削効率比は最大約142%である。したがって、このように水ジェットエネルギーにわずかの機械エネルギーを付加することで、水ジェットの掘削能力は大幅に改善されることがわかる。

5. 結 論

今回の掘削実験から得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 比エネルギーは、掘削厚の増大とともに漸減していく。つまり掘削厚の増大とともに単位掘削体積当たりに必要な水ジェットエネルギーはわずかに減少していく。

(2) 水ジェットの圧力や流量、カッタの移動速度によって、水平反力および鉛直反力は、ほとんど左右されない。ただしトルクは、水ジェットの圧力や流量を増大するか、カッタの移動速度を遅くするか、あるいは掘削厚を小さくすれば減少する。

(3) 掘削体積は、水平反力、鉛直反力およびトルクの増大とともに漸増の傾向を示す。ただしスラスト反力に対しては、強い相関を示さない。

(4) 掘削体積は、カッタ移動速度に対してはほぼ反比例して減少し、掘削厚に対してはほぼ比例して増加する。

(5) 切上げ掘削と切下げ掘削では、同じカッタ移動速度および同じ掘削厚であっても、切上げ掘削のほうが切下げ掘削よりもより掘削されるという有意差がある。

(6) スラスト反力は、カッタ移動速度とともに押付力として増大していく傾向にある。

(7) 水平反力は、切上げ掘削の場合に増大する傾向にあり、鉛直反力は、切下げ掘削の場合に増大する傾向にある。ただしトルクは、切上げ掘削および切下げ掘削における差はない。

(8) 水平反力変動比は、切下げ掘削においては掘削厚の増大とともに漸減の傾向を示すが、切上げ掘削の場合はその逆に増大の傾向を示す。鉛直反力変動比およびスラスト反力変動比とも掘削厚に対しては明確な関係を示さない。トルク変動比は、切上げ掘削切下げ掘削にかかわらず掘削厚の増大とともに減少していく。

(9) 水ジェットに対する機械の供給エネルギー比0.5%で掘削効率比は最大約142%であり、水ジェットエネルギーにわずかの機械エネルギーを付加するだけで、水ジェットの掘削能力は大幅に改善される。

6. あとがき

今回の実験から、わずかの機械力であっても水ジェットと併用すると水ジェットの掘削能力が改善されることを確認した。今回製作したカッタでは、カッタを回転させることにより、いくぶんかの水ジェットエネルギーは掘削部へ噴射されず、無駄となってしまう。そこで、ノズルの取付位置を含めて掘削に対してさらに効果的なカッタの形状を考えていけば水ジェットの掘削能力はいっそう改善されることになるであろう。今後水ジェットによる岩盤掘削法の一つのあり方として、水ジェットと機械力を併用することは有望な方法であると考え。

(1983年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 藤井喜一郎・守口照明・近藤 基：高圧水噴流の構造に関する実験結果及びモルタル試料掘削実験結果について、港湾技術資料No.60, 1968年9月, 43p.
- 2) 藤井喜一郎・守口照明：水噴流による水中の岩盤の理論的破壊過程について—モルタル試料による実験結果—, 港湾技術研究所報告第8巻第2号, 1969年6月, pp.71~114
- 3) 藤井喜一郎・守口照明：水噴流による水中の岩盤の掘削特性について—ノズル移動時のモルタル試料掘削について—, 港湾技術研究所報告第9巻第2号, 1970年6月, pp.147~162
- 4) 東海林秀幸・中島忠男：超高压水ジェットによる岩盤掘削, 港湾技術研究所報告第18巻第1号, 1979年3月, pp.177~197
- 5) 中島忠男・小岩蒼生・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第17巻第3号, 1978年9月, pp.91~120
- 6) 東海林秀幸・中島忠男・岩崎峯夫・秋園純一・轟達夫：超高压水ジェット併用さく岩機の掘削性について, 港湾技術資料No.327, 1979年9月, 19p.
- 7) M. Hashish and M. P. Duplessis: The Application of a generalized Jet Cutting Equation, The 4th International symposium on jet Cutting Technology, Apr., 1978, p. F1-6
- 8) 会田俊夫・岡本 隆：採炭機械, 技術書院, 1962年9月, p.35, p.44
- 9) 岩田尚生：ポンプ浚渫船のカッタについて, 作業船第8号, 1960年3月, p.58
- 10) 中島 巖・木下重教：切削厚さが小さい場合の岩石の切削抵抗, 日本鉱業会誌, 88 1015, 1972年9月, p.9
- 11) 石塚浩次：模擬岩盤(モルタル)の掘削抵抗について, 港湾技術研究所報告第12巻第1号, 1973年3月, pp.213~215

記 号 一 覧 表

a	: 切削係数
A	: ノズルの流路断面積
b	: 切削指数
d	: ノズルの直径
E	: ヤング率
E_j	: 供給水ジェットエネルギー
E_m	: 供給機械エネルギー
E_{SP}	: 比エネルギー
g	: 重力加速度
G	: せん断弾性係数
H_j	: 水ジェットの動力
H_m	: 機械動力
l	: カッタの移動長さ, もしくは試料の幅
L_1	: カッタの外筒からの突き出し長さ
L_2	: 外筒の支持台からの突き出し長さ
L_3	: 水平反力および鉛直反力測定用ひずみゲージの外筒端からの距離
L_4	: スラスト反力測定用ひずみゲージの外筒端からの距離
M	: 曲げモーメント
n	: カッタの回転数
P, P_{max}, P_{mean}	: 水ジェット圧力
Q	: 水ジェット流量
R_h	: 水平反力
R_v	: 鉛直反力
R_{th}	: スラスト反力
S	: 外筒の断面積
t	: 掘削時間
T	: トルク
V_c	: カッタ移動速度
V_j	: 水ジェットのノズル出口の流速
W	: 掘削体積
$X, X _{max}, X _{mean}$: 測定量
Z	: 掘削厚
Z_n, Z_p	: 断面係数
γ	: 水の比重
δ	: 切込み深さ
ϵ, ϵ_n	: ひずみ
ζ	: 供給エネルギー比
η, η_0	: 掘削効率
η_r	: 掘削効率比
λ	: 水ジェットの有効噴射比
ν	: ポアソン比
$\xi, \xi_h, \xi_v, \xi_{th}, \xi_t$: 変動比
π	: 円周率
σ	: 曲げ応力
τ	: せん断応力
ω	: カッタの回転角速度

港 湾 技 研 資 料 No.457

1 9 8 3 · 6

編 集 兼 發 行 人 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所

發 行 所 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所
 橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所 日 青 工 業 株 式 會 社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.