

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

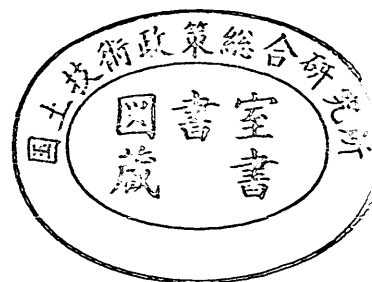
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 17

NO. 3

SEPT. 1978

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第17巻 第3号 (Vol. 17, No. 3), 1978年9月 (Sept. 1978)

目 次 (CONTENTS)

1. 港湾地域における土の工学的諸係数の相関性
.....小川富美子・松本一明..... 3
(The Correlation of the Mechanical and Index Properties
of Soils in Harbour Districts...Fumiko OGAWA, Kazuaki MATSUMOTO)
2. 高圧水ジェットによる珊瑚礁岩の掘削性について
.....中島忠男・小岩苔生・岩崎峯夫・石塚浩次・東海林秀幸.....91
(Coral Rock Excavation by High Pressure Water Jets
.....Tadao NAKAJIMA, Taisei KOIWA, Mineo IWASAKI,
Koji ISHIZUKA and Hideyuki SHOJI)

2. 高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性について

中島忠男* 小岩苔生** 岩崎峯夫***

石塚浩次**** 東海林秀幸*****

要 旨

圧力 500 kgf/cm^2 、流量 900 l/min の水馬力 $1,000 \text{ PS}$ という他に類を見ない大馬力、かつ大流量の水ジェットを用いて、さんご礁岩の空气中掘削試験を実施した。さんご礁岩は、外観からも認められるように多孔質、かつ不均質な岩石である。事実、物理的性質の測定結果では、みかけ比重や圧縮強度のばらつきが大きかった。また、シュミットハンマー反発値による推定圧縮強度からも、局部的には、大理石の圧縮強度に近い高い箇所が存在することが確認された。さらに、圧縮強度と圧裂引張強度の比、すなわちぜい性度も 14 と高かった。これらのことから、さんご礁岩は水ジェットの水くさび作用を受けやすく、よく破壊される傾向にあった。したがって水ジェットによる掘削工法は、さんご礁岩に対してかなり有望な工法であると思われる。なお、平均掘削深さに関する既存の実験式が、実験定数を変えるだけで適用可能であることも確認した。

* 図材部 作業員研究室
** 図材部長
*** 図材部 作業員研究室長
**** 元図材部 作業員研究室
***** 図材部 岩盤掘削主任研究官

2. Coral rock excavation by high pressure water jets

Tadao NAKAJIMA*

Taisei KOIWA**

Mineo IWASAKI***

Koji ISHIZUKA****

Hideyuki SHOJI*****

Synopsis

This paper discusses cutting performance of water jets for coral rock excavation at high jet energy.

The jet energy employed in this experiment was 441 to 968PS under the conditions that the jet pressure was 290 to 500kgf/cm² and the flow rate was up to 900 l/min.

Values of physical properties of the coral rocks showed a great scatter band, since these specimens were porous and heterogeneous from their outward appearance. The Schmidt hammer test revealed that these specimens locally have higher compressive strength which is close to that of marble. The brittle indices were 14.

The specimens were fractured into some pieces during cutting. Therefore, it can be said that the coral rocks are very sensitive to the Water Wedge Effect induced by water jets because of their characteristics.

The empirical equation proposed by Hamada and others can be applicable for predictions of the mean depth of cut only by modifying the empirical constants in the equation.

This study concludes that water jet cutting is considerably promising to coral rock excavation in practical dredging.

* Member of Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

** Head of Machinery Division

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

**** Former member of Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division

***** Senior Research Engineer, Machinery Division

目 次

要 旨	91
1. ま え が き	95
2. 試料および試験条件の選定	95
2.1 試 料	95
2.2 水ジェット圧力・流量	95
2.3 そのほかの試験条件	95
3. 試験装置および試験概要	96
3.1 試験装置	96
3.2 試験概要	97
4. 試験結果および考察	97
4.1 試料の物理的性質	97
4.2 試料の掘削試験後の状況と掘削プロファイル	102
4.3 平均掘削深さ \bar{l} , 最大掘削深さ l_{\max} , 平均掘削幅 \bar{b} , 表面最大掘削幅 b_{\max} , 掘削体積 v	112
4.4 平均掘削深さ \bar{l} とノズル出口圧力 p , ノズル先端から試料表面までの距離 L , およびノズル移動速度 V_n との関係	112
4.5 平均掘削深さ \bar{l} および平均掘削断面積 \bar{S} とノズルの単位移動長さ当りの供給エネルギー H/V_n との関係	113
4.6 掘削量 M および破砕量 m とノズル出口圧力 p との関係	114
5. さんご礁岩の水ジェットによる掘削の実用化へのアプローチ	115
5.1 平均掘削深さ \bar{l} の既存の実験式に対する適合性	115
5.2 水ジェットによる現地岩盤の破砕性に対する破壊力学的考察	116
6. ま と め	118
7. あ と が き	118
謝 辞	119
参考文献	119
記号一覧表	119

1. まえがき

わが国の港湾区域における岩盤しゅんせつ作業は、従来から困難かつ非能率な作業の一つとしてあげられている。その大きな理由は、陸上でのもっとも効率的な岩盤破砕法である発破による方法が、航行船舶の安全性、魚類などへの影響にからんだ漁業補償の困難性などの点からほとんど使用できないことであろう。そのため現在では、発破に代わる岩盤掘削工法として、重錘による方法、ポンプ船のカッターによる方法、100 t 前後の大型グラブによる方法、衝撃式のブレイカーによる方法などが用いられている。しかしこれらいずれの方法も、硬岩類に対する破砕効率は必ずしもよくないのが現状である。しかも今後の大水深での岩盤掘削技術、あるいは大規模な岩盤掘削技術なども考え合わせて、より効率的な岩盤掘削工法の開発が望まれている。そこで当研究所機材部では新工法として水ジェットによる方法、ならびに電磁波による方法を目下研究開発中である。

一方、第四港湾建設局では、離島における岩盤しゅんせつ工事を安全、かつ効率的に行なうための離島砕岩船の開発を昭和51年から進めている。そして今までの調査結果¹⁾から、与論島、奄美諸島などの離島近辺のしゅんせつ対象岩の多くはさんご礁であり、その種類、分布は複雑で、また強度などもまちまちであることがわかってきている。このようなさんご礁を主とする岩盤を対象とした岩盤しゅんせつは今まで例がなく、適切な岩盤掘削工法の採択、もしくは開発が望まれている。

なお当研究所では、過去、圧力 40 kgf/cm² 程度、流量 625 l/min のモルタル掘削試験²⁾、圧力 3,000 kgf/cm² 前後、流量 24 l/min の超高圧水ジェットの花こう岩掘削試験³⁾を行なっているが、中間的な圧力、しかも大流量かつ大馬力というような水ジェットを用いての掘削試験はまだ行なっていない。

本試験は、以上のような状況のもとで上述のような中間的な圧力、しかも大流量かつ大馬力の水ジェットによるさんご礁岩の掘削性について検討するために、当研究所構内において実施したものである。

2. 試料および試験条件の選定

2.1 試料

掘削試験には、与論島で採取したさんご礁岩を用いた。そのほか、さんご礁岩の強度がばらついていることが予想されたことと、試験条件を変えた場合の掘削性を比較するために、比較的均質な試料としてコンクリートブロックを用いた。また、過去の超高圧水ジェットによる

花こう岩の掘削試験³⁾と比較するために花こう岩をあわせて用いた。

さんご礁岩は、過去の実験と比較するために面を仕上げた直方体に整形したもの、またノズル先端から試料表面までの距離、あるいはノズル軸方向に対する試料表面の角度などによっても掘削性が異なることも考えられたので、できるだけ実作業に近い状態での掘削性を調べるための非整形のもの、と以上2種類用意した。

コンクリートブロックは、水セメント比が 63.0%、48.5%と異なるもの2種類、ならびに、鉄筋が格子状に入っているものを用意した（以後、それぞれコンクリート(A),(B),(C)と呼ぶことにする）。

花こう岩は、過去の超高圧水ジェットによる花こう岩の掘削試験³⁾に用いたものと同じ稲田花こう岩で、結晶粒は粗く、一軸圧縮強度は約 1,000 kgf/cm² である。

2.2 水ジェットの圧力・流量

水ジェットの掘削性を大きく支配する因子は、通常ノズル出口での圧力と流量と考えられている。そして圧力については、当然ながら必要破壊圧力というもの考えられる。当研究所では、過去、圧力 40 kgf/cm² 程度のモルタル掘削試験²⁾、圧力 3,000 kgf/cm² 前後の超高圧水ジェットの花こう岩の掘削試験³⁾を行なってきたり、またそのほかの過去の豊富な試験例^{4,5)}からも、必要破壊圧力は、試料の一軸圧縮強度の1/2程度とされている。当初、さんご礁岩の一軸圧縮強度は 200~400 kgf/cm² と予想されていた¹⁾。したがって、その 1/2 を上回る圧力で、しかもできるだけ高圧力、かつ大流量ということから、化学プラント洗浄用の圧力 400~570 kgf/cm²、流量 80~100 l/min 級のポンプを12台並列に運転し、ノズル出口での最大定常圧力 500 kgf/cm²、最大流量 900 l/min で行なうこととした。

2.3 そのほかの試験条件

圧力 p kgf/cm² および全流量 Q l/min が決まれば、流量係数を 1.0 とし、ノズル径 d mm、馬力 H PS、水ジェットノズル出口速度 V_j m/s が以下の関係式によって決定される。

$$H = \frac{pQ}{450} \quad (\text{PS}) \quad (1)$$

$$Q = 0.015 \pi d^2 V_j \quad (\text{l/min}) \quad (2)$$

$$V_j = \sqrt{\frac{2g(p \times 10^6)}{\gamma}} \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

ただし、重力加速度 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$

水の比重 $\gamma = 1,000 \text{ kgf/m}^3$

これらの関係を、それぞれのパラメータの値を変えて圧力 100~4,000 kgf/cm² の範囲について示したのが、

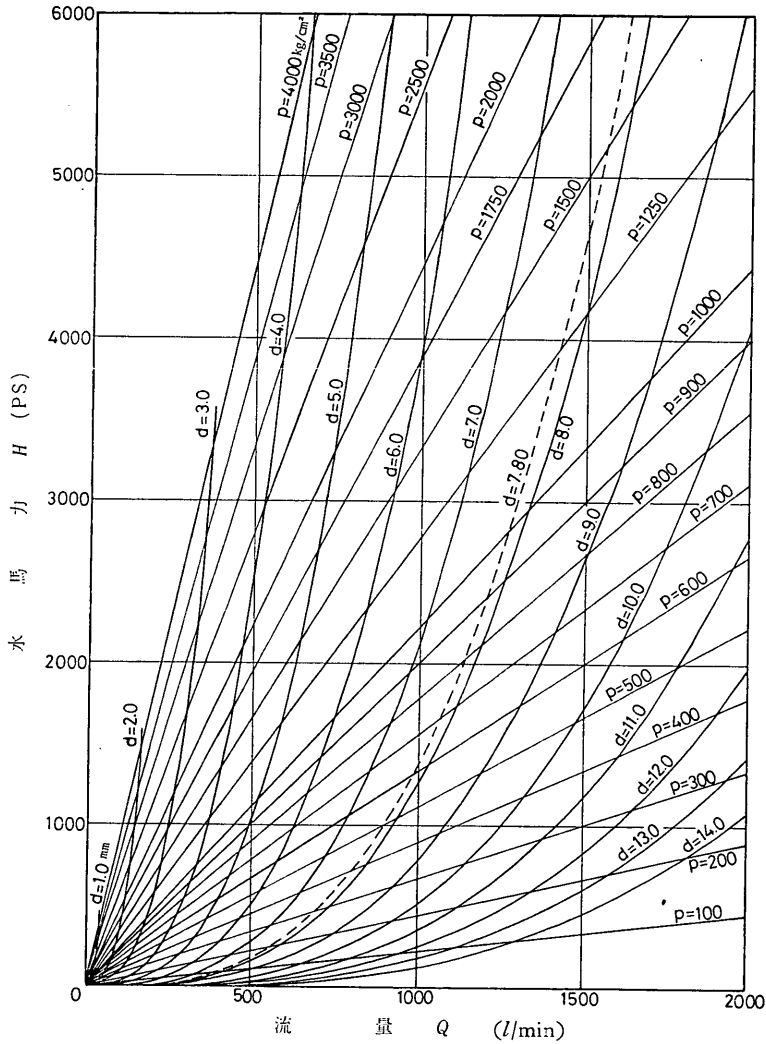


図-1 ノズルポンプにおける水馬力 H と流量 Q の関係

図-1 である。破線は、本試験におけるノズル径決定値 $d=7.80$ mm の場合を示す。

そのほかの試験条件として、ノズル移動速度については、静止、 1.44 mm/s、 2.88 mm/s の3種とした。またノズル先端から試料表面までの距離は、さんご礁岩の整形試料、コンクリートブロック、および花こう岩に対しては、 20 mm、 40 mm、 60 mm の3種とし、さんご礁岩の非整形試料に対しては、 $10\sim 240$ mm とした。

3. 試験装置および試験概要

3.1 試験装置

(1) 高圧ポンプ

化学プラント、ボイラ、熱交換器および船体の洗浄などに用いられている三連プランジャーポンプである。写真-1にそのポンプを示す。表-1にそれらのポンプの仕様を示す。

(2) ノズルおよびマニホール

a) ノズル

水ジェットのパフォーマンスを決める重要なものである。ノズル出口付近のストレート部の長さは、ふつうはノズル径の約4倍程度とされているが、本試験では約4.5

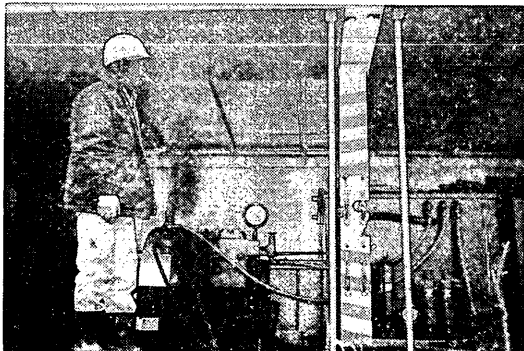


写真-1 高圧ポンプ

表-1 使用した高圧ポンプの仕様

メーカー	（株）スギノマシン	東京いすゞ自動車（株）
型式	JCE-57100	1502 P26
入力馬力 (PS)	150	150
常用吐出圧 (kgf/cm ²)	570	550
常用吐出量 (l/min)	80	100
使用台数 (台)	7	5

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

倍とした。ノズル出口の真円精度や内面の粗さは、水ジェットに性能に鋭敏に影響すると思われるので、とくに上仕上げとした。なお材質は S45C である。

b) マニホールド

12台のポンプから送られてくる圧力水を一箇所に集めるものである。ノズルがマニホールド先端部においてネ

ジ込み式によって取り付けられるようになっている。なおノズルをネジ込んでいくにしたがって、接触面のテーパ角に1度の差があることによって、その接触部でシールされるようになっている。材質は S45C である。図-2にノズルおよびマニホールドの取付図を示す。

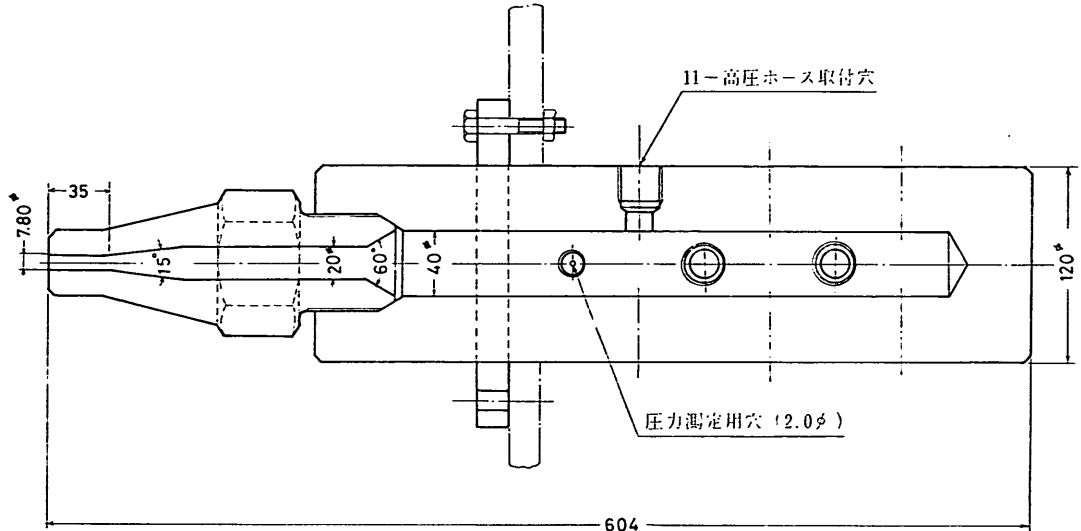


図-2 ノズルおよびマニホールド取付図

また試験中の圧力は、直径2 mmの圧力測定用穴がノズルに近いマニホールド側面にあけられており、その穴からホースに導かれて取り付けられているブルドン管圧力計によって読み取れるようになっている。

(3) ノズル移動装置付掘削試験箱

試料面からの衝突水ジェットや試料の破片が飛び散り周囲の物体に損傷を与えないためのもので、鋼板製である。その中にある試料台は、試料の大きさによって10cmごとに上下調整できるようになっている。またこの掘削試験箱の上部にはノズル上下移動装置がついており、ノズル先端から試料表面までの距離が、手動操作で微少調整できるようになっている。さらに、可変速モーターで駆動される水平移動装置によって0~7.19 mm/sの範囲で水平方向のノズル移動速度を変えられる。

3.2 試験概要

試験の実施状況の概略を図-3に示す。写真-2~4にその実施状況を示す。試験は次のように行なった。まず試料を掘削試験箱の中に入れ、ノズル先端から試料表面までの距離を設定値に合わせるなどして試料をセットする。つぎに、高圧ポンプを運転開始させる。すると12台

の高圧ポンプによって圧縮された高圧水は、それぞれの高圧ポンプから高圧ホースによってマニホールドまで導かれ1箇所に集められる。そして、ノズルから水ジェットとなって噴射される。さらに圧力計を見ながら圧力を増加させ、目標圧力に達したら、ノズル水平移動装置を作動させ掘削試験を行なう。そして試験後、試料を入れ換える。以後、同様に繰り返して行なう。

このようにしてすべての掘削試験終了後、掘削試験後の試料の写真撮影や掘削深さ、掘削幅、掘削体積などを測定した。

4. 試験結果および考察

4.1 試料の物理的性質

さんご礁岩の物理的性質については、個々の試料間にもばらつきがあると思われるが、個々の試料ごとに物理的性質を調べるにはかなりの困難をともなうので、本試験では、未使用さんご礁岩の中から代表的な1つを選び、その試料からいくつかのコアを採取して調べた。一方、コンクリートについては、コンクリートブロック打設の際にあらかじめ紙製型枠に製作してあったコアを用いて

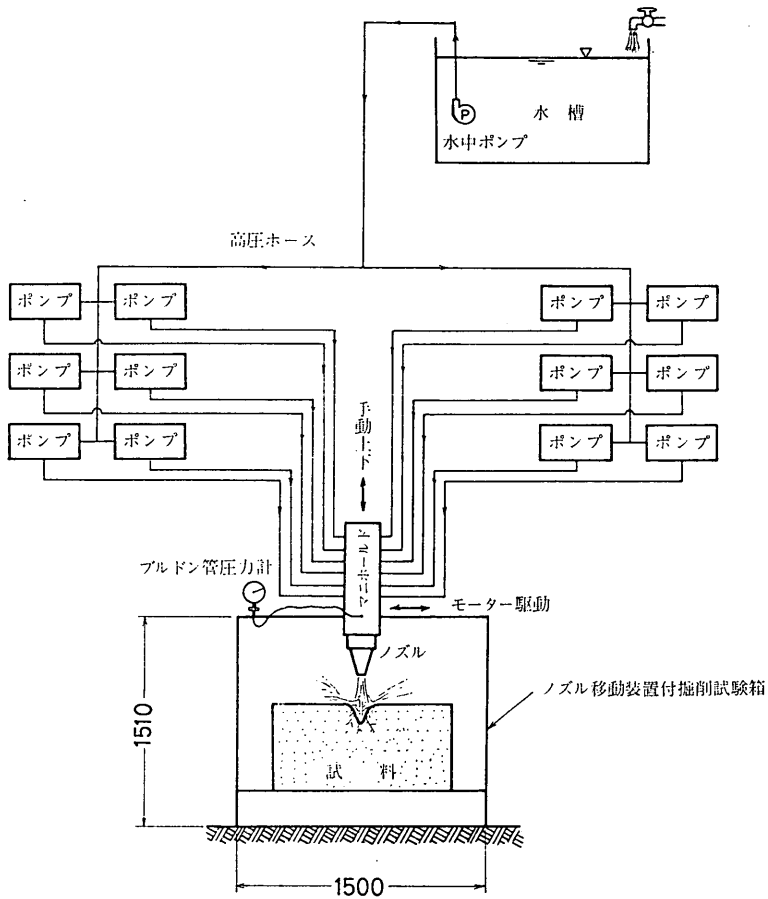


図-3 掘削試験状況概略図

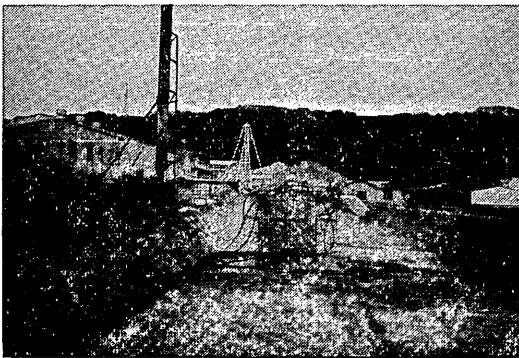


写真-2 掘削試験実施状況(1)

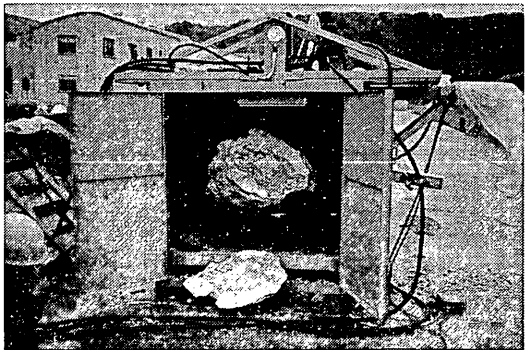


写真-3 掘削試験実施状況(2)

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

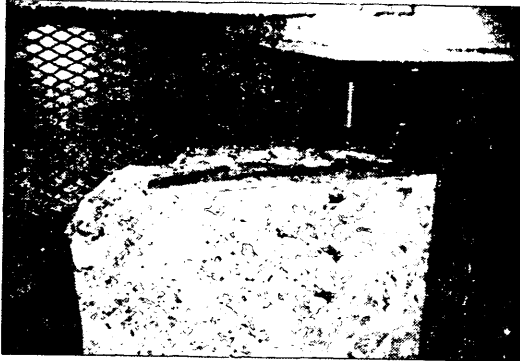


写真-4 掘削試験実施状況(3)

物理的性質を調べた。なお花こう岩については、掘削試験に用いた試料が2個と少なかったこと、過去の超高圧水ジェットによる花こう岩の掘削試験³⁾の際にすでに調べられていることなどから、前回のデータを用いた。

表-2にさんご礁岩、表-3にコンクリート(A)、表-4にコンクリート(B)の物理的性質の測定結果を示す。ただし、物理的性質の中の動的ヤング率は、つぎのようにして求めた。

コア内の弾性波通過時間を t_s コア平均長さを \bar{L} mm とすれば、コア内の弾性波速度 V_p cm/s は

$$V_p = \frac{\bar{L} \times 10^{-1}}{t} \quad (\text{cm/s}) \quad (4)$$

表-2 さんご礁岩の物理的性質測定結果

No.	\bar{D} (mm)		\bar{L} (mm)		w (gf)	δ	$t(\times 10^{-6}\text{s})$		E_d ($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)	P_c (t)	σ_c (kgf/cm^2)	P_t (t)	σ_t (kgf/cm^2)
	D_1	D_2	L_1	L_2			t_1	t_2					
1	55.8		110.7		592	2.19	21.65		5.83	6.74	276		
	55.8	55.8	110.8	110.6			21.65	21.65					
2	55.8		110.5		628	2.33	18.50		8.47	7.47	305		
	55.8	55.7	110.5	110.5			18.50	18.50					
3	55.7		109.4		570	2.10	21.90		5.36	5.19	213		
	55.7	56.6	109.4	109.4			21.90	21.85					
4	55.8		100.5		605	2.47	20.13		6.27	7.62	312		
	55.8	55.7	100.5	100.4			20.10	20.15					
5	57.5		108.6		610	2.16	19.33		6.97	4.60	177		
	57.2	57.8	108.6	108.6			19.30	19.35					
6	56.7		110.6		610	2.18	18.90		7.63	9.38	371		
	56.7	56.7	110.6	110.6			18.85	18.90					
7	55.8		110.5		615	2.28	19.98		7.10	8.43	345		
	55.8	55.8	110.5	110.5			19.98	19.97					
8	55.8		110.8		612	2.26	20.30		6.88	6.47	265		
	55.7	55.8	110.7	110.8			20.30	20.30					
9	55.8		112.8		626	2.27	22.60		5.77	9.58	392		
	55.9	55.7	112.8	112.8			22.55	22.60					
10	55.8		111.4		590	2.18	19.40		7.31	7.65	313		
	55.8	55.8	110.9	111.8			19.35	19.40					
11	55.9		109.8		590	2.20	23.40		4.94	6.38	256		
	55.8	55.9	109.9	109.7			23.20	23.50					

No.	\bar{D} (mm)		\bar{L} (mm)		w (gf)	δ	$t(\times 10^{-6}\text{s})$		E_d ($\times 10^3\text{kgf/cm}^2$)	P_c (t)	σ_c (kgf/cm^2)	P_t (t)	σ_t (kgf/cm^2)
	D_1	D_2	L_1	L_2			t_1	t_2					
12	55.6		110.2		646	2.41	16.97		10.39	8.92	367		
	55.5	55.7	110.2	110.2			16.95	16.98					
13	55.7		110.4		610	2.27	23.63		5.05	6.32	259		
	55.8	55.5	110.5	110.2			23.60	23.65					
14	55.5		109.7		610	2.30	19.30		7.57	7.62	315		
	55.5	55.5	109.6	109.8			19.30	19.30					
15	55.7		109.7		610	2.29	18.30		8.38			2.43	25.3
	55.7	55.6	109.7	109.7			18.29	18.30					
16	55.8		111.8		620	2.27	20.87		6.64			2.14	21.8
	55.7	55.9	111.8	111.8			20.85	20.88					
17	56.5		110.3		600	2.17	20.50		6.42			0.83	8.5
	56.5	56.5	110.2	110.3			20.50	20.50					
18	55.7		111.2		620	2.29	20.65		6.78			2.45	25.2
	55.6	55.7	111.2	111.2			20.50	20.80					
19	55.6		109.7		575	2.17	20.70		6.22			2.30	24.0
	55.5	55.6	109.6	109.8			20.65	25.70					
20	56.1		108.6		626	2.34				8.08			
	56.1	56.1	108.5	108.6									
21	56.1		108.6		593	2.20				3.60			
	56.1	56.1	108.5	108.6									
平均					2.25				6.84		290		21.0

と表わされる。

一方、密度 ρ $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^4$ 、動的ヤング率 E_d kgf/cm^2 とすると、bar velocity としての弾性波速度は

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (\text{cm/s}) \quad (5)$$

となるので、上の二式を等しいとおくことにより、動的ヤング率は

$$E_d = \rho \times \left(\frac{\bar{L}}{t}\right)^2 \quad (\text{kgf}/\text{cm}^2) \quad (6)$$

と求められる。

さて、さんご礁岩についての物理的性質の測定結果をみると、みかけ比重は 2.10~2.47、平均で 2.25 であり圧縮強度は 177~392 kgf/cm^2 、平均で 290 kgf/cm^2 であった。今までの与論島のさんご礁岩についての調査結

果²⁾では、みかけ比重について大きいものでは 2.4、圧縮強度については 200 kgf/cm^2 、あるいは 120~350 kgf/cm^2 と報告されていることから考えると、今回用いたさんご礁岩は、与論島における平均的なさんご礁岩とみなすことができるといえよう。ここではかの岩石の物理的性質とさんご礁岩の物理的性質を比べてみる。すると、比重の点からは 2.13⁶⁾であるコンクリートに近く、圧縮強度の点では平均的にはコンクリートに近いが、表-5に示すシュミットハンマー反発値による推定圧縮強度で、高い試料では 430~560 kgf/cm^2 であることから、局部的には大理石の圧縮強度 535 kgf/cm^2 ⁶⁾に近いようである。また動的ヤング率の点からは、今回の測定で平均 6.84 $\times 10^3$ kgf/cm^2 であり、大理石の 6.83 $\times 10^3$ kgf/cm^2 ⁶⁾と酷

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

表-3 コンクリート(A)の物理的性質測定結果

No.	\bar{D} (mm)		\bar{L} (mm)		w (gf)	δ	$t(\times 10^{-6}s)$		E_d ($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)	P_0 (t)	σ_c (kgf/cm^2)	P_t (t)	σ_t (kgf/cm^2)
	D_1	D_2	L_1	L_2			t_1	t_2					
1	99.8		210.3		3608	2.20				22.25	284		
	99.7	99.8	210.2	210.3									
2	99.4		211.7		3608	2.20				21.00	271		
	99.5	99.2	211.6	211.7									
3	99.5		208.3		3801	2.35				22.50	289		
	99.5	99.5	208.2	208.3									
4	98.1		209.3		3607	2.29				25.25	334		
	98.2	98.0	209.2	209.3									
5	99.7		208.4		3701	2.28				25.50	321		
	99.7	99.6	208.4	208.4									
平均						2.26					300		

表-4 コンクリート(B)の物理的性質測定結果

No.	\bar{D} (mm)		\bar{L} (mm)		w (gf)	δ	$t(\times 10^{-6}s)$		E_d ($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)	P_c (t)	σ_c (kgf/cm^2)	P_t (t)	σ_t (kgf/cm^2)
	D_1	D_2	L_1	L_2			t_1	t_2					
1	99.0		209.6		3507	2.17				22.50	292		
	99.1	98.9	209.6	209.5									
2	99.5		206.0		3406	2.13				24.50	315		
	99.5	99.5	206.0	206.0									
3	99.6		208.0		3408	2.11				21.00	270		
	99.6	99.5	208.0	208.0									
4	99.6		212.6		3502	2.11				22.70	291		
	99.6	99.6	212.6	212.6									
5	99.4		208.9		3407	2.10				20.75	267		
	99.2	99.5	208.9	208.9									
平均						2.19					287		

似している。

つぎにコンクリートについての結果では、みかけ比重（厳密には単位体積当りの重量のことであるが、ここではこのように見かけの比重として扱うこととする）はコンクリート(A)で平均 2.26、同じく(B)で平均 2.19、圧縮強度はコンクリート(A)で平均 300 kgf/cm^2 、同じく(B)で

平均 287 kgf/cm^2 と、(A)、(B)とも配合比を変えたにもかかわらず、ほぼ同様な結果であった。また、コンクリート(C)については表-5に示すようにシュミットハンマー反発値から推定圧縮強度を求めた。

ここで測定結果全体としての傾向をみてみると、コンクリート(A)、(B)ともにみかけ比重（単位体積当り重量）、

圧縮強度がばらつきが少ないのに比べ、さんご礁岩は、みかけ比重、動的ヤング率、圧縮強度、圧裂引張強度などいずれもばらつきが大きいという特徴を示している。これはさんご礁岩が、外見上からも認められるとおり、コンクリートと比べて多孔質、かつ不均質であることによるものと考えられる。

ところで、物理的性質の中でもとりわけ強度は、ジェットによる掘削性とは密接な関係があると考えられる。したがって強度試験における破壊過程を観察してみた。まず、圧縮試験での破壊過程を観察したところ、コンクリートでは、破壊クラックは負荷方向に対して斜め方向にやや曲線的に変化しながら進行していき、いわゆるせん断型破壊であるくさび形の破壊形状を示す傾向があった。一方、さんご礁岩の場合は、負荷方向に対し平行な方向に直線的なクラックが破壊直前に入る傾向があり必ずしもくさび型の破壊形状を示すものではなかった。このようなクラックは、コア内にもともと存在していた空げきや弱い介在物などの端に、圧縮応力とコアの横方向への拡がり応力から誘発される引張応力によって生じたものと考えられる。したがってさんご礁岩は、引張応力に弱い岩石であるということを暗示しているようであった。このことは、つぎのさんご礁岩の圧裂試験の観察からも確かめられた。圧裂試験での破壊クラックは、ほぼ負荷接触点を結ぶ中心線に沿って入り、2～4個に破壊された。そして圧裂引張強度は表-2に示すように平均 21 kgf/cm^2 であり、圧縮強度のほぼ $1/14$ 、すなわち、ぜい性度は14であった。コンクリートでは通常8～10といわれている⁷⁾ こと、さんご礁岩とコンクリートの一軸圧縮強度はほぼ等しかったことなどから、さんご礁岩は、コンクリートと比べてよりぜい性破壊を起こしやすいといえるであろう。

そのほか、このようなさんご礁岩の機械的な掘削性について、バイト式掘削試験装置によって検討してみた。その結果、幅2cmのバイトで掘削する場合の水平掘削抵抗は、掘削深さ1cmの増加ごとに約1,200kgfであり、モルタル(圧縮強度 132 kgf/cm^2)の結果⁹⁾ とほぼ同様であった。したがって、さんご礁岩は、モルタルとほぼ同様な機械的掘削性を有すると考えられる。

4.2 試料の掘削試験後の状況と掘削プロファイル

さんご礁岩、コンクリートブロックおよび花こう岩の各試料の掘削試験後の状況を写真-5～15に示す。まず、掘削跡を観察してみた。それによると、さんご礁岩では比較的硬いと思われる試料では、写真-6に示す試料No. 2のように、掘削幅は広く、浅い掘削跡を呈した。一方比較的軟かいと思われる試料では、写真-9に示す試料

No. 15のように、概して細く、深い掘削跡を呈した。一般には水くさびと思われる作用によって大きく局部破壊される傾向にあった。写真-5, 6, 11, 12などはその典型的な例である。このように局部破壊され、試料本体から分離破壊した破片の重量を本報告では破砕量と呼ぶことにし、その破砕量を破壊程度とともに表-5にしてある。ただし花こう岩のように全体が真二つに割れてしまったものについては、試料全体が破砕したと解釈して試料全

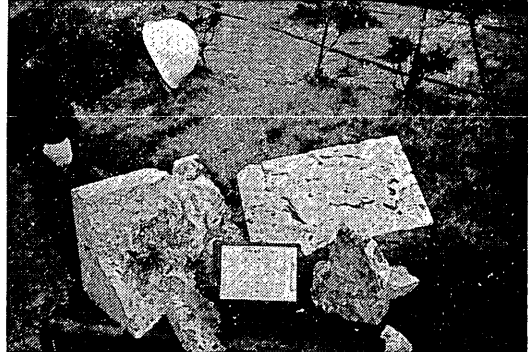


写真-5 さんご礁岩の掘削試験後の状況 (試料 No. 1)

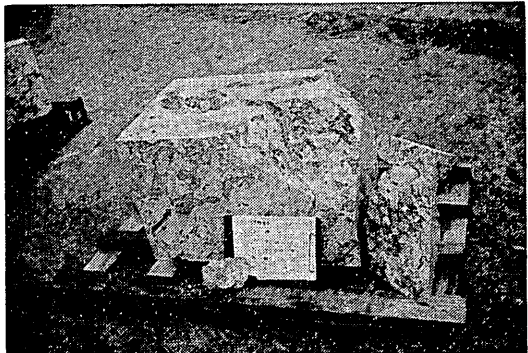


写真-6 さんご礁岩の掘削試験後の状況 (試料 No. 2)

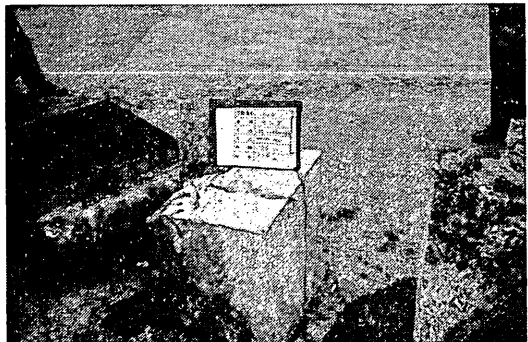


写真-7 さんご礁岩の掘削試験後の状況 (試料 No. 4)

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

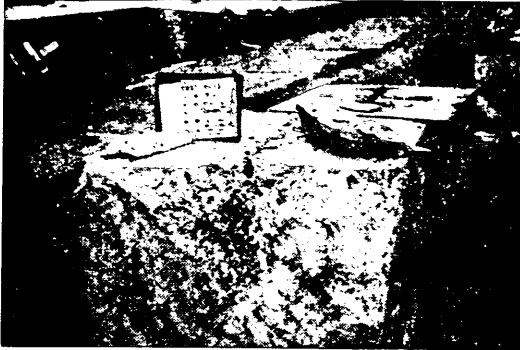


写真-8 さんご礁岩の掘削試験後の状況 (試料 No. 14)



写真-11 さんご礁岩 (非整形) の掘削試験後の状況 (試料 No. 8)



写真-9 さんご礁岩の掘削試験後の状況 (試料 No. 15)



写真-12 さんご礁岩の (非整形) の掘削試験後の状況 (試料 No. 16)



写真-10 さんご礁岩 (非整形) の掘削試験後の状況 (試料 No.7)

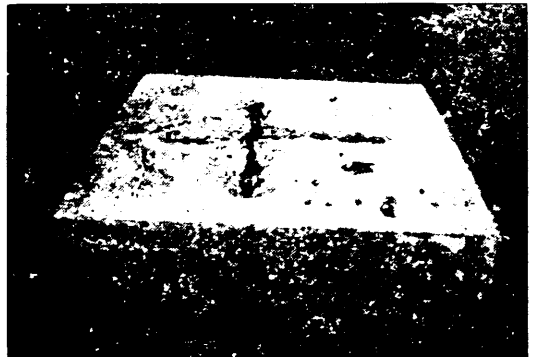


写真-13 コンクリート(A)の掘削試験後の状況 (試料 No. 11)



写真-14 コンクリート(B)の掘削試験後の状況
(試料 No. 12)



写真-15 花こう岩の掘削試験後の状況
(試料 No. 18, No. 19)

が長い場合は、一部貫通したものもあった。

花こう岩は、試料寸法が小さいことからノズル固定の試験条件で行なったのであるが、図-18, 19の掘削プロファイル、写真-15に示す掘削試験後の状況を見るとわかるように、円すい状に掘削された後、真二つに破壊された。ところが、さんご礁岩でノズル固定の試験条件で行なった場合の掘削プロファイルは、図-16に示すように円筒状であった。このような円筒状の掘削プロファイルは、過去の超高圧水ジェットによる花こう岩の掘削試験³⁾でも同様に見られたものである。ただしノズル出口圧力は約 $3,000 \text{ kgf/cm}^2$ と約 500 kgf/cm^2 と大幅な相違がある。このように、ノズル固定という同一試験条件でありながら、掘削プロファイルの点では、同程度のノズル出口圧力であっても試料によって著しく異なった。また同一試料であってもノズル出口圧力によって著しく異なった。そのほか、花こう岩の一軸圧縮強度は約 $1,000 \text{ kgf/cm}^2$ であるのに対し、今回用いた水ジェットのノズル出口圧力は、約 500 kgf/cm^2 と必要破壊圧力程度であった。以上試料やノズル出口圧力によっても掘削プロファイルが異なること、必要破壊圧力程度のノズル出口圧力でも試料寸法の小さい場合は破壊し得ることなどは、今回の試験で水ジェットの噴射後約30秒という割合短時間で二つに破壊されたと思われる音が聞えたことともあわせて、今後の水ジェットによる掘削機構を考える上できわめて興味深いものである。

つぎに、ノズル移動方向に対する掘削プロファイルを図-4~19に示す。これは図-20に示されるような掘削深

さんご礁岩 (試料 Nc. 1)

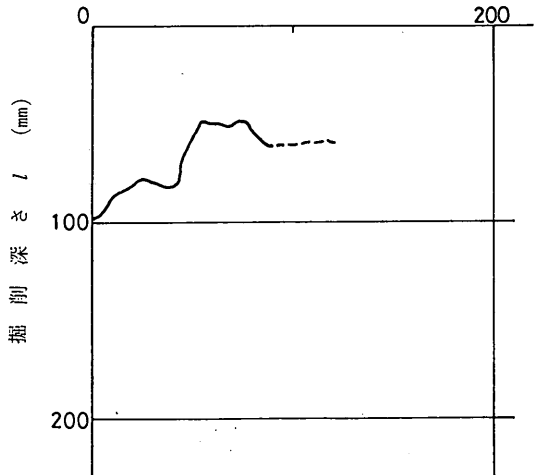


図-4 掘削プロファイル

体の重量を示してある。

そのほか、掘削試験後に、シュミットハンマー反発値から推定した圧縮強度も表-5に示してある。その結果では、試料 No. 1, No. 2, No. 3 はいずれも推定圧縮強度は 500 kgf/cm^2 以上であり、推定圧縮強度が高いにもかかわらず、よく破壊された。しかしながら、まれには写真-7に示す試料 No. 4 のようにそうでない試料もあった。この試料は、外見からも硬そうであり、事実、シュミットハンマー反発値より推定圧縮強度は 430 kgf/cm^2 であった。そしてこの試料の破砕量は表-5に示されるとおり、 4.2 kgf とわずかであった。

コンクリートでは写真-13, 14に示すようにだいたい幅一定のすかしみぞ状に掘削され、みぞ周辺の試料表面は、局部的にはく離破壊されるというような掘削形式が一般的であった。またコンクリート(C)のように掘削時間

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

さんご礁岩 (試料 No. 2)

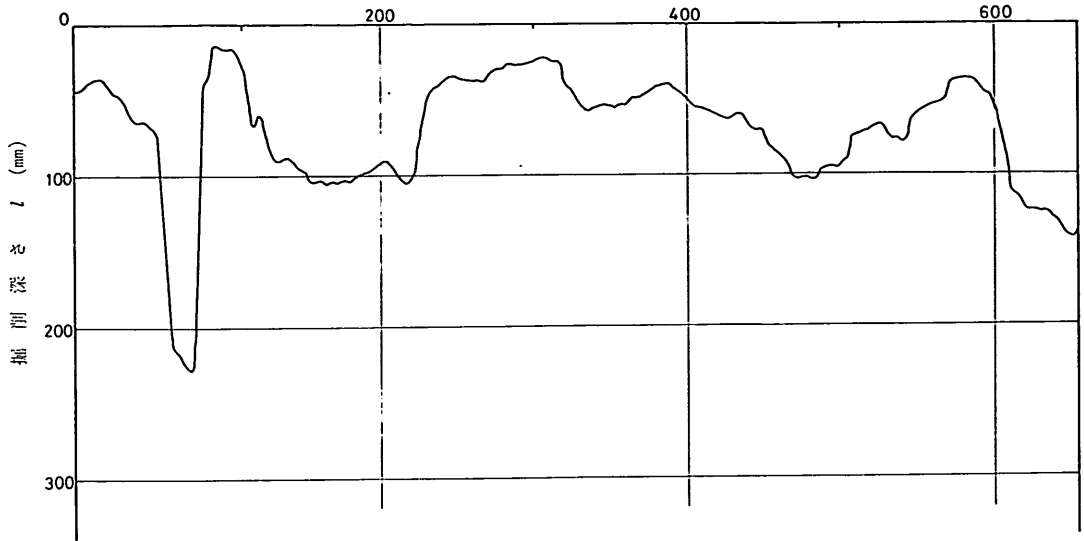


図-5 掘削プロファイル

さんご礁岩 (試料 No. 3)

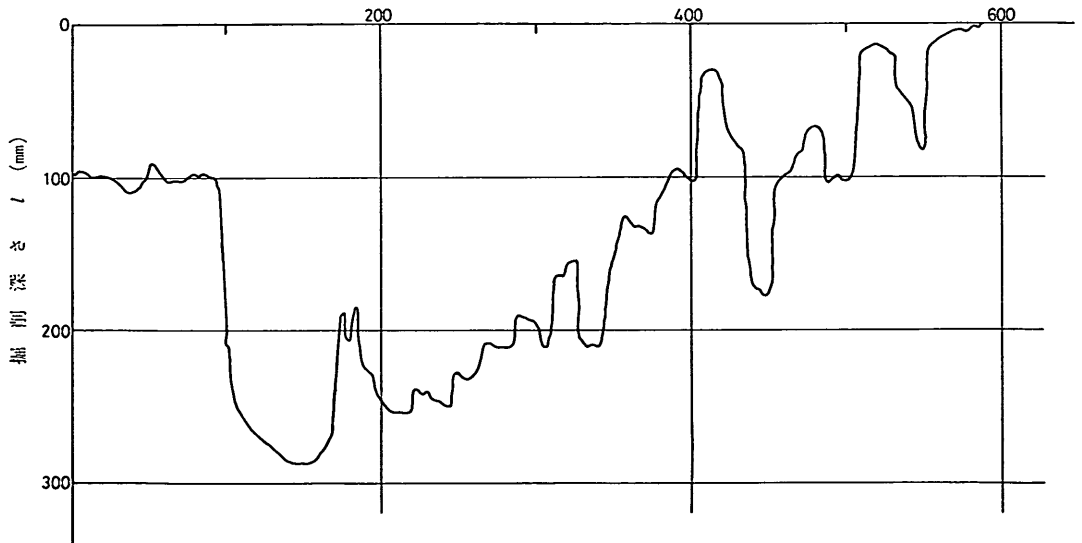


図-6 掘削プロファイル

さんご礁岩 (試料 No. 4)

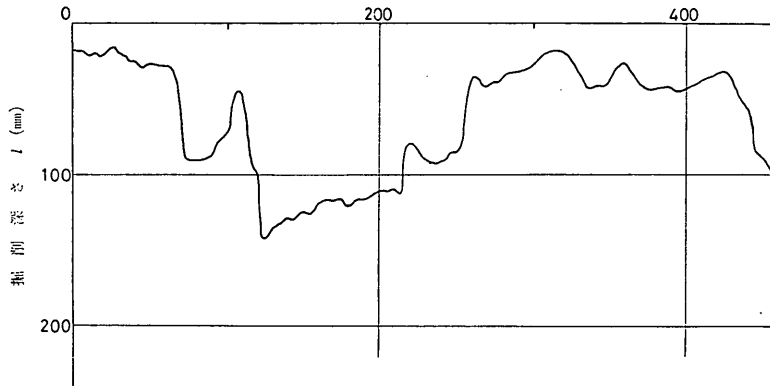


図-7 掘削プロファイル

コンクリート (A) (試料 No. 5)

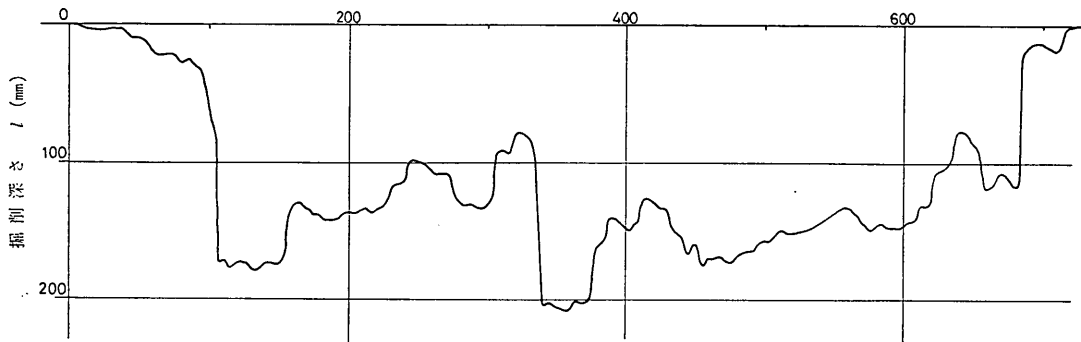


図-8 掘削プロファイル

コンクリート (B) (試料 No. 6)

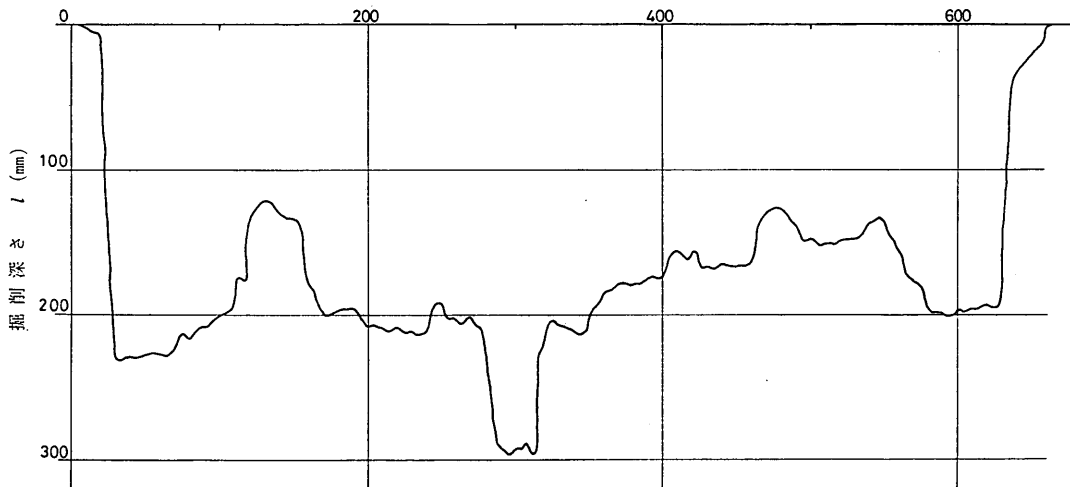


図-9 掘削プロファイル

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

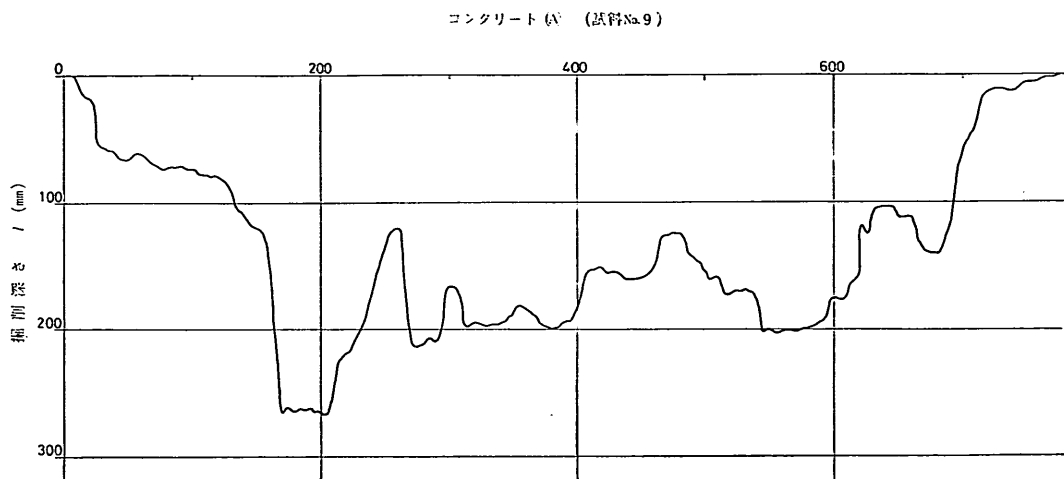


図-10 掘削プロファイル

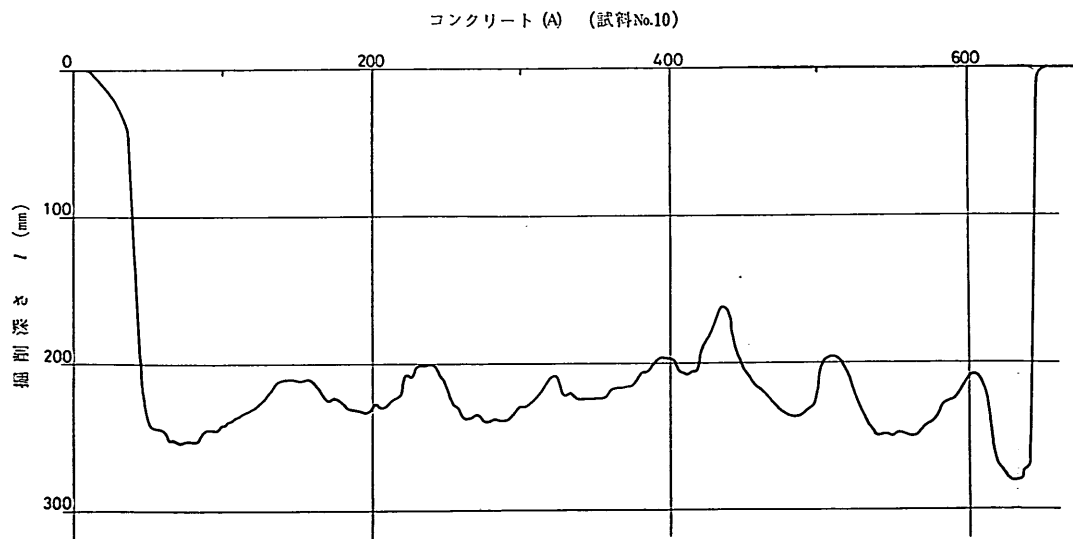


図-11 掘削プロファイル

No.11 (=No.6) コンクリート (B)

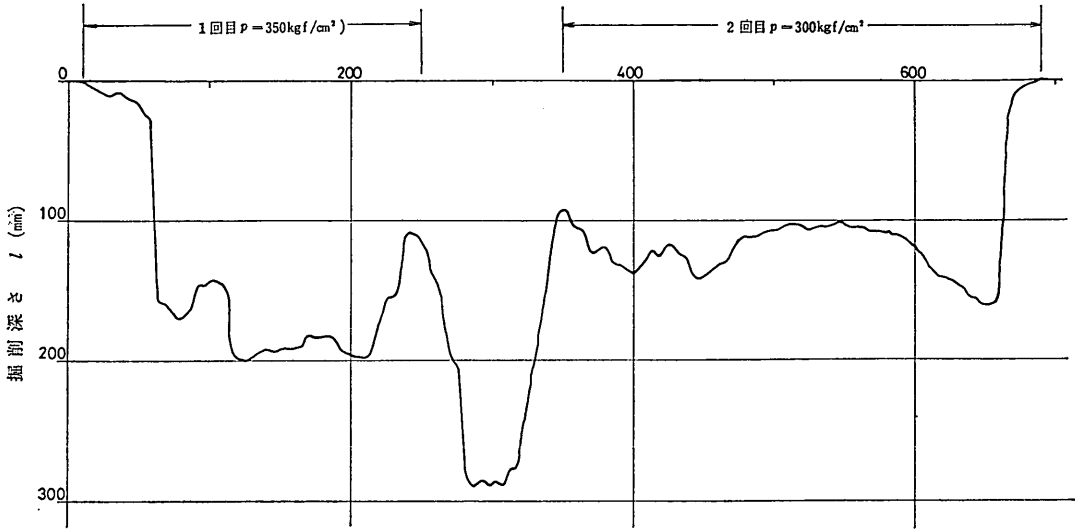


図-12 掘削プロファイル

No.12 (=No.5) コンクリート (A)

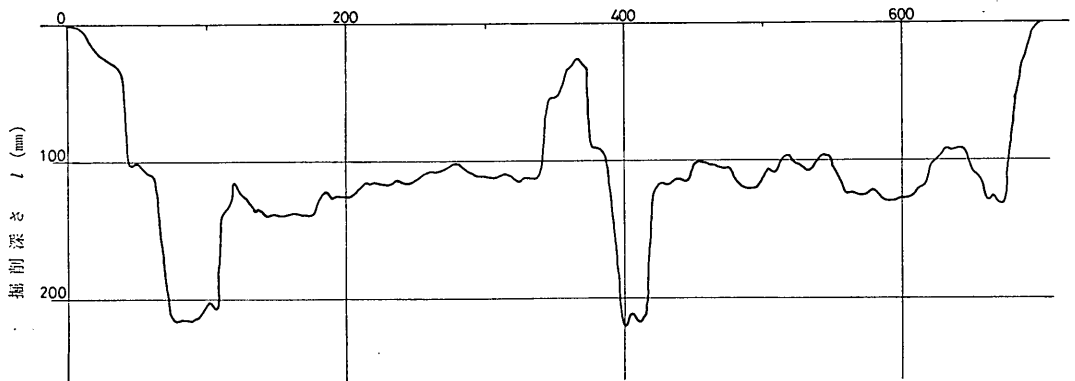


図-13 掘削プロファイル

コンクリート (C) (試料No.13)

1回目 $V_a = 2.88 \text{ mm/s}$

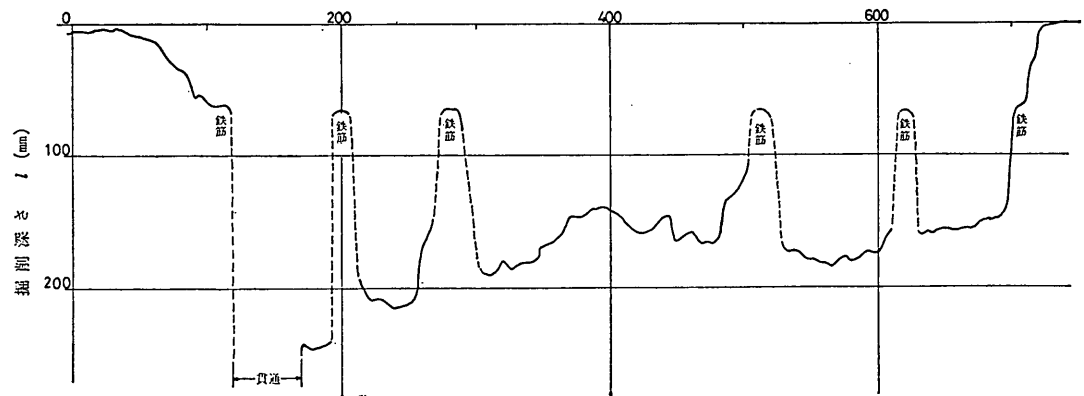


図-14 掘削プロファイル

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

コンクリート(C) (試料No.13)

2回目 $V_n=1.44$ cm/s

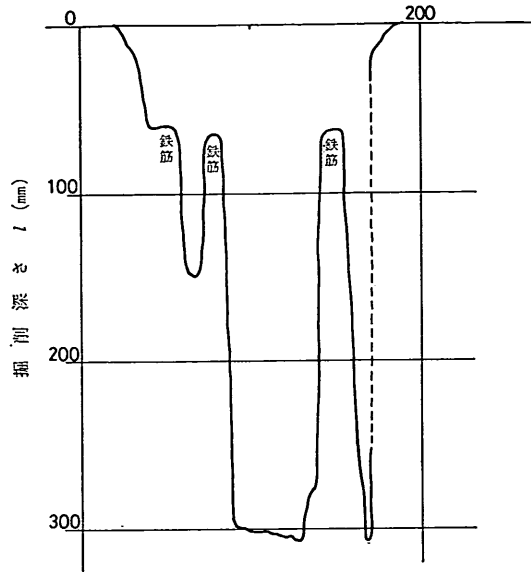


図-15 掘削プロファイル

さんご礁岩 (試料No.14)

1回目 $V_n=0$

2回目 $V_n=2.88$ mm/s

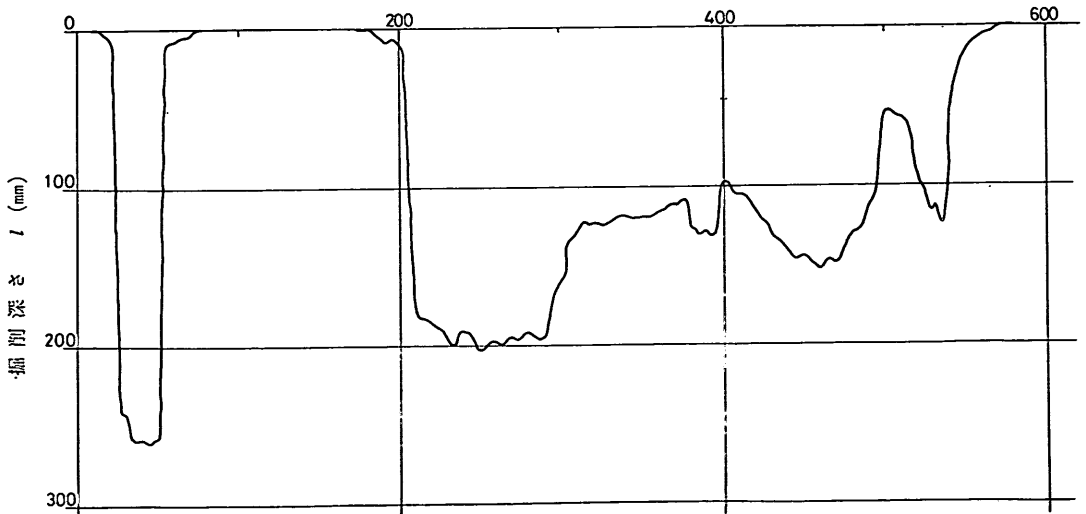


図-16 掘削プロファイル

さんご礁岩 (試料 No. 15)

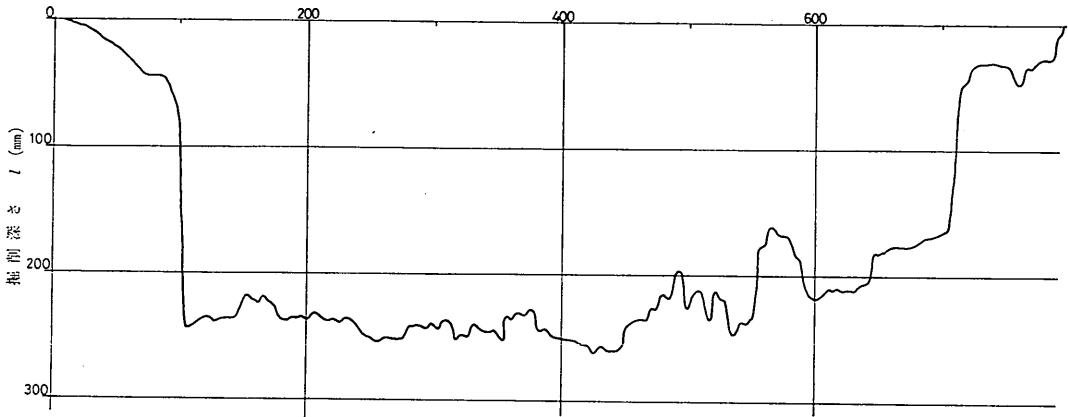


図-17 掘削プロファイル

No. 18 花こう岩

$V_n=0$

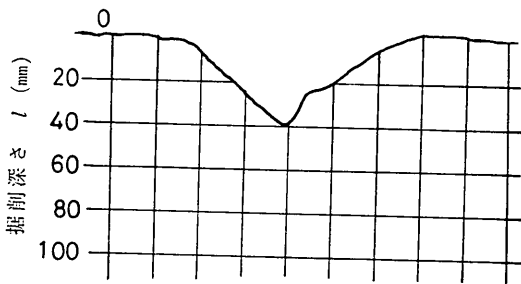


図-18 掘削プロファイル

No. 19 花こう岩

$V_n=0$

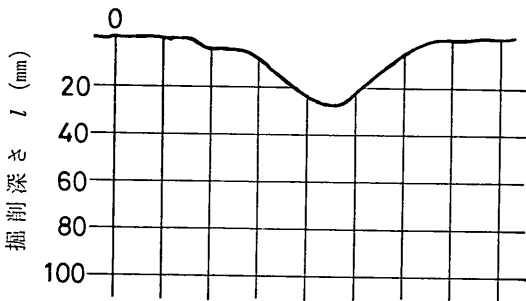


図-19 掘削プロファイル

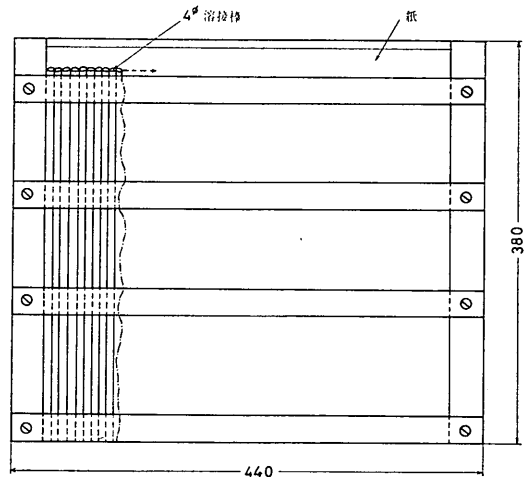


図-20 掘削深さ測定器

さ測定器によって、4 mm 間隔の掘削深さを紙にプロットして描いたものである。破壊された試料については破壊面を合せて復元した後、掘削部分についてだけ掘削深さを測定した。ただし非整形さんご礁岩については掘削深さ測定器が使用できなかったため、約 1 cm 間隔でノギスで測定した。結果をみると、さんご礁岩の方が掘削プロファイルが不規則かつ複雑であり、それに比べコンクリートの方が割合平坦な掘削プロファイルを呈している。それだけさんご礁岩の方が、組織的に不均質であるためと考えられる。なお花こう岩ではノズル固定の試験条件であり、前述のとおり図-18~19 のような掘削プロファイルを示した。

ここで、掘削プロファイルの不規則な度合を示す変動

表-5 掘削試験結果一覽表

ケース No.	試料		物理的性質		試験条件					試験結果					備考				
	No.	岩種	寸法 (cm)	比重 θ	σ'_c (kgf/cm ²)	ρ (kgf/cm ³)	L (mm)	V_n (mm/s)	H (PS)	l (mm)	l _{max} (mm)	b (mm)	b _{max} (mm)	S (cm ²)		v (cm ³ /s)	m (kgf)	M (cm ³ /s)	
1	1	さんご礫	64×46×40	2.11	550	380~390	40	2.88	674	67.3	86	69.0	62	46.4	390	248.5	13.4	非常に大 (5個)	
2	2	"	46×69×46		560	400	60	2.88	714	64.7	107	59.4	110	38.4	1460	15.2	11.1	大 高部破壊 (3個)	
3	3	"	46×77×46	2.22	500	390	20	2.88	687	140.1	280	142.6	65	199.8	7500	11.5	57.4	大 高部破壊 (3個)	
4	4	"	47×46×46		430	380	20	2.88	661	68.4	150	41.6	26	28.5	990	4.2	8.2	大 高部破壊 (2個)	
5	5	コンクリート(A)	100×100×50		300	380	40	2.88	661	137.3	205	39.5	41	54.2	2580		15.6	小 表面破壊	
6	6	"	(B)100×100×50		250	370~360	40	2.88	622	176.4	224	44.2	40	78.0	3460		22.4	小 表面破壊	
7	7	さんご礫 (非整形)	100×80×60		190	390~370	10~240	2.88	661	79.4	120		70	31.8		86.5	9.1	小 表面破壊	
8	8	"	80×70×50		250	380	10~	2.88	661	67.9	82		42	27.2		20.6	7.8	大 (2個)	
9	9	コンクリート(A)	100×100×50		255	450~480	40	2.88	894	175.3	270	42.6	50	74.7	3850		21.5	や大表面破壊 (3個)	
10	10	"	(B)100×100×50		210	480~500	40	2.88	968	222.7	275	37.7	32	84.0	4900		24.1	きれいなすかしみぞ状掘削	
11	11	"	100×100×50		250	350	40	2.88	584	175.3	207	48.6	47	85.2	1500		24.5	きれいなすかしみぞ状掘削	
12	12 (=No.6)	"	100×100×50		250	300	40	2.88	464	126.2	165	46.6	47	58.8	1740		16.9	きれいなすかしみぞ状掘削	
13	13 (=No.5)	"	(A)100×100×50		300	290	40	2.88	441	123.4	215	54.3	65	67.0	3350	6.0	19.3	やや大表面破壊	
14	14	"	(c)130×122×40		220	1回目 460~480 2回目 470~490	40	2.88	909	157.9	195	45.9	52	72.5	2900		20.8	大 貫通	
15	15	鉄筋入				460~480	40	1.44	938	301.2	308	58.5	63	177.1	1770		25.5		
16	16	さんご礫	91×76×76		350	1回目 460~480 2回目 460~480	40	静止	909	249.5	258	65.9	40	164.4	850	44.5	4.7	高部破壊 (3個)	
17	17	"	46×86×40		240	460~480	40	2.88	909	144.1	192	38.3	31	55.2	1480		15.9	小表面破壊	
18	18	"	80×80×60	2.28	220	460~470	10~230	2.88	894	94.8	130	40*	50	37.9		43.7	10.9	非常に大 (3個)	
19	19	"	120×90×70	2.48	210	460~470	30~80	2.88	894	131.2	230	40*		52.5		80.2	15.1	非常に大 (5個)	
20	20	(非整形)	32×33×16		1000*	3分 440	20	静止	923		30					105	50.3	0.6	非常に大 (其二つ)
21	21	花こう岩	30×38×16		1000*	3分 480	20	静止	938		43					110	50.0	0.6	非常に大 (其二つ)
22	22	"																	

係数 C_v を求めてみた。変動係数 C_v は次式で示される。

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{(l-\bar{l})^2}{n-1}}}{\bar{l}} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

ただし n : データ個数

この変動係数 C_v をノズル出口圧力 p に対してプロットしたものが図-21 である。コンクリートでは、圧力の増加とともにいくぶん変動係数が低下するのに対し、さんご礁岩では、圧力に関係せず、しかも変動係数はコンクリートよりも大きい。山門ら⁴⁾によれば安山岩で約6%、砂岩、モルタルでは約15%と報告されているが、今回の試験では、さんご礁岩で平均34%、コンクリートで平均15%であった。

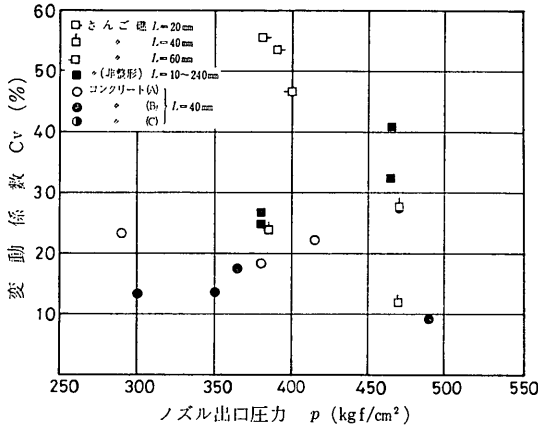


図-21 掘削みぞの変動係数とノズル出口圧力との関係

4.3 平均掘削深さ \bar{l} , 最大掘削深さ l_{max} , 平均掘削幅 \bar{b} , 表面最大掘削幅 b_{max} , 掘削体積 v

それらの測定結果を、試験条件とともに表-5に示す。平均掘削深さ \bar{l} は、試験条件に対してなるべく安定した値を得るため、図-4~19までの掘削プロファイルのうちで、重複して掘削した部分や破壊部の極近傍部分を除いた分についての面積を求め、その分についての正味の掘削長さで除することにより求めた。最大掘削深さ l_{max} は、破壊部極近傍、あるいはコンクリート(C)などにおける貫通部を除いた上での値である。表面最大掘削幅 b_{max} は、試料表面での掘削みぞ幅最大値とした。掘削体積 v は掘削みぞにメスシリンダで水を流し込むことによって測定した。ただし破壊部分には粘土を用いて水がしみ込まないようにして測定した。また試料表面のはく離破壊のひどいものについては、その部分を除いて測定した。平均掘削幅 \bar{b} は、掘削体積 v を (平均掘削深さ \bar{l} × 正味の掘削長さ) で除した値である。ふつうはノズル径の5

倍程度の掘削幅が多いが、今回は6~7.7倍であった。どちらかというと、コンクリートはだいたい一定幅を示しているのに比べ、さんご礁岩はばらつきが多く幅が広い傾向にあるようであった。また、試料の中には、まれに写真-9に示す試料 No. 15 のように表面よりも内部でいくぶん広く掘削されているものもあった。

しかし、掘削体積 v には試料表面での破壊部分の体積を含んでいる場合もあり、必ずしも平均掘削幅 \bar{b} が表面最大掘削幅 b_{max} よりも小であるとは限らなかった。

4.4 平均掘削深さ \bar{l} とノズル出口圧力 p , ノズル先端から試料表面までの距離 L , およびノズル移動速度 V_n との関係

平均掘削深さ \bar{l} は、水ジェット掘削能力を判定する重要な値であるので、この値に対する代表的な影響パラメータであるノズル出口圧力 p , ノズル先端から試料表面までの距離 L , およびノズル移動速度 V_n との関係について調べた。

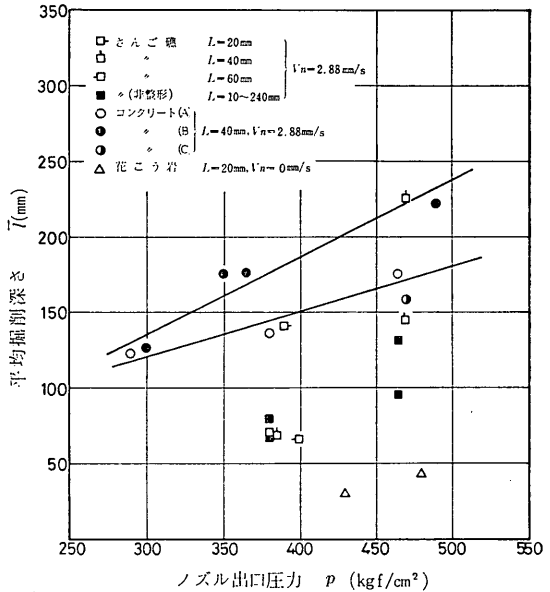


図-22 平均掘削深さとノズル出口圧力との関係

平均掘削深さ \bar{l} とノズル出口圧力 p との関係を図-22に示す。さんご礁岩については、ばらつきが大きいことから決った関係は求められないが、コンクリートについては、圧力増大にともない平均掘削深さ \bar{l} は単調に増加するようである。この傾向は今までの水ジェットによる掘削試験の結果^{4,9,10)}と同様である。

つぎに、平均掘削深さ \bar{l} とノズル先端から試料表面までの距離 L をそれぞれノズル径 d で除して、それらの関

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

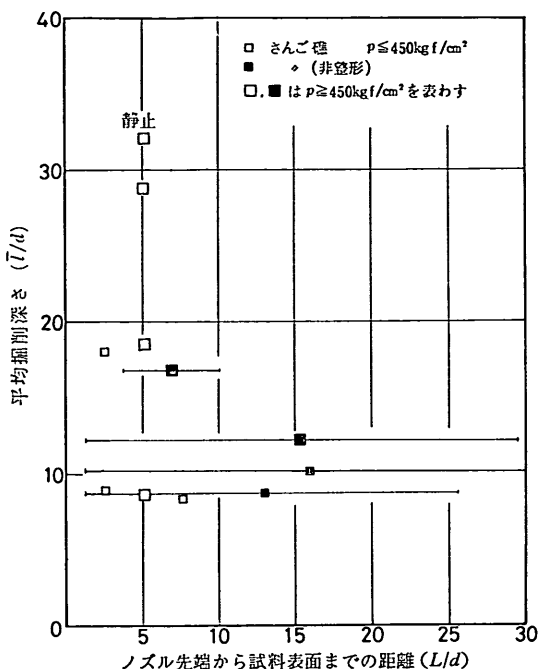


図-23 平均掘削深さとノズル先端から試料表面までの距離

係を無次元表示で表わしたものを図-23 に示す。この図からみると L/d の増加とともに \bar{l}/d は減少するようにも見えるが、はっきりしない。しかし、非整形のさんご礁岩のうち試料 No. 7 の掘削みぞは、写真-10 に見られるように、ノズル先端から試料表面までの距離 L が、ノズルの移動とともに変化したにもかかわらず、ほぼ一定深さとして観察された。また、柳井田ら¹¹⁾によれば空气中高速噴流における噴流軸上の流圧は、 R_e 数 (今回は 2.42×10^6)、ノズル形状によってもいくぶん異なるが、少なくとも数十倍以上持続され得ることが確認されている。ちなみにその減衰特性から求められた初期区の長さは、最低で $50d$ であったといわれている。したがって今回の L/d 範囲までは、水ジェットの掘削能力に対するノズル先端から試料表面までの距離 L の影響が出ていないといえよう。さらに試料表面と水ジェットの角度の相違による水ジェットの掘削能力についても、非整形さんご礁岩が写真-11, 12 に示すように局部破壊されており、大きな差はないと考えられる。

最後に、平均掘削深さ \bar{l} とノズル移動速度 V_n との関係を図-24 に示す。試験点が少ないが、ノズル移動速度 V_n の増加とともに、さんご礁岩、コンクリートとも平均掘削深さ \bar{l} が減少傾向を示すことは、従来の試験結果^{3, 4, 9, 10)}と同じである。

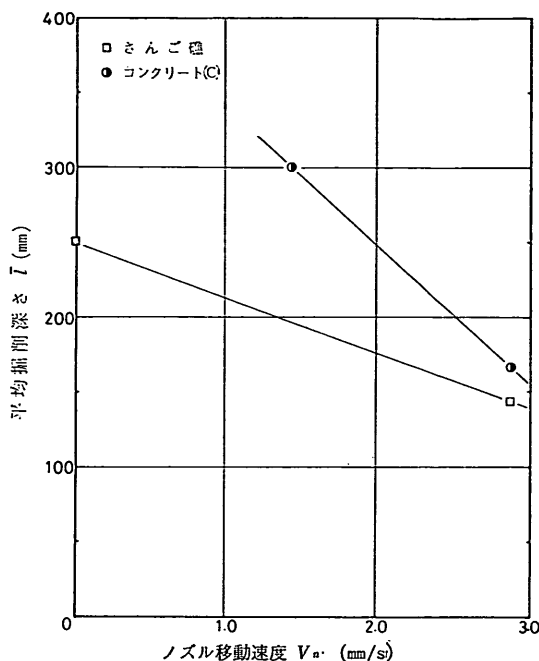


図-24 平均掘削深さとノズル移動速度との関係

4.5 平均掘削深さ \bar{l} および平均掘削断面積 \bar{S} とノズルの単位移動長さ当りの供給エネルギー H/V_n との関係

水ジェットによって与えられたノズルの単位移動長さ当りの供給エネルギーの変化に対して、平均掘削深さ \bar{l} や、ノズル移動方向に対して直角方向の平均掘削断面積 \bar{S} がどうなるかを調べた。ノズルの単位移動長さ当りの供給エネルギー H/V_n は、縦軸に平均掘削深さ \bar{l} をとった場合には、掘削幅を一定と考えてノズル移動方向に平行に単位長さ当りノズルが移動した場合の掘削体積を得るのに供給されたエネルギーとも解釈される。

平均掘削深さ \bar{l} とノズルの単位移動長さ当りの供給エネルギー H/V_n との関係を図-25 に示す。同様に平均掘削断面積 $\bar{S} = (\bar{l} \times \bar{b})$ とノズルの単位移動長さ当りの供給エネルギー H/V_n との関係を図-26 に示す。試験点が少ないながらも一応両図から実験式が求められるが、 $\bar{S} = \bar{l} \times \bar{b}$ の関係へ、 \bar{l} には \bar{l} の実験式、 \bar{b} には岩種についての \bar{b} の平均値を代入して、実際の試験点と反復検討しながら \bar{l} および \bar{S} と H/V_n の実験式を定めた。そして、それぞれさんご礁の場合で $\bar{l} = 0.04(H/V_n)$ 、 $\bar{S} = 0.0168(H/V_n)$ 、コンクリートの場合で、 $\bar{l} = 0.67(H/V_n)^{0.7}$ 、 $\bar{S} = 0.34(H/V_n)^{0.7}$ と定めた。図中にそれらの実験式を示してある。これらの図から掘削深さだけに限れば、同一供給エ

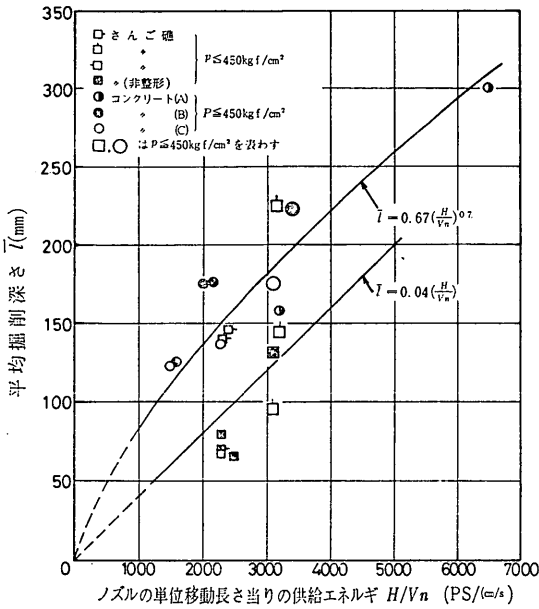


図-25 平均掘削深さとノズルの単位移動長さ当りの供給エネルギーとの関係

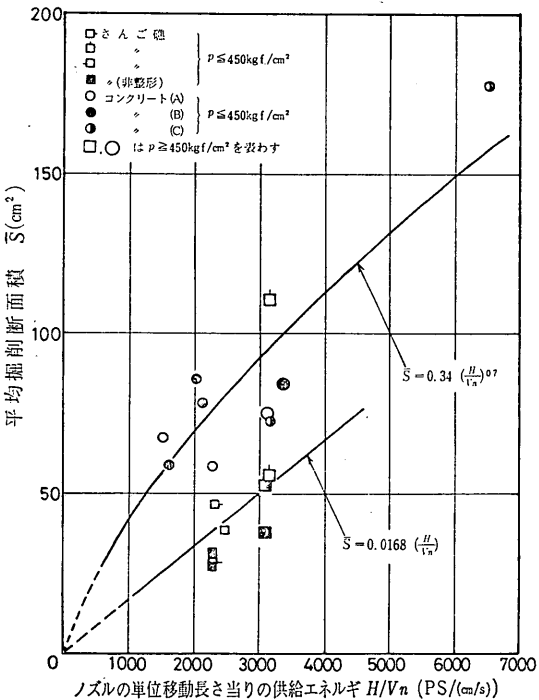


図-26 平均掘削断面積とノズルの単位移動長さ当り供給エネルギーの関係

エネルギーではさんご礫岩よりもコンクリートの方が少なくとも掘削されやすいといえよう。

4.6 掘削量 M および破砕量 m とノズル出口圧力 p との関係

単位時間当りの掘削体積を掘削量とすれば、掘削量 M は、

$$M = \frac{\bar{l} \times \bar{b} \times V_n}{100} \quad (\text{cm}^3/\text{s}) \quad (8)$$

と表わされる。この掘削量 M とノズル出口圧力 p との関係を図-27 に示す。また 4.2 で述べた破砕量 m とノズル出口圧力との関係を図-28 に示す。

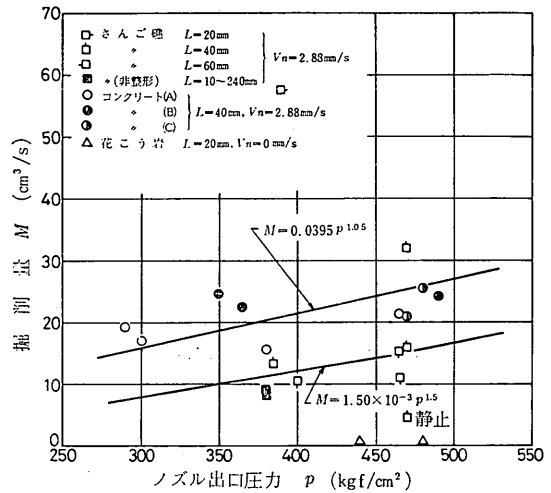


図-27 掘削量とノズル出口圧力との関係

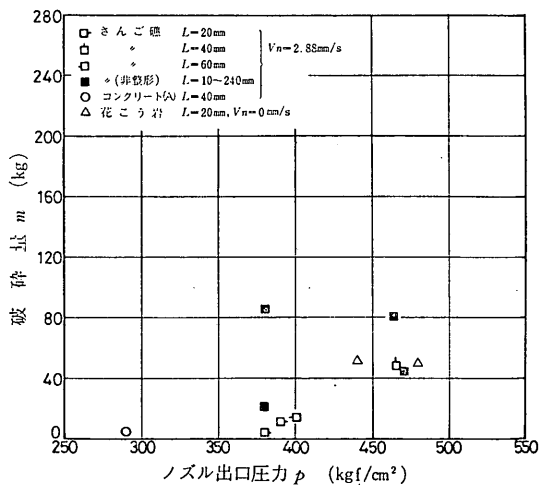


図-28 破砕量とノズル出口圧力との関係

ここで馬力は

$$H = \frac{pQ}{450} = \frac{\pi d^2}{300} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} \cdot p^{1.5} \quad (\text{PS}) \quad (9)$$

と表わされるので、4.6 で求めた \bar{l} および \bar{S} と H/V_n の

実験式の両方から、それぞれ掘削量 M と圧力 p の実験式が導かれる。そして試験点と検討しながら、さんご礁岩に対しては $M=1.50 \times 10^{-3} p^{1.5}$ 、コンクリートに対しては $M=0.0395 p^{1.05}$ と定めた。図中にそれらの実験式を示す。この結果から、ノズルの出口圧力の増加とともに掘削量 M は単調に増加していくが、同一圧力に対しては、コンクリートの方がさんご礁岩よりも大であるといえよう。ただしここでの掘削量 M は、平均掘削深さ \bar{l} を基礎として導いた掘削みぞの体積を意味する。このような掘削みぞは、おもに水ジェットのせん断作用によってなされたと考えられ、水くさび作用によってなされたと思われる破壊された量、すなわち破砕量 m は掘削量 M の中に含まれていない。したがって、見かけ上はコンクリートよりもさんご礁岩の方がよく破壊されたにもかかわらず、それらの破砕量 m は掘削深さに基づく掘削量 M の評価の中には反映されていないため、逆の結果になっている。ここで、水ジェットによる試料の掘削性を何で評価したらよいかという問題が生じる。つまり、平均掘削深さ \bar{l} が大であれば、掘削量 M は平均掘削深さ \bar{l} に対応して増大していくと考えてよいのであろうか。あるいは、平均掘削深さ \bar{l} はそれほど大でなくても、破片として破壊された方が掘削量 M としては大きいのであろうか、という問題である。これについてはつぎのように考えられる。

水ジェットの掘削作用は、大別すると3つの作用が考えられる。第一は、衝突圧力による破壊作用、第二は乱流削摩と関連する水ジェットと試料間のせん断作用、第三は水くさび作用である。このうち第二のせん断作用に対する影響パラメータとしては、せん断強度が支配的であると考えられる。そしてせん断強度は、Mohr の応力円包絡線から推定されるように圧縮強度とはほぼ対応関係が成立すると思われる。したがって、せん断作用による掘削量の影響パラメータとしては圧縮強度が含まれるであろう。つぎに水ジェットの圧力破壊については、圧力変動による“衝撃”を考えると衝撃剛性が支配的であるといえよう。この衝撃剛さは、圧縮強度とはほぼ対応関係があることが示されている⁶⁾。したがって、このような衝撃作用による掘削量の影響パラメータとしては圧縮強度が含まれるであろう。

またこのほか、クラック、空げき、節理、弱い介在物などの力学的欠陥（以後こう呼ぶこととする）を含んだ上での強度などが影響パラメータとして考えられよう。そして、とくにこのような強度は、第三の水くさび作用に対しては、より支配的であると考えられる。なお破砕量 m はこの水くさび作用に依存すると考えられる。この水くさび作用による破壊は、明らかに引張破壊である。と

ころが、破壊力学的見地からは、引張強度の高く、硬いものほど、一旦、前述のような力学的欠陥を発生、もしくは内在しているのであれば、その場合の強度は急激に低下する¹²⁾ことが知られている。したがって水ジェットの水くさびによる掘削量には、試料のぜい性度が高ければ高いほど力学的欠陥を含んだ上での強度が影響パラメータとして含まれてくるであろう。

以上のように、水ジェットの掘削作用には三つの掘削作用が考えられるのであり、掘削量は、これら三つの掘削作用と、試料の圧縮強度のみならず力学的欠陥を含んだ上での強度などとの兼ね合いで決ってくると考えられる。したがって真の意味での掘削量の評価法としては、平均掘削深さ \bar{l} にもとづく見かけの掘削量 M のみならず、破砕量 m を基準として考えていくのが望ましいと考えられる。逆に真の意味での掘削量の推定法としては、圧縮強度のみならず、力学的欠陥を含んだ上での強度を考慮していくのが望ましいと考えられる。

5. さんご礁岩の水ジェットによる掘削の実用化へのアプローチ

5.1 平均掘削深さ \bar{l} の既存の実験式に対する適合性

平均掘削深さ \bar{l} は、掘削量 M の評価パラメータとしては依然重要な値であるので、今回の平均掘削深さ \bar{l} についての試験結果と、今までに提案されている平均掘削深さ \bar{l} についての実験式との適合性を検討してみた。平均掘削深さ \bar{l} についての実験式は種々の条件のもとでいろいろ提案されているが^{4,5,9,10,13,14)}、今回は岩田の式³⁾と浜田ら¹⁴⁾の式について検討してみた。まず岩田の式について検討してみる。岩田の式はつぎのように示される。

$$\bar{l} = K_1 \left[\frac{(p - \sigma_f)}{p} - \frac{1}{K_2 + K_3 \cdot L/d} \right]^3 \left[\frac{d^2 V_j}{(1 + K_4 \cdot V_n/V_j)(1 + K_5 \cdot L/d) \sigma_g} \right]^{1/3} \times 10^{-3} \quad (10)$$

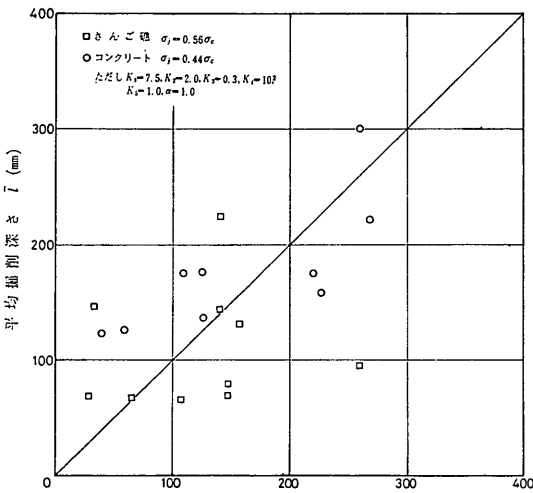
- ここに \bar{l} : 平均掘削深さ (mm)
 p : ノズル出口圧力 (kgf/cm²)
 σ_f : 水力破壊強度 (kgf/cm²)
 L : ノズル先端から試料表面までの距離 (mm)
 d : ノズル径 (mm)
 V_j : 水ジェットの流速 (m/s)
 V_n : ノズル移動速度 (mm/s)
 g : 重力加速度 (m/s²)

なお、 $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, \alpha$ は定数で表-6に示す値である。

表-6 定数の値

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	α
空気中	7.5	2.0	0.3	10^2	1.0	1.0
水中	15.0	2.0	1.0	10^2	1.0	3.0

ここで水力破壊強度 σ_j の採り方は、岩種により異なるとされており、モルタルに対して $\sigma_j = \sigma_c/3$ 、岩石類に対して $\sigma_j = \sigma_c$ 程度であるが、中には $\sigma_j = 2\sigma_c$ が提案されている¹³⁾。本試験の結果では、 σ_j について検討した結果、さんご礁岩で $\sigma_j = 0.56\sigma_c$ 、コンクリートで $\sigma_j = 0.44\sigma_c$ がもっとも適当であった。図-29に、横軸に実験式の値、縦軸に試験値をとってプロットしたものを示す。かなりばらついたものとなっている。



$$l = K_1 \left[\frac{(\rho - \sigma_j)}{\rho} - \frac{1}{K_3 + K_5 \cdot L/d} \right]^3 \left[\frac{d^2 V_j}{(1 + K_4 \cdot V_n / V_n) (1 + K_5 \cdot L/d) \sigma_c} \right]^{1/3} \times 10^{-1} \text{ (mm)}$$

図-29 平均掘削深さ \bar{l} の試験値と岩田の式¹³⁾との関係

つぎに浜田らの式について検討してみる。この式は、おもに花こう岩、砂岩、モルタルに対して試験を行なった結果得られたもので、浜田らの式はつぎのように示される。

$$\bar{l} = K \frac{d^{2.5} V_j^{2.2}}{L^{0.22} V_n^{0.38}} \cdot \frac{1}{\sigma_c} \quad (11)$$

ただし K : 実験定数 0.19

であり、また試験条件の適用範囲は

$$\begin{aligned} 5 \leq V_n \leq 100 & \text{ mm/s} \\ 0.69 \leq d \leq 1.03 & \text{ mm} \\ 325 \leq V_j \leq 700 & \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$400 \leq \sigma_c \leq 1570 \text{ kgf/cm}^2$$

である。今回の試験では、すべて試験範囲からはずれている。しかしそれらの差は、ノズル径を除けばわずかである。実験定数 K の値としては 0.19 が提案されている¹⁴⁾ が、検討の結果、さんご礁岩では $K=0.0025$ 、コンクリートでは $K=0.0041$ が適当であった。図-30 にその結果を示す。岩田の式と比べるとかなり直線近傍に集まっており、実験式の形としては、岩田の式よりも浜田らの式がより適切に掘削量を推定しているといえよう。また本試験のような大流量の試験結果についても、ノズル径の適用範囲逸脱による影響分に対して、実験定数 K を修正することのみでじゅうぶん適用可能であると思われる。

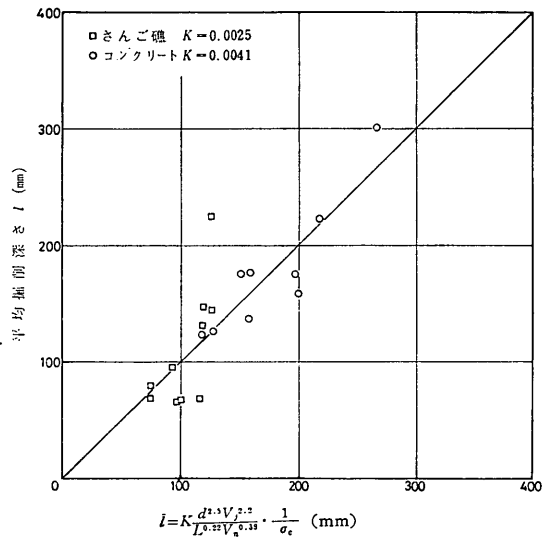


図-30 平均掘削深さ \bar{l} の試験値と浜田らの式¹⁴⁾との関係

5.2 ホジェットによる現地岩盤の破碎性に対する破壊力学的考察

1) 有限岩石と半無限岩盤の破碎性の関係

試料の自由面が多いか少ないかによって破碎性（ここでは破壊のしやすさの意）が著しく異なることは、経験上からもよく知られていることである。しかしながら、室内試験での試験結果を、半無限体と考えられる現地岩盤に対してはどこまで信頼し、かつ適用し得るのであるかという問題や、あるいは圧力、流量などの試験条件をどの程度まで増大させてやれば、室内試験での破碎性に関する試験結果と同様の結果が得られるのであろうかという問題などは、常に悩むところである。ここでは以上の問題に答えるべく、破壊力学の見地から二、三考察を試みた。

ここでは、ホジェットのの水くさび作用による破碎性に

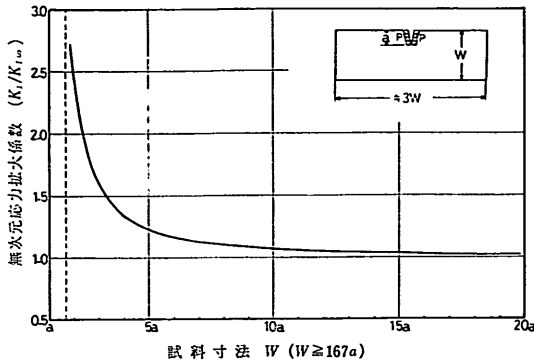


図-31 一樣な圧力 p を受けている二次元エッジクラックを持った試料の寸法と破砕性との関係

ついて、試料の大きさが有限体から半無限体まで変化した場合について考えてみた。いま試料を単純にモデル化して、図-31 のような長さ a の二次元エッジクラックを持った高さ W 、長さ $\approx 3W$ 、幅任意の有限体試料とする。そしてクラック両内面には、一樣な圧力 p を受けているとする。このように水くさび作用の状態をモデル化する。すると図-31 に示すような応力状態は、クラック先端近傍に限れば、クラック内面に圧力が全然作用しないで p という一樣応力でクラック面に直角な方向に引張った場合の応力状態と、重ね合わせの原理¹³⁾によって全く等価となる。図-31 のようなクラックに対して一樣応力 p で引張った場合、クラック先端近傍の応力場を支配する応力拡大係数 K_I は、表-7 のように与えられている¹⁰⁾。そしてそのときの応力拡大係数は、 $K_I = Y \times p \sqrt{a}$ で与えられる。応力拡大係数がわかれば、クラック先端近傍の応力と変位は、それぞれ一義的に線形破壊力学によって定められる¹³⁾。そして、もし破壊がクラック先端

表-7 一樣引張応力 p を受ける片側き裂の補正係数¹⁰⁾

$\frac{a}{W}$	$Y = \frac{K_I}{p\sqrt{a}}$
0	1.99
0.05	2.02
0.1	2.11
0.15	2.25
0.2	2.43
0.25	2.66
0.3	2.95
0.35	3.30
0.4	3.74
0.45	4.29
0.5	4.98

の応力集中部で起こるとすれば、 K_I が大であるほど試料が破砕されやすい状態にあるといえる。さて表-7の結果を、半無限体における破砕性を1となるように無次元化して試料の高さ W に対してプロットすれば、図-31 のようになる。

この図から $W=2a$ の有限体試料の破砕性を考えてみると、無次元応力拡大係数は約2.5と読み取れるので、この場合の破砕性は、半無限体の破砕性に比べて約2.5倍である。いいかえると、 $W=2a$ の試料で、クラック先端にある応力場が発生したとき、半無限体の岩盤に同程度のクラック先端応力場を発生させるには、2.5倍の圧力をかける必要があるということになる。また見方を変えれば、室内で水くさび作用を受けているような掘削試験をする場合で半無限岩盤としての破砕性について調べたいときは、ほぼ $W=5a$ 程度の寸法の試料で試験すればよいということになる。

以上述べてきたことは、クラックの種類、水ジェットによるクラック内面での圧力分布、試料の形状などをかなり単純化しているため、そのまま実際に応用できるものではないと考えられるが、オーダーとしては、他のモデルと比べても大差はないと考えられる。

2) 半無限岩盤に多数の水ジェットを用いる場合の水ジェットの間隔と破砕性の関係

多数の水ジェットを現地岩盤に適用する場合、ある間隔をもって平行に水ジェットを移動させて使用すると、そのときの水ジェットの間隔と破砕性の関係を破壊力学の上から考察してみた。

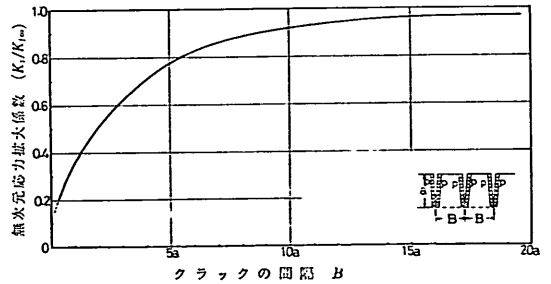


図-32 一樣な圧力 p を受けている半無限岩盤における二次元エッジクラックの間隔と破砕性との関係

いま図-32 に示されるように長さ a の二次元エッジクラックが幅 B をもって等間隔に分布し、それらのクラック内面には一樣な圧力 p が働くというモデル化した半無限岩盤を考える。すると、このときの応力拡大係数は、クラック内面に圧力が全然作用しないで一樣応力 p で引張った場合と等価となり、間隔 B の関数として表-8のよ

表-8 一様引張応力 p を受ける周期き裂の補正係数¹⁶⁾

$\frac{a}{W}$	$F_I = \frac{K_I}{p\sqrt{\pi a}}$	$\frac{a}{W}$	$F_I = \frac{K_I}{p\sqrt{\pi a}}$
0.000	1.12	0.693	0.48
0.051	1.09	0.776	0.45
0.104	1.03	0.887	0.42
0.153	0.95	0.952	0.41
0.195	0.88	1.063	0.39
0.237	0.81	1.430	0.33
0.281	0.75	1.797	0.30
0.328	0.69	2.163	0.27
0.385	0.64	2.530	0.25
0.459	0.58	2.896	0.23
0.509	0.55	3.263	0.22
0.578	0.52		

うに与えられている¹⁶⁾。これを(1)と同様、間隔 B が半無限体であるときの破碎性を1となるよう無次元化して間隔 B に対してプロットすれば、図-32のようになる。この図から、水ジェットをいくつか連結して使用する場合を想定したとき、掘削みぞも広義の意味でのクラックと考えれば、荷重方向にクラックが配列されていることにより、水ジェット間の間隔が狭くなるほど応力集中の軽減効果が作用する傾向にあることが予想される。いいかえれば多数水ジェットを使用する場合、全体としての破碎性は増大していくが、一つの水ジェット当りの破碎効果は、単一水ジェットの場合よりも落ちていく傾向にあることが予想される。

6. まとめ

本試験により明らかになったことをまとめると、つぎのとおりである。

(1) さんご礁岩の物理的性質については、つぎのことが明らかになった。まずみかけ比重(単位体積当り重量)の点では、コンクリートに近い。圧縮強度の点では、平均的にはコンクリートに近いが、局部的に高い箇所は、大理石に近い。そして動的ヤング率は、大理石と酷似している。またぜい性度は約14と高い。なお、多孔質、不均質であるがゆえに、それら物理的性質の測定値のばらつきは大きい。

(2) 水ジェットの掘削能力に対するノズル先端から試料表面までの距離による影響は、本試験のように空気中で行なった場合では、本試験の範囲(約30d)まではその影響が出ていないといえよう。また、非整形さんご礁岩の掘削試験後の状況から、試料表面の角度の相違による水ジェットの掘削能力についても、大きな差はないと考

えられる。

(3) ノズル出口圧力 p に対する平均掘削深さ \bar{l} との関係は、さんご礁岩では明確な関係は得られないが、コンクリートは、圧力の増大とともに増加の傾向を示す。またノズル移動速度に対する平均掘削深さ \bar{l} との関係は、ノズルの移動速度の増加とともに、さんご礁岩、コンクリートとも減少の傾向を示す。さらに、同一の供給エネルギー H/V_n にする平均掘削深さ \bar{l} との関係は、さんご礁よりもコンクリートの方が大である。

(4) 水ジェットによるさんご礁岩の掘削性では、乱流削摩に関連したせん断作用に依存していると考えられる平均掘削深さから導いた掘削量に限れば、コンクリートと比べていくぶん小であるが、多孔質、不均質であることなどから水くさび作用を受けやすく、よく破壊される傾向にある。

(5) 本試験のような大流量の場合でも、平均掘削深さ \bar{l} についての浜田らの実験式¹⁴⁾において、ノズル径の適用範囲逸脱による影響分に対しては実験定数 K の修正のみでじゅうぶん適用可能であると思われる。そのときの K の値は、さんご礁岩で0.0025、コンクリートで0.0041が適当である。

(6) 水ジェットのの水くさび作用を、クラック内面に一様な圧力が働く二次元エッジクラックとしてモデル化して破壊力学の上から考えた場合、半無限岩盤における破碎性は、 $W=2a$ の有限岩石の破碎性の1/2.5程度と推定される。

また、水ジェットをいくつか連結して使用する場合を想定したとき、水ジェット間の間隔が狭くなるほど応力集中の軽減効果が増大する傾向にあることが予想される。つまり、全体としての破碎性は増大していくが、水ジェット一つ当りの破碎効果は、単一水ジェットの場合よりも落ちていく傾向にあることが予想される。

7. あとがき

水ジェットによるさんご礁岩の掘削試験は今まで例がなく、今回が初めてであった。今回の試験では、データが少ないながらも一応の成果を納めたと思われる。

しかしながら、まえがきにも述べたようにさんご礁岩の種類、分布は複雑であるといわれており¹⁾、また物理的性質にもばらつきが大きいなど、今後の調査に待たなければならぬ点も多い。

そのほか、水ジェットの掘削作用のうち水くさび作用は、さんご礁岩のような多孔質、不均質な岩石に対しては有効であると思われるが、この水くさび作用については、まだまだ未解明な点が多い。とくに、クラックに

高圧水ジェットによるさんご礁岩の掘削性

作用した場合の圧力分布については、解明が望まれる。そして水くさび作用を受けた場合の破壊条件は、掘削量の急激な増大と結びつき得ることから重要と思われる。

また、花こう岩が今回の試験で真二つに割れたことは、今までの水ジェットによる掘削試験とは非常に異なっており、このような破壊の機構も考える必要があろう。

さらに、岩種ごとに、クラックなどの力学的欠陥の存在をも考慮した上での強度を研究すれば、岩種に対する水ジェットの掘削量を予想し得る手段と成り得るものと思われる。

なお、最近の破壊力学の発達にはめざましいものがあり、以前、定性的にしか認められていなかったクラックによる強度の低下なども、最近ではクラックの寸法や種類、試料形状、荷重条件などともに、かなり正確かつ定量的にとらえられるようになってきている。

著者らは、今後、水ジェットによるさんご礁岩、花こう岩を初めとした掘削試験とともに、以上述べてきたさんご礁岩の物理的性質を初めとした調査や、水ジェットによる掘削機構、クラックなどの存在を考慮した上での強度などの解明をも進めていきたいと考えている。

謝 辞

本試験に対してさんご礁岩の試料の提供をはじめとしていろいろな御協力をいただいた第四港湾建設局機械整備事務所の関係者各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本作業船協会：離島砕岩船調査研究報告書，昭和52年8月
- 2) 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
- 3) 東海林秀幸・藤井喜一郎：超高圧水ジェットによる花崗岩の掘削，未発表
- 4) 山門憲雄・横田 章：高速の水噴流による岩石の破壊，土木学会論文集，133号，昭和41年9月
- 5) 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，港湾技術研究所報告8巻2号，1969年
- 6) 鈴木 光：岩盤力学と計測，内田老鶴園新社，昭和48年3月，p. 44, p. 140
- 7) 山口梅太郎・西松裕一：岩石力学入門，東京大学出版会，1973年6月，p. 103
- 8) 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12巻1号，1973年3月
- 9) 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，港湾技術研究所報告，第9巻2号，1970年
- 10) 木下豊広・星野巖三：高速水噴流によるトンネル掘削法の研究（第1報），鉄道技術研究資料，1970年9

月

- 11) 柳井田勝哉・大橋 昭：気中高速水噴流特性に関する研究，日本鉱業会誌，93 1072, 1977年6月
- 12) 宮本 博：破壊の力学，コロナ社，昭和50年8月，p. 13
- 13) 小岩苔生・麻山和正・岩田尚生：岩盤浚渫に関する研究について，港湾技術研究所講演会，昭和46年
- 14) 浜田秀夫・福田 保・四条 篤：高圧水ジェット掘削，First International symposium on Jet cutting technology, 1972
- 15) 岡村弘彦：線形破壊力学入門，培風館，昭和51年5月，p. 40, p. 22
- 16) 石田 誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数，培風館昭和51年6月，p. 177, p. 168

記 号 一 覧 表

a	：クラック長さ
B	：クラック間隔
b	：平均掘削幅 (mm)
b_{\max}	：表面最大掘削幅 (mm)
C_v	：変動係数 (%)
\bar{D}	：コア平均直径 (mm)
D_1, D_2	：コア直径測定値 (mm)
E_a	：動的ヤング率 (kgf/cm ²)
F_I	：補正係数
g	：重力加速度 (=9.8m/s ²)
H	：水馬力 (PS)
K	：実験定数
K_I	：応力拡大係数
$K_{I\infty}$	：無次元応力拡大係数
K_1, K_2, K_3, K_4, K_5	：係 数
L	：ノズル先端から試料表面までの距離 (mm)
\bar{L}	：コア平均長さ (mm)
L_1, L_2	：コア長さ測定値 (mm)
l	：掘削深さ (mm)
\bar{l}	：平均掘削深さ (mm)
l_{\max}	：最大掘削深さ (mm)
M	：掘削量 (cm ³ /s)
m	：破砕量 (kgf)
p	：ノズル出口圧力 (kgf/cm ²)
P_c	：圧縮破壊荷重 (t)
P_t	：圧裂引張荷重 (t)
Q	：流 量 (l/min)
\bar{S}	：平均掘削断面積 (cm ²)
t	：コア内弾性波伝播時間 (s)
t_1, t_2	：コア内弾性波伝播時間測定値 (s)
V_j	：水ジェット流速 (m/s)
V_n	：ノズル移動速度 (mm/s)
V_p	：コア内弾性波伝播速度 (cm/s)
v	：掘削体積 (cm ³)
W	：試料高さ
w	：コア重量 (gf)
Y	：補正係数
α	：係 数

γ	: 水の比重量 ($\approx 1000\text{kgf/m}^3$)	σ_c'	: シュミットハンマー 反発値よりの 推定圧縮 強度 (kgf/cm^2)
δ	: みかけ比重 [もしくは単位体積当り重量]	σ_j	: 水力破壊強度 (kgf/cm^2)
ρ	: 密度 ($\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^4$)	σ_t	: 圧裂引張強度 (kgf/cm^2)
σ_c	: 一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)		