

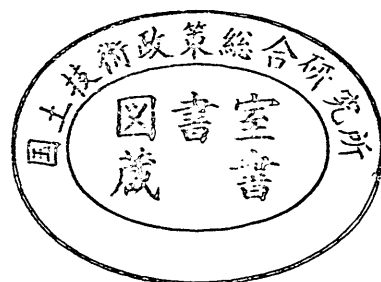
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 18 NO. 1 MAR. 1979

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第18巻 第1号 (Vol. 18, No. 1), 1979年3月 (Mar. 1979)

目 次 (CONTENTS)

港湾技術研究所報告および港湾技研資料に用いる量記号および単位記号について.....	3
1. A Review on Statistical Interpretation of Wave DataYoshimi GODA.....	5
(波浪資料の統計的取扱いに関する考察.....合田良実)	
2. 超軟弱粘土の圧密試験法とその適用.....梅原靖文・善巧企.....	33
(Consolidation Test Method of Very Soft Clays and Its ApplicationYasufumi UMEHARA and Kouki ZEN)	
3. 矢板岸壁地震時被災の分析.....北島昭一・上部達生.....	67
(Analysis on Seismic Damage in Anchored Sheet-piling BulkheadsShoichi KITAJIMA and Tatsuo UWABE)	
4. 港湾計画における財政に関する研究 (第一報) ——港湾管理者財政の現状 と特徴——.....矢島道夫・中村松子・稲村 肇.....	129
(An Analysis of Financial Conditions of Port Management BodyMichio YAJIMA, Matsuko NAKAMURA and Hajime INAMURA)	
5. 超高圧水ジェットによる岩盤掘削.....東海林秀幸・中島忠男.....	177
(Rock Excavation by High Pressure Water JetsHideyuki SHOJI and Tadao NAKAJIMA)	

5. 超高圧水ジェットによる岩盤掘削

東海林 秀 幸*・中 島 忠 男**

要 旨

本報告は最大圧力 4000 kgf/cm², 最大流量 24 l/min の超高圧水ジェットを空気中で噴射し, 主として花崗岩の掘削実験結果をまとめたものである。

ノズルを静止して無拘束の岩石試料を圧力 2200 kgf/cm², ノズル径 0.56 mm で掘削すると約 15×15×15 cm の小型岩石の大部分は 2 つ以上に大きく割れた。これらと同様の寸法の試料数個をモルタルで固めて 70×50×30 cm のブロックとし, 圧力 3100 kgf/cm², ノズル径 0.85 mm で実験した結果においても岩石とモルタルにクラックが入り, 単一試料で得た実験結果と大きな差はなかった。極端なケースではブロック全体が破壊され原形をとどめぬものもあった。30×30×30 cm 角の稲田花崗岩および同寸法の小豆島花崗岩の中央部に水ジェットを噴射すると 8 秒から 55 秒で 2 つに割れるケースが大部分であった。これらの実験結果から, 静止したノズルから水ジェットを噴射すると無拘束の岩石を 2 つ以上に分割することが可能と言える。

岩石に拘束を与えて実際の海底岩盤に近い状態で掘削実験を行った。用いた試料は 30×30×30 cm 角の稲田花崗岩である。30 cm のシャコ万力 4 個で水ジェット噴射方向に直角の 2 方向から押え付けて拘束した。静止水ジェットでは試料に孔が穿孔されたり, 円錐状のクレーターが発生した。移動ノズルから噴射した水ジェットは溝を掘削した。溝の深さは一定でないため, プロファイルの平均値を掘削深さとし, 実験条件を変えて一連の実験を行った。圧力 p_0 (kgf/cm²), ノズル径 D_0 (mm), ノズル試料間距離 H (mm), ノズル移動速度 V_n (mm/s), ノズル出口平均流速 V_0 (m/s), 圧縮強度 σ_c (kgf/cm²), 掘削回数 N を変数として実験結果を整理すると掘削深さ L (mm) は次の実験式で表わされた。

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

掘削深さを上式で表わせると仮定し, ある水ジェットエネルギーでの最大掘削深さを得るための圧力と圧縮強度の関係を求めると

$$p_{\text{opt}} = 1.5\sigma_c \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

となった。

* 椋材部 岩盤掘削主任研究官

** 椋材部 作業部研究室

5. Rock Excavation by High Pressure Water Jets

Hideyuki SHOJI*

Tadao NAKAJIMA**

Synopsis

This paper investigates cutting performance of high pressure water jets in air at pressures up to 4000 kgf/cm² and at flow rates up to 24 l/min. Most of free standing 0.15 cubic meter rocks were split into two pieces by stationary water jets. Then several rocks were fixed in 0.7×0.5×0.3 m concrete blocks. However, complete destruction of specimens including concrete blocks was brought. Cracks propagated through concrete blocks. No differences was found in fracture between free standing rocks and specimens fixed in concrete blocks. Experiments on destruction of 0.3 cubic meter granite were conducted. Inada granite and Shodoshima granite were employed. They were broken to two pieces from eight seconds to fifty five seconds in case of free standing condition. These experiments lead to the conclusion that high pressure water jets can break free standing rocks with above mentioned dimensions into several pieces in very short time.

In order to investigate depth of cut under various conditions, experiments were carried out on stressed 0.3 cubic meter granite specimens. Four C clamps gave stress to specimens to simulate excavation work at infinite rock beds. Water jets through a stationary nozzle drilled holes or creators in specimens. To obtain an empirical relationship between depth of cut and controlling parameters, experiments were done on Inada granite. The following equation is obtained through experiments.

$$L = \frac{1}{6} \left(\frac{p_0}{\sigma_c} - 0.5 \right) D_0^3 \left(\frac{D_0}{H} \right)^{0.4} \left(\frac{V_0}{V_n} \right)^{0.5} N^{0.7} \quad (\text{mm}),$$

where p_0 , σ_c , D_0 , H , V_0 , V_n , N are jet pressure (kgf/cm²), compressive strength (kgf/cm²), nozzle diameter (mm), standoff distance (mm), average jet velocity (m/s), feed rate (mm/s) and the number of cut, respectively. It is seen that depth of cut is proportional to momentum of jets.

Optimum condition for a given jets energy was calculated on the basis of the empirical equation. For the optimum depth of cut jet pressure is 1.5 times the compressive strength of a target material.

* Senior Research Engineer, Machinery Division

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

目 次

要 旨	177
1. ま え が き	181
2. 実験装置および実験方法	181
3. 掘削実験	183
3.1 静止ノズルによる小型岩石の掘削	183
3.2 静止ノズルによる花崗岩の掘削	185
3.3 移動ノズルによる花崗岩の掘削	188
4. 考 察	190
4.1 掘削深さの実験	190
4.2 最適掘削条件	193
5. 結 論	194
6. あとがき	195
参考文献	195
記 号 表	196
付 録	196

1. まえがき

港湾工事あるいは航路浚渫で問題の一つとして取り上げられているのは花崗岩および同等の強度を有する硬岩類の大規模浚渫である。これは離島開発の拠点となる港湾建設においても硬岩類の掘削を避けられないので困難な課題とされている。陸上土木工事では火薬によって硬岩類を破砕するのが通常である。しかし、海洋土木工事では爆発の際に生ずる強力な衝撃波が魚類および船舶へ多大な影響を与えるので大量に火薬を使用することはきわめて困難である。そのため、従来から岩盤浚渫にもっともよく使用されているのは重錘式砕岩船である。最近では、開発の進んだ 100 トン級の大型クラブも使われているようである。これらの方法は衝撃エネルギーで岩を破砕するので圧縮強度の高い岩種では破砕が不可能であったり、ある程度可能であっても刃先の摩耗とか破損によって能率の低下は避け難い。さらに海底形状が複雑であると急傾斜であると滑落によって作業機械を損傷したり、作業の安全性を損ねるので破砕は非常にむずかしくなる。このような背景により、機械的方法に代る新しい工法の開発が強く望まれている。

従来の方法に代るユニークな工法の一つに超高压水ジェットの応用がある。超高压水ジェットによる岩盤破砕は水ジェットが岩盤に衝突して発生する流体力（ここでは主に圧力と剪断応力を意味する）で岩盤を破砕するものである。衝撃力を利用する機械的な方法と異なり、刃先を岩盤に直接接触させないので刃先の摩耗や破損は生じない。衝撃力を作業機械に伝えることもなく反力も従来の方法に較べて非常に小さいので前述の諸問題は解決される。超高压水ジェットの最大の利点は圧力の選択によって高压縮強度の岩種も破砕でき、噴射方向の制御により急傾斜岩盤でも問題なく破砕できることである。

水ジェットの応用は、掘削への応用を初めとし、高压プランジャーポンプの開発によってディスクレーシング、プラントクリーニングの応用が可能となり、増圧機の出現は岩盤掘削、コンクリート掘削^{9)~11)}を容易にした。10,000 kgf/cm² 以上の圧力では金属掘削の実験報告⁹⁾があるほど超高压水ジェットの利用範囲は拡大している。国内で比較的高い圧力の水ジェットによる岩石類の掘削は山門と横田¹²⁾が 3 連プランジャーポンプ (700 kgf/cm², 86 l/min, 主として砂岩) を用いて実験し、掘削深さの実験式を発表して以来、木下と星野¹³⁾, Matsumoto と

Hamada¹⁴⁾ 等が増圧機を用いて 1000 kgf/cm² 以上の超高压水ジェットによる硬岩類の掘削深さについて検討している。しかし、山門と横田の報告を除くといずれも流量が少ない圧力に重点を置いた実験である。国外では、Nikonov と Goldin⁷⁾, Kuzmich⁸⁾ の石炭掘削に関する研究、Leach と Walker, Norswothy, Mohaupt と Burns¹⁰⁾, Franz¹¹⁾, Reh binder¹²⁾, Crow と Hurburt¹³⁾, Cheung と Hurburt¹⁴⁾ による砂岩、石灰岩、大理石、花崗岩に関する実験結果が発表されている。国内、国外で発表された報告の大部分は実験研究であり、解析的な検討は静止ノズルによる初期掘削に関する研究を除くとほとんどない。ノズルが移動するケースでは掘削の進行に伴って掘削される面の形状が変り、それによって流体力の分布が変化する。同時に岩石内部の応力分布も大幅に変わるので数値計算法を用いたとしても理論的方法は相当な困難をまぬがれない。Crow と Hurburt¹³⁾, Mohaupt と Burns¹⁴⁾ の理論的な考察も前者は実験結果と一致しがたいし、後者は Cooley¹⁵⁾ の指摘でもわかるように数多くの仮定を導入しても未解決の部分が残る、最終的な式には実験定数を含めて実験結果と合わせるようにしている。言い換えれば理論的考察に基づいた半理論式である。文献 13 と 14 の推定方法には疑問点が残っており、それよりはむしろデータ整理から得られる実験式を用いた方が有利と思われる。実験式には実験条件の影響が定数に含まれるので実験範囲外では精度の低下を招きやすい。その防止には広範囲のデータを整理して実験定数を決定するのが一方法である。

本報告は最大圧力 4000 kgf/cm², 最大流量 24 l/min の超高压水ジェット実験装置を用いて主として花崗岩の空気中での掘削実験結果をまとめたものである。静止ノズルの実験では花崗岩、風化花崗岩、安山岩、伊豆の青石等の掘削の様子を述べ、移動ノズルを用いた実験では花崗岩に拘束を与えて溝の深さと実験条件との関係を調べ、実験式を提案した。前報²⁾でまとめた圧力 500 kgf/cm², 1000 PS の水ジェットによる珊瑚礁岩とコンクリートの実験データ、ならびに他研究者の結果を引用し比較検討した。得られた実験式をもとに与えられた水ジェットエネルギーでの最適掘削条件について検討し、圧力と圧縮強度の関係を求めた。

2. 実験装置および実験方法

掘削実験に使用した超高压水ジェット実験装置の流れ

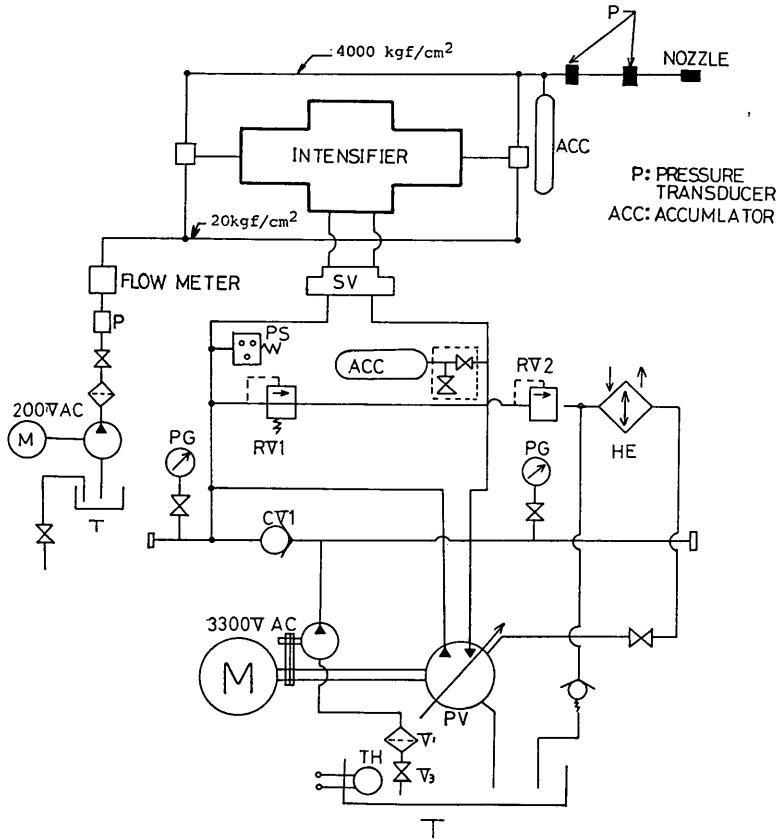


図-2.1 実験装置流れ図

表-2.1 実験装置諸元

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
使用ノズル径 (mm)	0.85	1.20
ノズル材質	工業用ダイヤモンド	
駆動方式	油圧駆動	

図を 図-2.1 に示し、表-2.1 に主な諸元を記してある。この実験装置はパスカルの原理を応用した増圧機で超高压水ジェットを発生する。大型ピストン (面積 A_1) と小型ピストン (面積 A_2) を直結し、大型ピストンに P_1 の圧力を作用させると小型ピストンには $P_1 \times A_1/A_2$ の圧力が生じる。ここで $A_1/A_2 > 1$ としているので小型ピスト

ンに現われる圧力は大型ピストンに作用する圧力と比べて高くなる。高压ピストンに圧縮された水が流れ出すとこの関係は厳密に成立しがたいが、面積比あるいは P_1 の値を変えれば高压側に設定どおりの圧力を得ることができる。本機では圧力は約 20:1 になっている。図-2.1 に示したように本機は左右に高压シリンダーを有し、超高压水は 2 本のシリンダーから交互に流れてパイプライン先端に設けたノズルへと導かれる。増圧機は一種のピストンポンプなので行程間での圧力降下を避けられない。この圧力ドロップを軽減するために高压配管に 6l のアキュムレーターが取り付けられている。増圧機の駆動は潤滑、信頼性、安全の観点でもっとも優れている油圧によっている。定圧可変流量型アキシャルプランジャーポンプを 300 PS のモーターで駆動し、油圧源としている。水は三連プランジャーポンプで 20 kgf/cm² に加圧されて逆流防止弁を通り、吸入行程中の高压シリンダーへと供給される。増圧機の利点の一つは水ジェット圧力を低圧側

で調整できることである。圧力源がプランジャーポンプでは山門と横田⁹⁾のようにノズルに至る高圧配管にバイパス回路を設けて水ジェット圧力を調整しなければならず、安全作業の点で超高压では望ましくない。本機では図-2.1 中のリリーフバルブ RV1 で油圧回路の圧力を調整すればよいので比較的安全で機器の維持管理も楽である。

水ジェット圧力はひずみゲージ型圧力変換器を増圧機出口とノズルホルダー直前に取り付け、連続記録を得ている。流量は給水ポンプ出口で歯車型流量計によって測定している。本機で使用しているノズルは工業用ダイヤモンド製である。2000 kgf/cm² 以上の圧力で水を噴出すると平均流速は 600 m/s 以上の流速でノズル出口を通過するのでその潰食によって材料が取り去られ口径が拡大することがある。潰食による口径の変化を防ぐため、物質中でもっとも硬度の高いダイヤモンドを用いてノズルを製作している。

掘削実験は別室に設けた破碎室内の試料台車上に岩石試料をのせて行った。ノズル試料間距離を設定値に調整した後、所定の圧力で超高压水ジェットを噴射し、同時に試料を移動する。試料に溝を掘削するには、ノズルか試料のいずれか一方を動かせばよいので本実験では試料を移動した。ノズルを移動するとそれによって水ジェットの霧化が促進されることが考えられるが、水ジェットの平均流速に対してノズル移動速度を十分に小さく保てればこの影響は殆ど無視できる。本実験ではノズル移動

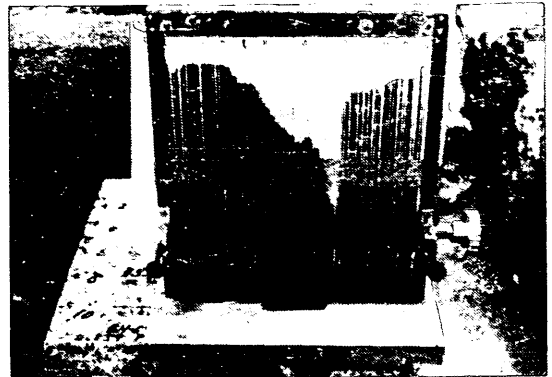


写真-2.1 掘削深さ測定の様子

速度は水ジェット平均流速の 10⁴ 分の 1 程度で前述の影響はないので、以後、試料移動速度をノズル移動速度と呼ぶ。掘削形状は一様でないので図-2.2 に示す測定器でプロフィールを求め、平均値を掘削深さとした。測定器には直径 1 mm で先端を鋭くし、熱処理したピアノ線 100 本を組み込んである。写真-2.1 に測定中の様子を示してある。

3. 掘削実験

3.1 静止ノズルによる小型岩石の掘削

花崗岩の掘削実験前に小型岩石に静止したノズルから超高压水ジェットを噴射し、圧力と掘削孔深さの関係を調べてみた。岩の種類は安山岩、花崗岩、風化花崗岩、変成岩である。圧縮強度は 600 kgf/cm² から 3510 kgf/cm² の範囲で、大部分の試料は 1000 kgf/cm² から 2000 kgf/cm² であった。実験前に岩石整形機で約 15×15×15 cm にカットし、水ジェットが直角に衝突するようにした。これらの試料の一部をノズル径 0.56 mm、ノズル試料間距離 10 mm~20 mm、圧力 2200 kgf/cm²~3500 kgf/cm² で掘削した結果、使用した試料のすべてが真二つに割れてしまい、一部は四散した。これは試料寸法によると思われるので4~5個の試料をモルタルで固め、70×50×30 cm のブロックとして3週間の養生期間をおいた後実験試料とした。このブロックの掘削条件を表-3.1 に示す。掘削後の試料の状態を写真-3.1 から写真-3.3 に示す。写真-3.1 は 0.56 mm ノズルで圧力 3760 kgf/cm²、ノズル試料間距離 10 mm で掘削した結果である。写真上方2個の岩は安山岩で、下2個は変成岩である。安山岩は3か所の掘削孔を貫通するクラックを生じたが、変成岩には単に孔が掘削されたのみであった。モルタルに

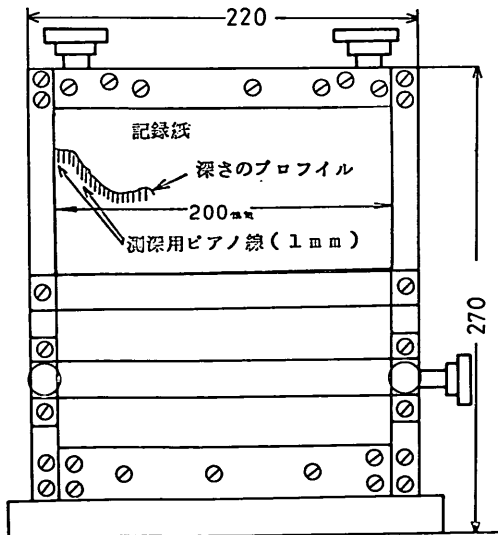


図-2.2 掘削深さ測定器

表-3.1 掘削条件

写真番号	ノズル径 (mm)	ノズル出口圧力 (kgf/cm ²)	ノズル試料間距離 (mm)	時間 (s)
3-1	0.56	3760	10	30~90
3-2	0.85	3100	12	30~90
3-3	0.85	2310	12	30~90

は右上の部分にクラックが入った。これは安山岩の破壊に原因すると言える。写真-3.2 は 0.85 mm ノズルを用いて圧力 3100 kgf/cm²、ノズル試料間距離 12 mm とした実験結果である。写真-3.1 に比較すると明らかなように試料は大きく破壊され、ブロック全体が原形を保てぬほどである。このように大きく破壊するのは穿孔中に発生するクラック内に超高压水が入り込み、クサビと同様の作用で岩石に大きな力を与えることによる。いわゆる水クサビ作用である。写真-3.2 ではノズル径を大きくし、圧力を低下したが、掘削能力は向上している。水ジェット掘削では圧力を後述の必要破壊圧力よりも高くすれば、掘削能力を増加するためには圧力よりも流量に関係するノズル径を大きくした方が有利であることを示し

ていよう。これはノズル移動で得られる溝の深さの実験式で山門と横田³⁾、Matsumoto・Hamada⁵⁾の式中で圧力項よりもノズル径の指数が大きいくことと定性的に一致する。写真-3.3 は 0.85 mm ノズルで圧力を 2310 kgf/cm² として掘削した結果である。圧力を低下させたので写真-3.2 ほどの破壊は見られないが、0.56 mm ノズルよりは掘削されていると言える。この実験結果から判断すると静止ノズルで超高压水ジェットを噴射して小型岩石を破壊するのは容易と考えられる。

掘削した岩石の掘削深さを測定し、圧力と試料の圧縮強度の比 p_0/σ_c をパラメーターとしてプロットすると図-3.1 のようになる。掘削孔深さは p_0/σ_c に関してはほぼ正比例することがわかる。同図に砂岩、花崗岩、石灰岩

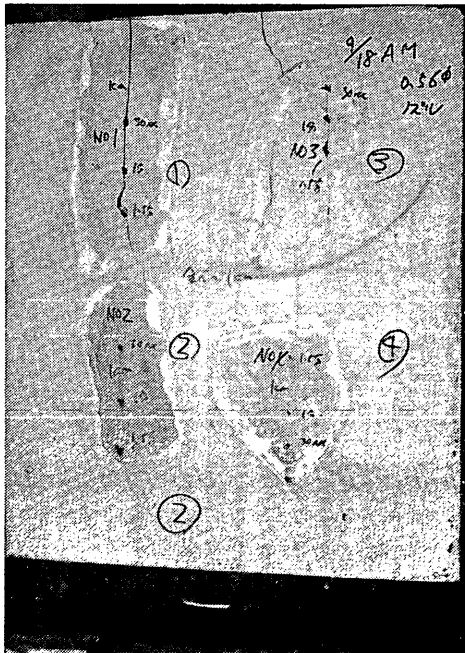


写真-3.1 小型岩石の掘削結果 (1)
($D_0=0.56$ mm, $P_0=3760$ kgf/cm²)

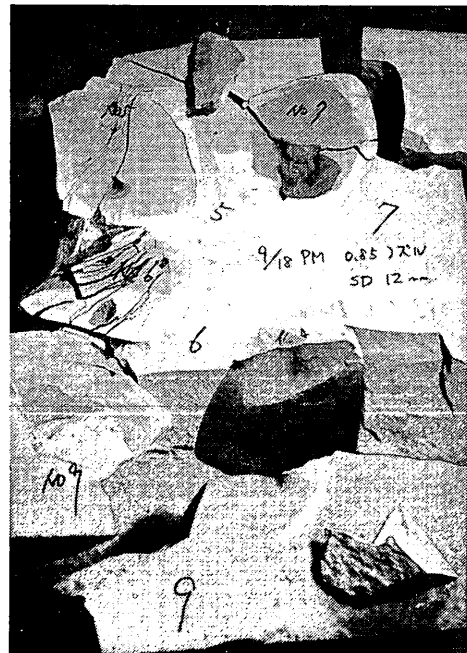


写真-3.2 小型岩石の掘削結果 (2)
($D_0=0.85$ mm, $P_0=3100$ kgf/cm²)

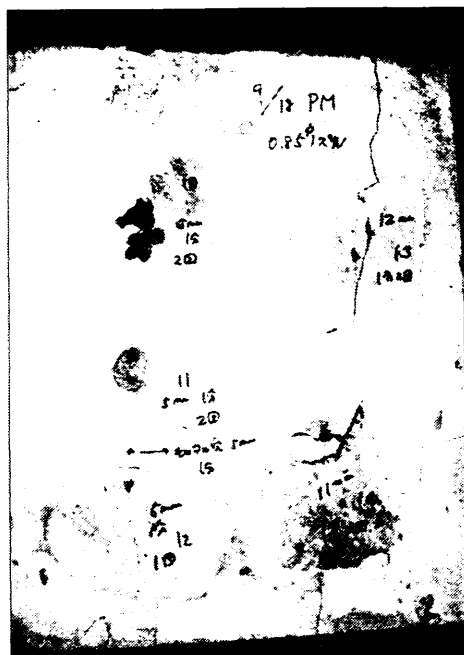


写真-3.3 小型岩石の掘削結果 (3)
($D_0=0.85\text{ mm}$, $p_0=2310\text{ kgf/cm}^2$)

で実験した Labus¹⁹⁾の結果も描いてある。岩種に関係なく $L_0 \propto p_0/\sigma_c$ の関係が成立すると言えよう。注意すべき点は $p_0/\sigma_c > 0.5$ 以上、すなわち、圧力が圧縮強度以下でも若干ながらも岩は掘削されることである。ここで、必要破壊圧力の定義が問題となってくる。本報告では掘削が始まる水ジェット圧力を必要破壊圧力と定義する。山門と横田は 2cm 掘削された時の圧力としており、高い値となる。Powell と Simpson の理論計算による必要破壊圧力は引張強度の 20 倍となっている。この計算では Leach と Walker⁹⁾ の圧力分布が外力として使われ、試料表面での剪断応力は無視されている。理論値は実験

値よりも大きく、Pennant sandstone で 3 倍、Aberdeen granite で 4 倍、Carrara marble では 2 倍となっている¹⁶⁾。このような差を生じる原因は剪断応力と関係する乱流削磨によると説明されている。必要破壊圧力の絶対値は実験結果と十分に一致するとは言えないが、圧力と掘削孔深さの関係は実験値と同一の傾向である。すなわち、乱流削磨を無視して求めた掘削孔深さは現象の定性的な説明を与える。文献 16 では必要破壊圧力は引張強度との関係で表わされていた。しかし、工学的には一軸圧縮強度 (単に圧縮強度と呼ぶ) を求めるほうが容易である。圧縮強度と引張強度の比は岩種によって変わり、10:1 から 20:1 になる。この事と Powell と Simpson の結果を考えると、 $p_t = \sigma_c \sim 0.25\sigma_c$ となる。山門と横田の実験では $p_t = \sigma_c$ であるが、 p_t の定義が本報告と異なる。Cooley はかなり小さな値で整理しているが、十分とは言いがたい。そこで本報告では $p_t = 0.5\sigma_c$ と仮定する。

3.2 静止ノズルによる花崗岩の掘削

前節で述べた小型岩石試料の掘削では単体のすべての試料が真二つに割れ、モルタルで数個を固めてブロックとしても大きく破壊するケースがあった。そこで、試料寸法が $30 \times 30 \times 30\text{ cm}$ の稲田花崗岩と小豆島花崗岩について実験した。前節と同じくノズルは静止で、口径は 0.85 mm のみを用いて圧力、ノズル試料間距離を変えた。表-3.2 に実験条件と結果を記してある。表中の掘削時間は試料が 2 つに割れるまでの時間で、モニターテレビで観察し、ストップウォッチで計測した値である。写真-3.4 から写真-3.8 に掘削後の試料の状況を示してある。

花崗岩試料の中央部に超高压水ジェットを噴射すると写真のようにいずれも 2 つに割れた。実験後、掘削跡の状態を調べると稲田花崗岩と小豆島花崗岩の様子には差が見受けられた。割れた稲田花崗岩は深さ 32 mm と 70

表-3.2 実験結果

写真番号	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ノズル出口圧力 (kgf/cm ²)	ノズル試料間距離 (mm)	掘削時間 (s)	掘削深さ (mm)
3-4	1090	2870	39	30	170
3-5	1210	3080	39	55	190
3-6	1190	2730	68	25	220
3-7	1020	2870	70	8	70
3-8	1040	2480	150	9	32

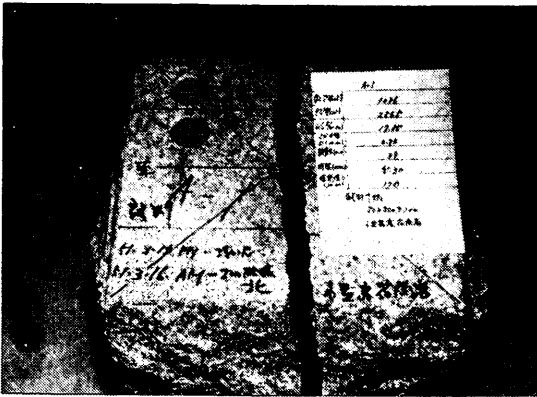


写真-3.4 小豆島花崗岩の掘削結果 (1)

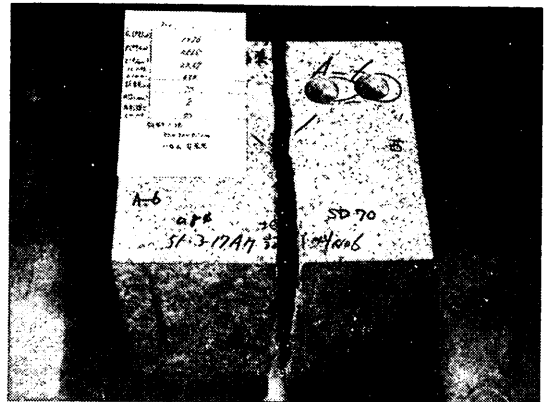


写真-3.7 稲田花崗岩の掘削結果 (1)

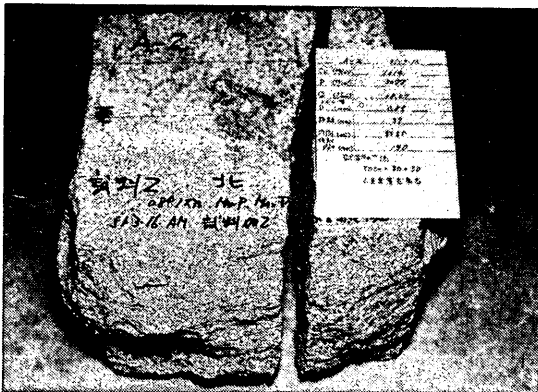


写真-3.5 小豆島花崗岩の掘削結果 (2)

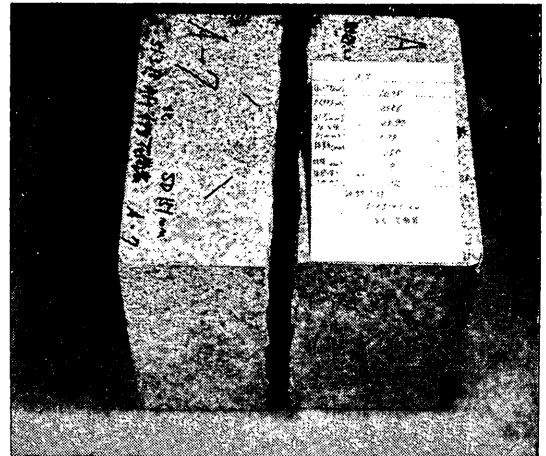


写真-3.8 稲田花崗岩の掘削結果 (2)

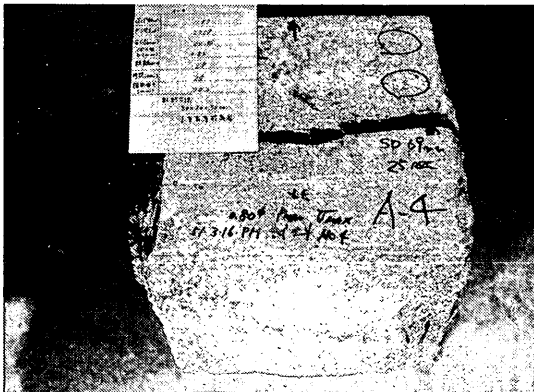


写真-3.6 小豆島花崗岩の掘削結果 (3)

mm の掘削孔があり、小豆島花崗岩では 170mm 以上であった。すなわち、稲田花崗岩は浅い掘削孔が生じて破壊し、小豆島花崗岩は深い掘削孔が穿孔されてから割

れている。表-3.2 に示すように圧縮強度の差が $150 \sim 90 \text{ kgf/cm}^2$ であるからこれが主な原因とは言い難い。肉眼で両種の花崗岩を観察すると結晶の粗さに相異が認められた。小豆島花崗岩の結晶粒は小さく、細かい黒雲母が一樣に分布している。他方、稲田花崗岩は粗い結晶粒からなり、大きめの黒雲母が存在する。掘削された破片も小豆島花崗岩では細かく砕かれたものが多かった。圧縮強度の差と結晶粒の多少によって水クサビ作用の影響の度合いに相異が生じ、このような実験結果になったと思われる。すなわち、稲田花崗岩は水クサビ作用に鋭敏であるが故に浅い掘削孔を生じて大きく破壊されるが、小豆島花崗岩はその逆となり十分深い孔が掘削されてから2つに分割される。この説明は現象的であり、本質的な検討は前報でも触れたように材料に内在している力学

超高圧水ジェットによる岩盤掘削

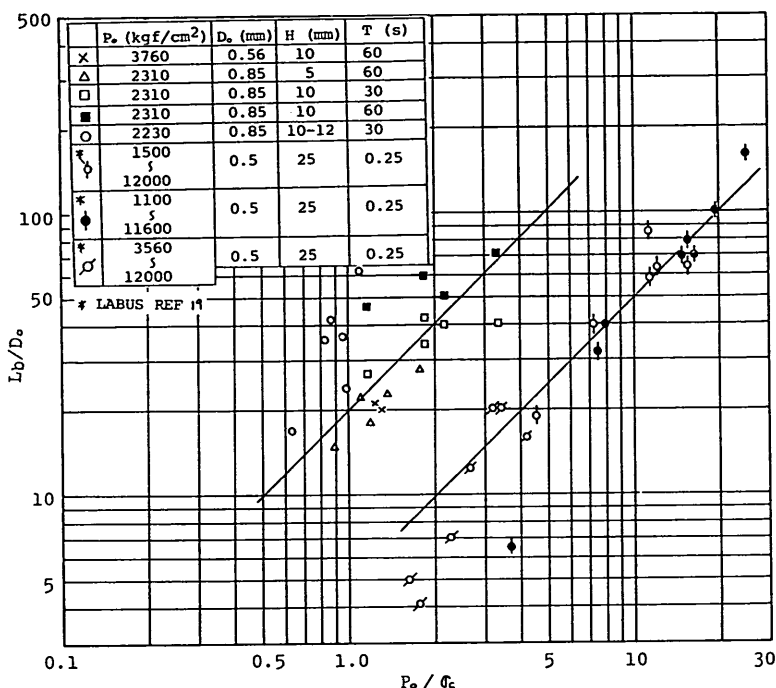


図-3.1 静止ノズルによる小型岩石の掘削孔深さ

的欠陥と破壊の関連から論ずるべきものである。しかし、この課題は本報告の主たる目的である超高圧水ジェットの掘削能力から外れるので、詳しい議論は他の機会にゆずりたい。

掘削孔深さをノズル試料間距離に対してプロットすると図-3.2のようになる。稲田花崗岩は掘削時間に殆ど差がないのでノズル試料間距離の影響を明確に表わしている。小豆島花崗岩は25秒から55秒と掘削時間にかなりの差があるにもかかわらず稲田花崗岩とほぼ同様の傾向を示している。両種の花崗岩はともに掘削孔深さはノズル試料間距離に反比例していることを示していると言ってよい。後述する移動ノズルによる掘削結果と比較すると、この結果はノズル試料間距離の影響がかなり強い方である。

図-3.1 と 図-3.2 は試料に何らの拘束を与えないで得たものである。実際の岩盤は周囲から拘束を受けており、無拘束の実験結果とは若干の差を生じると考えられる。そのため、長さ300mmのシャコ万力4個で水ジェットの噴射方向に直角の2方向から拘束を与えて、掘削時間と掘削孔深さの関係を求めた。使用したノズルは0.85

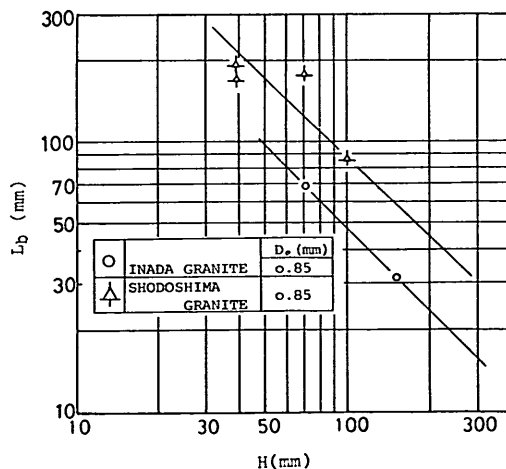


図-3.2 掘削孔深さとノズル試料間距離の関係 (破壊の場合)

mm, 圧力は2560 kgf/cm², ノズル試料間距離は20mmと50mmの2種類である。岩石試料は30×30×30cm角の稲田花崗岩である。図-3.3に実験結果を示す。掘削孔深さはノズル試料間距離に関係なく、10秒ほどで飽和

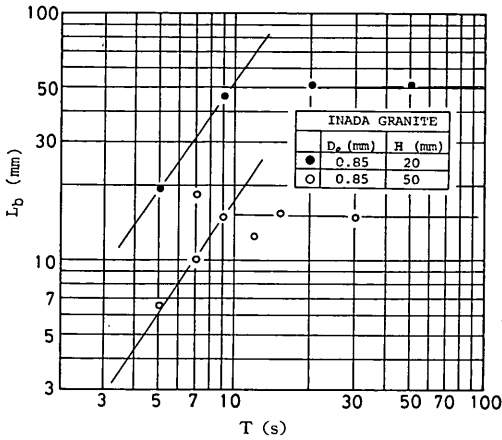


図-3.3 掘削孔深さと掘削時間の関係

する。この時間は表-3.2の掘削時間に近い値である。掘削開始から飽和するまでの掘削孔深さと時間の関係は

$$L_b \propto T^{1.5}$$

で近似的に表わせる。ただし、 L_b は掘削孔深さ(mm)、 T は時間(s)である。時間の指数は山門と横田³⁾、木下と星野⁴⁾の結果よりもかなり大きい。飽和するまでの時間は前述の2つの報告の間中である。

3.3 移動ノズルによる花崗岩の掘削

岩盤を連続的に掘削するにはノズルを移動しなければならない。このような条件ではノズル移動速度の影響を受けるので3.1と3.2で詳述した静止ノズルでの実験結果とは異ってくる。2で述べたようにノズル出口での水ジェット平均流速に対してノズル移動速度が十分に小さいので本実験では試料を移動し、その速度をノズル移動速度とする。ノズル移動時の掘削では圧力、圧縮強度、ノズル径、ノズル試料間距離、ノズル移動速度、掘削回数によって掘削深さは変化する。これらの変数の定義を図-3.4に示す。岩石試料は30×30×30cmの稲田花崗岩で、掘削時間と掘削深さの関係での実験と同様に4個のシャコ万力で拘束した。無限岩盤のシミュレーションのためと、大きな破壊を防ぐために行なった。

本実験で得られた掘削深さの代表例を図-3.5と図-3.6に示す。この図で明らかなように掘削形状はあるプロフィールを有しているので平均値を掘削深さとする。このような形状を呈するのは増圧機の圧力変動と岩の性質による。

最大掘削深さと掘削深さの比を掘削深さに対してプロットしてみると図-3.7のようになる。掘削深さが増加

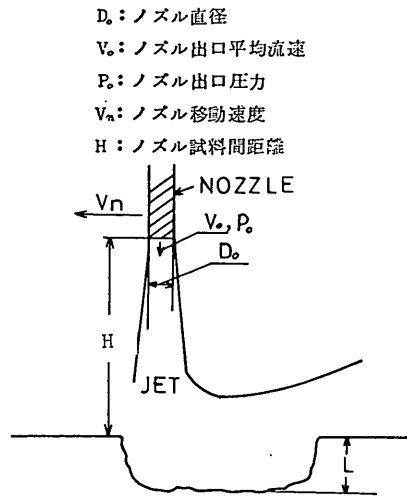


図-3.4 変数の定義

するとこの比は減少することを読み取れる。十分深く掘削されれば、掘削形状に大きな変動はなくなってくる。

図-3.8は最大掘削深さを p_0/σ_c に対して表わしたものである。最大掘削深さは圧力変動、試料の組成の不均一さの影響を受けやすいが p_0/σ_c にほぼ比例して増減することがわかる。図-3.9は無次元掘削深さ L/D_0 と無次元圧力 $(p_0/\sigma_c - 0.5)$ との関係を表わしている。本報告では稲田花崗岩についての実験結果のため、 σ_c は一定であるから整理方法の妥当性を検討する意味で他研究者のデータも付記した。岩種は石炭、砂岩、安山岩、大理石、石灰石であった。圧力は120 kgf/cm²から6000 kgf/cm²である。圧縮強度の代りにプロトジャコフ係数 ϕ で整理したデータ^{3),7)}は $\sigma_c = 100\phi$ として換算して再整理した。いずれの岩種でも L/D_0 は無次元圧力に関して正比例関係を維持しているのは明らかであろう。無次元圧力の表示として $(p_0/\sigma_c - 0.5)$ の形式を選んだのは必要破壊圧力の考えを導入したからである。本報告では必要破壊圧力を圧縮強度の50%としている。このような無次元変数を用いずに単なる比で整理すると圧力が零に近くても掘削を生ずることになり、実験結果に反する。図-3.9の横軸は掘削に有効な圧力の無次元表示と考えてもよい。図-3.10はノズル径と掘削深さの関係を表わしている。併記したのは山門と横田³⁾の結果である。掘削深さはほぼノズル径の2乗に比例している。MatsumotoとHamada⁵⁾等は水中掘削でノズル径の2.5乗に比例していると報告しているが、空気中での掘削では図-3.10の結果とVoitskhovskiy²⁰⁾等の報告を参照するとノズル径の2

超高压水ジェットによる岩盤掘削

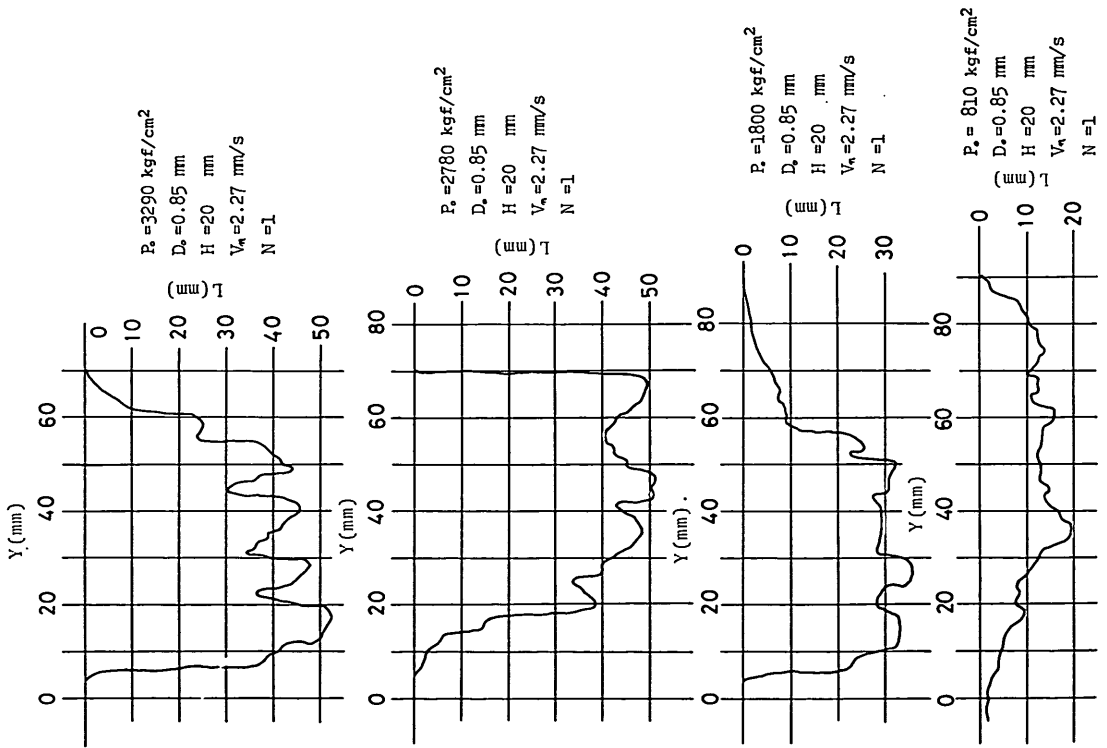


図-3.5 掘削プロファイル

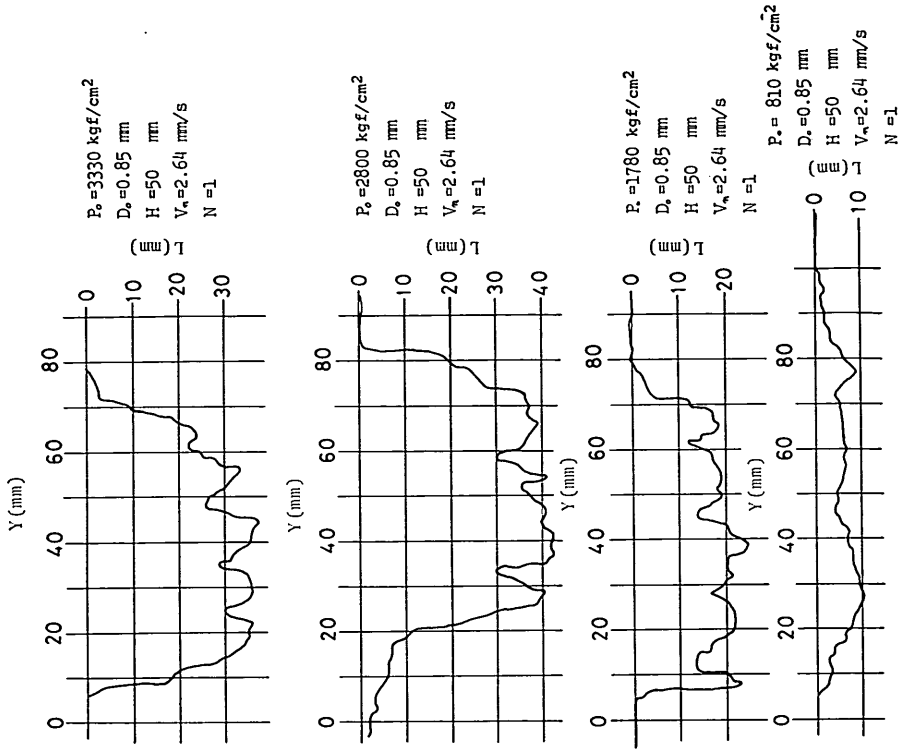


図-3.6 掘削プロファイル

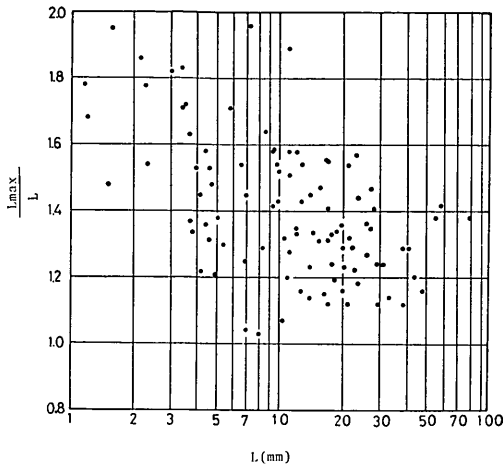


図-3.7 (最大掘削深さ/掘削深さ)と掘削深さの関係

乗に比例した掘削深さが得られると言える。ノズル試料間距離と掘削深さの関係は 図-3.11 のようになる。ノズル径の 100 倍以上の距離では掘削能力は急激に低下する。柳井田と大橋の測定結果、ならびに Leach と Walker の報告で $H > 100D_0$ では衝突圧力は減少するこ

D_0 (mm)	H (mm)	V_n (mm/s)	N	
○	1.00	20	2.38	1
●	1.00	50	2.38	1
◇	1.00	100	2.70	1
▲	1.00	150	2.40	1
△	0.90	20	2.58	1
▲	0.90	50	2.33	1
▲	0.90	70	2.33	1
▲	0.90	100	2.47	1
▽	0.85	20	2.27	1
▽	0.85	50	2.64	1
▽	0.85	100	2.68	1
▽	0.85	150	2.68	1

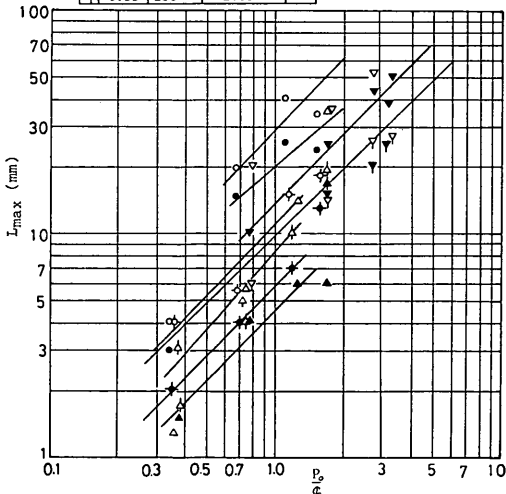


図-3.8 最大掘削深さと p_0/σ_c の関係

とが明らかとなっており、掘削能力の急速な低下はこの原因によると思われる。併記した山門と横田⁸⁾の結果はこの傾向を表わしていないが、圧力源の特性と岩種によるのではないと思われる。図-3.12 はノズル移動速度の影響を示したものである。ノズル移動速度の増加に従って掘削深さは減少する。図-3.3 で掘削孔深さは時間に依存することを明らかにしたが、ノズル移動時には単位移動距離当りのエネルギーがノズル移動速度の増加に従って減少するので掘削深さは小さくなると言える。図-3.13 は掘削回数によって掘削深さが変わる様子を示している。掘削回数に応じて深く掘れるが、正比例関係ではない。この結果から、複数個のノズルを進行方向に並べて掘削してもその効果はノズル数に正比例しないことを示している。図-3.14 は水ジェットエネルギーと掘削深さの関係である。掘削深さは水ジェットエネルギーにほぼ比例していると言える。

4. 考 察

4.1 掘削深さの実験式

前章で圧力、ノズル径、ノズル試料間距離、ノズル移動速度、圧縮強度、掘削回数、等の変数と掘削深さの関係を本報告での実験結果と他研究者のデータを引用して調べた。これらの関係は解析的に取り扱うのがもっとも望ましいが、初期掘削の Powell と Simson の例でわかるように静止ノズルでもかなりの困難を伴う。移動ノズルでは破砕面の移動によってより一層のむずかしさが予想される。例えば、Mohaupt と Burns の方法である。エネルギーバランスをもとに数多くの仮定を導入しても未解決の部分が残る最終的には実験定数を含む式となっている。本報告では解析的な観点では実験的な視点から掘削深さと各要因の関係を調べ、実験式を提案する。掘削深さを圧力、圧縮強度、ノズル径、ノズル移動速度、ノズル出口平均流速、ノズル試料間距離、掘削回数の変数とすれば

$$L = F(p_0, \sigma_c, D_0, H, V_n, V_0, N) \quad (4.1)$$

筆者の一人¹⁾は水中水ジェット掘削で圧力破壊の考えに基づき、静止ノズルから噴射した水ジェットによる掘削孔深さは初期の段階で無次元変数を用いて次式で近似できることを示した。

$$L = C_0 \left(\frac{p_0 - p_c}{\sigma_c} \right)^\alpha \frac{D_0^{2\alpha}}{H^{2\alpha-1}} \quad (4.2)$$

ここで、 C_0 と α はよどみ点圧力と引張強度の比で決定される定数である。 p_c は必要破壊圧力の理論値である。

超高压水ジェットによる岩盤掘削

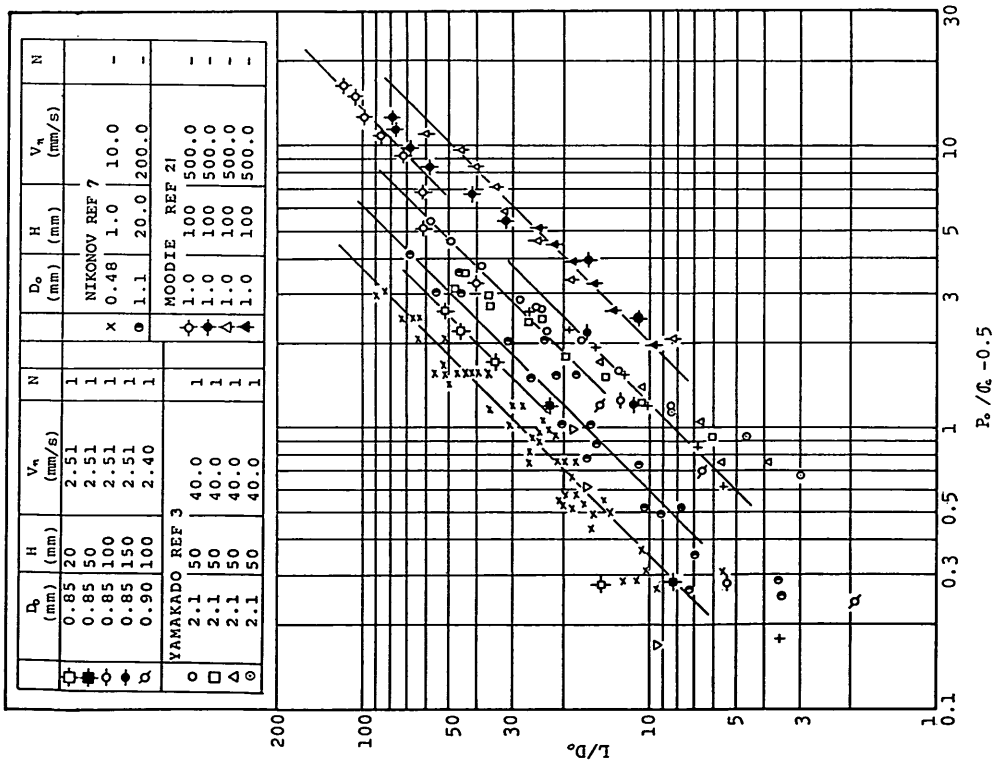


図-3.9 L/D_0 と $(p_0/\sigma_0 - 0.5)$ の関係

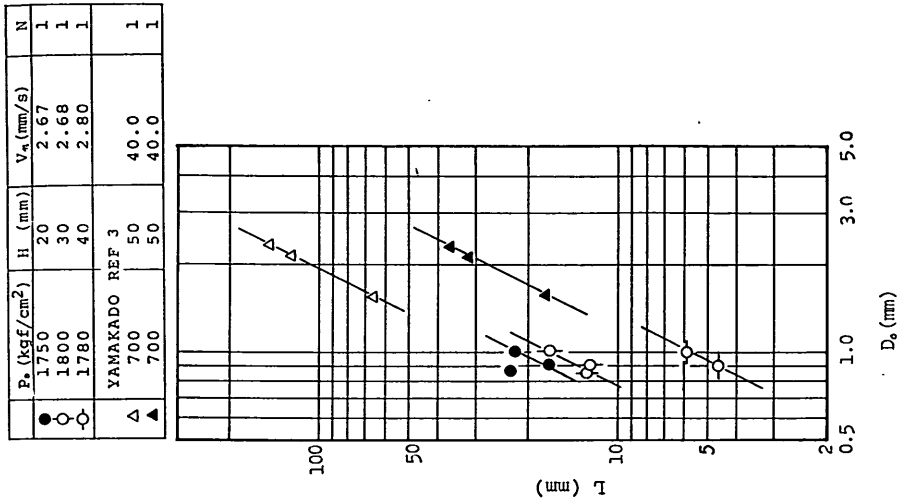


図-3.10 ノズル径と掘削深さの関係

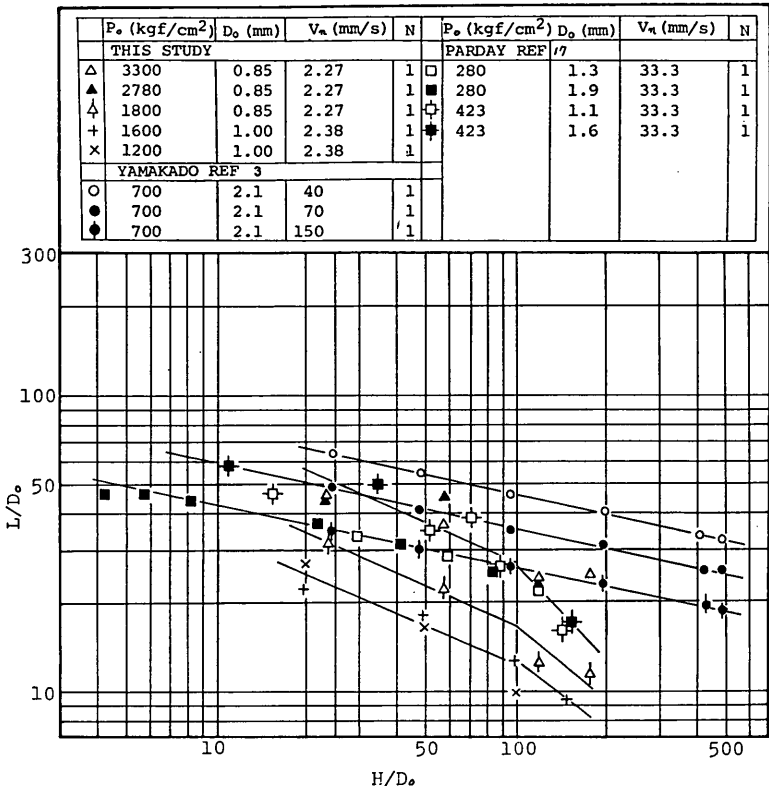


図-3.11 掘削深さとノズル試料間距離の関係

本報告は空気中水ジェットによる掘削であるから水中水ジェットとは特性は異なる。さらに液滴の衝突によるウォーターハンマーの効果も考えられ、(4.2)式のように定数が2個では十分に記述しがたい。ノズル移動速度、掘削回数の新しい変数を導入すれば、各変数の指数は別個の値をとると考えたほうがよい。(4.2)式と同様にできるだけ無次元数を用いて(4.1)式の関数形を仮定すると

$$L = C_0 \left(\frac{p_0 - p_t}{\sigma_c} \right)^\alpha D_0^\beta \left(\frac{D_0}{H} \right)^\gamma \left(\frac{V_0}{V_n} \right)^\delta N^\xi \tag{4.3}$$

と書ける。ここで、 C_0 , α , β , γ , δ , ξ , p_t は実験結果から決められる定数である。図-3.9 から 図-3.13 で示したデータから、これらの定数は

$$\alpha=1, \beta=2, \gamma=0.4, \delta=0.5, \xi=0.7, p_t=0.5\sigma_c \tag{4.4}$$

と決められる。 C_0 は未定なので(4.4)式の数値を(4.3)式に代入し、プロットすると 図-4.1 となる。この図より $C_0=1/6$ となる。最終的な式は

$$L = \frac{1}{6} \left(\frac{p_0}{\sigma_c} - 0.5 \right) D_0^2 \left(\frac{D_0}{H} \right)^{0.4} \sqrt{\frac{V_0}{V_n}} N^{0.7} \text{ (mm)} \tag{4.5}$$

となる。実験定数を求めた範囲と各変数の単位は

$$\left. \begin{aligned} 200 \leq p_0 \leq 3300 & \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \\ 0.85 \leq D_0 \leq 2.25 & \text{ (mm)} \\ 20 \leq H \leq 1000 & \text{ (mm)} \\ 2.2 \leq V_n \leq 300 & \text{ (mm/s)} \\ 120 \leq \sigma_c \leq 1200 & \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \\ 1 \leq N \leq 15 & \end{aligned} \right\} \tag{4.6}$$

(4.5)式は圧力差とノズル径の2乗の積を含んでいる。この量は水ジェットの運動量に比例するので、掘削深さは水ジェットの運動量に比例すると言える。

図-4.1で注意すべき点は Moodie と Artingstall²⁾の結果と前報³⁾の圧力 500 kgf/cm², 1000 PS のデータは(4.5)式で記述できないことである。Moodie と Artingstallの結果には C_0 を 1/6 以上にすることがあり、 V_n がかなり大きいことと噴射時間が 0.25 s と他の実験とはか

超高圧水ジェットによる岩盤掘削

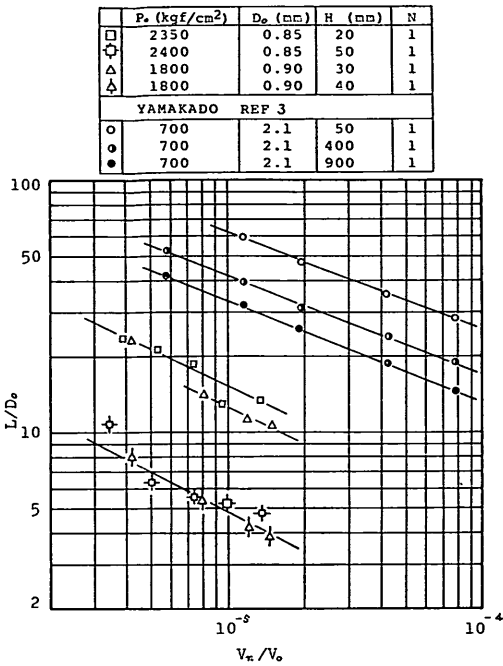


図-3.12 掘削深さとノズル移動速度の関係

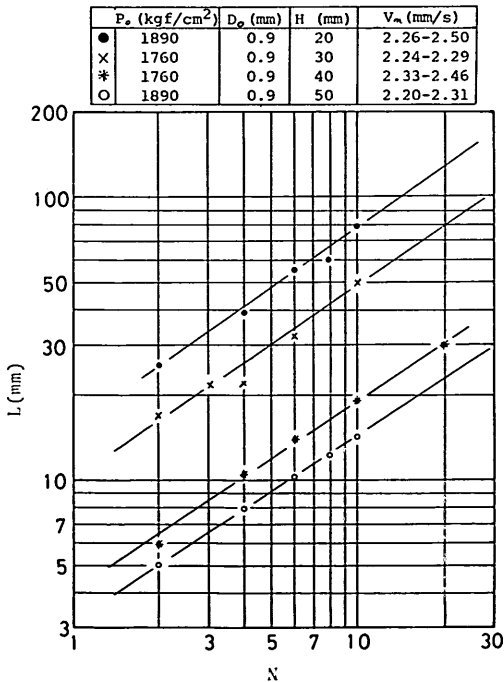


図-3.13 掘削回数と掘削深さの関係

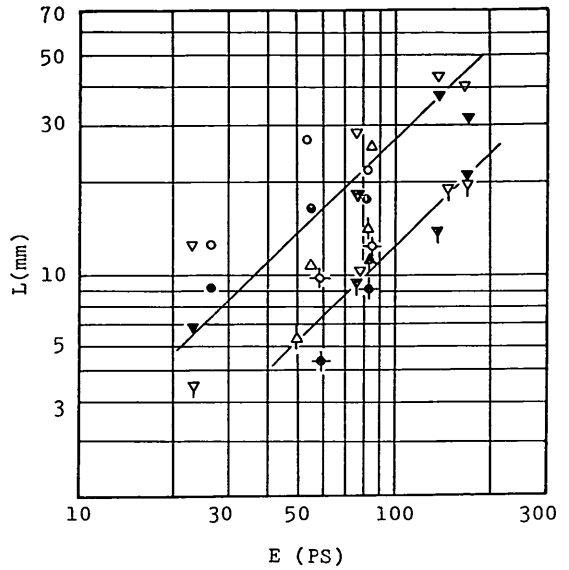


図-3.14 掘削深さと水ジェットエネルギーの関係

なり条件が違うためと思われる。前報のデータはノズル径が7.8mmという前例のない大きさであり、これの過大評価によって C_0 は1/6より1オーダー小さい値をとらざるを得ないのであろう。前報では Matsumoto と Hamada 等の実験式で整理し、 C_0 に対応する定数が2オーダー小さくなったが、(4.5)式の場合は1オーダーの減少ですむ。実験範囲外では実験式の精度は低下するのは十分考えられることであり、水ジェット掘削に関しては過大評価の恐れが生じるのは図-4.1でよくわかる。

4.2 最適掘削条件

掘削深さの実験式(4.5)式中でノズル移動速度、ノズル試料間距離、掘削回数は浚渫作業の進展に応じてオペレーターが任意に変えることのできる変数である。しかし、圧力とノズル径は馬力と直接関係する量であるから上限を決められてしまう。掘削すべき岩盤の圧縮強度は事前調査で測定できるので、それに対して最適掘削条件を得るには与えられた水ジェットエネルギーで p_0 と D_0 をどのように選ぶかによる。ここでは、掘削深さは(4.5)式で表わされるとして、ある水ジェットエネルギーでの最適掘削条件を計算してみる。

ノズル出口での単位時間当りの水ジェットエネルギー E は

$$E = \frac{\pi}{400} D_0^3 V_0 p_0 \quad (4.7)$$

である。 p_0 の圧力で水は非圧縮性とし、ノズルの速度

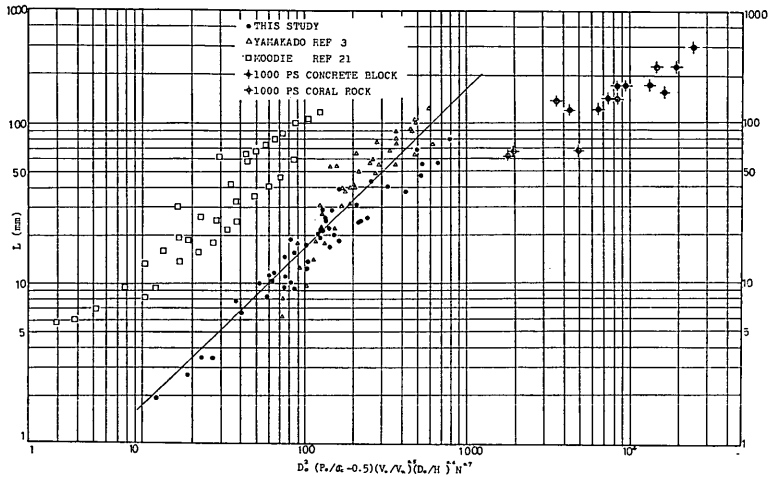


図-4.1

係数を ϕ とすれば V_0 は

$$V_0 = 100\phi\sqrt{\frac{2g}{\rho}p_0} \quad (4.8)$$

ただし、 g は重力加速度、 ρ は水の単位体積重量である。(4.7) 式と (4.8) 式を (4.5) 式に代入すると

$$L = \frac{100}{21\pi} \frac{E}{\phi} \left(\frac{p_0}{\sigma_c} - 0.5 \right) \frac{1}{p_0^{1.5}} \left(\frac{D_0}{H} \right)^{0.4} \left(\frac{V_0}{V_n} \right)^{0.5} N^{0.7} \quad (4.9)$$

となる。ここで、 D_0/H 、 V_0/V_n 、 N は定数と考えているので L は p_0 のみの関数となる。 L を最大にする条件は (4.9) 式を p_0 で微分し、導関数を零とおくことにより次のように求まる。その値を p_{opt} で表わせば

$$p_{opt} = 1.5\sigma_c, \quad (4.10)$$

である。つまり、圧力を岩石の圧縮強度の 1.5 倍に設定すると最大掘削深さを得られる。その際のノズル径は (4.10) 式を (4.7) 式に代入して

$$D_{opt} = \sqrt{\frac{200}{7\pi} \frac{E}{p_{opt}^{1.5}}} \quad (4.11)$$

最大掘削深さ L_{opt} は (4.9) 式と (4.10) 式から

$$L_{opt} = \frac{100}{21\pi} \frac{E}{\phi} \frac{1}{p_{opt}^{1.5}} \left(\frac{D_0}{H} \right)^{0.4} \sqrt{\frac{V_0}{V_n}} N^{0.7} \quad (4.12)$$

となる。掘削深さと最大掘削深さは水ジェットエネルギーに比例する。これは 図-3.14 で明らかである。

本節で求めた最適条件は (4.5) 式の実験式にもとづいているので実験定数と必要破壊圧力の定義によって変ることがある。山門と横田の必要破壊圧力の定義では $p_{opt} = \sigma_c$ ($\sigma_c = 100\phi$ とし) となり、(4.10) 式の 2 倍とな

る。掘削深さは (4.3) 式の形で決められるとして実験定数に具体的な数値を代入せず、変数名のまま p_{opt} を計算した結果を付録に示してある。 p_{opt} は

$$p_{opt} = \frac{3\beta}{3\beta - 4\alpha} f\sigma_c \quad (4-13)$$

のようになり、 α 、 β と f の関数である。

5. 結 論

4000 kgf/cm² の超高压水ジェットを発生する増圧機で主として空気中での花崗岩の掘削結果をまとめた。移動ノズルと静止ノズルで実験条件を変えて掘削能力を実験的に調べた。静止ノズルを使用した実験では約 15 cm 角に整形した各種岩石を単体、および、いくつかをモルタルで固め 70×50×30 cm のブロックとしたものと 30 cm 角の稲田花崗岩と小豆島花崗岩を用いた。大部分は無拘束のまま掘削した。移動ノズルでは、30 cm 角の稲田花崗岩のみを用い、4 個のシャコ万力で水ジェット噴射方向に直角の 2 方向から拘束を与えて無限岩盤と同様の状態で掘削した。実験条件を変えて掘削深さを測定し、実験式を提案した。本報告の内容をまとめると以下のようになる。

静止ノズルによる掘削

- 1) 約 15 cm 角の岩は容易に破壊できる。これとほぼ同寸法の岩をモルタルで 70×50×30 cm のブロックとして固めても大きく破壊することが可能である。
- 2) 30 cm 角の稲田花崗岩と小豆島花崗岩のいずれも真二つに割れた。

- 3) これらの実験結果から、無拘束に近い岩石はノズルを静止して掘削すれば大きく破壊することが可能と言える。

移動ノズルによる掘削

- 4) 拘束を受けた岩には溝が掘削された。
 5) 掘削深さは圧力に比例し、ノズル径の2乗に比例した。
 6) 掘削深さについて、圧力、必要破壊圧力、圧縮強度、ノズル径、ノズル試料間距離、ノズル移動速度、掘削回数を含む実験式を提案した。
 7) 得られた実験式をもとにして、与えられた水ジェットエネルギーでの最適掘削条件を検討し、圧力を圧縮強度の1.5倍にすればよいことを求めた。

6. あとがき

本報告では空気中での超高压水ジェット掘削について述べ、実験式を提案した。最適掘削条件を求めた理由の一つは実際に水ジェットを利用した砕岩船を設計する際に圧力を重点的に考えるか、流量を中心としてポンプを設計するかについて議論を呼ぶであろうと考えたからである。実験式の形と定数によって p_{opt} が変わるのは当然であり、本報告の方法は一つの考え方である。もう一つの点は空気中と水中では掘削に大きな差が生じるのではないかという疑問である。超高压水ジェット掘削で殆ど差がないと報告されている。港研の実験装置は定格圧力を 2000 kgf/cm^2 にし、流量を以前の2倍に変更して水中と空中での比較を行っている。コンクリートブロックを用いて、一連の実験を開始したばかりであるが、ノズル試料間距離が大きくなければ、水中と空気中の差はあまりない結果も得られている。ノズルの運動を変えて各種の実験も実施する予定であり、一連の実験終了後まとめて報告したいと考えている。

水ジェット掘削は他の機械的方法との組み合わせで性能を格段に向上させることも一利用方法である。この点について今後考えていきたい。

謝 辞

本報告は特別研究「岩盤浸漬に関する研究」の一環としてまとめたものであり、実験装置の計画から製作、実験実施に至るまで多くの人の力添えがあった。計画全体では小岩機材部長、実験装置の計画、概略設計については麻山元作業船研究室長、製作と実験計画は藤井前作業船研究室長に御指導を仰いだ。厚く感謝いたします。

図-4.1 に引用した圧力 500 kgf/cm^2 , 1000 PS の実験

データは第四港湾建設局の協力で得られたデータを再整理した結果である。高压水ジェット掘削実用化へ向けての実験結果であるが、 1000 PS という他には実施例のわずかな大規模な実験で貴重なデータが得られており、第四港湾建設局に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) H. Shoji: "Submerged Water Jets Cutting", Master thesis, University Waterloo, Nov., 1977.
- 2) 中島忠男, 小岩昔生, 岩崎峯夫, 石塚浩次, 東海林秀幸: "高压水ジェットによる珊瑚礁岩の掘削性について", 港研報告 Vol. 17, No. 3, 1978年12月
- 3) 山門憲雄, 横田 章: "高速の水噴流による岩石の破壊", 土木学会論文報告集第133号, 昭和41年9月
- 4) 木下豊弘, 星野謙三: "高速水噴流によるトンネル掘削法(第1報)", 鉄道技術研究所報告, No. 709, 1970年4月
- 5) K. Matsumoto, H. Hamada, T. Fukuda and A. Shijo: "High Pressure Jet Cutting", Proc. of 1st International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, Apr., 1972
- 6) O. Imanaka, S. Fujino and Y. Kawate: "Experimental Study of Machining Characteristics of Liquid Jets of High Power Density up to 10 W/cm^2 ", Proc. of 1st International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering Cranfield, England, Apr., 1972
- 7) G. P. Nikonov and Yu. A. Goldin: "Coal and Rock Penetration by Fine Continuous High Pressure Water Jets", Proc. of 1st International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, Apr., 1972
- 8) I. A. Kuzmich: "Some Relationships in the Coal Mining Penetrations by High Pressure Thin Water Jet", Proc. of 1st International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, Apr., 1972
- 9) S. T. Leach and G. L. Walker: "Some Aspects of Rock Cutting by High Speed Water Jets", The Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Sec. A, Vol. 260, pp. 295-308, 1966
- 10) A. G. Northworthy, U. H. Mohaupt and D. J. Burns: "Design and Performance of Water Jet System for Slotting of Concrete", Proc. of 2nd International Conference on High Pressure Engineering, Institute of Mechanical Engineers, 1975
- 11) N. C. Franz: "Fluid Additives for Improving

- High velocity Jet Cutting”, Proc. of 1st International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, Apr., 1972
- 12) G. Reh binder: “Some Aspects on the Mechanism of Errosion of Rock with a High Speed Water Jets”, Proc. of 3rd International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, May, 1976
- 13) S. C. Crow, P. V. Lade and G. H. Hurburt: “The Mechanics of Hydraulic Rock Cutting, Proc. of 2nd International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, May, 1976
- 14) U. H. Mohaupt, P. V. Lade and G. H. Hurburt: “The Mechanics of Hydraulic Rock Cutting, Proc. of 2nd International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, May, 1976
- 15) W. C. Cooley: “Correlation of Data on Liquid Jet Cutting on Rock and Other Materials”, Terraspace, Inc., Jan., 1975
- 16) J. H. Powell and S. P. Simpson: “Theoretical Study of the Mechanical Effects of Water Jets Impining on a Semi-Infinite Elastic Solid”, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6, pp. 353-364, Pergamon Press, 1969
- 17) P. H. Paday: “Underwater Applications of Continuous Water Jets”, Proc. of 3rd International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, May, 1976
- 18) 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, Vol. 93, 1977年6月号
- 19) T. Labus: “Energy Requirements for Rock Penetration by Water Jets”, Proc. of 3rd International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, May, 1976
- 20) B. V. Voitsekhovskiy, et al.: “On Destruction of Rocks and Metals by High Pressure Jets of Water”, Proc. of 1st International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, Apr., 1972
- 21) K. Moodie and G. Artingstall: “Some Experiments on the Application of High Pressure Water Jets for Mineral Excavation”, 1st International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, England, Apr., 1972

L_{max}	: 最大掘削深さ	(mm)
L_{opt}	: 最適掘削深さ	(mm) (kgf/cm ²)
p_0	: 圧力 (ノズル出口)	(kgf/cm ²)
p_{opt}	: 最適圧力	(kgf/cm ²)
V_0	: 水ジェット平均流速	(m/s)
V_n	: ノズル移動速度	(mm/s)
p_c	: 圧縮強度	(kgf/cm ²)
ρ	: 単位体積重量	(kgf/m ³)
N	: 掘削回数	(—)
H	: ノズル試料間距離	(mm)
E	: 単位時間当りの 水ジェットエネルギー	(kgm/s)
p_t	: 必要破壊圧力	(kgf/cm ²)
g	: 重力加速度	(m/s ²)
φ	: ノズル速度係数	(—)
Φ	: プロトジャコノフ係数	(—)
C_0	: 実験定数	
C_1	: ”	
C_2	: ”	
α	: ”	
β	: ”	
γ	: ”	
δ	: ”	
ξ	: ”	

付 録

4.2 では $\alpha, \beta, p_t/\sigma_c$ に具体的な数値を代入して $p_{opt}, D_{opt}, L_{opt}$ を計算したが、ここでは変数名のままとして最適条件を求めてみる。 $f = p_t/\sigma_c$ とすれば (4.3) 式は

$$L = C_1 \left(\frac{p_0}{\sigma_c} \right) - f^\alpha D_0^\beta \quad (A.1)$$

$$C_1 = C_0 \left(\frac{D_0}{H} \right)^\gamma \left(\frac{V_0}{V_n} \right)^\delta N^\xi \quad (A.2)$$

と書ける。水ジェットのエネルギーは D_0 (mm), V_0 (m/s), p_0 (kgf/cm²) の単位を用いると

$$E = \frac{\pi}{400} D_0^3 V_0 p_0 \quad (A.3)$$

p_0 の圧力で水は非圧縮性とすれば、 V_0 は近似的に

$$V_0 = 14\varphi\sqrt{p_0} \quad (A.4)$$

と表わすことができる。(A.3) 式と (A.4) 式を (A.1) 式に代入して、 L は

$$L = C_2 \left(\frac{p_0}{\sigma_c} - f \right)^\alpha p_0^{-(3/4)\beta} \quad (A.5)$$

$$C_2 = C_1 \left(\frac{200}{7\pi} \frac{E}{\varphi} \right)^{\beta/2} \quad (A.6)$$

記 号 表

L_b	: 掘削孔深さ	(mm)
L	: 掘削深さ	(mm)

超高压水ジェットによる岩盤掘削

となる。(A.5) 式は p_0 のみの関数であるから、4.2 と同様に L が最大値となる条件を求めると

$$P_{\text{opt}} = \frac{3\beta}{3\beta - 4\alpha} p_i \quad (\text{A.7})$$

となる。 p_{opt} は α , β , p_i によって決定される。筆者等の調べた範囲では $\alpha=1$, $\beta=2$ とするのが妥当なようで

ある。 p_i は定義によって変り、 $p_i=0.2\sigma_c$ から $p_i=\sigma_c$ までである。すなわち、 $p_{\text{opt}}=0.6\sigma_c \sim 3.0\sigma_c$ となる。 $p_{\text{opt}} < \sigma_c$ は現実的な意味がない。 $p_{\text{opt}}=3.0\sigma_c$ とするのは山門と横田の定義による値であるが、その定義は厚さ 2 cm の試料を掘削する圧力を p_i としている。そのため、掘削開始にくらべると高い値となる。