

土研資料 1184 号

土木研究所資料

岩石掘削工法に関する試験調査

——リッパ掘削に関する実験的研究——

昭和52年 2 月

建設省土木研究所

岩石掘削工法に関する研究

機械研究室室長 本田 宣 史
主任研究員 後 藤 勇
研究員 岡 崎 治 義
石 島 威
後 藤 勝 志

目 次

1. まえがき	1
2. 目 的	1
3. 実験方法	2
3.1 現場実験	2
3.1.1 実験場所と使用機械	2
3.1.2 実験項目	3
3.1.3 実験コースの設定	9
3.1.4 実験工程	10
3.1.5 実験条件	11
3.2 室内実験	13
3.2.1 模型試験機の概要	13
3.2.2 試験項目	15
3.2.3 水平力、鉛直力の検定方法	18
3.2.4 試験工程	20
3.2.5 試験条件	20
3.2.6 試験手順	21
3.2.7 試験に用いた岩石試料	22
4. 実験結果	23
4.1 岩盤調査結果及び岩石試験結果（現場と室内）	23
4.1.1 岩盤調査結果	23
1) 地表踏査結果 2) 弾性波探査結果	
3) ボーリング調査結果 4) 岩石試験結果	
4.1.2 室内試験用試料の試験結果	25

4.2	掘削実験結果	26
4.3	リッパ刃先にかかる外力	26
4.3.1	静力学的計算による推定値との比較	26
4.3.2	リッパ作用力に影響を及ぼす諸要因	29
	(1) 掘削深さ (2) 掘削速度 (3) すくい角	
4.4	リッパ能力	38
4.4.1	掘削断面積に影響を及ぼす諸要因	38
	(1) 掘削深さ (2) 掘削速度 (3) すくい角 (4) リッパピッチ	
4.4.2	リッパ能率	47
	(1) 最適水平力 (2) 岩質とリッパ能率	
4.4.3	振動切削効果	53
	(1) 岩石の振動破碎 (2) 切削力と加振効果	
	(3) 切削能力と加振効果 (4) 切削能率と加振効果	
	(5) 加振効果より実機への推論	
5.	まとめ	60
6.	今後の問題点	60
	参考文献	61
	データ集	62

報告書に使用したシンボル一覧

A_f : 掘削断面積	[m^2]	v_f : 掘削速度	
A_m : 切削断面積	[mm^2]	v_m : 切削速度	
b_f : 掘削巾	[cm]	y : 中立軸から応力の作用 する点までの距離	[cm]
b_m : 切削巾	[mm]	W : ブルドーザ自重	[ton]
b_f : 掘削有効巾	[cm]	α : 加速度	[g]
b : リッパシャンク巾	[mm]	ϵ : 引張り(圧縮)ひずみ	
h : リッパシャンク厚	[mm]	τ : 剪断応力	[kg/cm^2]
b_c : カッタ巾	[mm]	ν : ポアソン比	
E : 縦弾性係数	[kg/cm^2]	μ : 地面とブルドーザとの 粘着係数	
G : 横弾性係数	[kg/cm^2]	γ : 剪断ひずみ	
I : 慣性モーメント	[cm^4]	η_f : 掘削能率	[m^3/Bsh_r]
H_f : リッパに働く水平力	[ton]	η_m : 切削能率	[m^3/Bsh_p]
H_m : カッタに働く水平力	[kg]	σ_{cf} : 一軸圧縮強度(供試体)	[kg/cm^2]
h_f : 掘削深さ	[cm]	σ_{cm} : 一軸圧縮強度(岩盤)	[kg/cm^2]
h_m : 切削深さ	[mm]		
K : 定数			
L_f : 荷重計の読み	[ton]		
L_s : リンクに組み込んだ荷 重計の読み(鉛直)	[kg]		
L_s : リンクに組み込んだ荷 重計の読み(水平)	[kg]		
l_x : 支点から作用点までの x 軸距離	[mm]		
l_y : 支点から作用点までの y 軸距離	[mm]		
M_s : リッパに働くモーメント			
N_s : リッパに働く軸力			
Q_s : リッパに働く剪断力			
N : 振動数	[$v.p.m$]		
P_s : 切削馬力	[Ps]		
P : リッパピッチ	[cm]		
Q_f : 単位長さ当たり掘削量	[m^3]		
Q_m : 単位長さ当たり切削量	[mm]		
R_H : 前部アイドラの受ける 水平力	[ton]		
R_v : 前部アイドラの受ける 鉛直力	[ton]		
t : 時間			
V_f : リッパに働く鉛直力	[ton]		
V_m : カッタに働く鉛直力	[kg]		
V_p : 弾性波速度(縦波)	[km/sec]		

Suffix の f . m はそれぞれ

f : field (現場実験)

m : model (室内実験)を表わす。

1. ま え が き

近年、岩石掘削工法の有力な手段の一つである発破工法が、発破の使用規制、あるいは公害問題等の発生によって、制限が加えられつつある。この結果リッパ工法やトンネルボーリングマシンなどの機械掘削が見直され、施工例が増加してきている。しかもこれらの機械掘削による施工可能領域は建設機械の大型化、高出力化など技術の進歩とともに拡大されて来ている。しかしながら現在、機械掘削工法を実現場へ適用する場合、適用条件、施工能力、経済性などについては、系統的な調査研究資料が不十分なため、必ずしも明確にされていないのが現状である。一般に岩掘削は、土工に比べコストや工期が5～10倍になるため、適切な工法の選択が工事計画の時点で重要な課題となっている。こうしたことから在来の岩石掘削工法の適用区分を明らかにするとともに、省力化、能率向上、低公害を目指した新しい岩石掘削工法の開発が要望されている。

土木研究所、機械研究室においては、昭和49年度よりこの問題を取り上げ、普及度の高い岩石掘削工法の一つであるリッパ工法について掘削機構の解明、能率の向上、更に硬い岩の領域への適用の可能性を検討するため調査を開始した。本報告書は2ヶ年のリッパ現場実験及び室内実験により得たデータより、リッパ掘削時の作用力、掘削能力に影響を及ぼす要因等についてとりまとめたものである。

2. 目 的

岩石トンネル掘削機、岩石たて孔掘削機などに代表される機械的な岩石掘削工法は、岩質の変化に対する適用範囲が狭いとされ、複雑な地質条件の多い我国では、必ずしも一般的な工法として確立されるまでには至っていない。

本研究は、岩石の機械掘削としてもっとも普及度が高く、しかもマクロ的にはすべての機械掘削の原形とみなされるリッパ工法を取りあげ、岩質と掘削時に作用する力の関係より、効率的な掘削を行なうための条件、適用の限界となる条件などを明らかにするとともに、掘削能力を向上させ、岩石掘削機適用範囲を拡大する手法についての検討を行なうことを目的としている。

3. 実 験 方 法

実験は、実機リッパによる現場実験、ロッドヘダ用カッタによる室内実験の両面より実施した。すなわち、現場実験は、特定の条件に対するリッパ掘削時の作用力の大きさ、リッパを有効に行なう条件を見出すための実験であり、室内実験は岩種の変化に対する機械切削の定性的な傾向を見出すための実験である。さらに両者の比較により、亀裂の有無の影響や、岩石掘削における寸法効果や、相似についての検討も行なうこととしたが、本報告では、その点に触れるまでには至っていない。両実験の概要を以下に述べる。

3.1 現場実験

3.1.1 実験場所と使用機械

昭和49年度は、千葉県夷隅郡荒木根ダムにおいて比較的軟かい岩（泥岩）についてキャタピラ三菱D8Hリッパドーザを用いて実験を行なった。昭和50年度は岡山県新見市中国自動車道の現場において、比較的硬い岩（流紋岩）について小松D150リッパブルドーザを用いて実験を行なった。実験に使用したリッパブルドーザの仕様を表-3.1にする。

表-3.1 実機リッパドーザの仕様

実験年月	49年8月			50年12月					
製作会社	キャタピラー社			小松製作所					
形式名称	D8H (マルチジャンク アジャスタブルリッパ)			D150 (固定式 DRD150-1 ジャイアントリッパ)					
総重量	32,600Kg (内リッパ4,500Kg)			37,730Kg (内リッパ4,440Kg)					
機関出力	270PS (1,280rpm)			300PS					
走行速度 けん引力	前 進		走行速度	けん引力	前 進		走行速度	けん引力	
			Km/h r	Kg			Km/h r	Kg	
		1.	2.6	21,760		1.	2.5	27,600	34,500
		2.	3.4	11,060		2.	3.5	19,700	(max)
		3.	4.7	5,160		3.	4.9	14,100	
						4.	7.6	9,080	
	後 進				後 進				
		1.	2.6			1.	3.6		
		2.	3.4			2.	5.0		
		3.	4.7			3.	6.8		
						4.	10.6		
全 長	8,100 ㎜			8,285 ㎜					
全 幅	4,000 ㎜			4,130 ㎜					
全 高	3,099 ㎜			2,560 ㎜					
履帯中心 距離	2,134 ㎜			2,140 ㎜					
接 地 長	3,150 ㎜			3,140 ㎜					
リッパ最大 掘削深	790 ㎜			925 ㎜					

3.1.2 実験項目

(1) 水準測量

レベルとスタッフにより実験コースに沿って2m間隔に水準測量を行なう。

(2) 地表踏査

地表踏査は層理の方向と傾斜、節理の方向と傾斜、断層の有無と風化の度合を調べるため、クリノメータによって付近の露頭において観察等を行なった。また地表部より得られた岩石について密度、含水比など求めるため試料採取を行なった。

(3) 弾性波探査

地表に近い地層構造や岩盤中に存在するクラックの度合を判定するため応用調査事務所製Ps-5弾性波測定機を使用し、実験コースに沿って図-3.1のように測定した。測定は実験コースの1端部に受振器を設置し、実験コースの全長25mを5m間隔で振動を発生させた。また最初に叩いた位置と逆の測線を叩いて往復による測定を行なっている。弾性波探査の測定地点位置図を巻末の附図-1に示した。

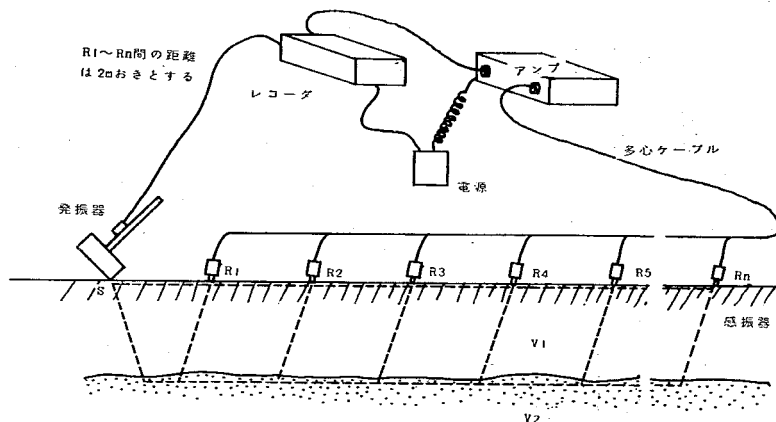


図-3.1 弾性波測定方法

(4) コアボーリングによる岩石試験

一軸圧縮試験に使用するコアサンプルを得るためにKANO150型ボーリングマシンを使用しコアボーリングを行なった。コア直径は4.5~4.8cmφである。採取したコアは整形後一軸圧縮試験、引張試験に使用した。測定に当たっては容量5tonの力計(5トンブルーピングリング)を使用し、圧縮速さ2.5Kg/cm²の速度で供試体を加圧した。同時に歪をダイヤルゲージにより測定し、一軸圧縮強度 σ_{cf} は後述する6-3-9式により求めた。

(5) 跡坪測量

実験終了後、掘削断面積の測定のため図-3.2のように掘削断面の測量を行なった。ここで

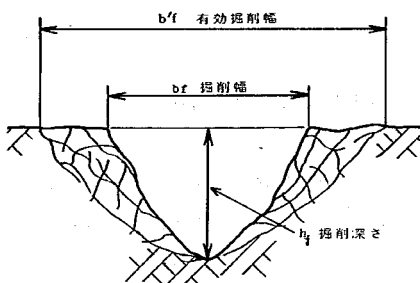


図-3.2 路坪測量

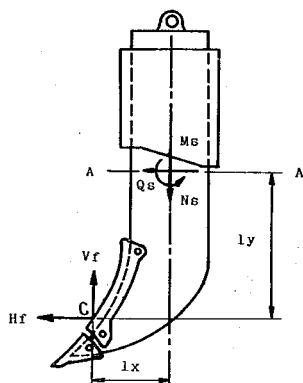


図-3.3 リッパに作用する外力

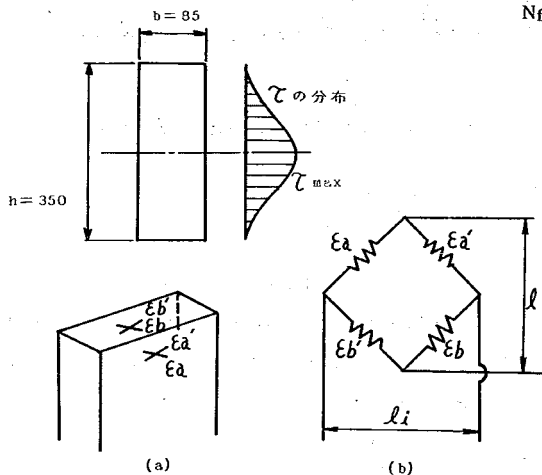


図-3.4 測定ブリッジ

有効掘削幅は直接には破壊されていないが明らかに掘削によって生じたと思われる地表面で観測されたクラックの範囲である。

(6) リッパシャंकにかかる作用力の測定

岩掘削時にリッパに作用する力を測定するために、ストレインゲージによる応力測定を行なった。測定方法を荒木根実験に使用したリッパシャंकについて以下にのべる。なお、50年度の下布瀝実験もリッパシャंकの形状は異なるが同様な方法である。図-3.3においてリッパに作用する外力の水平成分を H_f 、垂直成分を V_f とする。測定断面A-Aに於る軸力、曲げモーメント及びせん断力をそれぞれ N_s 、 M_s 、 Q_s とすると外力の作用点Cは垂直方向及び水平方向の力の釣合から

$$H_f = Q_s \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$V_f = N_s \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

また0点の回りの曲げモーメントの釣合から

$$V_f l_x - H_f l_y - M_s = 0 \quad \dots\dots (3.3)$$

3.1、3.2式を上式に代入して

$$N_f l_x - Q_s l_y = M_s \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで $l_x = k l_y$ とおくと

$$N_s \cdot k l_y - Q_s l_y = M_s$$

$$l_y (N_s \cdot K - Q_s) = M_s$$

$$l_y = \frac{M_s}{N_s \cdot K - Q_s} \quad \dots\dots (3.5)$$

A-A断面の M_s 、 N_s 、 Q_s の3力を測定して3.5式により外力の作用位置と H_f 、 V_f を知ることができる。

ここで、 $l_x = 532.5$ 、 $l_y = 950$ と実測結果を代入すると

$$k = \frac{l_x}{l_y} = \frac{532.5}{950} = 0.5605$$

$$\therefore l_y = \frac{M_s}{0.565 \cdot N_s - Q_s}$$

せん断力 Q_s はリップ断面と歪ゲージの貼付位置を

図-3.4(a)、図-3.5 のようにとると

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{Q_s}{b \cdot h} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$Q_s = \frac{2}{3} b h \tau_{\max} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

さらに、 $\tau = r \cdot G$ 、 $r = 2\epsilon$ であるから

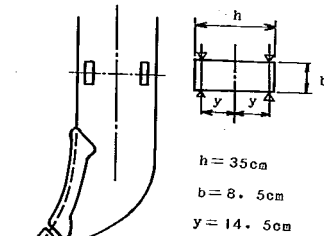
($G = \frac{E}{2(1+\nu)}$) 上式は

$$Q_s = \frac{2}{3} b h \times 2 \cdot \epsilon \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$Q = \frac{2}{3} \frac{b h E}{1+\nu} \cdot \epsilon$$

$$= \frac{2 \times 7.1 \times 32.5 \times 2.1 \times 10^6}{3(1+0.3)} \cdot \epsilon = 2.485 \times 10^6 \cdot \epsilon$$

図-3.5 測定リップ断面



であるから図-3.4(b)のような測定ブリッジを組めば、出力は

$$\ell = K S \cdot \epsilon \ell_i \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

となり、実際のひずみの4倍となる。従って測定ひずみを ϵ_M とすれば、

$$Q_s = 2.485 \times 10^6 \frac{\epsilon_M}{4} = 6.213 \times 10^6 \epsilon_M \text{ (Kg)} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

となる。次に曲げモーメント M_s を求めてみると、曲げモーメント M_s は次式により与えられる。

$$M_s = \frac{I}{y} \sigma = \frac{E I}{y} \cdot \epsilon$$

ここで $I = \frac{b h^3}{12}$ であるから

$$M_s = \frac{E b h^3}{12 y} \cdot \epsilon$$

$$= \frac{2.1 \times 10^6 \times 7.1 \times 32.5^3}{12 \times 14.25} \cdot \epsilon$$

$$= 2.993 \times 10^6 \epsilon \dots\dots (3.11)$$

従ってゲージブリッジは次の図-3.6

のようになるから、曲げひずみは

$$\epsilon = \frac{\epsilon_A - \epsilon'_B}{2}$$

として測定する。従ってその出力は

$$e = \frac{1}{2} K S \epsilon \ell_i \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

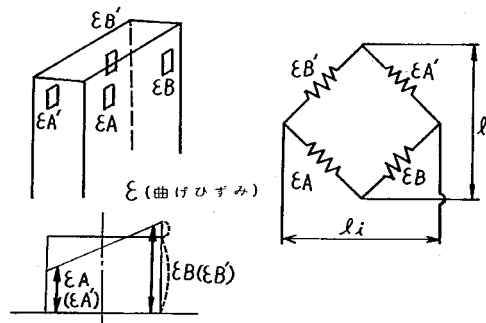


図-3.6 ゲージブリッジ

となり実際のひずみの2倍となる。従って測定ひずみを ϵ_M とすれば、

$$M_s = 2,993 \times 10^6 \cdot \frac{\epsilon_M}{2} = 1,496 \times 10^6 \cdot \epsilon_M \text{ (Kg-cm)} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

軸力(N_s)は、

$$N_s = \sigma A = \epsilon E A = \epsilon E b h = 2.1 \times 10^6 \times 7.1 \times 32.5 \cdot \epsilon = 484.6 \epsilon$$

となるから今軸ひずみを $\epsilon = \frac{\epsilon_A + \epsilon_B}{2}$ として測定するとゲージブリッジは図-3.7のようになり、その出力は

$$e = \frac{(1+\nu)}{2} K S \cdot \epsilon l_i \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

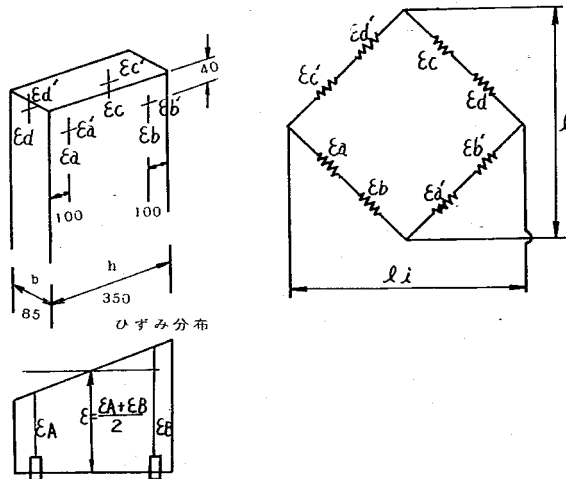


図-3.7 ゲージブリッジ

となる。そこで実際のひずみの $2(1+\nu)$ 倍とすれば、 $\nu=0.3$ として2.6倍となるから測定ひずみを ϵ_M とすると、

$$N_s = 484.6 \times 10^6 \times \frac{\epsilon_M}{2.6} = 184.4 \times 10^6 \epsilon_M \text{ (Kg)} \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

(7) リップシャंकにかかる作用力の較正、検定

実際の掘削実験を行なうに先立ち、次のような方法でストレインゲージの較正、検定を行なった。水平力の較正は図-3.8のように途中にロードセルを入れたワイヤロープを他のブルドーザによりけん引し、ロードセル荷重と歪ゲージ出力の較正を行なう。較正曲線は図-3.9(a)のようになる。次に鉛直力の較正はロードセルの代りに10 ton ロードメータを3個設置し、リップの先端から受ける荷重を、この3つのロードメータに均等配分できるようにし(図-3.8 参照)ロードメータ荷重読みと歪ゲージ出力の較正も行なう。較正曲線は図-3.9(b)と

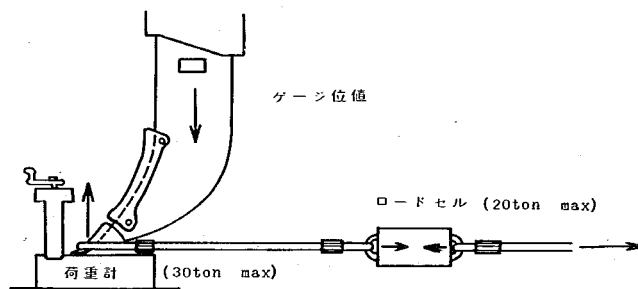


図-3.8 水平力、鉛直力の較正方法

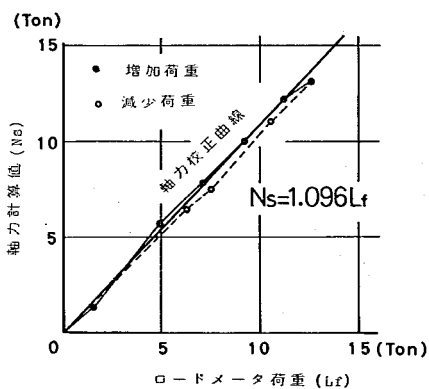


図-3.9 (a) 軸力校正曲線

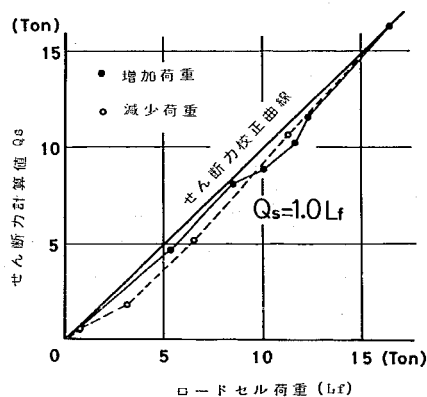


図-3.9 (b) せん断力校正曲線

なった。

(8) エンジン回転数

リッパドーザのサービスメータよりタコグラフに記録した。取付及び測定法を図-3.10に示す。

(9) リッパドーザ本体傾斜角とリッパシャック傾斜角の測定

ブルドーザ本体進行方向傾斜角とリッパシャック進行方向傾斜角の測定には、フロートペンジュラムを用いた。その記録方法を図-3.11に示す。

(10) リッパドーザの掘削速度の測定

掘削速度の測定には実験コースに沿って1m間隔で白線(石灰)を引き、実験機がその白線を通過するたびにパルスを発信させ、記録器に書かせた。

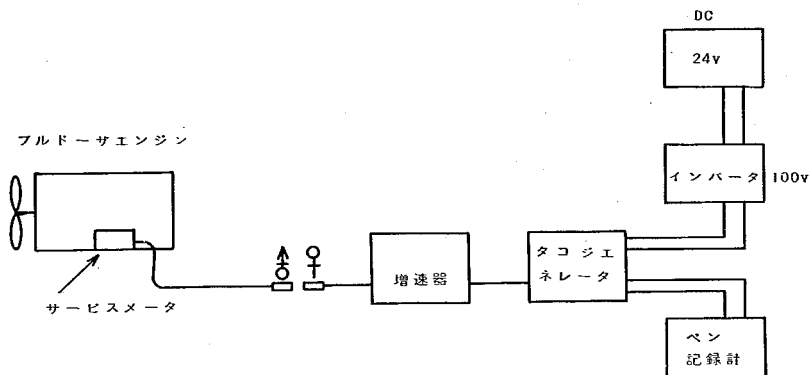


図-3.10 エンジン回転数測定方法

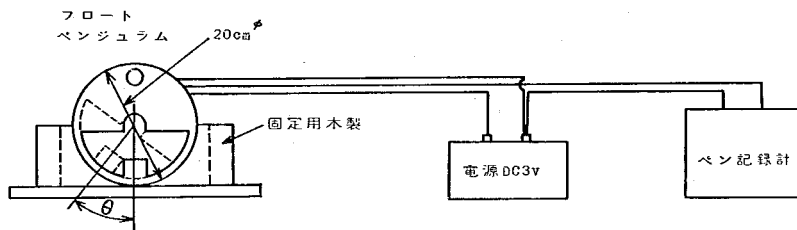


図-3.11 傾斜角の測定方法

(11) リッパシャंकのすくい角の測定

リッパシャंकすくい角は図-3.12

のような方法で測定した。

(12) リッパシャंकに生じる加速度の測定

掘削時のリッパシャंकに発生する振動数、加速度を計測するため、ストレインゲージを貼った真横に、20g 3軸形の加速度計を1個取付けた。

(13) リッパ掘削深さの測定

リッパの掘削深さについて図-

3.13 のような方法で測定した。以上、

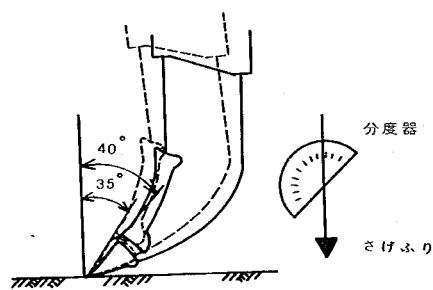


図-3.12 リッパすくい角の測定
(アジャスタブルリッパ)

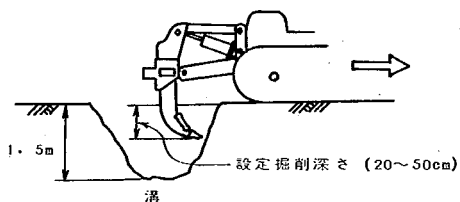


図-3.13 掘削深さの測定

リッパドーザについての測定項目をまとめて図-3.14に、測定記録方法を図-3.15に示す。

3.1.3 実験コースの設定

49年度の掘削実験は、千葉県夷隅郡大原町大原8513の1、千葉県荒木根ダム工事現場内で実施した。実験場の全景を写真-3.1に、ま

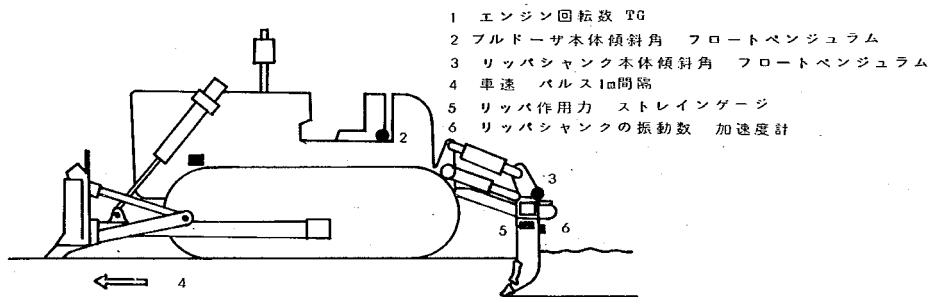


図-3.14 リッパの測定項目

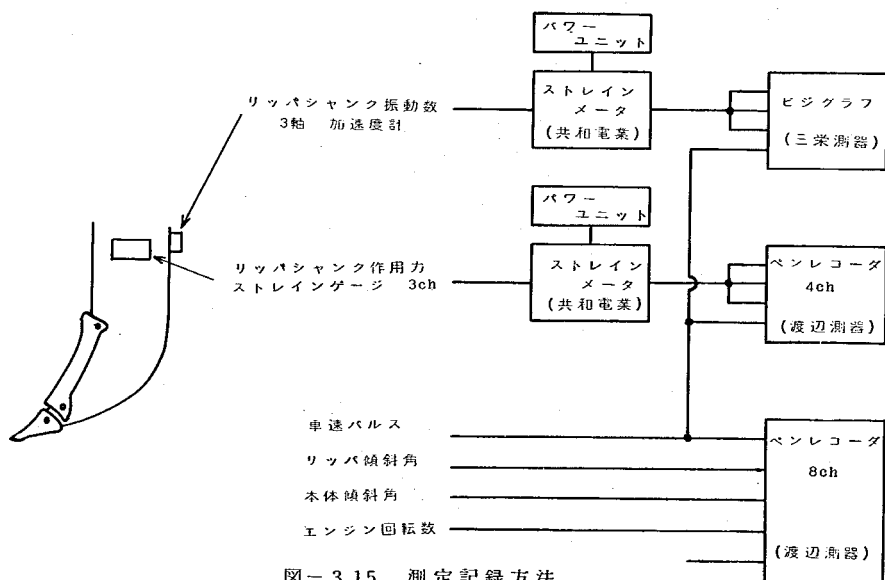


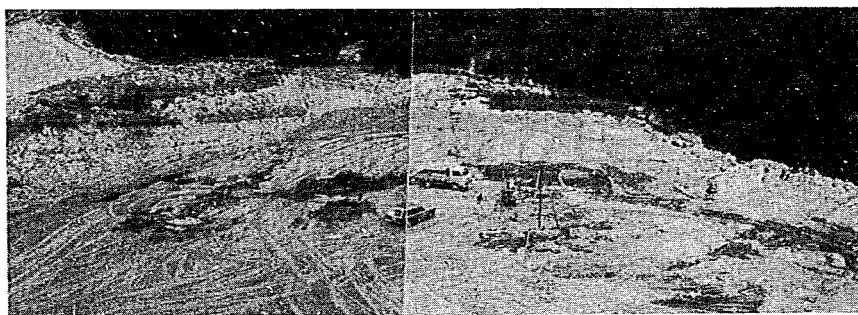
図-3.15 測定記録方法

た実験コースを写真－3.2に示す。実験コースは、幅7 m、全長15 mで、中心の溝が実験スタートの位置である。実験場の総面積は40 m×50 mであった。尚、実験コースの造成は実験に使用するブルドーザによって可能なかぎり平垣なものとしたが、若干の凹凸は認められた。

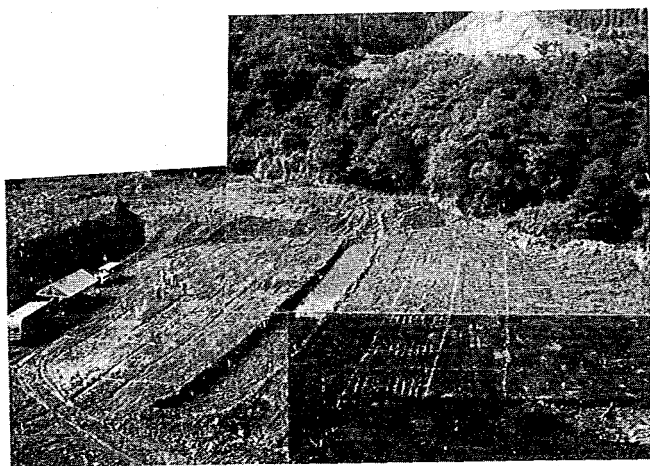
50年度の岩掘削実験は岡山県新見市大佐町下布瀬日本道路公団中国自動車縦貫道工事現場内に実施した。中国縦貫道での現場掘削実験場は、その工事の性格から十分な実験場の面積がとれず、極めて狭い範囲内となった。従ってコースは切土側斜面に沿って幅10 m、長さ30 mの敷地内で行ない1回の造成で6つの実験コースを作り、掘削実験後、又新しく同一場所で新鮮岩を露出させ、これを実験コースとした。実験コースを写真－3.3と図－3.16に示す。

3.1.4 実験工程

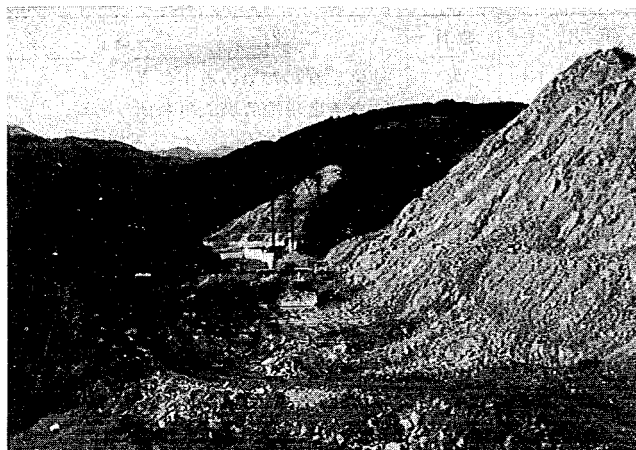
表－3.2の工程で軟岩（49年度）、中硬岩（50年度）の掘削実験を実施している。



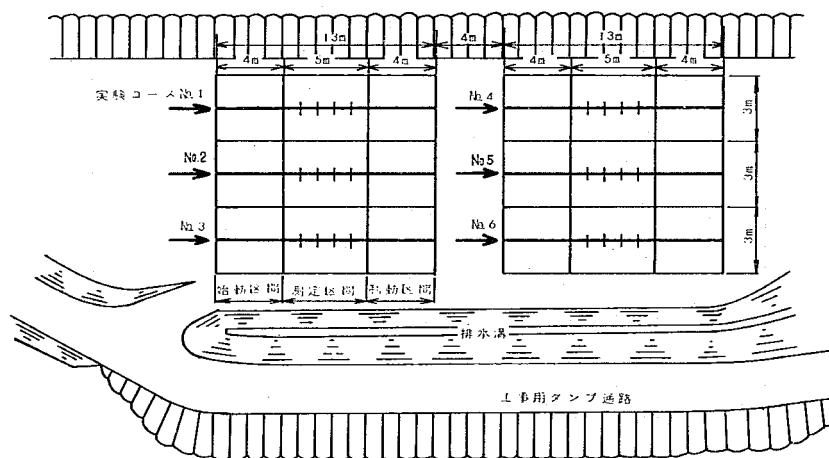
写真－3.1 荒木根実験場全景



写真－3.2 実験コースの造成



写真－3.3 下布瀬実験場



図－3.16 下布瀬実験コース

3.1.5 実験条件

軟岩掘削の実験条件を表－3.3 にまとめる。同じく中硬岩掘削の実験条件を表－3.4 にまとめる。

表-3.2 実験工程表

年 月 日	曜日	内 容
49. 8. 13	火	地盤調査のための表土はぎ
14	水	踏査（応用地質調査事務所）
15	木	ボーリング（ " ）
16	金	弾性波測定（ " ）
17	土	
⑮	日	
19	月	実験コースの造成
20	火	実機リッパドーザ・搬入、午後ゲージ貼り
21	水	計測器の調整、ゲージ校正作業
22	木	実 験
23	金	"
24	土	
⑮	日	実験コースの再造成
26	月	実 験
27	火	"
28	水	"
29	木	ゲージの検定作業
30	金	実機ブルドーザの搬出、後片づけ
50. 12. ⑦	日	
8	月	実験場の造成、計測テントの仮設、 地盤調査（水準測量）
9	火	弾性波調査、シュミットハンマ調査、 実機リッパドーザゲージ貼り
10	水	ゲージ校正作業
11	木	実験 資料収集（ビニール袋）
12	金	実験
13	土	実験 ゲージ検定
⑭	日	
15	月	後坪測量
16	火	"
17	水	コア採取作業
18	木	"
19	金	後片づけ

表-3.3 現場(泥岩)掘削実験条件

設定掘削深 すくい角	30 cm	40 cm	50 cm
35°			②④⑬
40°	⑤⑦⑧⑨	④⑬⑪	①⑥⑫⑬
45°			③⑮⑱
①～⑦ 順層掘削 ⑮⑱ オペレータの自由施工			
⑧～⑬ 逆層掘削			

表-3.4 現場(流紋岩)掘削実験条件

設定掘削深 すくい角	20 cm	40 cm	最大
35°	—	—	—
40°	③⑥	②⑤	①④
45°	—	—	—
リップ パ ビ ッ チ 40°	50 cm	—	⑨
	80 cm	—	⑩
	110 cm	—	⑦
	150 cm	—	⑧

3.2 室内実験

3.2.1 模型試験機(2次元切削試験機)の概要

本試験機は岩種による切削特性を室内実験で解明するために製作したものである。主たる検討内容は、岩種による定性的な掘削時の傾向から、適切な切削条件を見出すこと、カッタに振動等を加えた場合の切削効果を見出すことである。模型試験機の仕様を表-3.5に概要を写真-3.4に示す。この試験機は旋盤を改造したものでカッタは切削深さを調整できるように上下動が可能なカ

表-3.5 2次元切削試験機主要諸元

試料形状		600 mm × 400 mm × 200 mm
カッタ推力(水平力)		2800 Kg
切削深さ調整ストローク		200 mm
試料移動速度		0.99 cm/sec ~ 51.2 cm/sec
全長		3140 mm
全幅		1010 mm
全高		2090 mm
動力伝達機構	無段変速機	住友バイエル変速機5-BM マグネットブレーキ附属 3.7kW × 4P 300~1,200 rpm
	カップリング	ブリジストンタイヤ型カップリング(A-120K)
	減速機	東京精密ウォーム下段型減速機LA-6 出力3.7kW 減速比1:50
	スプロケット	RS100用単列 B型及びC型
	スプロケットチェーン	RS100用2列 B型
起振機	型式	FV-75 特殊電機工業(株)
	電圧	3相 200V
	出力	0.075 kW
	電流	0.5 A (50 Hz)
	振動数	0 ~ 2,900 cpm (50 Hz)
重量		7.5 Kg

ッタ取付台に固定し、試料を水平方向に動かすことによってカッタと接触させ切削を行なわせる。カッタに作用する切削力は水平力と鉛直力の2分力にそれぞれ分けられカッタ取付台を形成する平行四辺形リンクに組み込んだロードセル(容量5ton)により測定される。リンク機構はそれ自体にかなりの自重を持つものであるので図-3.17のように油圧ジャッキの使用によってカッタ及びカッタ取付台の自重分をキャンセル出来るように工夫している。

カッタの取付台の前後面には2台の起振機を取付け、上下方向のみの一方向振動をカッタに与えることのできる構造とした。また、この起振機は抵抗器により振動数を可変でき1台ずつ独立しての操作も可能である。

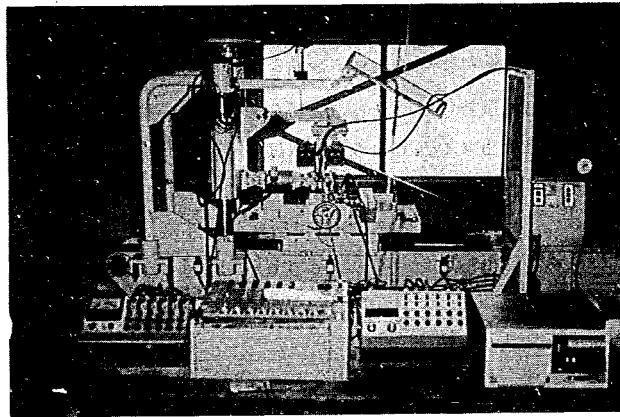


写真-3.4 2次元切削試験装置

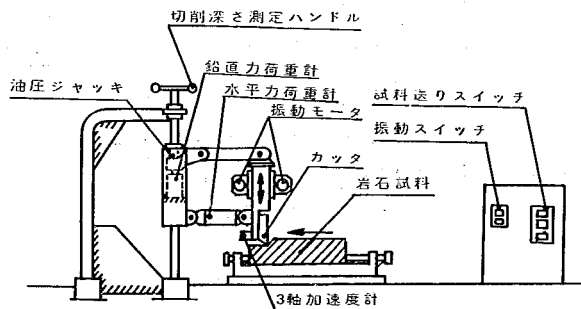


図-3.17 平行四辺形リンク図

I 機構の説明

a) 試料の取付け

試料は長さ×幅×厚さ(20~60 cm×10~20 cm×10~25 cm)の直方体に整形され試験機の試料台に固定される。

b) カッタの取付け

カッタはカッタシャンクの長さ×幅×厚さが4 cm×3 cm×6~10 cm以内のものであれば取付けが可能で、実験の用途によって簡単に交換が出来る。カッタはカッタ形式(ドラグ形、ロータリ形等)、すくい角、超鋼チップの材質の異ったもの、また各々のカッタはカッタのすくい角、にげ角の異った数種類のものを準備した。

c) 起振機によるカッタの加振

カッタに振動を加えることにより、切削時に必要な切削力の軽減、及び切削能力の向上を期待してカッタ取付台に2台の起振機を前述のように取付けた。そして振動が試験機の構造系に伝わらないようにカッタ台の受面には防振パッドを用いて、振動の伝達を防いでいる。さらに振動周波数は3相200V抵抗器の使用によって定格振動数の $\pm 5 \sim 10\%$ まで可変できるようにした。

d) 切削速度

切削速度は表-3.5に示すような減速機により、試料台に与えられるが、さらにスプロケットの交換により、最大5.12 cm/secまで与えることが可能である。しかし、この試験機的能力から切削速度を上げると、カッタ推力(試料送り力)が反比例して低下するので、適当な速度を選んで試験を行なう。今回の試験には、スプロケットは最低速度段として、無段変速機により、1、2.5、4.5 cm/secの3速を使用している。

e) 小さい切削力による切削

土や石膏などの軟かい試料に対する小さい推力の測定が可能なように、前述のような、カッタ及びカッタ取付台のキャンセル機構をもつ、図-3.17の油圧ジャッキにより、ジャッキを加圧して、このリンク系全体を水平に持ち上げ保持する。この状態で各測定器のバランスをとれば自重分以下の小さな応力も荷重としてロードセルに検出されることとなる。切削力による油圧シリンダーの変動は、アキュムレイタを油圧回路に入れることにより無視できる。

3.2.2 試験項目

試験にあたり測定した項目ならびに測定方法は図-3.18に示す通りで以下順をおって説明する。

1) 切削速度 V_m (mm/sec)

試料の移動時にリミットスイッチを定間隔で作動せせ発信するパルス記録計(ペン書きオ

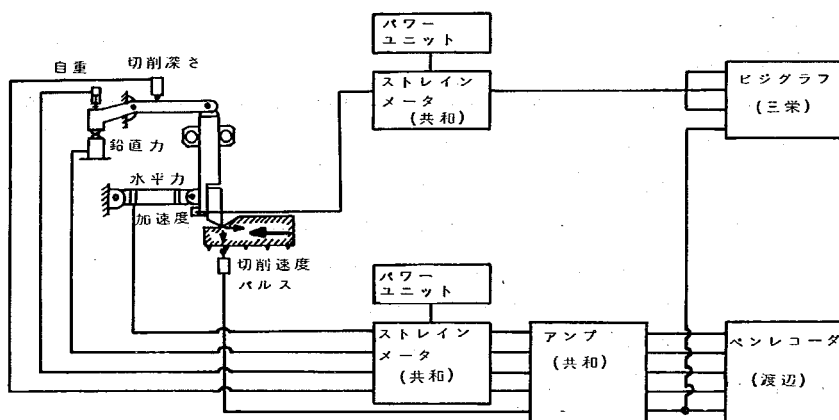


図-3.18 測定項目ならびに測定方法

シログラフ以下ペンレコーダ)に自記させて計測する。

2) 水平力 H_m (Kg)

切削によってカッタの水平方向に生じる力の分力をカッタ取付台後のアームに取付けたロードセルによって測定し、ペンレコーダに記録する。記録された値は、図-3.19 のようなリン

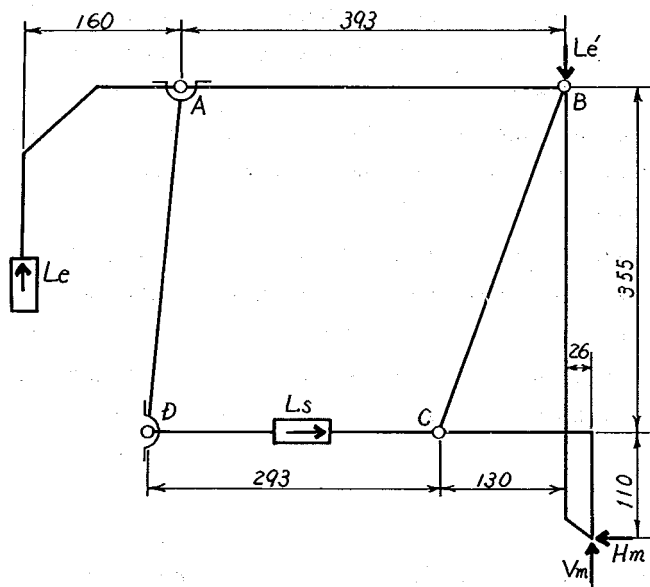


図-3.19 モーメント計算値

ク図より、以下の方法でモーメント計算を行ない、カッタ先端に働く力に換算する。

A点の回りのモーメントを考える。

$$393L_e' + 465H_m = 355L_s + 419W \quad \text{①}$$

B点の回りのモーメントは

$$465V_m = 355L_s + 26V_m \quad \text{②}$$

であるから①-②として

$$393L_e = 393V_m$$

$$L_e' = V_m \quad \text{③}$$

③を②に代入して

$$465H_m = 355L_s + 26L_e'$$

$$H_m = 0.76L_s + 0.0559L_e' \quad \text{④}$$

ここで L_e とは、実測される力 L_e とリンクの上部アーム比で示される。

$$160L_e = 393L_e'$$

$$L_e' = 0.4071L_e \quad \text{⑤}$$

従って⑤を③と④に代入して

$$V_m = 0.4071L_e$$

$$H_m = 0.763L_s + 0.0224L_e$$

で示されることになる。

ただし H_m : 水平力 L_s : リンクに組み込んだ荷重計の読み

V_m : 鉛直力 L_e : " "

3) 鉛直力 $W(Kg)$

切削により発生するカッタの鉛直方向の力の分力は、水平力と同様にリンク機構によってロードセルに伝えられ測定される。カッタ先端に働く力の換算方法は、上述のモーメント計算で同じように行なう。

4) 切削深さ $h_m(mm)$

図-3.18に示すような固定された台に置かれたポテンションメータによりリンクの上部アームの上下動を測定し、ペンレコーダに記録する。これと上部アームの支点ピンからカッタまでの水平距離の比例計算によってカッタ切削深さを求めている。さらに1回の切削試験が終了したのち、直接試料からデプスゲージとノギスによって岩石表面からの実切削深さ、切削幅を測定、記録している。

5) 加速度、振動数 $\alpha(g)$ 、 $N(vpm)$

起振機によってカッタに加えられた振動をカッタ真横に取付けた3軸加速度計により、X、Y、Z方向(試料の送り方向に向かい上下、前後、左右)方向を測定し、ストレインメータを

通じてビジグラフに記録する。

6) 切削断面積 A_m (mm²)

切削断面積は切削深さ h_m を切削幅 b_m より計算し、切削後の試料断面形状に近似させるため、切削幅 b_m の大きさがカット幅 b_c よりも $b_m < b_c$ の時は

$$A_m = \frac{1}{2} b_m h_m \quad \dots\dots\dots 3.16 \text{ (近似三角形断面)}$$

$b_m \geq b_c$ であれば

$$A = \frac{1}{2} (b_m + b_c) h_m \quad \dots\dots\dots 3.17 \text{ (近似平行四辺形断面)}$$

7) 切削馬力 P_s (P_s)

切削馬力は直接測定することが困難であるので切削時に発生する水平力 H_m と切削速度 V_m より次式で示した

$$P_s (P_s) = \frac{H_m V_m}{75 \times 1,000} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

3.2.3 水平力、鉛直力、検定方法

水平力、鉛直力は前項に述べる方法により測定した。この値の検定は次の方法により行なった。

1) 水平力の検定

図-3.20 の試料固定台に水平方向に反力を取って油圧ジャッキによりカットの切刃面に垂直に直圧力を徐々に加え、水平力測定用ロードセルの値を測定した。油圧ジャッキの荷重については、油圧ジャッキとカット面との間にプルーピングリングを入れて測定した。与えた荷重

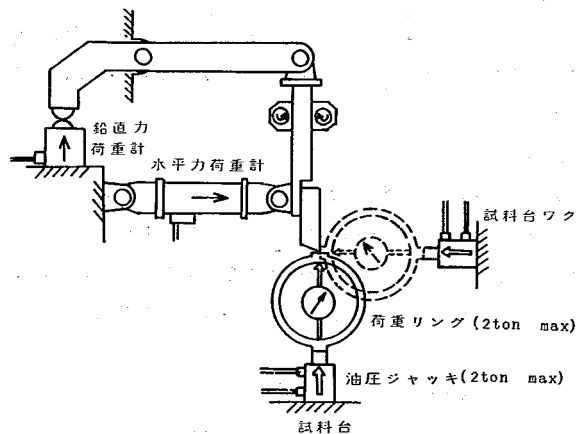


図-3.20 水平力、鉛直力の検定法 (室内)

と測定された荷重の関係を図-3.21(a)に示す。これから前項のモーメント計算結果による数値とほぼ等しい結果を得ることができる。

2) 鉛直力の検定

図-3.20の試料固定台の鉛直方向に反力を取り、油圧ジャッキを間に入れることによって水平力の検定方法と同様の方法で荷重検定を行なった。与えた荷重と鉛直力測定用のロードセルによって測定された荷重関係を図-3.21(b)に示す。これから前項のモーメント計算による

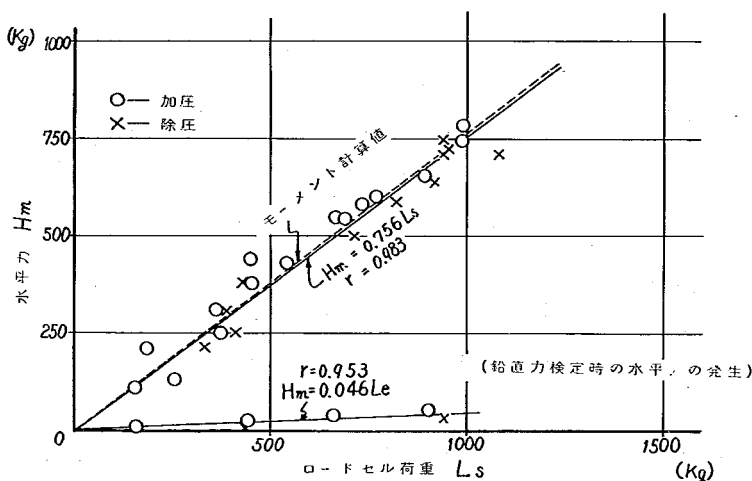


図-3.21(a) 荷重較正曲線(水平力)

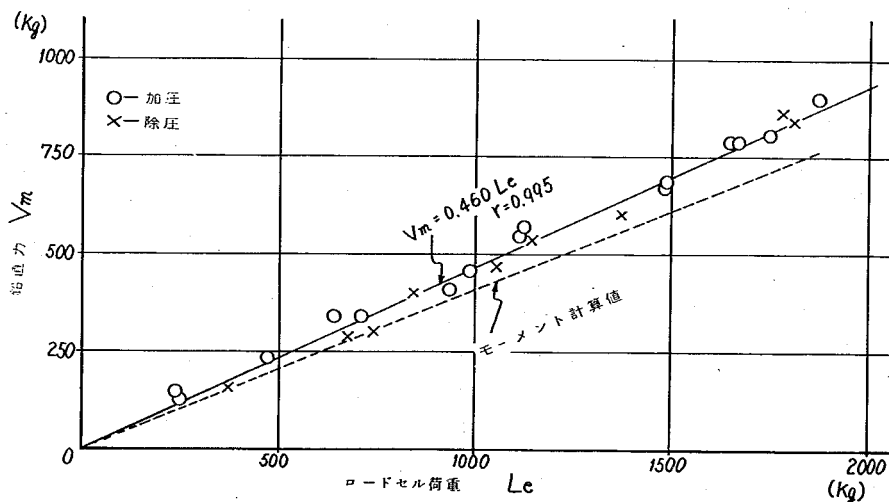


図-3.21(b) 荷重較正曲線(鉛直力)

方法が正しいことがいえる。

3.2.4 試験工程

試験は表-3.6のような工程で行なった。

表-3.6 2次元切削試験工程表

年月日	曜日	内 容
46.		岩石試料(花崗岩 砂岩 頁岩 大理石 凝灰岩)購入
46. 8. 12	木	砂岩、凝灰岩 試料の物理試験
46. 10. 27	水	大口径掘削機高倉山現場実験(パイト型、ローラ型カッタ)
~ 12. 16	木	
46. 12. 20	月	日立建(Kennametal bit)試験 モルタル試料
47. 2. 23	水	花崗岩、頁岩、石灰岩(大理石)試料の物理試験
~ 3. 3	金	
47. 2. 24	木	カッタ スクイ角度による切削能率への影響 試験(各種岩石)
47. 7. 21	金	カッタ摩耗幅(大口径掘削機に関連して)による切削能率の低下試験(モルタル試料)
~ 11. 7	火	
49. 11. 28	木	リップ型カッタによる各種岩石の切削試験
		カッタスクイ角+5° 試料 凝灰岩
49. 12. 20	金	" " 砂 岩
12. 21	土	" " モルタル
12. 14	土	" " 石 膏
50. 3. 14	金	リップ型 スクイ角-5° 試料 花崗岩
3. 14	金	" " 砂 岩
3. 25	火	" " 凝灰岩
5. 13	火	" " モルタル
50. 8. 20	水	2次元試験機改造工事(起振器の取付け, 各部補強)
~ 9. 10	水	
50. 9. 20	土	切削に振動を加え試験開始(一方向振動)
~ 51. 3. 31		

3.2.5 試験条件

岩切削においてその能力もしくは能率に影響を及ぼす要因として考えられるものは、被切削材として、岩の性質(強度、地層の状態、風化亀裂の度合等)カッタ側としては、形状、切削速度、切削深さ、切削力等であろう。実際の切削においては、これらの諸要因が互いに影響し合って切削を行っているわけであるが、今回の試験ではこれらの要因を単純化して究明するため、試験条件として次の表-3.7に示すようなものを選んでいく。

表-3.7 室内試験条件一覧

試料名	花 崗 岩					大 理 石					砂 岩					モ ル タ ル					凝 灰 岩				
カッタ 種類	バイト 形	リップ 形	ローラ 形			バイト 形	リップ 形	ローラ 形			バイト 形	リップ 形	ローラ 形			バイト 形	リップ 形	ローラ 形			バイト 形	リップ 形	ローラ 形		
カッタ スライ角	+5°	0°	-5°			+5°	0°	-5°			+5°	0°	-5°			+5°	0°	-5°			+5°	0°	-5°		
切削速度 (mm/sec)	10	25	40			10	25	40			10	25	40			10	25	40			10	25	40		
切削深さ (mm)	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
加振条件 (振動機 電圧) (Volt)	0	150	180	210		0	150	180	210		0	150	180	210		0	150	180	210		0	150	180	210	

3.2.6 試験手順

本試験に使用する岩石材料は写真-3.5に示す。供試体表面はカッタに対してレベルを保つように、予め滑らかな表面としておく。試験条件の見かけの切削深さは、この試料表面よりのカッタ先

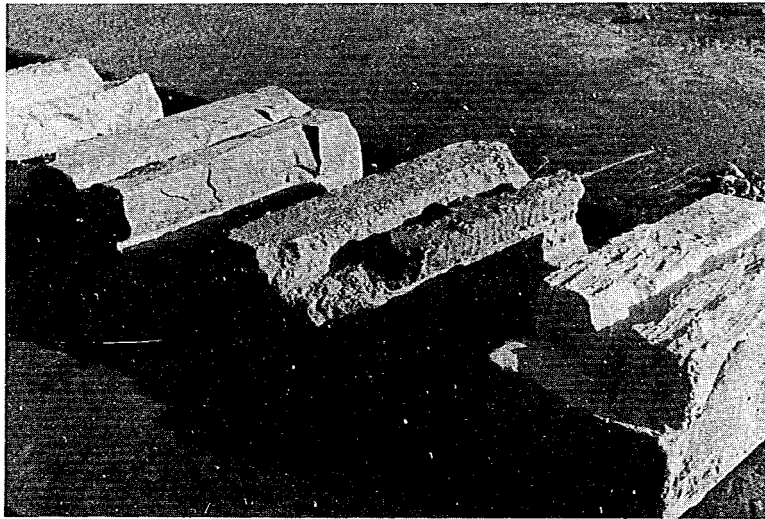


写真-3.5 実験に使用した岩石試料

端までの距離で表わす。試料にはカッタが岩に接触する際カッタに対する急激な応力の発生を防ぐために、切り欠きを作った。

試験は試料台に供試岩石を固定し、カッタ取付台のリンク機構のレベルを保つように油圧ジャッキを調整する。切削深さ、切削速度などの試験条件を与えた後に、電動機を起動して切削を行なわせる。試料の切削が終わった後カッタを引き上げて試料を元の位置までもどす。デプスゲージ、ノギ

スを用いて切削溝の深さと幅を切削区間を5等分して測定し、その平均値をそれぞれ切削深さ h_m 、切削幅 b_m とした。一方測定された切削力、切削振動数、切削速度等は試料切削区間の5点と同じように記録紙を5等分し各区间ごとの平均値をその値とした。

3.2.7 室内試験に用いられた岩石の供試体

供試体として岩石の種類による破壊の特徴（破断面の特徴）を調べるために次の7種類の岩石を準備した。

花崗岩（茨城県笠間産）、粘板岩（稲井産）、石灰岩、砂岩（千葉銚子産）、凝灰岩（栃木県大谷産）、モルタル、石膏

これまで岩石の破壊に対する各種岩石の破断特性のあらかたの性質は以下のように説明されている。

- 偏平に壊れやすい岩種として
結晶片岩、千枚岩、粘板岩、片麻岩、砂岩、頁岩等
- 角ばった形に壊れやすい岩種として
珪岩、チャート等
- 塊状に壊れやすい岩種として
大部分の火成岩、砂岩、石灰種、大理石等
- 偏平で細片に壊れやすいものとして
雲母、長石等

また、このような岩種による特性を調べるため岩石試験については参考資料Ⅱ3の項で述べるような試験方法によってそれぞれ各岩種について行なった。但し、せん断試験は実施していない。

4. 実 験 結 果

4.1 岩盤調査結果及び岩石試験結果（現場と室内）

4.1.1 岩盤調査結果（49.50年度）

1) 地表踏査結果

49年度荒木根実験場の地表踏査は、旧地山のカットによって取り残された調査地南端と両端に位置する露頭において、当調査地に分布する泥岩層の走向と傾斜の測定及び亀裂や節理の観察を行なった。また調査地の整地作業、溝の掘削作業の際に、地表面および溝の測面の観察を行ない、泥岩層の方向と傾斜を測定した。以上の地表踏査結果をブロックダイヤグラムとして附図-2～5に示す。調査結果によれば周辺の泥岩層はN60°Eの方向で分布しており、調査地北西部に向かって約12°傾斜している。また、節理は北東約20°の方向で発達し、調査地南東～東部へ約60°～70°程度傾斜している。調査地北西部と南東部には、規模の小さな断層が確認され、亀裂の状況、地層の分布について巻末の写真-1～3に示す。

50年度下布瀬実験場の調査結果では、実験場内の地質構造は実験場の北東部切土斜面および南西部の切土斜面より判断して、実験コースとした場所はほぼコースに対して平行層となっていると推察されるが、実験場の地盤層理はN50°Eの方向に約25°傾斜している。さらにこの流紋岩層の節理について観察すると実験場内の北端と東端に位置する露頭からN60°Wの方向で分布していることがわかった。また、露頭部の観察では表層部はこの個所が1年間切土のまま放置された状態であったので、風化の影響が強くみられ、玉ねぎ状風化やクラック内の粘土鉱物などによる茶褐色化を呈して岩そのものも脆弱であった。実験コース上の地盤については局部的に風化層と地山層とが表われ、小断層がよく発達していた。

2) 弾性波探査結果

49年度荒木根実験場での結果からは弾性波速度 V_1 と V_2 の値は、0.5Km/sec程度の範囲内ではらついている。このばらつきの要因として主なものは、ボーリング調査によるコアの観察結果にも現われているように、亀裂の発達の程度の局所的な相違によるものであるといえる。附図-6に低速度層の調査地内での第1速度層の等深線図を示す。この結果によれば低速度層は全体に調査地東部に向かい傾斜しており、測線2.3の附近で層厚3m以上を示し最も厚く分布している。

測線1から測線6までの走時曲線と、これより推定される速度断面を附図-7.1～7.6に示す。これによれば往復走時により当調査地内に分布する低速度の表層部は測線1.4.5の両端でその分布深度に相違が認められ、実験場東部に向かい傾斜している。表層速度 V_1 は1.0～1.2 Km/sec、第2層速は1.9～1.8 Km/secであり、またその不連続面は測線部東端部でGL-1.1～

-1.4 m である。2.3 測線では、 $V_1 = 1.0 \sim 1.4 \text{ Km/sec}$ であり V_2 が $2 \sim 2.2 \text{ Km/sec}$ と比較的硬質の弾性波速度の速い層が地層下位に分布している。6 測線では、表層は $GL - 1.4 \text{ m}$ で $V_1 = 0.8 \text{ Km/sec}$ 、 $V_2 = 1.7 \text{ Km/sec}$ であった。従って現在の実験場に分布する低速度を示す表層が測線の東端へ向かって全体に傾斜している事の裏付となる。

50 年度の下布瀬実験場の弾性波結果

今回の調査には、従来の地表弾性波探査の他にリッパ実験終了後地表を掘り下げて整地した上での弾性波探査を加えて行なった。この時の弾性波による速度線図を附図-8.1~8.6、附図-9.1~9.4 に示す。

地表の調査結果によれば、 V_1 と V_2 は 2 個の大きな値を除けばいずれも 0.6 Km/sec 程度の範囲内であらっている。附図-10.1 に弾性波結果からの地盤推定を示す。バラツキの要因として主なもの、地表踏査結果にも表われているが、風化や亀裂の発達の程度の局所的な相違によるものであらうと思われる。低速度層の層厚は、全体的には 0.5 m 以下であるが測線 2 の附近が 1 m 以上を示し最も厚く分布している。高速度層については V_1 と V_2 の差が小さい事や地表踏査結果より判断して、亀裂や風化の影響の少ない比較的硬質の層であらうと思われる。

ブルドーザで地表を掘り下げた新地盤での弾性波探査結果によれば、低速度層は速度・層厚とも各測線で同程度の値を示している。これを附図-10.2 に示す。この傾向は掘削によって風化や亀裂の程度の不均一な部分が少なくなった反面、新たなリッピング作業によって生じたクラックによるためとも思われる。高速度層は、地表の調査結果で大きな値 ($3.3 \sim 4.0 \text{ Km/sec}$) を示した附近である測線 2 の V_2 で 2.9 Km/sec 、他の測線 1.3.4 の V_2 で $2.0 \sim 2.4 \text{ Km/sec}$ とほぼ類似した値を呈している。また地表調査の測線 2.3 の附近では新地盤の測線 2 附近が同じ高速度層よりもこの傾向が強い層であらうと思われる。

3) ボーリング調査結果

49 年度荒木根実験場のボーリング柱状図を、ボーリング採取箇所とともに附図-11、附図-12.1~12.7 に示す。これから推察すると、実験場の表層部には亀裂の発達した暗灰色の泥岩が一様に分布している。 $GL - 2 \text{ m}$ までの調査結果であるから、その分布深度の限界は不明であるが、コアの状況からの観察によれば岩質の地域的な相違が見られた。この場合の岩質とは、亀裂やひび割れの程度、荷重や応力に対する割れやすさを言い、岩種や組織によるものではない。柱状図に示すコア採取率とは、 1.0 m のボーリング掘進長に対する採取されたコアの累計長であり、R.Q.D (Rock Quality Designation = 岩質評価) とは、採取コア内の 10 cm 以上のコア累計長をいい、それぞれ%によって値が示される。この表示法は岩盤に含まれる亀裂や節理の程度を表現し、岩質を比較判定するひとつの目安となる値である。すなわち、ボーリングが行なわれている時には、コアチューブ先端付近、つまり、岩からコアへと入る部分には応力の集中現象が生じ、コアの根本は非常に折れやすい状態にあるといえる。そこで潜在

的な亀裂があったり、一様に弱い岩石であればそこで破断してしまうことになる。したがって R.Q.D は節理、その他亀裂による割れやすさばかりでなく、岩盤の強度的な割れやすさも反映することとなる。一般に R.Q.D は 50~75% 程度を普通として 50% 以下を弱岩、75% 以上を健岩としている。

ボーリング柱状図によると、 μ 2.4.5 地点でコア採取率と R.Q.D が非常に低く、コアの状況観察からも亀裂の多い事が確認された。しかし、 μ 1.3.6.7 の 4 地点で採取したコアは、これと対照的にコア採取率と R.Q.D とが高く、比較的きれいな測面と端面を持っている。R.Q.D による岩質判定では、 μ 1、6 が健岩ないし普通岩、その他の地点は弱岩となっている。50 年度下布瀬実験場のボーリング結果を採取位置とともに附図-13、附図-14 に示す。

4) 岩石試験結果

49、50 年度の現場採取岩石試験

結果を表-4.1、表-4.2 に示す。表-4.1 より 49 年度実験結果の方は比較的ばらつきが少ないが 50 年度現場採取岩石は非常にばらついたものとなっている。この原因として考えられることは 50 年度の実験場は極めて狭い範囲であるにもかかわらず、地層の状態に地域的なものがあり、地山層と風化層が不規則で複雑であったこと、またボーリングの際

表-4.1 現場岩石試験結果 (泥岩)

試験名	試験結果
比重	1.75~1.94 g/cm^3
乾燥密度	1.29~1.61 g/cm^3
吸水量	36%
含水比	20~36%
一軸圧縮強度	101 Kg/cm^2 ($\sigma = 19 Kg/cm^2)$
コア採取率	80% ($\sigma = 17%$)
R.Q.D	39% ($\sigma = 27%$)

に簡易形ボーリン

表-4.2 現場岩石試験結果

グ機械を使用したため、コアの採取時点で十分満足いく試料が得られなかったことなどがあげられる。

試験方法		試験方法	
コア採取率	77.3%	ショア硬度	32.1 Hs
R.R.D	55.3%	シュミットハンマ	34.5
比重	2.6~2.7	プロトジャコフ	11.7
含水比	1.5~2.5%	静弾性係数	$9.0 \times 10^3 Kg/cm^2$
一軸圧縮強度	300~550 Kg/cm^2	弾性波速度(Vp)	1.8~3.5 Km/sec
圧裂強度	30~50 Kg/cm^2		

4.1.2 室内試験用試

料の試験結果

参考文献 項目 II 3 によって各種岩石試験によって実施した結果を表-4.3 に示す。

表 - 4. 3 室内岩石試験結果

試験名 試料名	比重	一軸圧縮 σ_c (Kg/cm^2)	圧 裂 σ_t (Kg/cm^2)	ショア硬度 H_s	ページ衝撃	シュミ トハンマ	プロトジ ャコノフ	剪断強度 τ (Kg/cm^2)	弾性波速度 V_p (km/sec)
凝 灰 岩	1.65	56.89	13.53	12.62		30.05	1.98	25.92	1.5
モルタル	2.11	283.9	33.86	1808		32.15	7.41	61.17	3.0
砂 岩	2.28	466.7	31.57	24.60		47.18	4.73	67.98	2.2
石 灰 岩 (大理石)	2.74	437.2	43.22	16.22		50.25	9.64	81.95	3.8
流 紋 岩	2.65	393.8	51.91	33.77		34.53	11.77	91.94	3.5
粘 板 岩	2.74	1,223.9	119.49	55.33		63.28	33.67	227.39	5.6
花 崗 岩	2.64	1,171.3	79.80	66.17		64.43	15.45	171.38	4.9

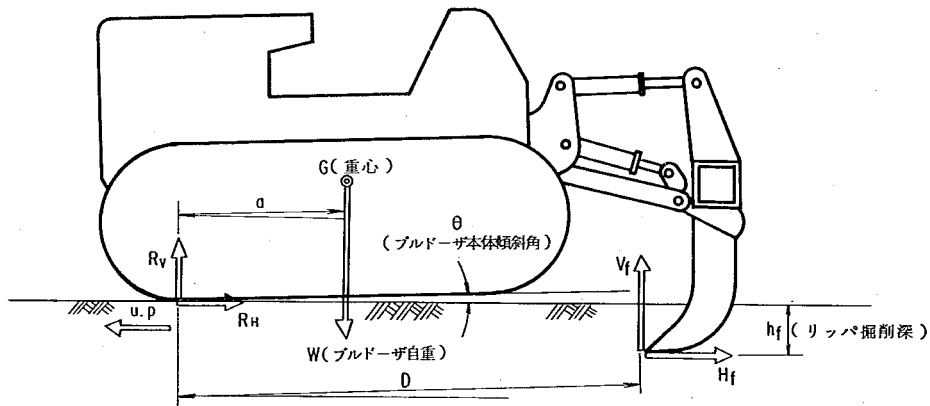
4. 2 掘削実験データ

現場実験による掘削実験結果と室内試験による切削試験結果を附表 - 1、附表 - 2、附表 - 3 にまとめデータ集とする。

4. 3 リッパ刃先にかかる外力

4. 3. 1 静力学的計算による推定値との比較

一般にリッパ掘削を行なっているブルドーザに作用する力については、図 - 4. 1 に示すように自重 W 、リッパ鉛直力 V_f 、水平力 H_f 、地面から本体が受ける力 R_v 、 R_H との間に次の関係が成立する。



R_v : 前部アイドラが受ける鉛直力 R_H : 前部アイドラが受ける水平力
 V_f : リッパ鉛直方向作用力 H_f : リッパ水平方向作用力
 μ : 粘着係数

図 - 4. 1 ブルドーザにかかる外力

$$W = V_f + R_v \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\mu R_v = H_f + R_n \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$W a \cos \theta = V_f b \cos \theta + H_f (h_f - b \sin \theta) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで、 μ : 粘着係数 a : ブルドーザ前アイドラと重心間距離 (cm)

b : 前アイドラからリッパ刃先までの距離 (cm) h_f : リッパ掘削深さ (cm)

$R_n \neq 0$ 、とすると 4.1 ~ 4.3 式より V_f 、 V_n を求めると次のようになる。

$$V_f = \frac{W(\mu h_f - \mu b \sin \theta - a \cos \theta)}{\mu h_f - \mu b \sin \theta - b \cos \theta} \div \frac{W(\mu h_f - a - \mu b \theta)}{\mu h_f - b - \mu b \theta} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$H_f = \frac{\mu W(a - b) \cos \theta}{\mu h_f - \mu b \sin \theta - b \cos \theta} \div \frac{\mu W(a - b)}{\mu h_f - b - \mu b \theta} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

となる。

ここで θ の小さい範囲では、

表 - 4. 4

$$dV_f/d\theta > 0 \quad dH_f/d\theta < 0$$

(unit TON)

である。

とすると V_f は増加関数、 H_f は減少関数となる。

故に、 $\theta = 0$ で水平力は最大値

$$H_{f_{max}} = \frac{\mu W(a - b)}{\mu h_f - b} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

となる。

そこで、今、4.6 式で $\mu = 0.8$ と仮定して実機ブルドーザの諸元を入

計算による最大水平力・鉛直力					
機 種		小松 D150A		キャタピラー—三菱 D8H	
力の種別		水平力 (H _f)	鉛直力 (V _f)	水平力 (H _f)	鉛直力 (V _f)
最 大 値		30.29	13.78	26.32	12.04
掘 削 深 さ (h _f)	0.1 m	22.67	9.52	19.66	8.32
	0.3 m	23.47	8.52	20.35	7.46
	0.5 m	24.33	7.45	21.10	6.53
	0.6 m	24.78	6.89	21.49	6.04
	0.7 m	25.25	6.30	21.89	5.53

れて計算した結果を実験に用いた 2 機種について示すと表 4.4 の通りになる。

一方、49、50 年度に行なったリッパ刃先にかかる作用力を水平分力と鉛直分力とに分けて測定記録した結果の一例を図 - 4.2 に示す。

図より鉛直力、水平力の両成分とも高周波成分を含み脈動していることがわかる。また、鉛直力、水平力のそれぞれのピーク値は一致しており、瞬間的に大きな作用力を先じている部分は、掘削速度が小さくなっていることなどがわかる。

したがってこの場合の岩掘削現象は後に述べる (16.11) 亀裂形の切削であり、リッパによる岩の掘削が間歇的に行なわれていることを示している。

実機によって計測された水平力、鉛直力の関係を図 - 4.3 に示す。図に示すように最大水平力は表 - 4.4 の静力学的に計算出来る最大水平力を超す値は、流紋岩の場合に少しみられるが殆んど発生していない。一方、最大鉛直力については、泥岩掘削時に瞬間的ではあるが約 17 ton、流紋岩掘

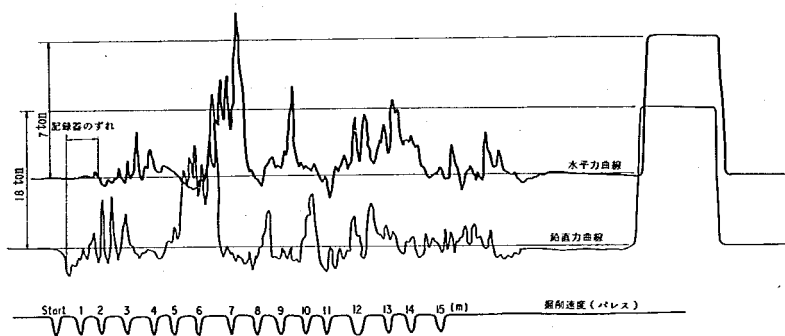


図-4.2 リップパに働く作用力の実測結果の一例

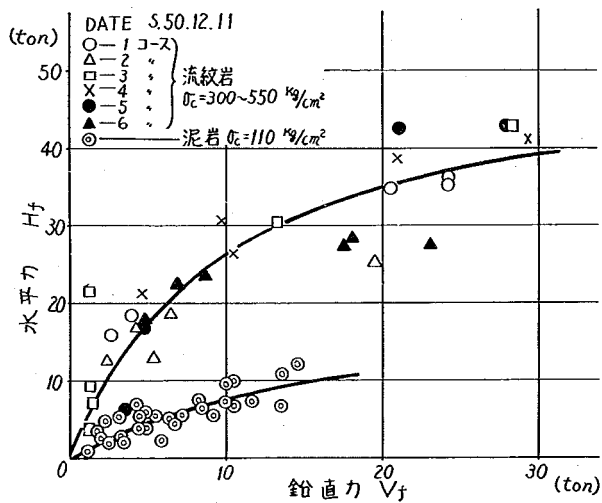


図-4.3 実機リップパの水平力と鉛直力の関係(現場)

削時には、40 tonを超える最大鉛直力が測定され、計算による最大能力を大幅に上回っている。これは、前にも述べたようにリップドーザによる岩掘削が動的なものであり、岩破碎時の慣性力が瞬間的に作用して衝撃力となるためと考えられる。すなわち、リップ刃先にかかる外力は、水平力に関してはリップドーザの能力より静的なバランスを考慮した計算により求めた値を超えることは少ないが、鉛直力は機体の上下方向の振動が加わるため、計算値を大幅に超えた値を岩石に与えて掘削を行なっているものと考えられる。

4.3.2 リップ作用力に影響を及ぼす諸要因

(1) 掘削深さ

リッピングに要する水平力や鉛直力は掘削深さが深くなる程、対象とする岩石が硬くなる程大きな値を必要とすることは容易に想像するが、それらの定量的な数値については、これまで必ずしも明らかにされて来っていない。

そこで、現場実験により求めた水平力、鉛直力と掘削深さの関係を図-4.4、4.5に示してみると、図-4.4より水平力については掘削深さが増す程、岩盤が硬くなる程、水平力が増加する傾向になることがわかる。流紋岩層の場合には、実験コースによって大幅な風化や亀裂の発達程度の違いがあるため、データにバラツキが生じているものと考えられる。

また、図-4.5は泥岩層について鉛直力と掘削深さの関係を示したものである。掘削深さ40

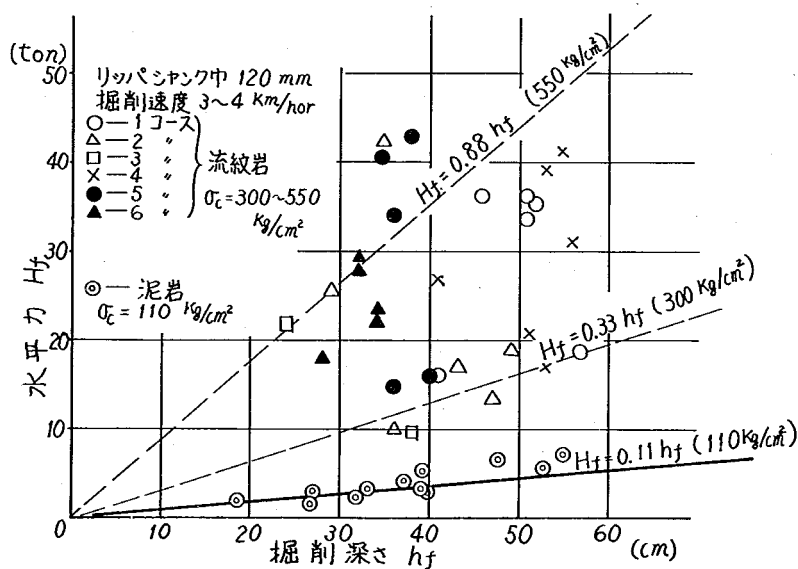


図-4.4 実機リップの水平力と掘削深さの関係(現場)

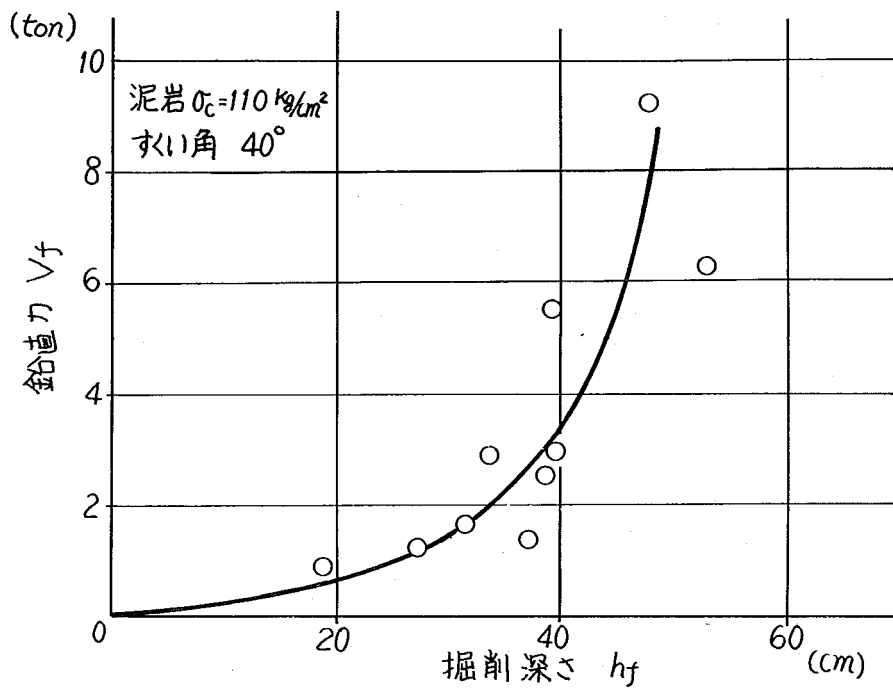


図-4.5 実機リッパの鉛直力と掘削深さ（現場）

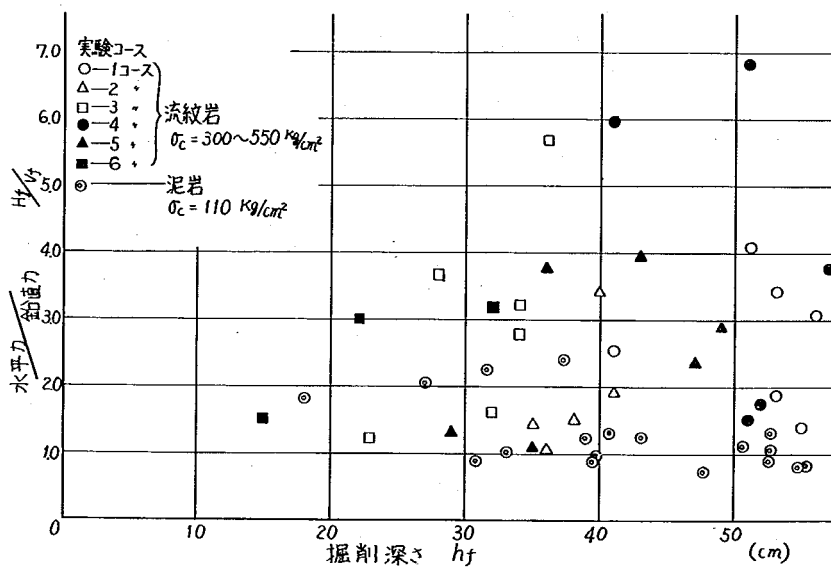


図-4.6 掘削深さによる水平力と鉛直力の関係（現場）

cmを境として急激に鉛直力が増大し、効率的な掘削を行なうための限界となる深さがこの辺にあることを示しているものと思われる。そこで、実際の掘削時には水平力、鉛直力の両成分がどのようにカッタ刃先に作用しているのか、あるいは、岩破碎にはどちらの力が効果的であるのかを調べるため、掘削深さと水平力、鉛直力の比の関係を図示すると図-4.6のようになる。

すなわち、泥岩のように比較的軟かい岩石では掘削深さが増しても水平力と鉛直力の絶対値の大きさは、ほぼ同じと考えられるが、流紋岩のようにやや硬くなってくると、その傾向は掘削深さが増すほど、鉛直力に比べて水平力の増加傾向が著しくなることがわかる。こうした傾向を示す理由としては、次のような事が考えられよう。すなわち、岩石にリップが貫入した時、岩盤内に発生する応力は破壊現象が図-4.7に模式を示すようなせん断破壊と考えるならば、破壊は主応力線の方に働く。この場合、岩が硬くなる程、そのせん断角が小さくなるため主応力線方向の水平方向分力が大きくなり、水平力の増大の傾向が著しくなるものと推察される。

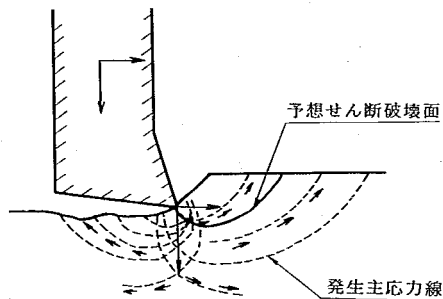


図-4.7 主応力線とせん断方向

しかしながら、実際の現場における岩盤には亀裂があり、これが本実験の泥岩の場合のように岩層の層理、節理とともに方向性を有している場合が多い。このような場合には主応力線が発達した亀裂面に当たれば、応力はそこで開放され、掘削に必要とされる力は大幅に減少されることになる。

本実験の泥岩の場合には、こうした理由も含めて水平成分と鉛直力成分がほぼ等しい結果になったものと考えられる。

以上のように、硬い岩に対しては水平力が鉛直力より大きくなり、この力が岩の破壊に有効であるとすれば、リップによる岩掘削に対しては水平力に着目して以下の考察を行なえばよいことになる。

そこで、新鮮な岩を対象とした室内試験により切削深さと水平力の関係をみたのが図-4.8である。図は切削速度25mm/sec、カッタのすくい角 $+5^{\circ}$ と一定にして岩石試料の種類だけを変えて行なったものである。図によると、水平力は切削深さに一次の直線関係で比例増加している。そして、ここで得られる回帰直線の勾配係数を岩石の強度差によるものと考えて、岩石強度に一軸圧縮強度を選び、両者の間に相関を求めてみる。ここで次元を合わせるために水平力としてはカッタ刃物幅当たりの水平力をとった。その結果は図-4.9に示すように非常に高い相関のあることが判明した。この回帰式は

$$H_m / h_m \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 1.05 \times 10^{-1} \sigma_{cm} \text{ (Kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (4.7)$$

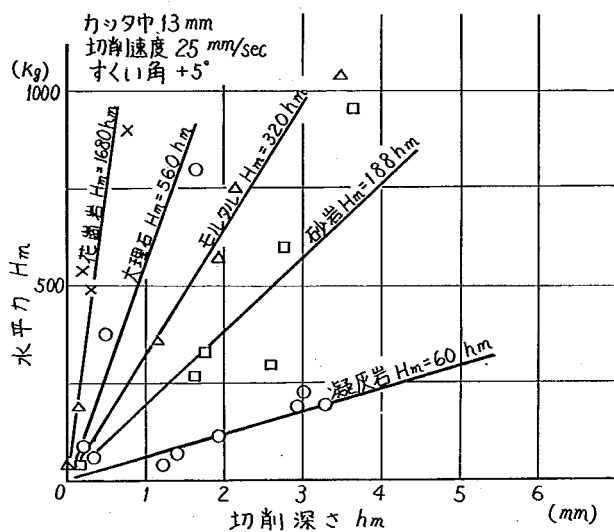


図-4.8 岩種による水平力の発生（室内）

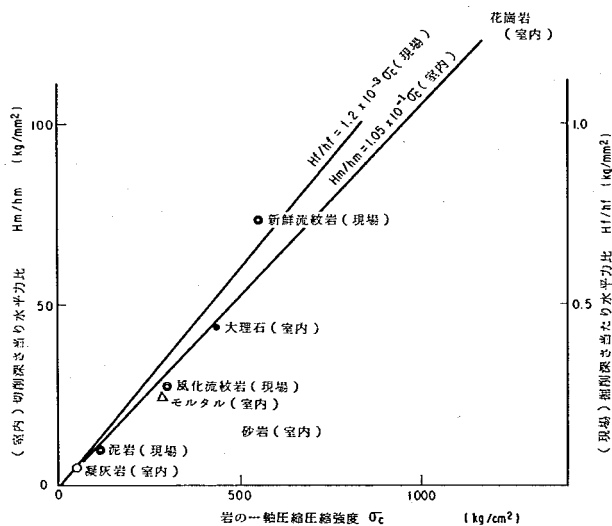


図-4.9 一軸圧縮強度と水平力比

と表わされる。

また、同様に図-4.4の現場実験結果より得られた水平力をリップ幅当たりの水平力に換算して同様に計算すると次式のようになる。

$$H_f/h_f \text{ (Kg/cm)} = 1.2 \times 10^{-3} \sigma_{cf} \text{ (Kg/cm}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

従って、今、現場と室内の両式を比較してみるとカッタ刃幅当たりの水平力は、室内で均一岩石を切削した場合が現場での亀裂を十分に含んだ岩盤を掘削した場合の約80~90倍となることが判明した。この差の生じる理由としては、カッタの形状効果、施工速度差、岩盤の状態の相違等が考えられるが、これらについては、今後の調査に待ちたい。

(2) 掘削速度

金属切削における切削速度の影響は速度が早くなるとせん断ひずみが小さくなり、せん断角が大きくなる。逆に切削速度が遅い場合にはせん断ひずみが大きくなって、せん断角が小さくなることはよく知られていることである。ここで、せん断角が大きくなるということは、切粉の金属表面からの剝離が容易となり、流水形の切粉に近づくことを意味する。そこで、岩掘削における掘削速度の影響について検討してみることにする。

現場での掘削速度と水平力の関係を図-4.10に示す。リップドーザの掘削速度は1速のみで実験を行なったために速度範囲が狭く明確なものとは得られていない。ここで、水平力は掘削深

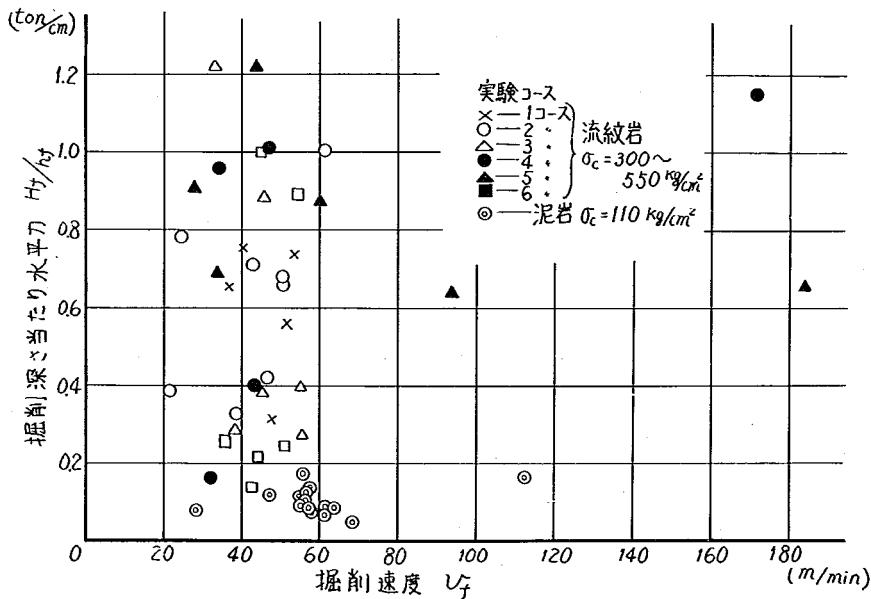


図-4.10 掘削速度による水平力への影響(現場)

さによって荷重が変化するため掘削深さ当たりの水平力 (H_f/h_f) で整理した。図より、水平力は掘削速度差によって影響を受けていないことがわかる。

一方、ブルドーザの車速とけん引力との関係を見ると図-4.11に示すように両者の間には反比例的な関係にあり、車速を上げて作業を行なう時は、けん引力は小さく、車速を低速度にして作業を行なう時には大きなけん引力が得られることが出来る。従って、作業能力を上げるため掘削速度を高めて作業を行なった場合、岩盤が硬い場合には破壊に必要な水平力も増加するため所要けん引力が不足することになる。従って、実作業においては硬い岩の場合には低速度で重掘削を行なった方がより効果的であると云えよう。

また、これらの関係を室内試験によって調べてみると図-4.12のようになり、現場掘削実験と同様に速度差による水平力への影響は認められないことが判明した。

切削速度による切削力への影響は、これまでの文献によっても関与率が低いとされており、今回の試験結果によっても同様の傾向を示すことが確かめられたことになる。

(3) すくい角

掘削の際のリップのすくい角（以下すくい角と呼ぶ）は、掘削力や岩の破断に大きく関与するものと思われる。49年度に行なわれた現場掘削実験では、リップのタイプとしてすくい角を可変できるアジャスタブルリップを使用したので以下にすくい角によるリップ作用力への影響について述べる。なお、50年度に行なわれた掘削実験ではリップタイプがすくい角の可変形でなかったため調査は行っていない。

図-4.13、4.14にすくい角を変えた時の掘削深さと水平力、鉛直力との関係を示す。両図より、すくい角を大きくとった方が力の発生は低く抑えられることがわかる。しかし、あまりすくい角を大きくするとカッタの強度的な問題が生じ、現在リップドーザの固定形すくい角は平行タイプ、ヒンジタイプのリップには、大体 $40^\circ \sim 45^\circ$ 前後のすくい角が標準とされている。

一方、室内試験によってもすくい角の関係を調べてみると、図-4.15のようになる。

ここで、室内試験機によって使用される岩石試料は全て新鮮な岩石であり、従って、亀裂、風化等はほとんどないと云ってよい。図からすくい角がプラス 5° のカッタの方がマイナス 5° のカッタよりも同一切削深さにおける水平力の発生が低い。そこで、現場実験と室内試験の結果より、これらの関係は岩盤の状態等によってもそれほど左右されないことが判明した。また、これら一連のすくい角と岩石の切削性については、米国の Gray 等によっても研究されており、Gray によれば両者の間には次の図-4.16のような関係にあることが示されている。

* 参考文献 2)

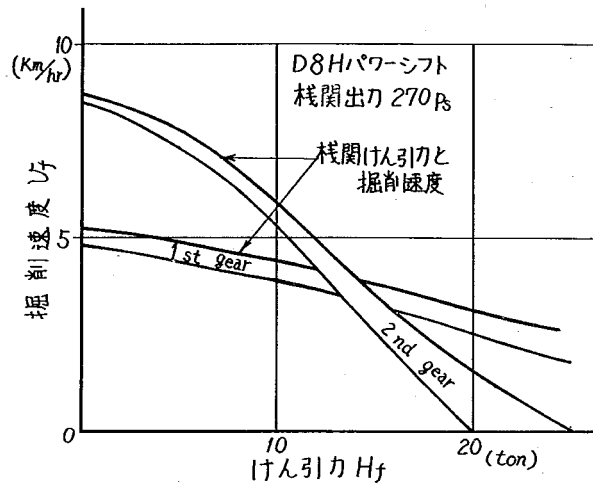


図-4.11 実機リッパドーザの車速とけん引力の関係

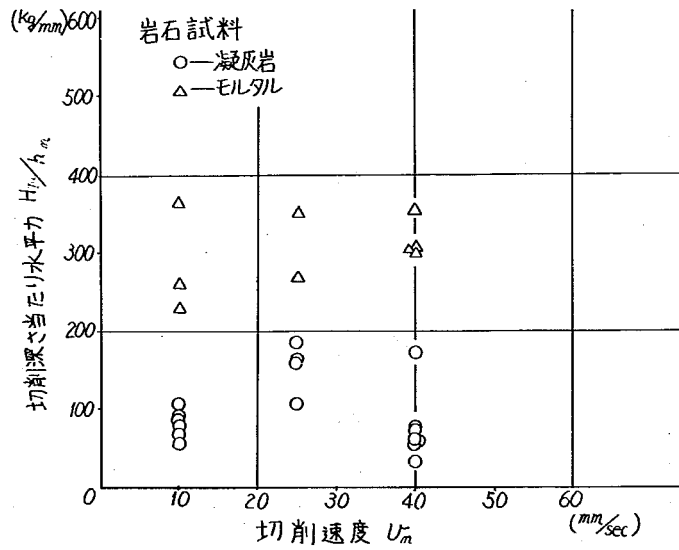


図-4.12 切削速度差による水平力(室内)

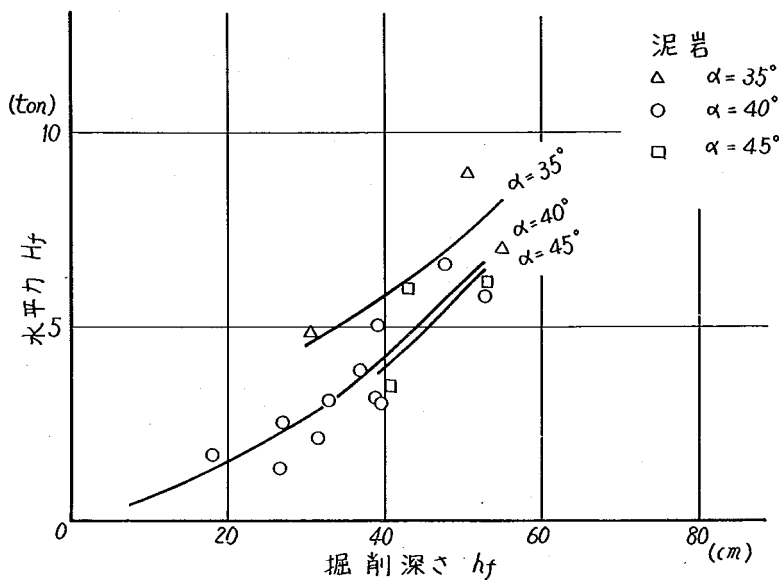


図-4.13 水平力と掘削深さ(現場)

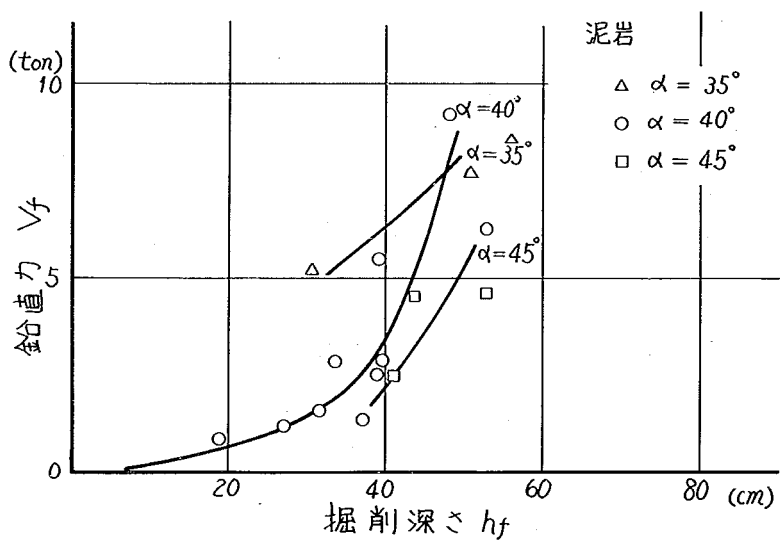


図-4.14 実機リップの鉛直力と掘削深さ(現場)

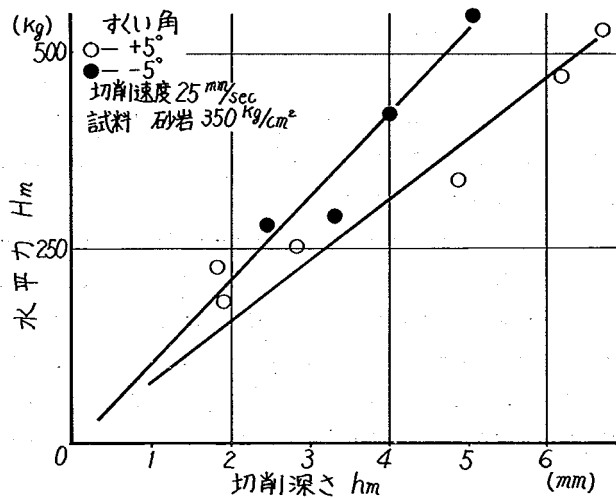


図-4.15 すくい角と水平力(室内)

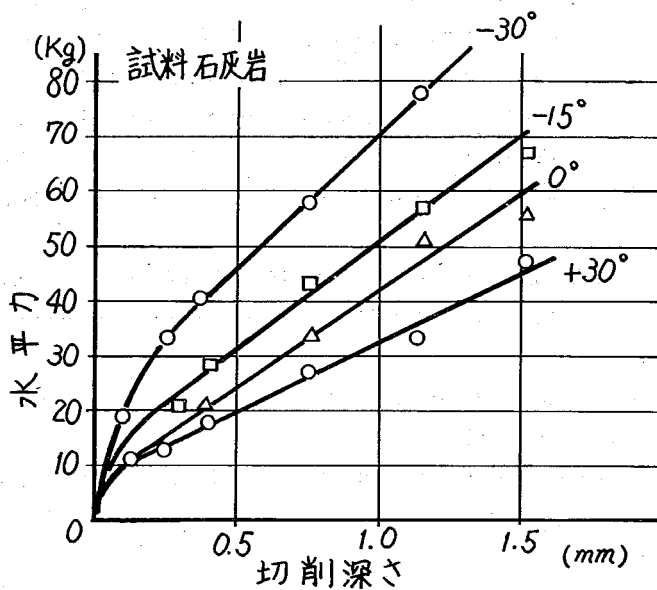


図-4.16 Gray によるすくい角の影響

4.4 リッパ能力

4.4.1 掘削断面積に影響を及ぼす諸要因

(1) 掘削深さ

掘削断面積を求める方法として3.1.2および3.2.2項に述べるように跡坪測量によって、掘削深さ、掘削幅をそれぞれ測量し、この値より、現場実験では断面を三角形断面に近似させ、掘削深さを高さ、掘削幅を底辺として求めた。すなわち

$$A_f = b_f \cdot h_f / 2 \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

実験結果より掘削深さと掘削幅との関係を図に示すと図-4.17を得る。図は49年度の泥岩の掘削結果で、図から掘削深さが60 cm位までは掘削深さの増加と共に掘削幅も増えているが、それ以上になると頭打ちとなる傾向が認められる。同様に流紋岩について掘削深さと掘削幅の関係を示すと図-4.18の通りであり、泥岩と比べバラツキの範囲が大きい、一軸圧縮強度の大きいコース程掘削幅が広がる傾向を示している。これは硬いもの程せん断角が小さくなるという一般的な傾向に合致している。

また、流紋岩の場合にもせん断角の影響しうる範囲、すなわちせん断範囲が存在するはずであるから、当然図-4.18の関係は上に凸な曲線になって関係づけられるはずである。しかし、今回の実験条件の範囲内では流紋岩の横這い点の存在は認められなかった。次に切削速度を10 mm/sec、カッタのすくい角をプラス5°で一定とし、一軸圧縮強度の異なる各種の岩石を切削試験した結果を図-4.19に示す。切削深さと切削幅には相関が認められ、各岩種について回帰式を求めてみると図中に示したように、切削幅は切削深さ0.7乗に比例している。ここで、図中の各回帰式にある定数項はカッタ幅によるものと考えられる。そこで、この回帰式を各岩種の一軸圧縮強度との間に関係づけてみると図-4.20に示すように一次の回帰直線になることが判明した。

以上より、切削幅と切削深さと岩石の一軸圧縮強度との関係を求めてみると次式が得られる。

$$b_m = (1.13 \times 10^{-2} \sigma_{cm} + 7.3) h_m^{0.7} + 9 \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

ただし b_m : 切削幅 (cm)

σ_{cm} : 一軸圧縮強度 (Kg/cm²)

h_m : 切削深さ (cm)

これより、亀裂や風化のない新鮮な岩に対して一軸圧縮強度が求めれば、切削深さに応じた切削幅、換言すれば切削断面積を計算によって求めることが可能となるが、実際の現場への適用性については今後さらに検討を要する。

(2) 掘削速度

掘削速度と掘削幅の関係を図-4.21に示す。これによると速度差が掘削断面積に影響しているかどうかは明確ではない。これは現場実験がブルドーザの1速だけで行なわれたため速度

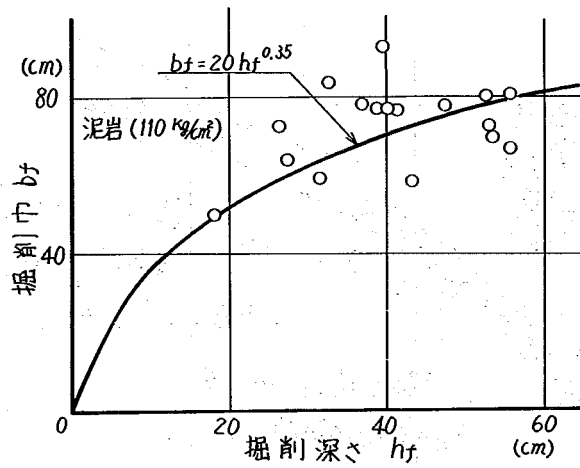


図-4.17 掘削幅と掘削深さの関係（現場）

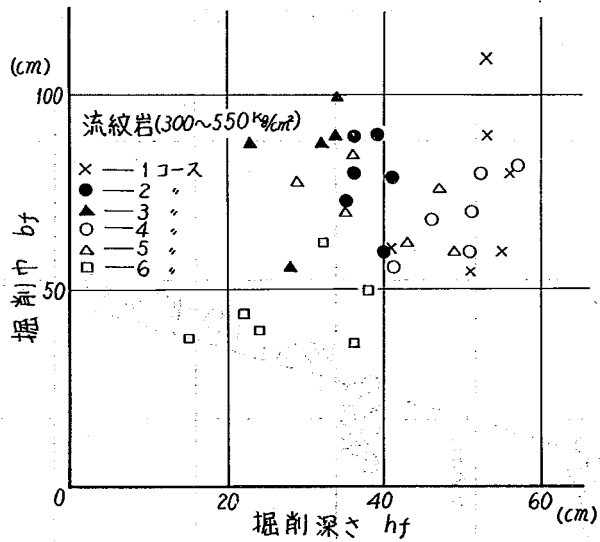


図-4.18 掘削幅と掘削深さの関係

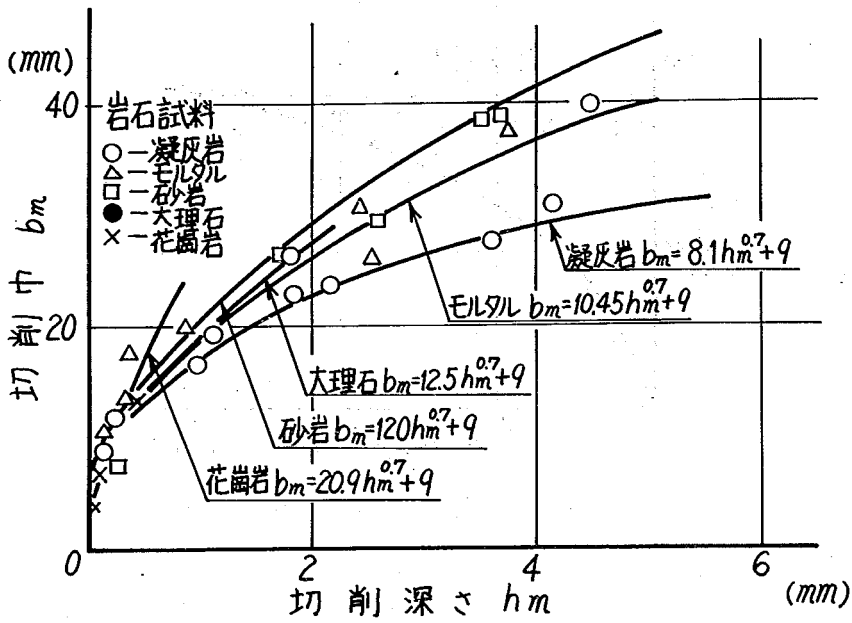


図-4.19 岩種による切削幅と切削深さ（室内）

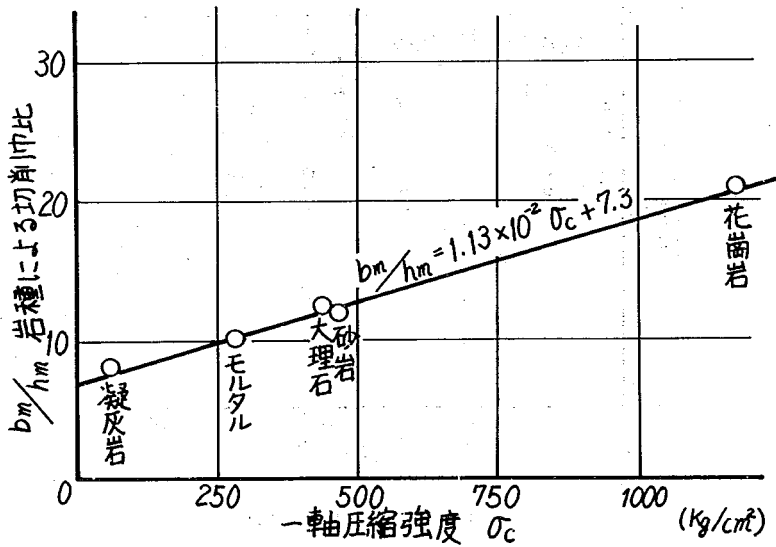


図-4.20 岩種と切削幅の関係（室内）

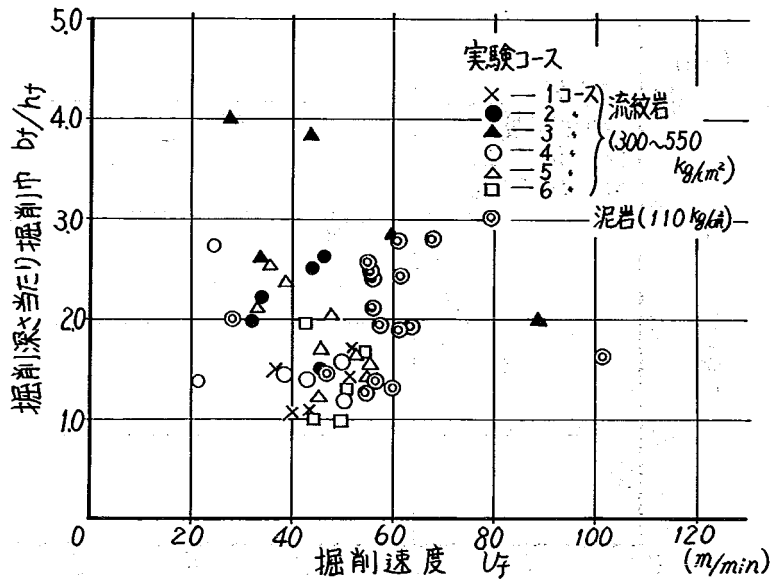


図-4.2.1 掘削速度と掘削幅の関係(現場)

範囲が狭いことも考えられるが、衝撃荷重となるような速度を得られる場合を除き、掘削速度差による掘削幅への影響は、ほとんどないものと考えの方が妥当である。

次に室内試験による試験結果を示す。図-4.2.2 は比較的緻密で均質な砂岩を対象としたものである。図-4.2.3 は比較的岩が空隙や小さな亀裂を多く有する凝灰岩を対象としたものである。図よりいずれの場合も切削速度の切削幅への影響を容易に判断することは難しい。これらの結果より同一深さを掘削する場合、掘削速度が掘削幅に与える影響はあまりないものと考えられよう。

(3) すくい角

すくい角が掘削断面積に及ぼす影響を図-4.2.4 に示す。図からすくい角を変化させることにより掘削断面積が異なった値を示す傾向が認められる。すなわち、すくい角が 40° の場合に掘削断面積が最も大きく、次に 35° 45° の順となっている。すくい角は大きくとったほど岩への喰い込みがよくなり、掘削しやすくなる傾向は4.3.2の項でも記述した通りであるが、掘削断面積にも岩種や岩質に応じた適当なすくい角があるように考えられる。しかし、すくい角と掘削断面積の関係についての実験は泥岩の場合のみであり、さらに他の岩種についての調査を要すると思われる。また、すくい角が何故、掘削幅に影響するのかは明確ではなく、今後、

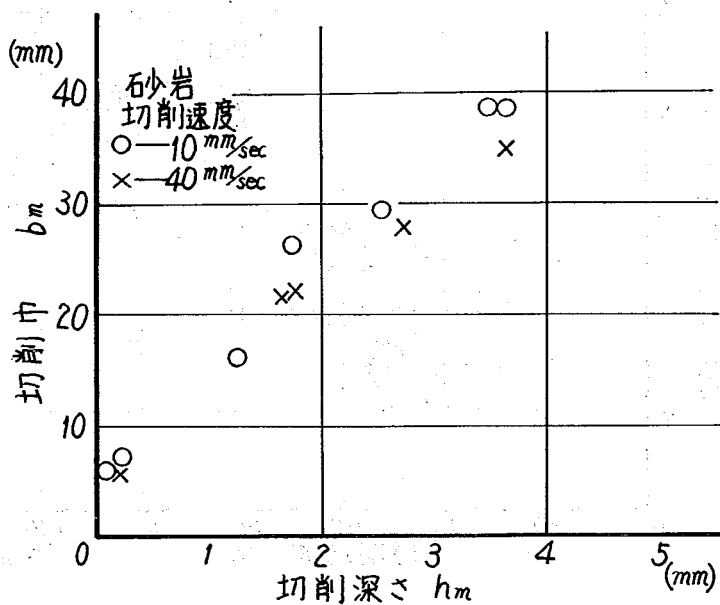


図-4.22 切削幅と切削深さ(室内)

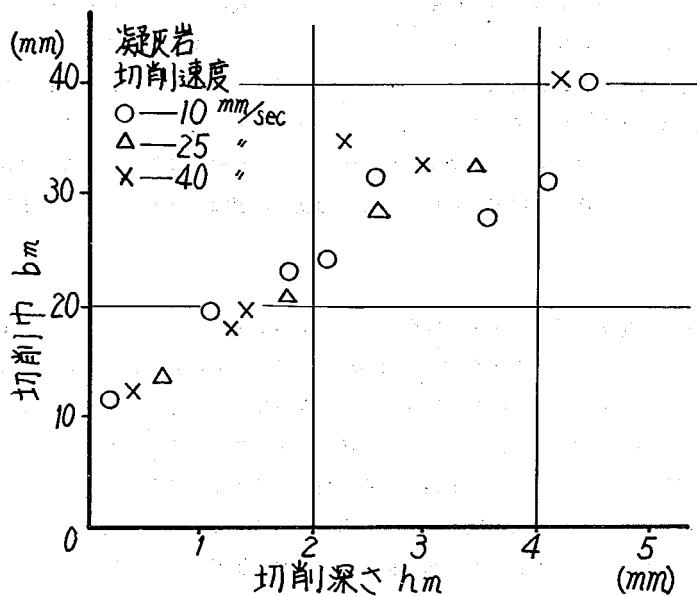


図-4.23 切削幅と切削深さ(室内)

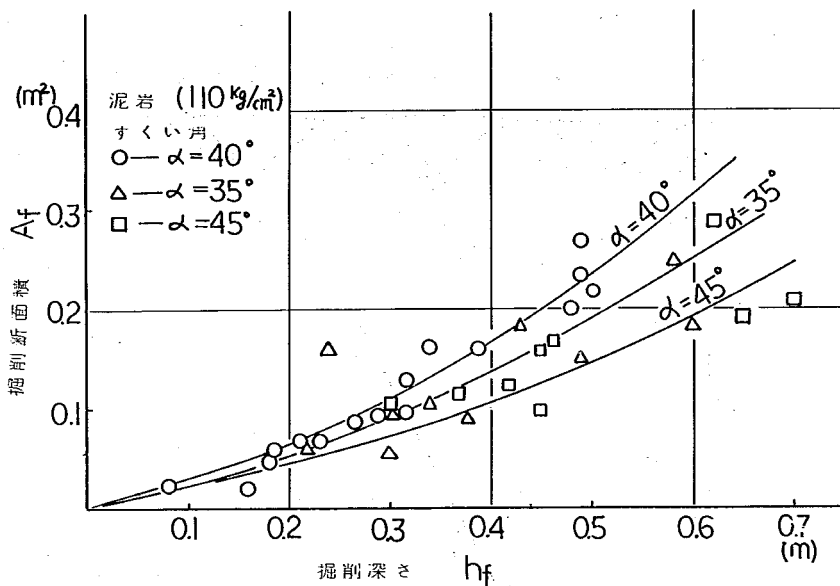


図-4.24 すくい角による掘削断面積への影響（現場）

このような点についても調査を要すると思われる。

4) リッパピッチ

実際の岩盤掘削作業では、リッパによる直接の破断部分（岩石がリッパによって破壊され元位置より移動している部分）の他に間接的に破壊された部分（岩石が破壊によって移動はしていないが、それにより亀裂が発生して内部構造的には岩としての強度を持たない部分）を形成する。この間接的に破壊された部分は、ブルドーザの排土板等による作業によっても容易に掘削が可能であるから、リッパピッチを最大効果をあげられるように適当に選べば、ブルドーザによるリッピング作業回数も減少することとなる。そこで、最適リッパピッチの選び方として図-4.25に示す模式図を考えれば最適リッパピッチは次式で示される。

$$P = \frac{1}{2} (b'_f + b_f) \quad (4.11)$$

ただし、 P ：最適リッパピッチ (cm)

b'_f ：有効掘削幅 (cm)

b_f ：掘削幅 (cm) とする。

有効掘削幅は、泥岩、流紋岩の実験結果によって次の図-4.26、4.27に示すような結果を得ている。図から両岩種とも掘削有効幅 b'_f は掘削幅 b の約2倍と考えてよいため次式によって示すことが出来る。

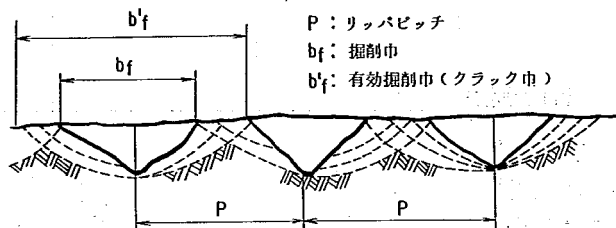


図-4.25 適当なリップピッチ

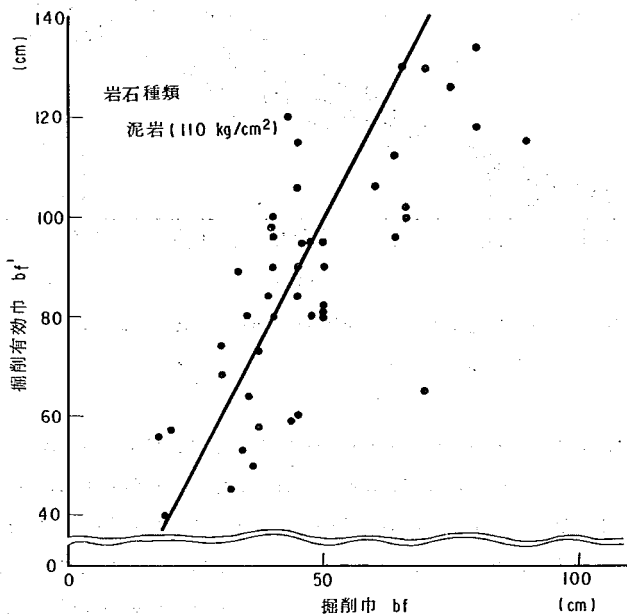


図-4.26 掘削幅と有効掘削幅（現場）

$$b'_f = 2 b_f$$

従って、最適ピッチは4.11式から

$$P = \frac{1}{2} (2 + 1) b_f = 1.5 b_f \quad \text{となる。}$$

さらに、泥岩の掘削幅は掘削深さに対して図-4.17から

$$b_f = 20 h_f^{0.35}$$

によって近似することが出来るから、最適ピッチは

$$P = 1.5 \times 20 h_f^{0.35} = 30 h_f^{0.35} \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

のように、掘削深によってリップピッチを求めることがある。この結果より例えば、泥岩層に50cm

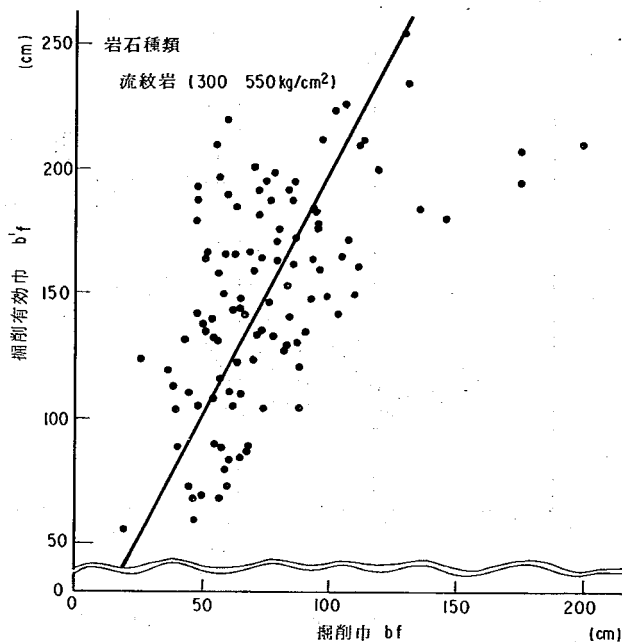


図-4.27 掘削幅と有効掘削幅（現場）

の掘削深さで、施工を行なうことが出来るとすれば4.12式より

$$P = 30 h_f^{0.35} = 30 \times 50^{0.35} = 126 \text{ cm}$$

となり、大体掘削深さの約2.5倍ピッチで作業を行なえば掘削断面的に効果的であると云えよう。

次に、では掘削時の掘削力を考慮した場合はどうであろうか、すなわち、リッピング作業は1サイクル終了後、リッパピッチだけ横へシフトするのであるが、このシフト量を種々に変えて、その時にリッパに作用する力から最適リッパピッチを求めようとするものである。50年度に行なった流紋岩層での実験では予めリッパピッチを50、80、110、150 cmと4条件変化させて掘削実験を行ない、この時に発生するリッパの掘削力と掘削断面積より、効果的なリッパピッチを調べてみた。附図-15.1～15.4にリッパピッチを変えて行なった時の掘削断面積の測量結果を示す。始めに掘削断面積とリッパピッチとの関係を調べてみよう。図-4.28にリッパピッチを変えた時の掘削断面積の関係を示す。図からは掘削深さが一定でないため断言することは出来ないが、110 cmピッチのものがより広断面となることがわかる。

一方、リッパピッチを変えた場合の水平力への影響を調べてみたのが図-4.29である。図によるとリッパピッチが50～80 cmでは水平力は低いが110 cmになると高くなる傾向を示して

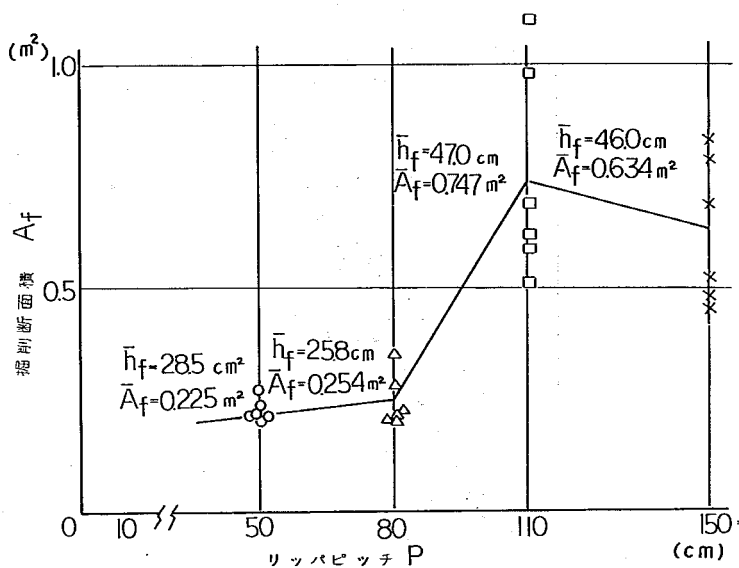


図-4.28 リップピッチと掘削断面積

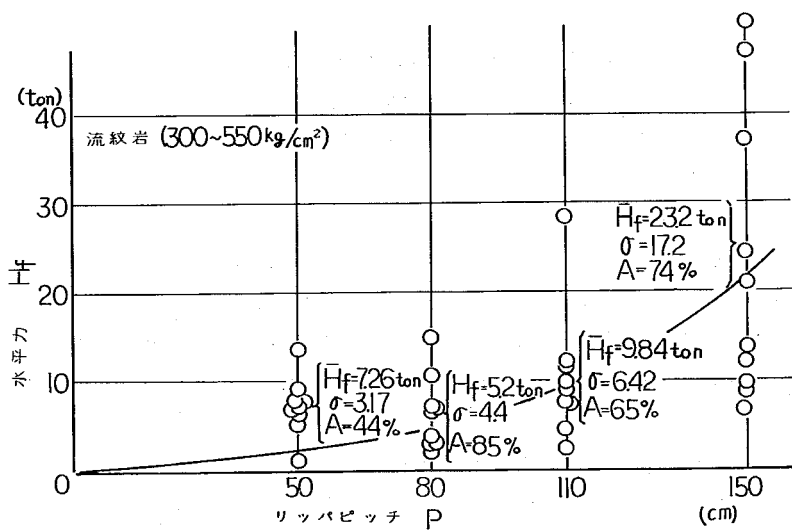


図-4.29 リップピッチと水平力の関係（現場）

いる。さらに、150cmになるとバラツキ幅が急激に広まが、これは隣のリップングの影響を受けている場合と受けていない場合とがある事を示しているものであり、この附近が最適リップピッチと考えられよう。

従って、リップによる施工能率を考える場合には掘削断面積とリップ作用力の両面からの検討が必要である。今、この両方の要素を考慮したリップ能率（後述する）を考え、このリップ能率とリップピッチの関係を示したのが図-4.3.0である。図によれば掘削力と掘削断面積の両方において有利であると考えられる最適リップピッチは、ややバラツキの範囲が大きいものの110~150cmの間にあるものと推察される。この値は掘削深さ40~60cmの約2.5倍となり前述の有効掘削幅からの考えとも合致する。

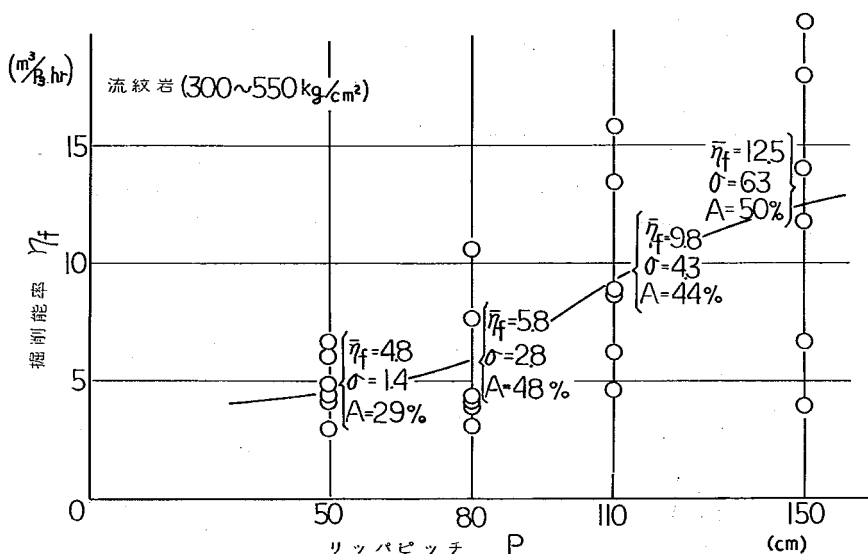


図-4.3.0 リップピッチと掘削能率の関係（現場）

4.4.2 リップ能率

本節ではリップ作業の経済性を表わす要因としてリップ能率を考える。リップ能率は単位時間当たり掘削量を消費馬力で除した値であり、作業に使われたエネルギーがどれだけ有効に使われたかを示す尺度となる。与える力の大きさ（水平力）や岩質によってリップ能率がどのように変化するかについて以下に考察する。

(1) 最適水平力

ここでは一般に考えられているように岩盤を掘削する場合には、出来るだけ大きな力を与え

ればよい、という考え方と違い、岩種あるいは岩質に応じて適当な掘削力があり、それ以上の力を使用することはエネルギー的に不利になるという前提で検討したものである。

掘削能率は掘削深さ、掘削幅、掘削速度、水平力によって次式のように計算される。

$$\eta_f = \frac{75 \times Q_f}{H_f \times V_f \times t} \quad (\text{m}^3/\text{ps hr}) \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

ただし、 η_f : 掘削能率 ($\text{m}^3/\text{ps hr}$)

Q_f : 掘削量 (m^3)

H_f : 水平力 (ton)

V_f : 掘削速度 (m/min)

t : 単位長さを掘削するのに要する時間 (hr)

従って、

$$\begin{aligned} \eta_f &= \frac{75 \times 60 \times 60 \times Q_f}{1,000 \times H_f \times V_f \times t} = \frac{270 \times Q_f}{H_f \times V_f \times \frac{t}{V_f}} \\ &= \frac{270 \times Q_f}{H_f} \quad (\text{m}^3/\text{ps hr}) \quad \dots\dots\dots (4.14) \end{aligned}$$

図-4.31は実験データを上式に代入して求めた掘削能率と水平力の関係を示すものである。

図より、泥岩では水平力が3~4 ton前後の時に掘削能率の最大ピークが存在している。

また、流紋岩の場合では、実験コースによって多少のバラツキを示しているが概2、3コー

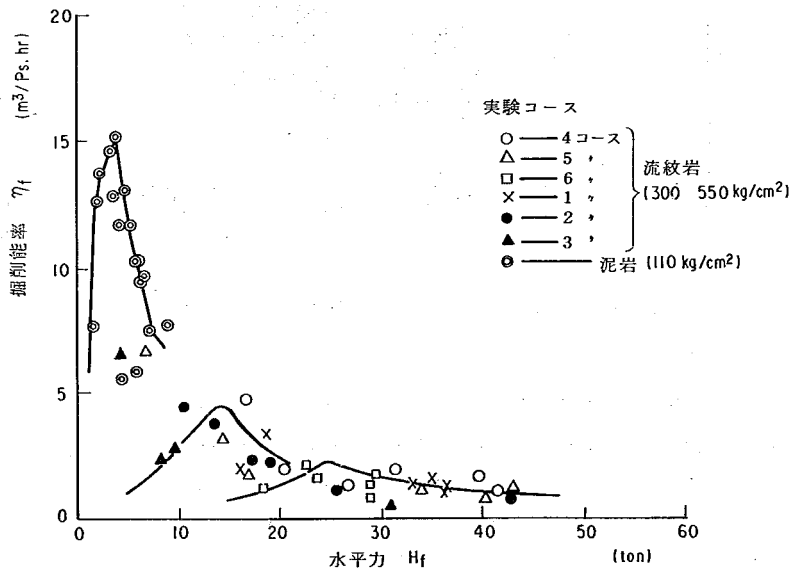


図-4.31 掘削能率と水平力の関係(現場)

スでは水平力が14 ton前後にピーク値が認められ、 γ 1、4、5、6コースでは24 ton前後にピークが現われている。

次に、室内試験によって同様に検討してみると図-4.3.2に室内試験での結果を示す。ここで、切削能率の単位は現場と室内で同じものを使用している。

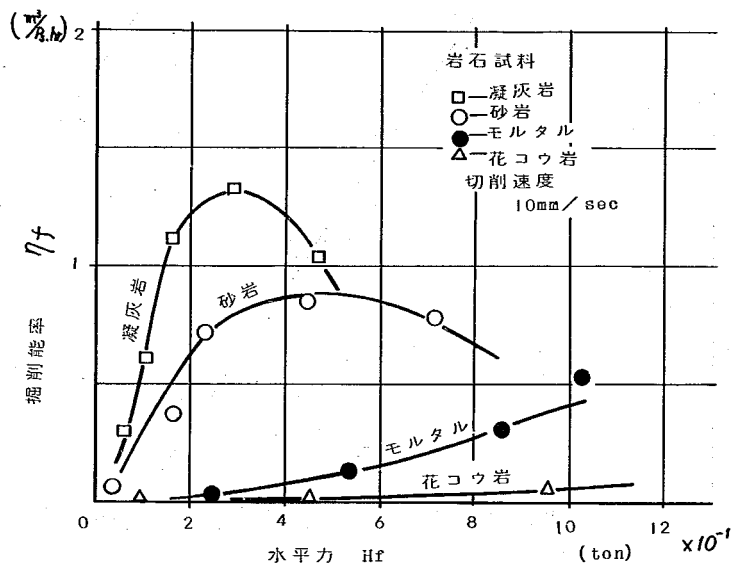


図-4.3.2 掘削能率と水平力の関係(室内)

図より、比較的軟かい凝灰岩や砂岩の例などにはピーク値が現場実験と同様に存在する事が判明した。しかし、モルタル、中硬岩、および硬岩の範疇とされている花崗岩等の試験結果からは、切削能率の最大ピーク値は、まだこの試験条件の範囲内では現われず、さらに大きな荷重条件下にあることが推定される。すなわち、室内試験からも岩種によって切削能率を最大にする水平力のあることが確かめられた。これらは、次のような理由によるものと考えられる。

岩種のせん断角とせん断ひずみの関係より、硬岩である場合には、切削によるせん断角が大きくなるため切削断面は拡大されるが反面せん断ひずみが大きくなって、そのために非常に大きな切削力が必要とすることになる。逆に軟岩である場合には、せん断ひずみは小さく切削力はそれ程必要としないが切削断面が小断面となるため深く切削する必要がある。

そこで、このピーク値とピーク値の得られる水平力との間に相関を求めてみると次の図-4.3.3を得ることが出来る。ここで、実機による掘削能率と模型試験機による切削能率とは、共通の単位より導いた次元の等しいものであるから、図から両者の間を次式に回帰させることが出来た。

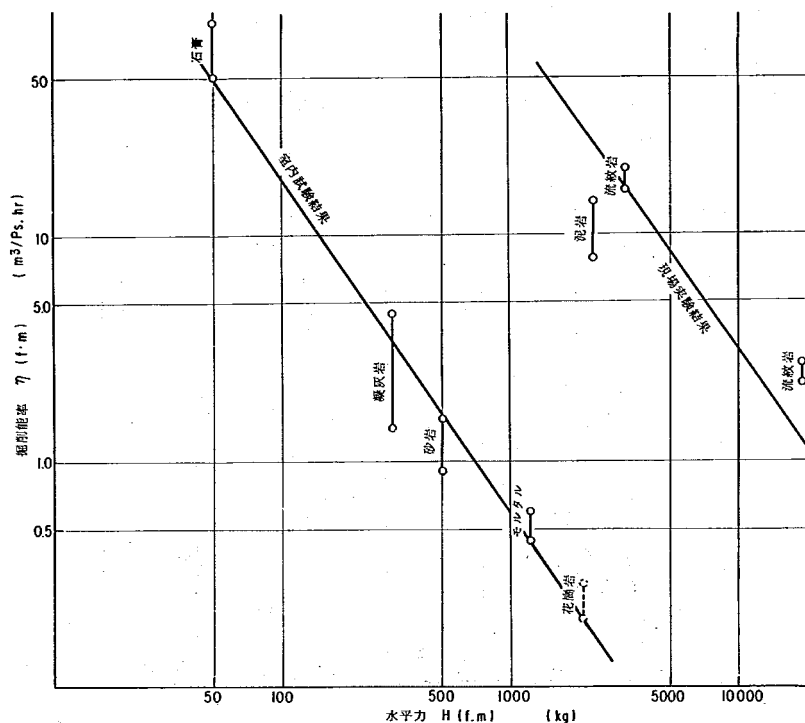


図-4.33 掘削効率と水平力の関係

$$H_f = 2.25 \times 10^4 \eta_f^{-0.7} \dots\dots\dots 4.15 \text{ (現場)}$$

$$H_m = 7.00 \times 10^2 \eta_m^{-0.7} \dots\dots\dots 4.16 \text{ (室内)}$$

上記の式における $H_{(f,m)}$ 、 $\eta_{(f,m)}$ の関係は室内試験も現場実験も同じべき項を持つ式で表わせるため、この結果を発展させれば模型試験機による、岩石試料の切削試験結果から実機の掘削能率、必要とされる水平力を推定することは可能となることも考えられる。

例えば、室内試験で得た切削能率と同じ掘削能率を現場で得るとすれば、 $\eta_f = \eta_m$ であり次式が成立する。

$$H_f = 3.214 H_m \dots\dots\dots (4.17)$$

すなわち、室内で得た水平力の約3.2倍のリップ水平作用力を現場で与えればよいことになり、リップドーザ所要のけん引力としては、これ以上の機種を選定することになる。

上述した切削能率のピーク値が岩質のいかなる要因により決まるかについて次に検討する。

図から、切削能率を表わす要因としては弾性波速度によるものが両対数グラフ上に非常によく回帰でき、次の回帰式によって表わすことが出来る。

$$\eta_m = 3.14 V_p^{-1.58} \dots\dots\dots (4.18)$$

前項で述べた通り実機と模型実験によって得られた値は、共通の単位より導いている同次元の値と考えられるため、両者の関係を図-4.35のように示すと、図から実機と模型試験との間には、ほぼ平行な差が生じている。従って、この差を両者の間の幾何学的な相似の縮尺比によるものや、現場と室内試験との岩石の状態その他の全ての要因を含むものと考えて、図-

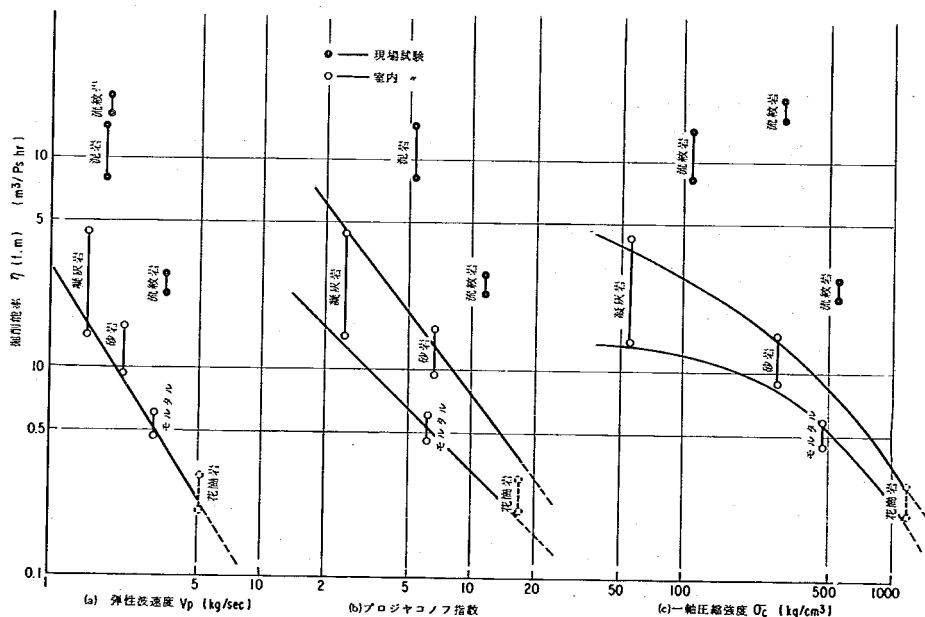


図-4.34 各種試験法との相関

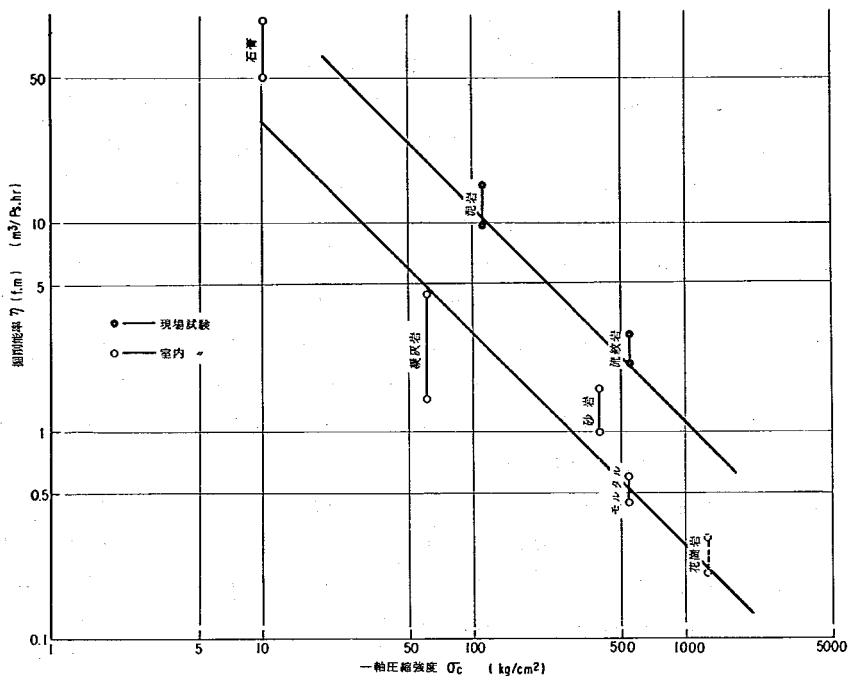


図-4.35 掘削能率と一軸圧縮強度の関係

4.35 より両者の回帰式を求めると、次式が得られるから、

$$\eta_f = 1.180 \sigma_{cf}^{-1} \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

$$\eta_m = 3.10 \sigma_{cm}^{-1} \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

これより、上式は同一岩石を掘削試験する時の掘削能率の現場と室内との違いを表わすものである。同一の一軸強度を持つ岩石に対しては、

$$\sigma_{cm} = \sigma_{cf}$$

であるから、これより次式が成立する。

$$\eta_f = 3.8 \eta_m \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

これらの関係を用いて模型実験から現場での必要水平力を算出出来る。すなわち、4.15、4.21、4.20式より

$$H_f = 2.25 \times 10^4 \eta_f^{-0.7} \quad \dots\dots\dots 4.15$$

$$= 2.25 \times 10^4 (3.8 \eta_m)^{-0.7} \quad \dots\dots\dots 4.21$$

$$= 2.25 \times 10^4 \{ 3.8 (3.10 \sigma_{cm}^{-1}) \}^{-0.7} \quad \dots\dots\dots 4.20$$

$$= 8.837 (3.10 \sigma_{cm}^{-1})^{-0.7}$$

$$= 1.60 \sigma_{cm}^{0.7} \quad \dots\dots\dots 4.22$$

例えば、現場条件として岩石の一軸強度を 300 Kg/cm^2 とする。

始めに模型試験での切削能率は 4.20 式より

$$\begin{aligned}\eta_m &= 310 \sigma_{cm}^{-1} \\ &= 310 \times 300^{-1} \\ &= 1.03 \text{ m}^3/p_s h_r\end{aligned}$$

また、この時に必要な水平力は 4.16 式により

$$\begin{aligned}H_m &= 7 \times 10^2 \eta_m^{-0.7} \\ &= 7 \times 10^2 \times 1.03^{-0.7} \\ &= 685 \text{ Kg}\end{aligned}$$

同じ岩石を現場実験したとすれば、その時の最大掘削能率は、

$$\begin{aligned}\eta_f &= 3.8 \eta_m \\ &= 3.8 \times 1.03 \\ &= 3.93 \text{ m}^3/p_s h_r\end{aligned}$$

従って、現場での必要とされる水平力は 4.15 式より

$$\begin{aligned}H_f &= 2.25 \times 10^4 \eta_f^{-0.7} \\ H_f &= 2.25 \times 10^4 \times 3.93^{-0.7} \\ &= 8,630 \text{ Kg}\end{aligned}$$

の水平力を必要とすることが推察され、これらは 4.22 式によって表わされる。すなわち

$$\begin{aligned}H_f &= 160 \sigma_{cm}^{0.7} \\ &= 160 \times 300^{0.7} \\ &= 8,670 \text{ Kg}\end{aligned}$$

の力が現場一軸強度 300 Kg/cm^2 の岩盤に $3.93 \text{ m}^3/p_s h_r$ の最大掘削能率をあげるために必要となる。

4.4.3 振動切削効果

(1) 岩石の振動破碎

岩石は色々な鉱物、水、空気等の複雑な結合体で構成され、一面では強度的に脆弱な部分を擁するものである。従って、振動あるいは衝撃力を岩石に作用させると、これが強度的に脆弱な部分にも作用し、結合力の弱い空隙等に微妙なすべりを生じせしめ、グリフィス理論による破壊現象等によって、これらの部分より亀裂の誘因を起こすことが考えられる。

さらに、これらの現象を助長せしめる作用として振動による固体粒子間の摩擦力の減少も望めることになり破碎を一層促進させる。そして、岩石の全体的な破碎へと拡大されと考えられる。

岩石を振動切削する時、切削速度を減少させるか、振動数を増すか、あるいは振幅を増すか

によって刃先が岩石に対して衝撃荷重を与えられるとされている。そこで、衝撃荷重になるための条件は、これまでの報告によれば振動切削の場合この臨界速度を次式で表わされている。

$$V_c = 2\pi af \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

ただし、 V_c : 臨界速度 (mm/sec)

a : その時の振幅 (mm)

f : その時の振動数 (cps)

従って今回の試験条件を 4.23 式に当てはめて臨界速度を求めると

$$\begin{aligned} V_c &= 2\pi \times (0.02 \sim 0.8) \times 48.3 \\ &= 6.1 \sim 243 \text{ mm/sec} \end{aligned}$$

与えている切削速度 V_m は $10 \sim 40 \text{ mm/sec}$ であるから、振幅が大きくとれている時は

$$V_m < V_c$$

となる。

従って、与えている切削速度条件は臨界速度以下であるので本試験の振動切削は岩に衝撃荷重を与えていることとなる。

(2) 切削力と加振効果

切削力は、これまでの無振動切削実験より、カット形状、試料種類、切削速度、切削深さ等によって、決まった値となりこれらの諸因子の間には前述のような関係式が得られることが判明している。

これまでの結果より凝灰岩などの軟かい岩石と花崗岩などの硬い岩石を比べると、硬い岩種程切削時に大きな水平力が必要となってくる。また切削時に発生する力は水平力、鉛直力に分けられ、その配分は図-4.6 より切削深さが増す程、水平力の割合が増えていることがわかる。

従って、もし振動を与えることによって切削時の水平力を低く抑えることが出来れば、さらに硬い岩への適用が可能となる。また同質の岩であれば、切削力の低減された分だけ、切削量の増加、切削能力の向上を望めることとなる。

今、水平力の加振による減少傾向を無振動切削と振動切削の結果を比較して示すと図-4.36 が得られる。図は、岩石試料に凝灰岩を選び、切削速度 10 mm/sec で一定として行なったもので、与える起振力と単位切削深さ当たりの水平力との関係を示したものである。図から同じ切削深さ当たりの水平力は、無振動より加振時が、また起振力が大きいほど発生する水平力が小さくなっていることがわかる。

また、砂岩についても同様な実験を行なったが、この場合はデータのバラツキが大きく現われ凝灰岩の時のような明らかな結果は得られなかった。

従って、加振効果については振動特性や岩種によって相異なることが予想される。

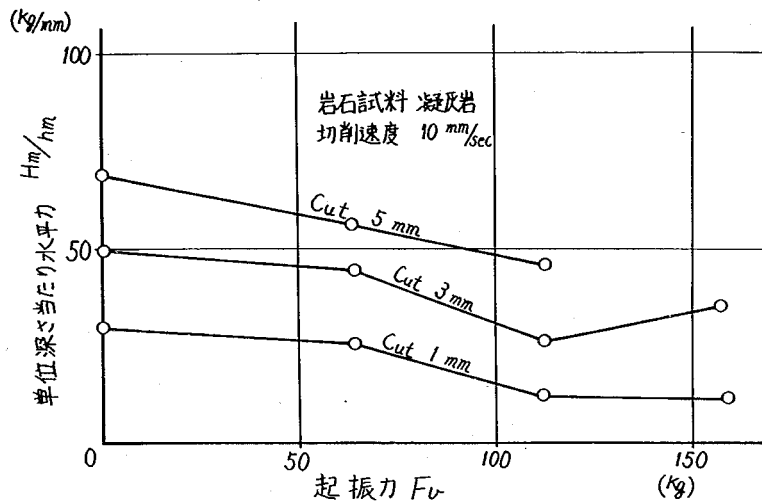


図-4.36 起振力と水平力(室内)

(3) 切削能力と加振効果

凝灰岩、砂岩を振動切削した場合の切削量と起振力の関係をそれぞれ図-4.37、4.38に示す。図より凝灰岩の場合には無振動切削よりも振動切削したものの方が、同一条件で切削を行なう場合に切削量が増大していることがわかる。そして、その影響は起振力に比例して大きくなっていること、切削深さが増すほどその効果も著しい傾向を示す。

一方、砂岩については加振することによって切削量は増加するが、その効果の程度は凝灰岩の場合に比べかなり低い。これらから岩種によって効果のある起振力がそれぞれ異って存在することが考えられる。

また、図-4.37、4.38をみるといずれの岩に対しても切削深さが浅い場合についての影響はあまり認められないが、この理由について切削深さが浅い場合、振動が有効に働かないこと、切削深さが浅い場合、与える切削条件による誤差も大きくなっているためであると考えられ今後起振力の大きさの検討とともに、さらに調査が必要と思われる。

(4) 切削能率と加振効果

与えたエネルギーに対する切削量を表わす方法として切削能率のあることを前節で述べたが、これまでの実験より各岩種によってそれぞれ切削能率を最大にする水平力が存在して、それ以上の水平力を岩に対して与えても切削力は与えた力に比例して増加しないことがわかっている。

今、同様な方法で切削能率について無振動切削と振動切削を比較したものが図-4.39である。

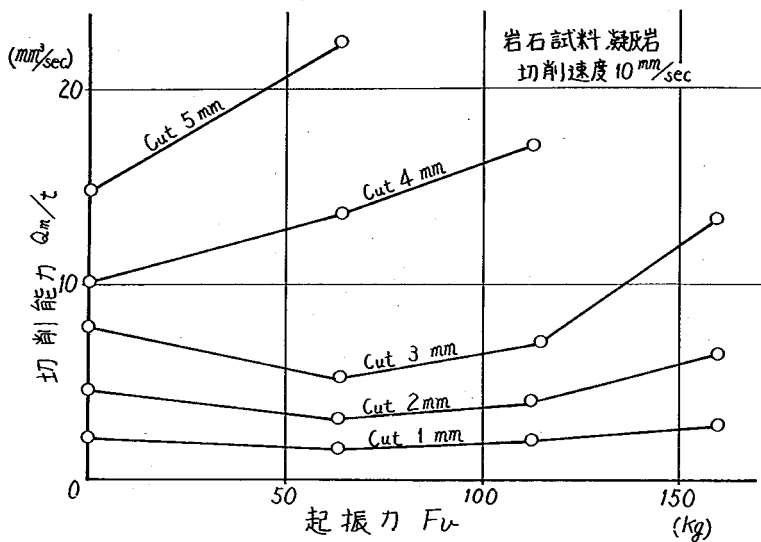


図-4.37 起振力と切削能力の関係(室内)

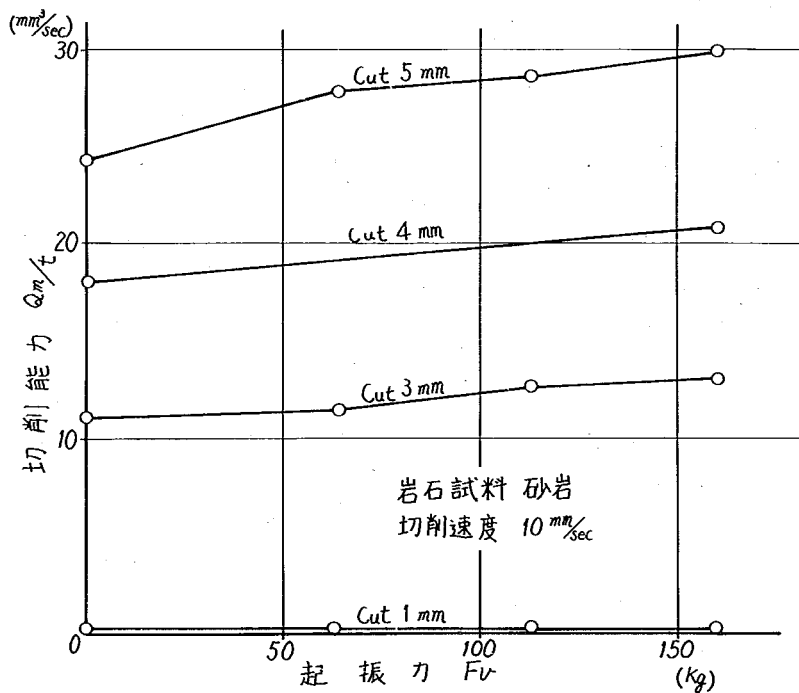


図-4.38 起振力と切削能力(室内)

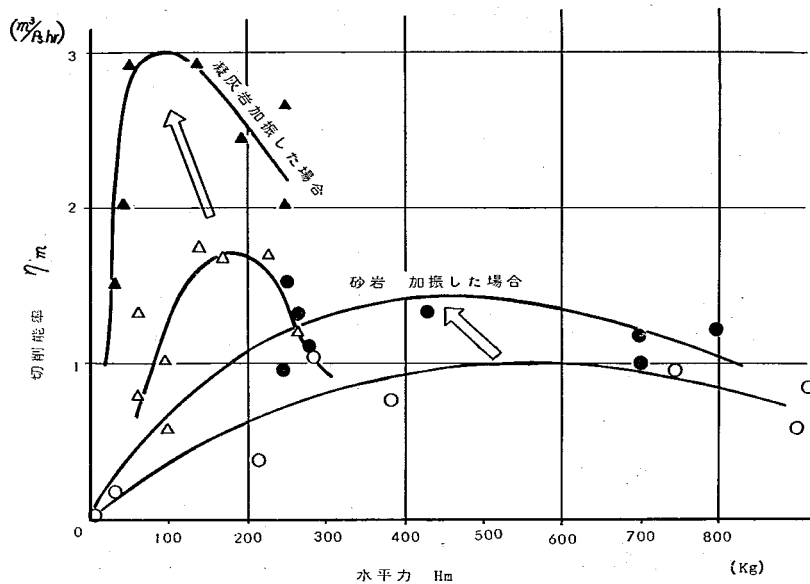


図-4.39 水平力と切削能率（室内）

図は凝灰岩と砂岩について切削速度を 10 mm/sec で一定として行なったもので、図から凝灰岩の無振動切削時は水平力が約 200 Kg 前後で最大能率のピーク値の存在することがわかる。そして、これが振動切削を行なうとなると、水平力が約 100 Kg に減少され、切削能率を約 1.7 倍にあげることが出来る。砂岩の場合には、水平力の減少については凝灰岩ほど明確ではないが、切削能率については約 1.5 倍の向上をみることが出来る。

以上より加振装置の出力は 0.075 kW と全体装置の出力 3.2 kW に比べて極めて低く、振動エネルギーを僅かに加えることによって切削能率がかなり上昇する傾向が認められた。

(5) 加振効果から実機への推論

加振効果の実機への適用を考える時、凝灰岩と砂岩との切削試験結果より、次の結論を得た。

凝灰岩の場合は、最大切削能率のピーク値は与える起振力の大きさによって、本加振装置の場合には約 1.7 倍までの切削能率の増加を期待できることが判明した。従って、起振力と水平力の割合と加振効果との間に相関関係が成り立つものであるとすれば、現場での必要とされる水平力が求まれば、それから必要とされる起振力を算出できることになる。

今、凝灰岩と砂岩より無振動切削時に対する振動切削時加振効果の割合を示すと表-4.5 のようになる。また、起振力 150 Kg に対する砂岩、凝灰岩の水平力はそれぞれ 550 Kg 、 200 Kg で

この時の加振効果が砂岩 1.2、凝灰岩 1.6 倍
であるとすれば、

砂岩の場合

$$150/550 = 0.27 \text{ —— 加振効果 } 1.2$$

凝灰岩の場合

$$150/200 = 0.75 \text{ —— 加振効果 } 1.6$$

とまとめられるから、これより図-4.40
を得る。従って図より加振した場合の加振効
果は次式で表わすことが出来る。

$$\text{加振効果} = 0.8 \times (\text{起振力} / \text{水平力})$$

$$+ 1 \text{ (4.24)}$$

表-4.5 加振した場合の切削能力の
向上

与える 試料名		遠心力 (Kg)	50	100	150
			50	100	150
凝 灰 岩	切 削 深 さ (mm)	1	0.84	1.00	1.39
		3	0.76	0.85	1.59
		5	1.41		
砂 岩	切 削 深 さ (mm)	1	1.00	1.00	1.00
		3	1.03	1.11	1.16
		5	1.11	1.16	1.21

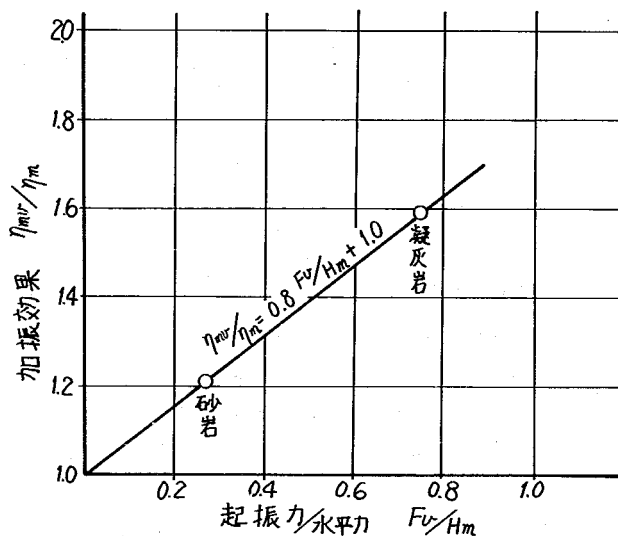


図-4.40 加振効果と起振力の関係(室内)

この例より云うと、例えば現場で砂岩を掘削する時、始めに必要なとされる水平力を求めると、
前述の4.22式から、砂岩の一軸圧縮強度は466Kg/cm²として、

$$H_f = 160 \sigma_{cm}^{0.7} \text{ 4.22}$$

$$= 160 \times 466^{0.7}$$

$$= 11,800 \text{ Kg}$$

これより、最大掘削能率をあげるための水平力を得ることが出来る。

次に加振効果として最大掘削能率をさらに、1.5倍向上させるとするならば、この時必要な

起振力は、4.24 式から

$$\text{加振効果} = 0.8 (F_v / H_f) + 1.0 \dots\dots\dots 4.24$$

$$1.5 = 0.8 (F_v / 1.8) + 1.0$$

$$\text{起振力 } F_v = 1.8 \times (1.5 - 1.0) / 0.8$$

$$= 7.38 \text{ ton}$$

すなわち、7.38 ton の起振力のある振動機を用いて掘削を行えば無振動掘削時に比べ約 1.5 倍の最大掘削能率の向上を図ることが出来ると考えられる。しかしながら、これらの結果は僅かなデータによる大胆な仮設に基づくものであり、今後さらにデータを積み上げて続けなければならない。

5. ま と め

- i) 実機リップドーザによる掘削時の作用力は静力学的計算による作用力と比較して、水平力はほぼ等しいが鉛直力は機体の振動が加わり大きな値を発生している。
- ii) 現場実験、室内実験とも掘削深さが深くなると、鉛直力より水平力が大きくなる傾向がある。この水平力と掘削深さ、岩石の強度の間には相関関係が認められる。
- iii) 掘削速度による水平力への影響は認められない。
- iv) リップのすくい角は、すくい角が大きいくほど発生水平力が低くなるが、すくい角が大きくなると逆に掘削断面積が減少するため 40° 程度が実験の範囲内では適当であった。
- v) リップ能率として馬力時間当たり掘削量 ($m^3 / p_s h_f$) を考えエネルギー的に最大効果を得られる掘削条件を考えた。この結果、岩種によっては最大リップ能率を与え得る水平力の存在することが判明した。

一方、岩質とリップ能率の関係を求めると弾性波速度をパラメータとしてリップ能率を表わすのが、もっとも妥当であることが判明した。

模型切削試験から実機掘削試験への推論を行なうために共通の岩石強度単位として一軸圧縮強度を選び両方のデータを比較すると相関があり、室内実験より現場での所要けん引力、掘削能率等を推定出来る可能性を見出した。

- vi) 室内実験で均質な岩石に振動を与えると岩種によっては切削水平力が減少し、掘削断面積は増大する傾向が見出せた。これは振動リップの可能性を示唆しているものと考えられる。

6. 今後の問題

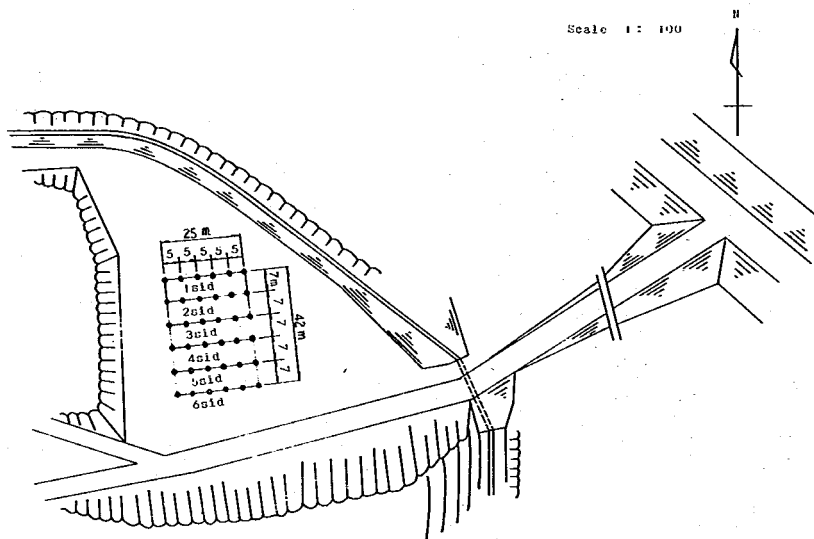
本報告は49年度から始めた岩石掘削工法に関する調査の49年度、50年度の成果をとりまとめたものである。リップドーザによる岩掘削の現場実験並びに室内実験より施工条件（カッタのすくい角、岩盤の強度、掘削速度）とリップの作用力、掘削能力の関係について、その概要を明らかにすることが出来た。しかしながら、その実例が少ないため今後はこれらのデータから汎用性を見出し、他の現場への適用を考えるためには、さらに実験をくり返し以下の問題について解決していかなければならない。

- (1) 岩盤の亀裂や風化の度合、含水比などの要因による掘削性の変化。
- (2) 岩盤のドラグタイプカッタに対する掘削強度の判定要因を見出し、現場で簡単に掘削能力を把握できるような試験方法の確立。
- (3) リップドーザのより硬岩への適用、高能率化を図るため各岩種に対して有効に作用する振動の大きさ、方向、周波数やクラックや欠陥のある場合への効果についての確認。

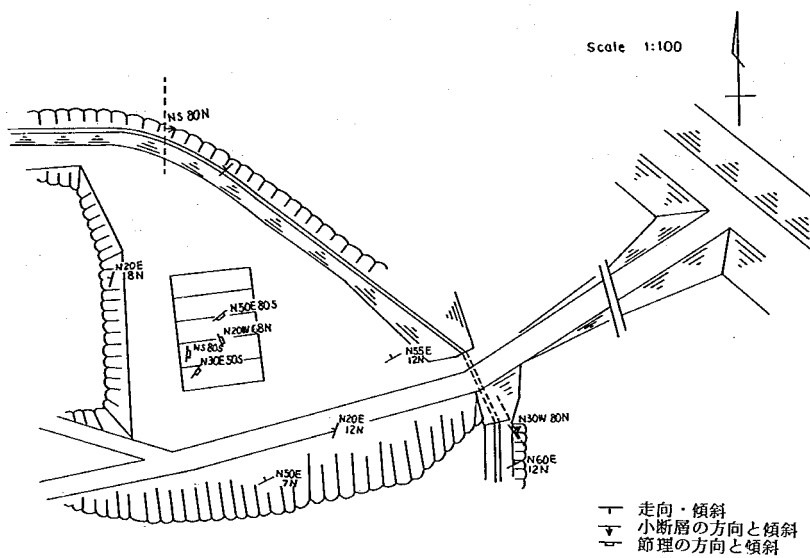
最後に本報告書の作成に当たり実験に協力をいただいた千葉県農林部耕地第2課、千葉県大原土地改良事務所、日本道路公団新見工事事務所、大日本土木中国自動車道大佐工事事務所の方々に深く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

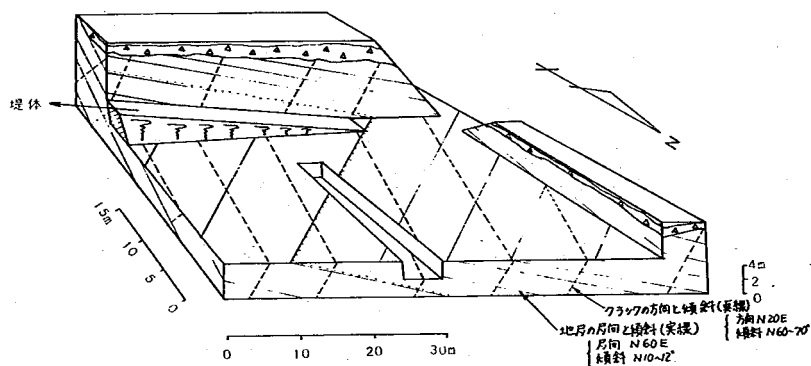
- (1) 千 田 昌 平 大口径掘削機のドリルビットドリラビリティ 建設機械 '72、9
- (2) W.C.Maurer The State of Rock Mechanics Knowledge in Drilling
Failure and Breakage of Rock
- (3) 千 田 昌 平 米国における大口径削孔 土木技術資料 12-11
- (4) 加 藤 三重次 建設機械 技報堂
- (5) 星 野 謙 三 高速水ジェットによる岩盤掘削 建設の機械化 '72. 4
- (6) 岩 田 尚 生 空気中と水中における水力掘削特性の比較 建設の機械化 '72. 3
- (7) 外 尾 善次郎 建設工事における火焰ジェットの応用 建設機械 '72. 9
- (8) 三 沢 清 扶 電磁波による岩石の破壊について 建設機械 '72. 2
- (9) Jeffrey, P. Research Investigation of Laser Rock Kerfing
Carstens et al Federal Railroad Administration '72. 11
- (10) John H. Subterrene rock melting devices
Altseimer Tunnels and Tunnelling '74. 1
- (11) 小 野 末 雄 リッパメータによる建設機械作業能力の予測 土木技術資料 11-2
- (12) 山 口 梅太郎 岩石力学入門 東京大学出版会
西 松 裕 一
- (13) 大久保 彪 岩石の物理的性質と弾性波速度 土と基礎 19-7(161)
寺 崎 晃
- (14) 三 谷 健 軟岩の性状と施工性 土と基礎 22-6(196)
- (15) 西 松 裕 一 ローラカッタによる岩石掘削に関する研究 日本鉱業会誌 '75. 10
- (16) 日本道路協会 道路土工指針(改訂版) 日本道路協会 '73. 5



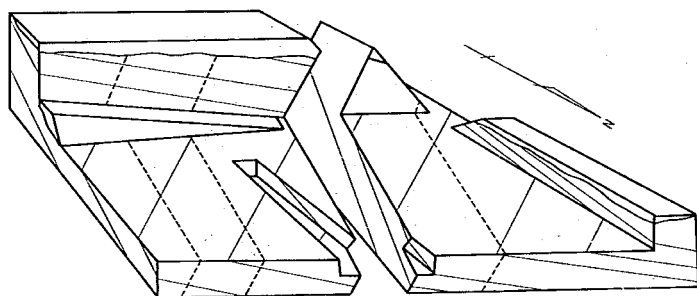
附図-1 弾性波探査測定位置



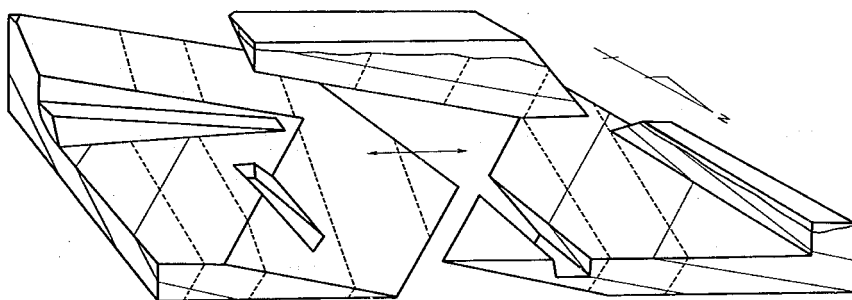
附図-2 調査地附近の地表踏査結果



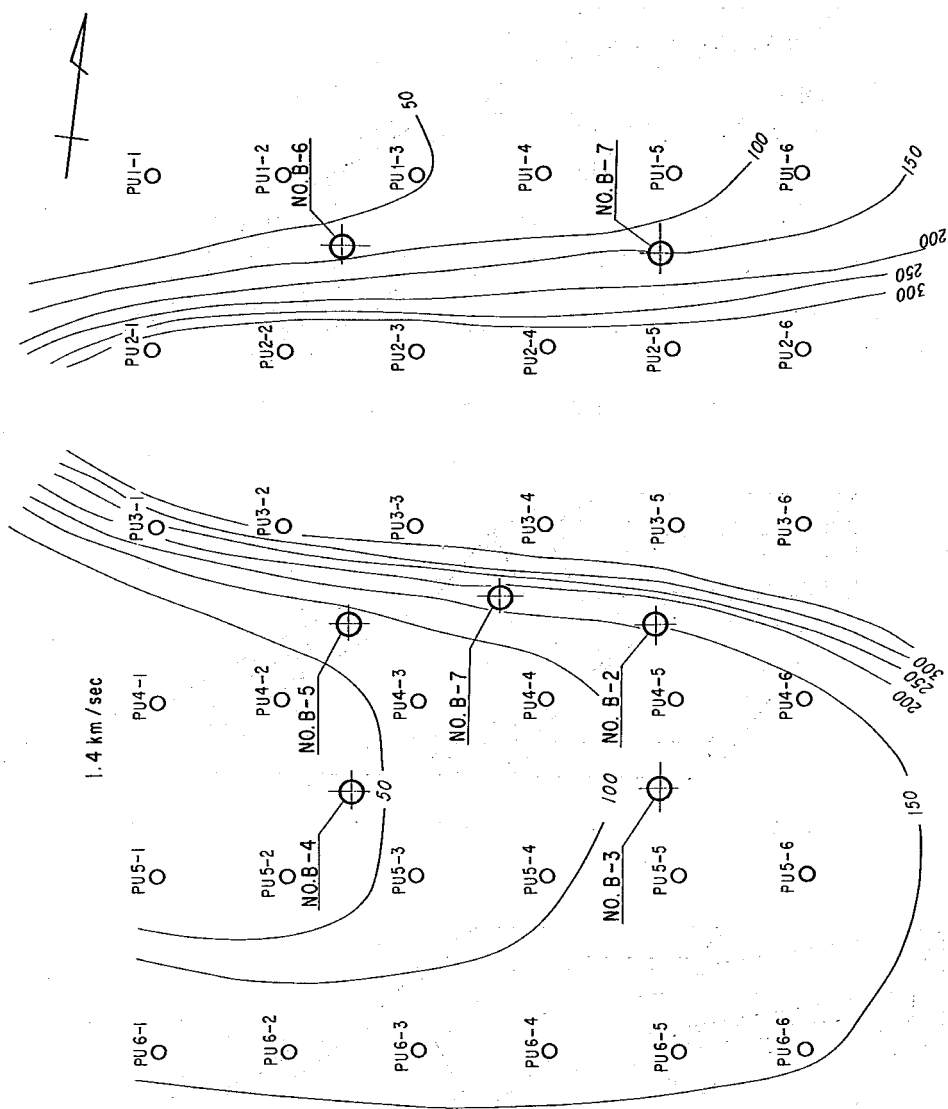
附図-3 調査地のブロックダイヤグラム



附図-4 節理面に沿って切断したブロックダイヤグラム

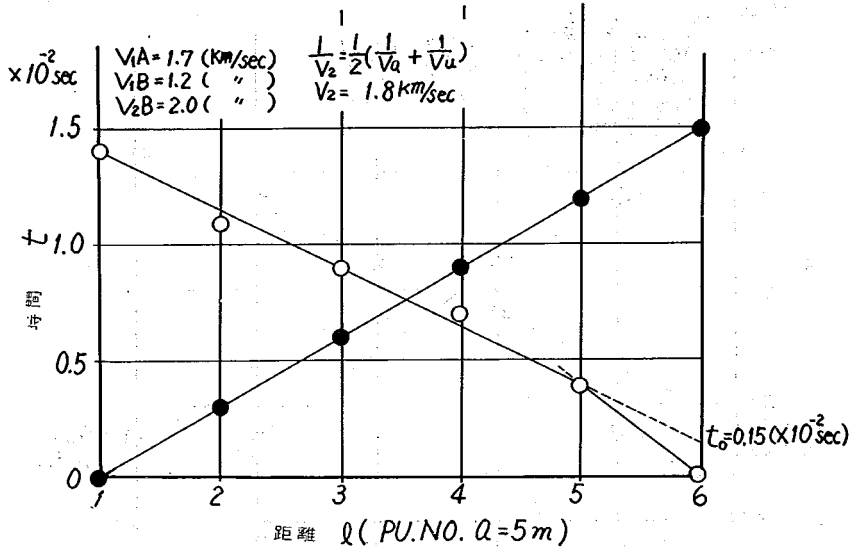


附図-5 地層面に沿って切断したブロックダイヤグラム



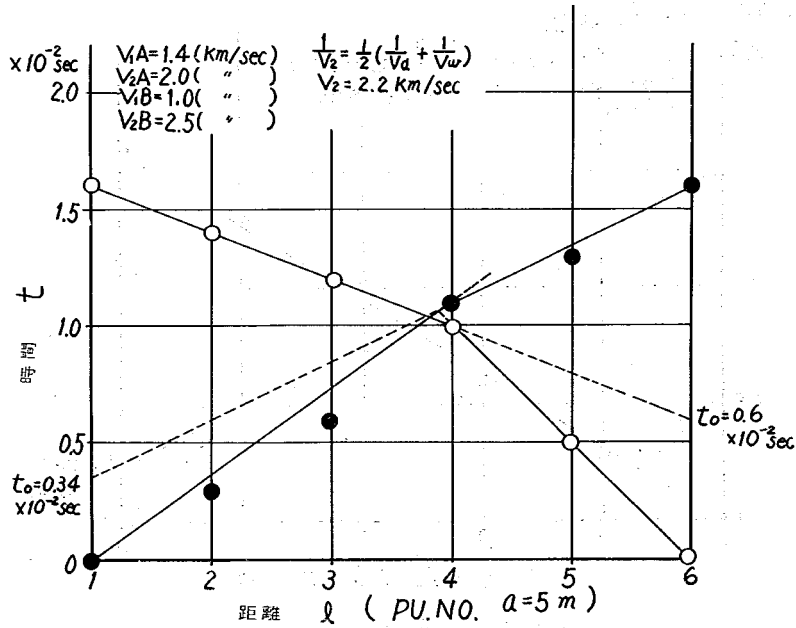
附圖—6 (第1速度層)等深線圖

泥岩1測線

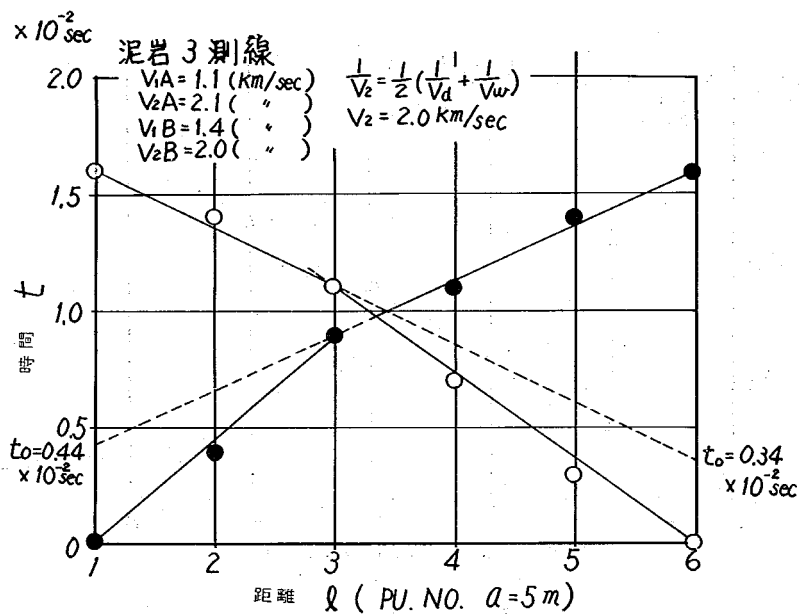


附圖-7.1 走時曲線

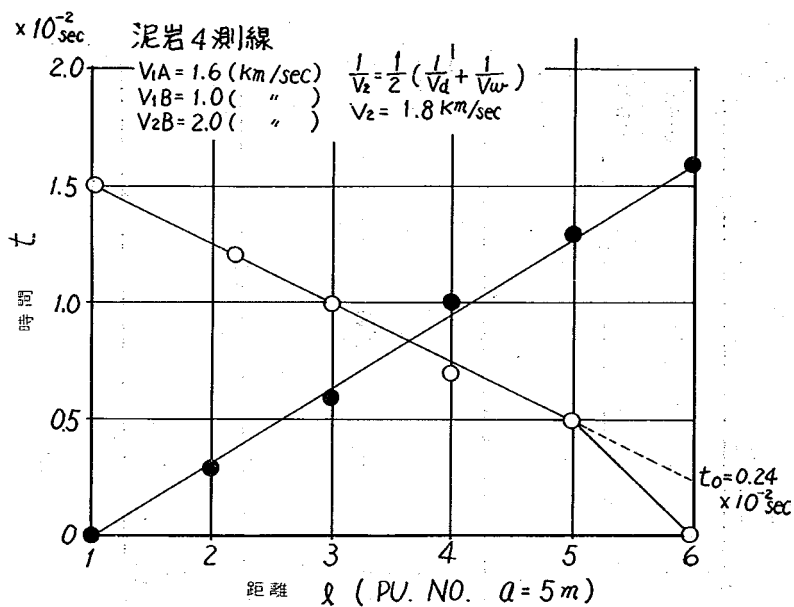
泥岩2測線



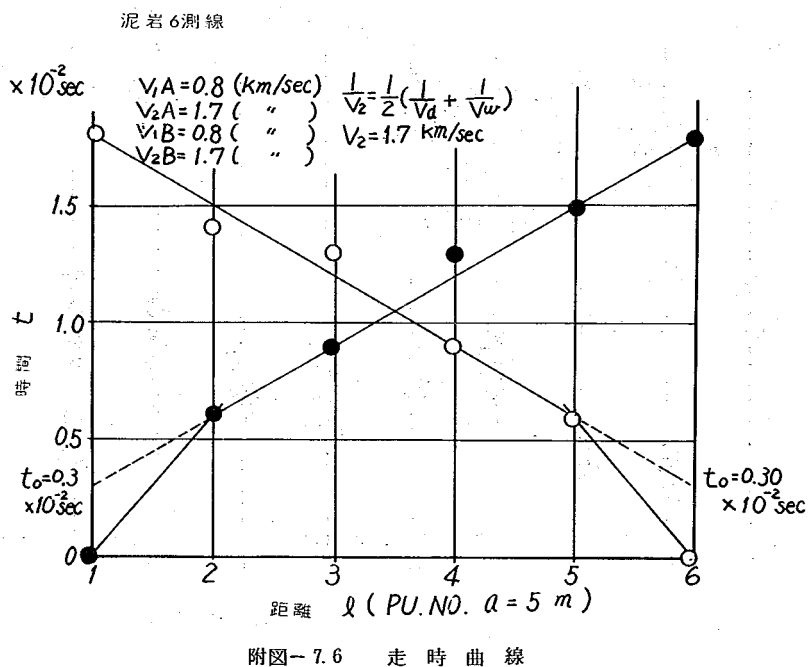
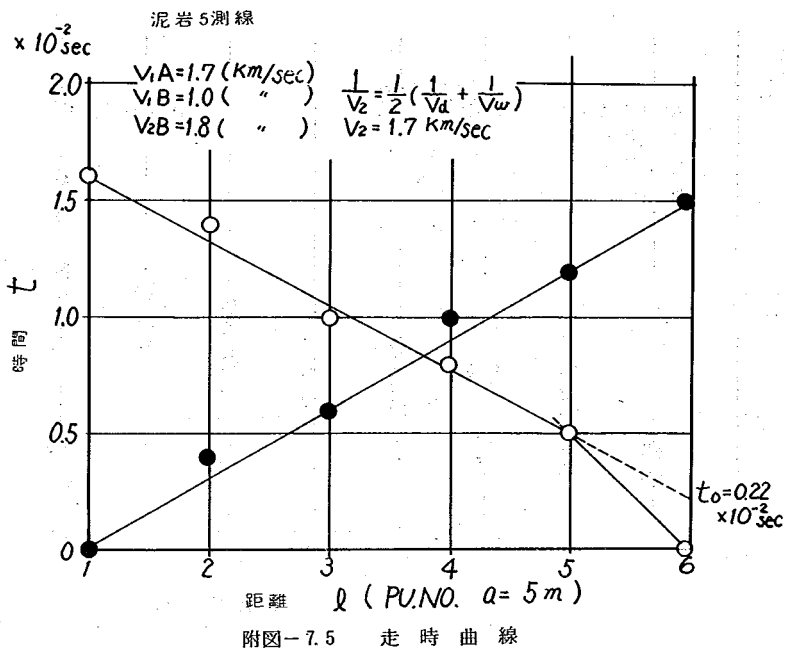
附圖-7.2 走時曲線

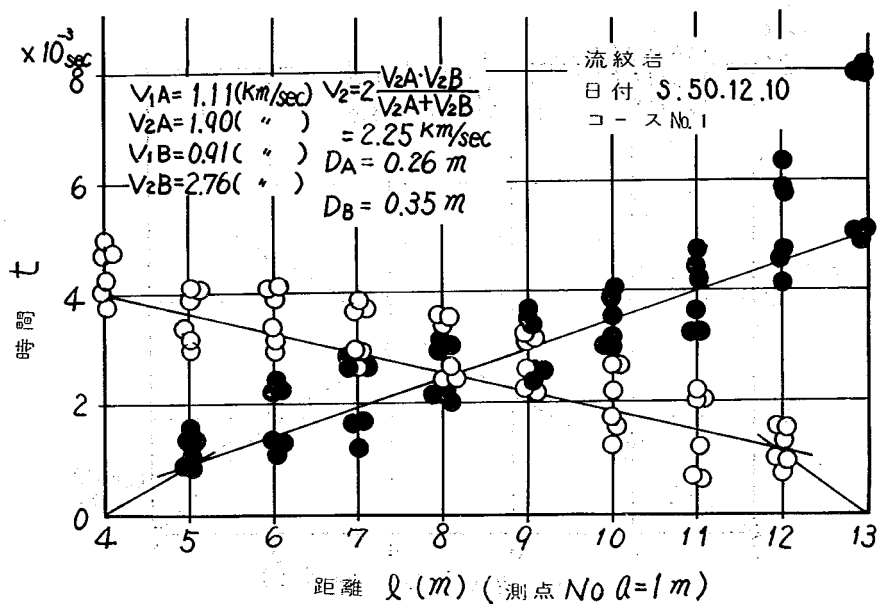


附圖-7.3 走時曲線

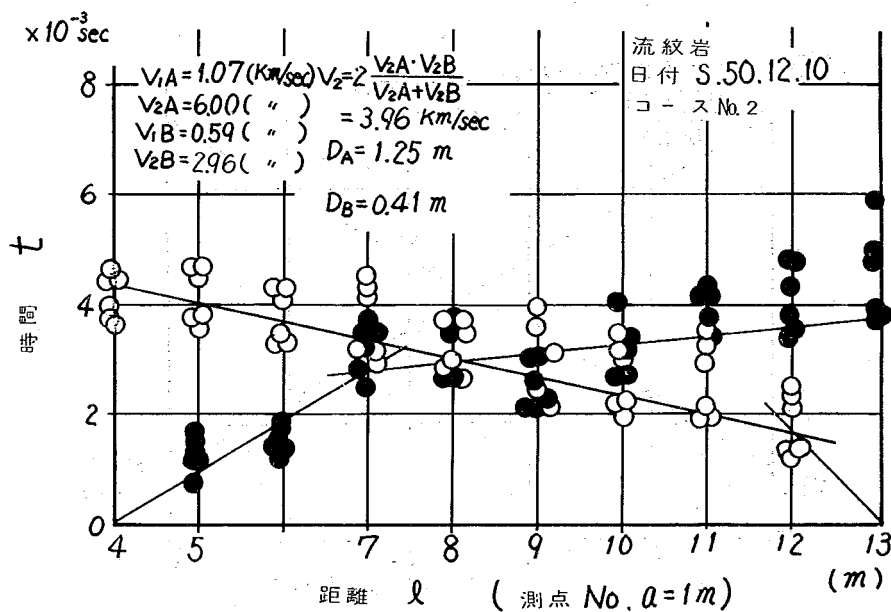


附圖-7.4 走時曲線

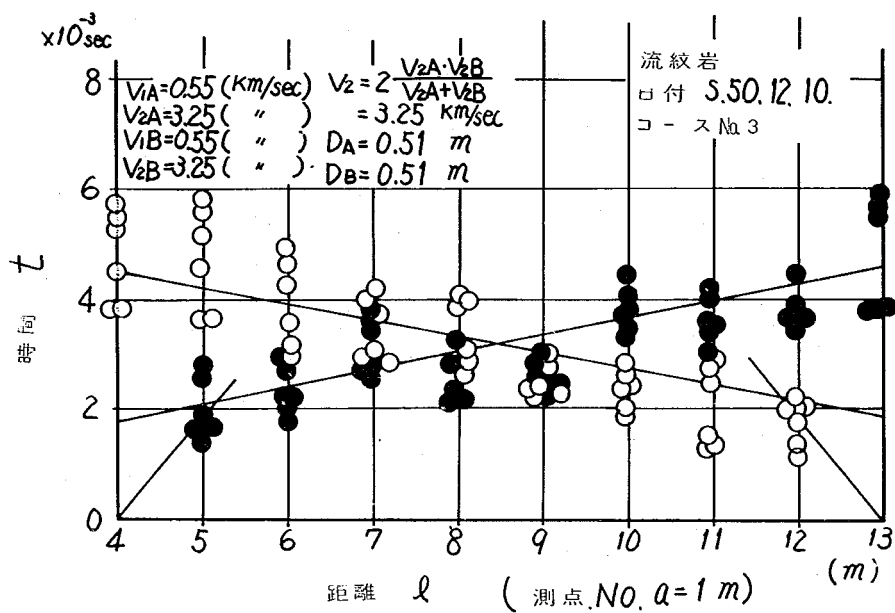




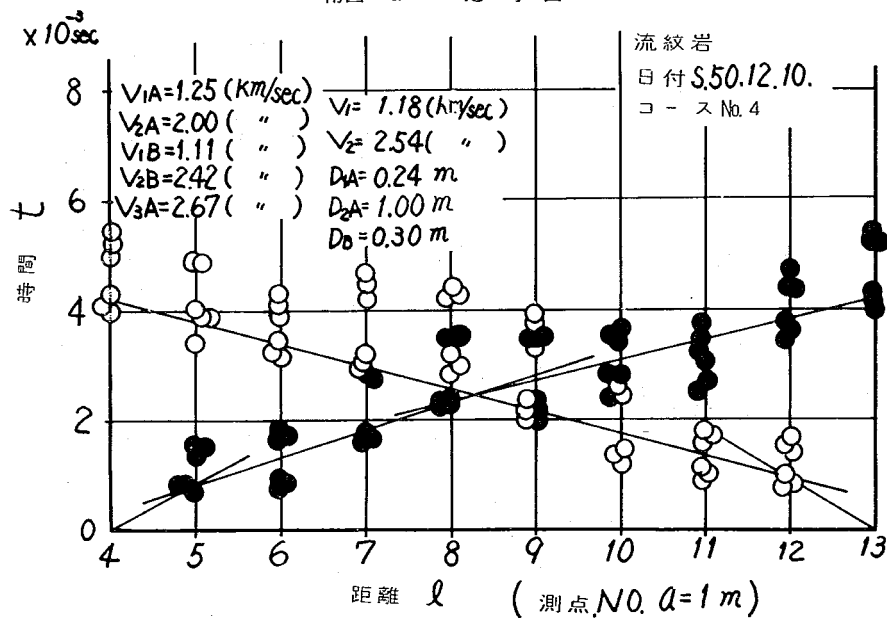
附図-8.1 走時曲線



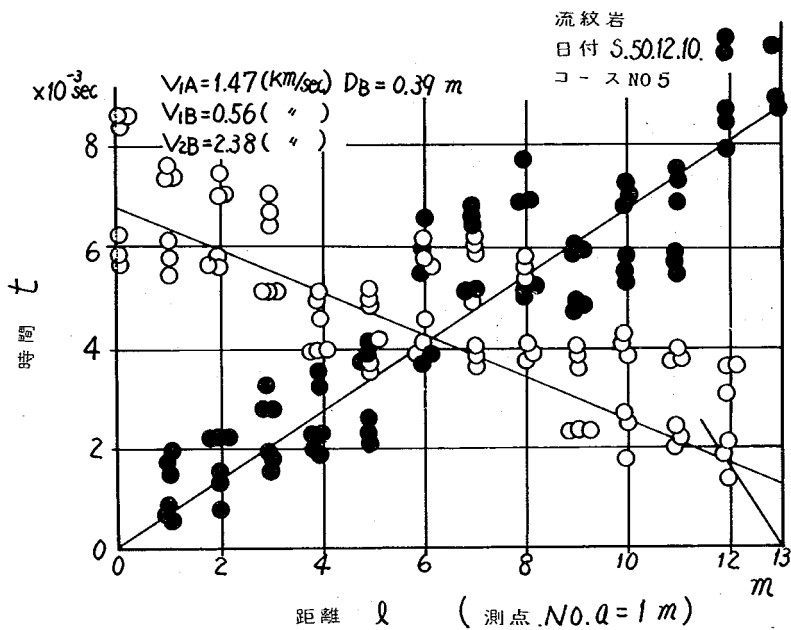
附図-8.2 走時曲線



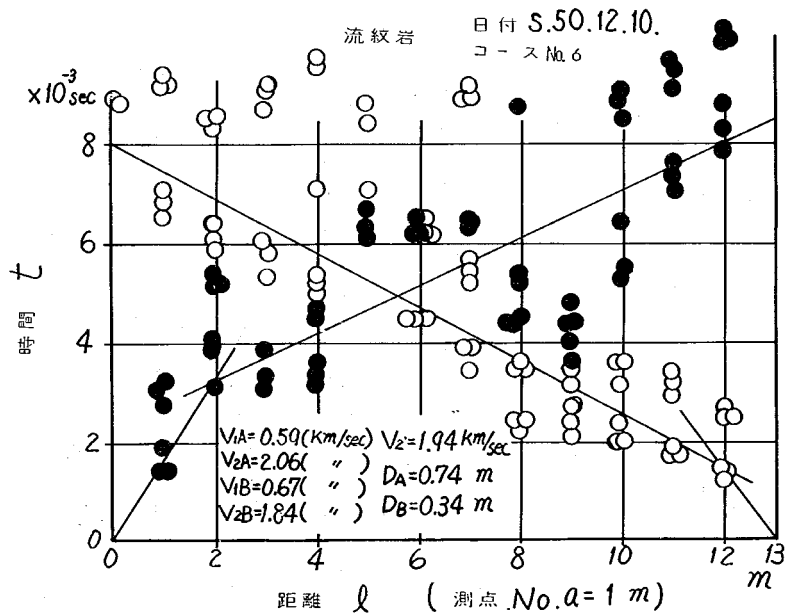
附図-8.3 走時曲線



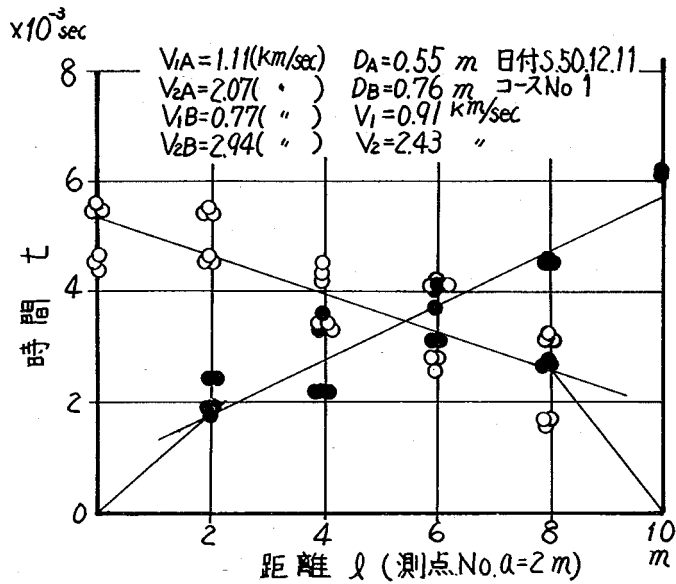
附図-8.4 走時曲線



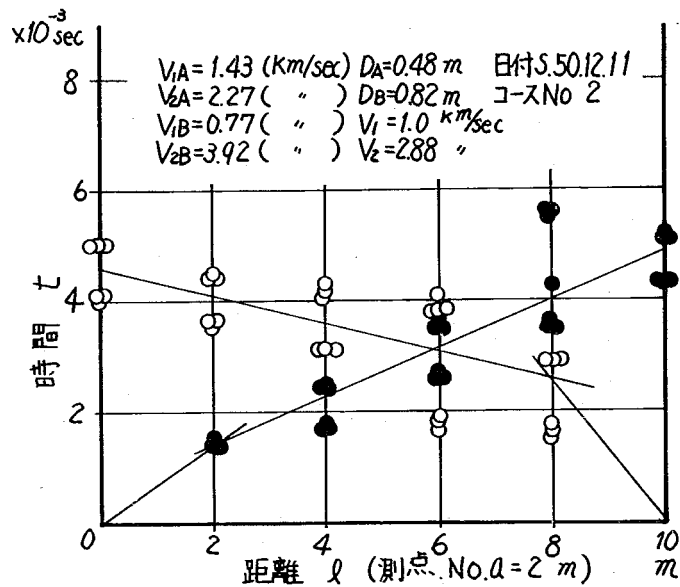
附図-8.5 走時曲線



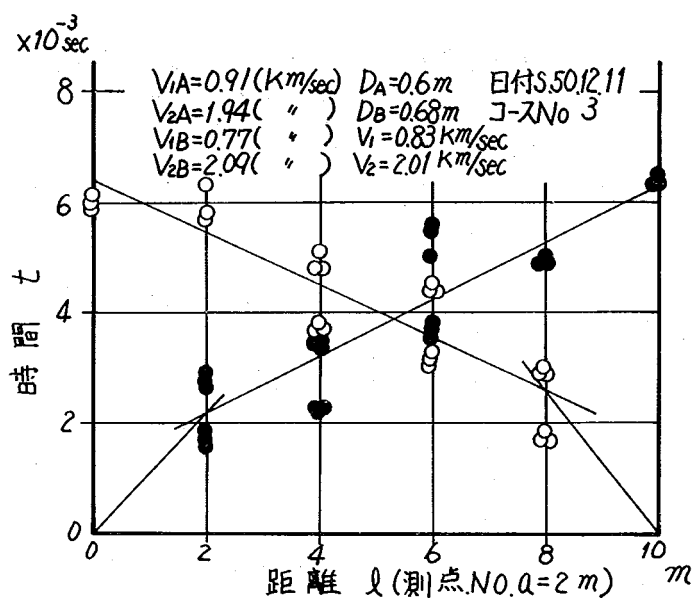
附図-8.6 走時曲線



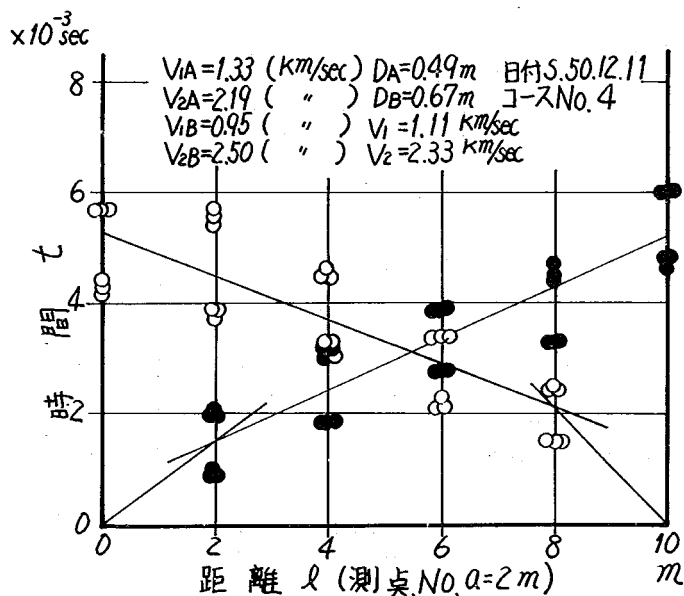
附図-9.1 走時曲線



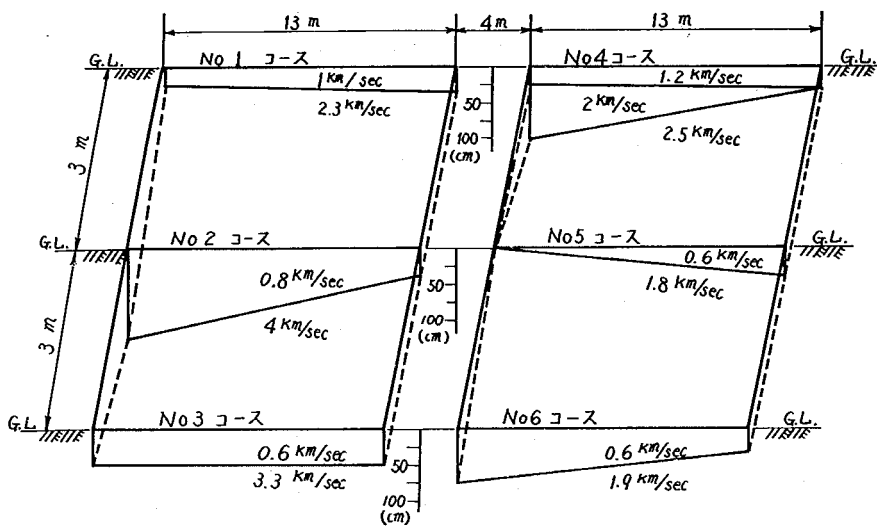
附図-9.2 走時曲線



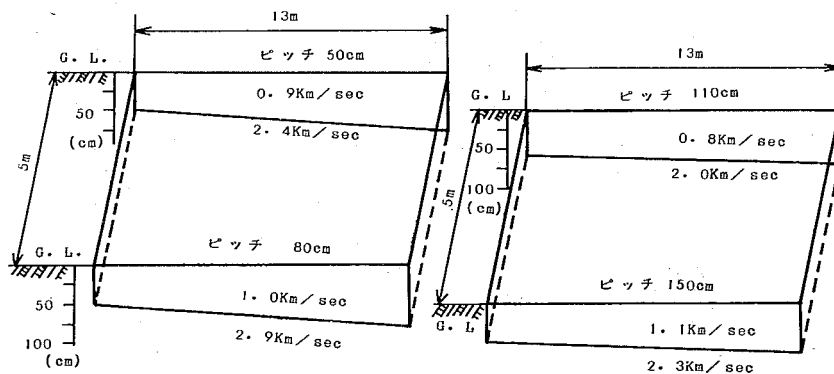
附図-9.3 走時曲線



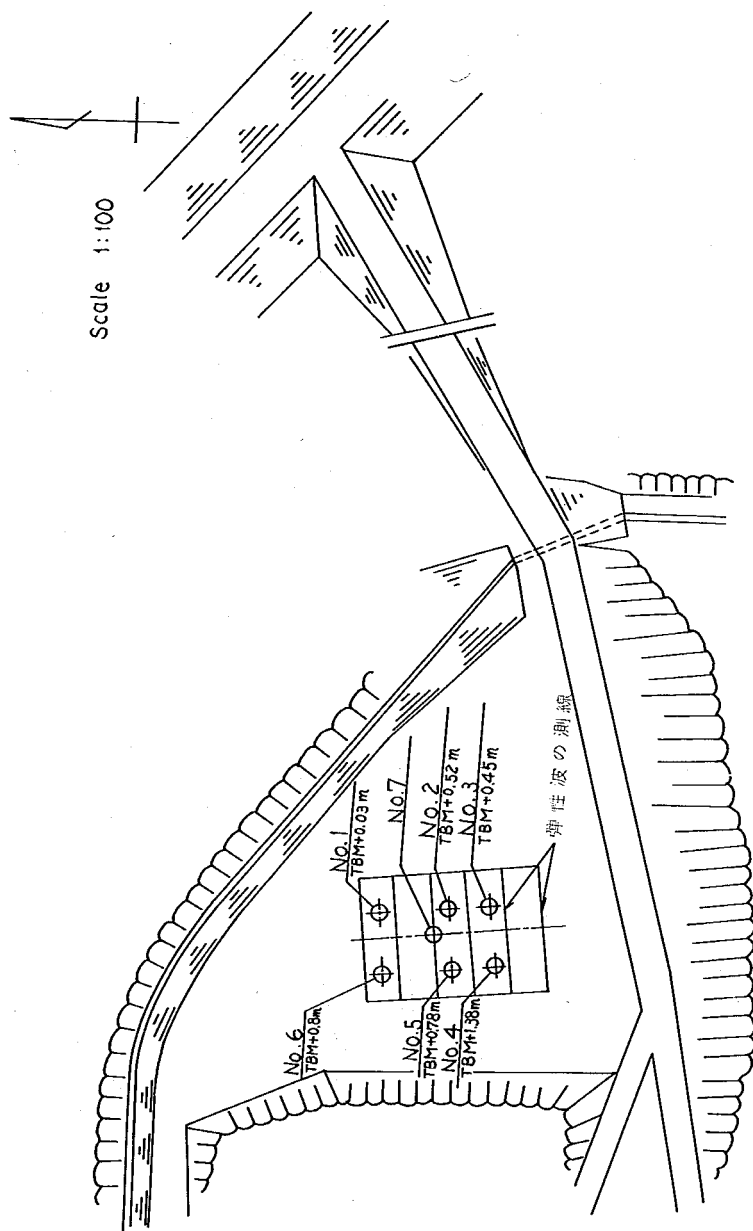
附図-9.4 走時曲線



附図-10.1 弾性波から地盤速度の推定



附図-10.2 弾性波から地盤速度の推定



附図-11 ボーリング採取地点位置図

附図-12.1 ボーリング柱状図

調査名 岩石掘削実験場地盤調査

掘削深度 G.L-2.0 m

標 高 T.B.M + 0.03 m

調査地 千葉県夷隅郡大原町大原 8513の1

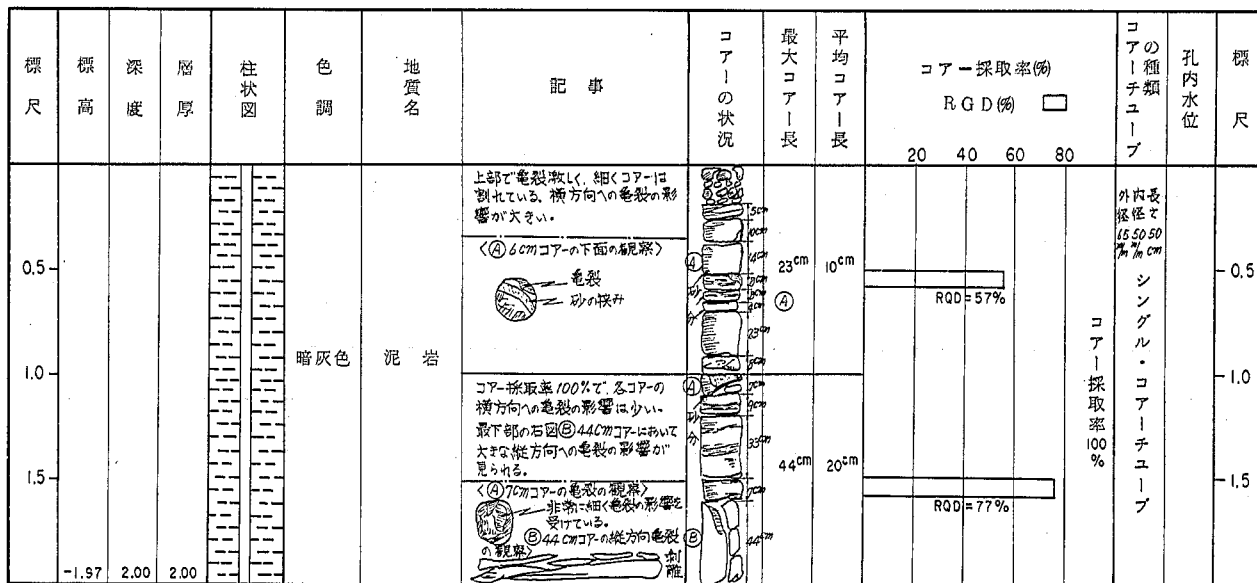
コア採取率 100%

孔内水位

ボーリング番号 NO.B-1

掘進時間

使用機械 K.A.N.O. 150



付図-12.2 ボーリング柱状図

調査名 岩石掘削実験場地盤調査

掘削深度 GL-2.0 m

標 高 TBM + 0.52 m

調査地 千葉県夷隅郡大原町大原 8513の1

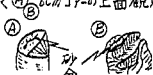
コア採取率 65%

孔内水位

ボーリング番号 NO. B-2

掘削時間

使用機械 KANO150

標尺	標高	深度	層厚	柱状図	色調	地質名	記事	コアの状況	最大コア長	平均コア長	コア採取率(例) RGD(例) ☐				この種類 コア・チューブ	孔内水位	標尺	
											20	40	60	80				
0.5							非常に亀裂が激しく、コア採取率が80%と比較的高い割にRGD値が10%と低いのはそれだけコアが細く割れているためである。 亀裂面に極細 砂分が挟まれている。 ④ 6cmコアの上面観察 ⑤ ⑥		10cm	7cm	RGD=10%				コア採取率80%		0.5	
1.0					暗灰色	泥 岩	非常に亀裂が激しく、コア採取率50%、RGD値0%と細く割れたコアよりなる。上部のコア⑦(右面)附近では亀裂面に砂の附着が見られる。 ⑦ コア上面の観察 ⑧		5cm	4cm	RGD=0%					コア採取率50%		1.0
1.5																		1.5
	-1.48	2.00	2.00															

付図-12.3 ボーリング柱状図

調査名 岩石掘削実験場地盤調査

掘削深度 G.L-2.0m

標 高 TBM+0.43m

調査地 千葉県夷隅郡大原町大原8513の1

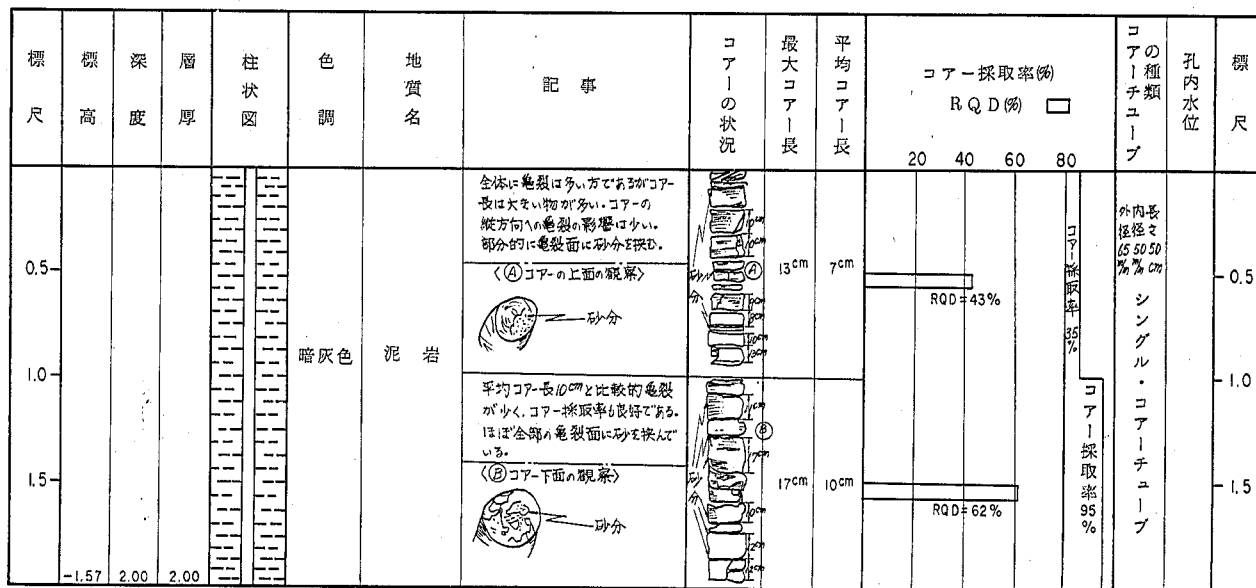
コア採取率 90%

孔内水位

ボーリング番号 NO.B-3

掘進時間

使用機械 KANO150



付図-12.4 ボーリング柱状図

調査名 岩石掘削実験場地盤調査

掘削深度 G-L-2.0 m

標 高 TBM + 1.38 m

調査地 千葉県夷隅郡大原町大原 8513 の 1

コア採取率 70 %

孔内水位

ボーリング番号 NO. B-4

掘進時間

使用機械 KANO 150

標 尺	標 高	深 度	層 厚	柱 状 図	色 調	地 質 名	記 事	コ ア ー の 状 況	最 大 コ ア ー 長	平 均 コ ア ー 長	コア採取率 (%) R Q D (%) ☐				コ ア ー の 種 類 チ ュー ブ	孔 内 水 位	標 尺
											20	40	60	80			
0.5							下部に浅い亀裂は散見。 コア採取率は著しく低下する。 右図の②付近ではほぼ粉砕 された状態に近い。	④	16cm	9cm							
1.0					暗灰色	泥 岩	④ 50cm コアの下面の観察 → 断片はコア端面に集中し 線状の亀裂が散見。 ⑤ 6cm コアの上面の観察 → ガラス状の亀裂が散見。 ⑥ 6cm コアの上面の観察 → 亀裂が散見している。	⑤			RQD=16%				コア採取率 70 %		0.5
1.5							細い、剥離に至らぬ亀裂が 各コアに数多く存在している。 右図の⑦ 7cm コア上位では粉砕状 に細く割れている。	⑦	22cm	10cm							1.0
							⑦ 7cm コアの亀裂の観察 → 細い亀裂がコア表面に は数多く存在する。 ⑧ 6cm コアの上面の観察 → 亀裂に添って割れた層 → 細亀裂が重なり合いに存在する。	⑧			RQD=22%						1.5
	-0.62	2.00	2.00					亀裂									

付図-12.5 ボーリング柱状図

調査名 岩石掘削実験場地盤調査

掘削深度 G.L-2.0m

標 高 TBM+0.78m

調査地 千葉県夷隅郡大原町大原8513の1

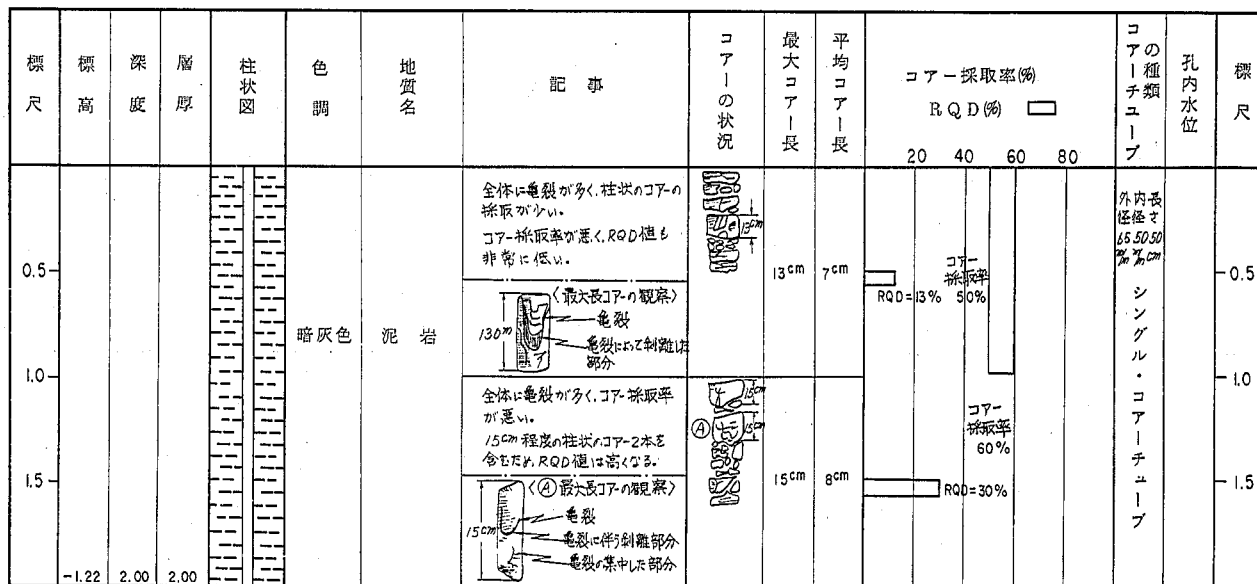
コア採取率 55%

孔内水位

ボーリング番号 NO.B-5

掘進時間

使用機械 KANO150



付図-12.6 ボーリング柱状図

調査名 岩石掘削実験場地盤調査

掘削深度 GL-2.0m

標 高 TBM+0.80m

調査地 千葉県夷隅郡大原町大原8513の1

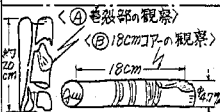
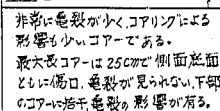
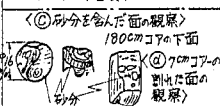
コア採取率 95%

孔内水位

ボーリング番号 NO.B-6

掘進時間

使用機械 KANO150

標尺	標高	深度	層厚	柱状図	色調	地質名	記事	コアの状況	最大コア長	平均コア長	コア採取率(%) RQD(%)	コアの種類 チューブ	孔内水位	標尺
0.5							非常に亀裂が少く、コア採取率は100%を示す。 最大コア長28cmと比較的長い柱状を呈す。		28cm	20cm	RQD=80%	コア採取率100%		0.5
1.0					暗灰色	泥岩	非常に亀裂が少く、コアリングによる影響も少ないコアである。 最大長コアは25cmで側面断面ともに亀裂、亀裂が見られず、下部のコアへは若干の亀裂の影響がある。		26cm	15cm	RQD=77%	コア採取率90%		1.0
1.5							⑤ 砂分を多く含む面を観察							1.5
	-1.20	2.00	2.00											

付図-12.7 ボーリング柱状図

調査名 岩石掘削実験場地盤調査

掘削深度 G・L-2.0m

標 高

調査地 千葉県夷隅郡大原町大原 8513 の1

コア採取率 85%

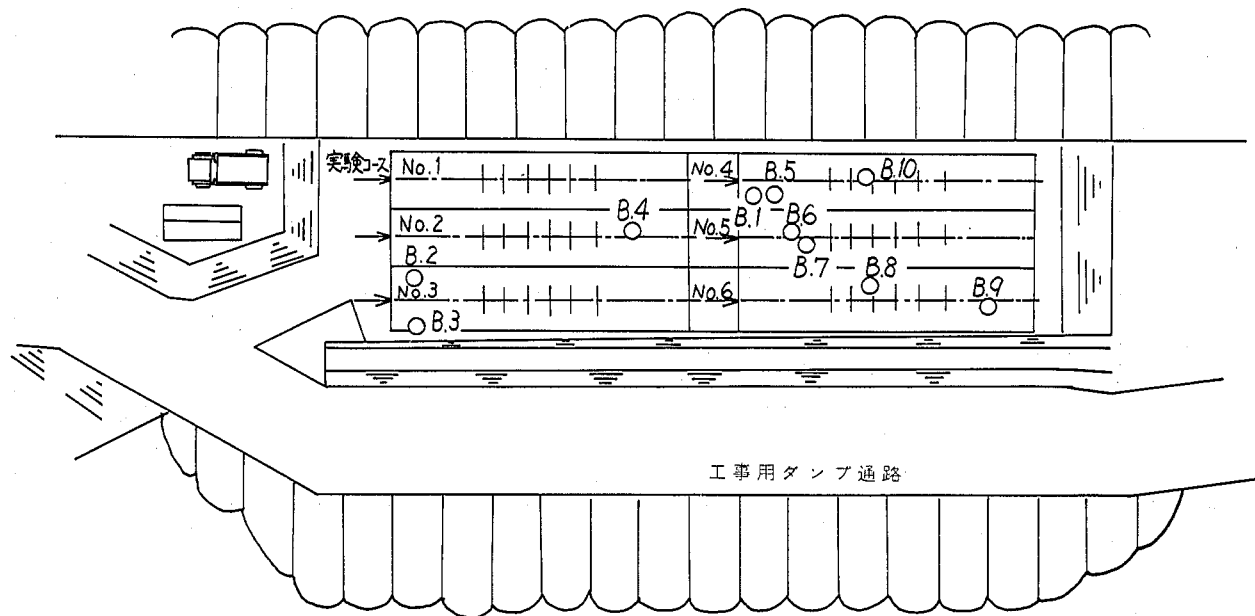
孔内水位

ボーリング番号 NO.B-7

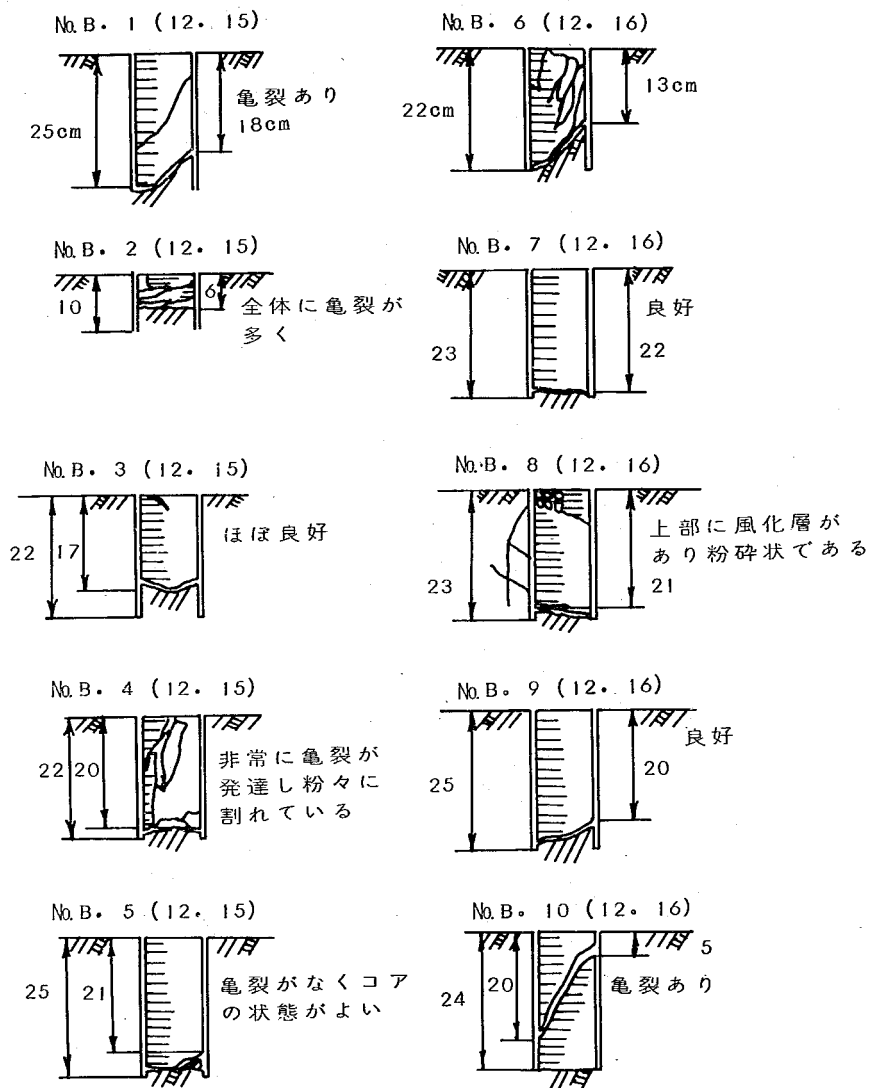
掘進時間

使用機械 KANO150

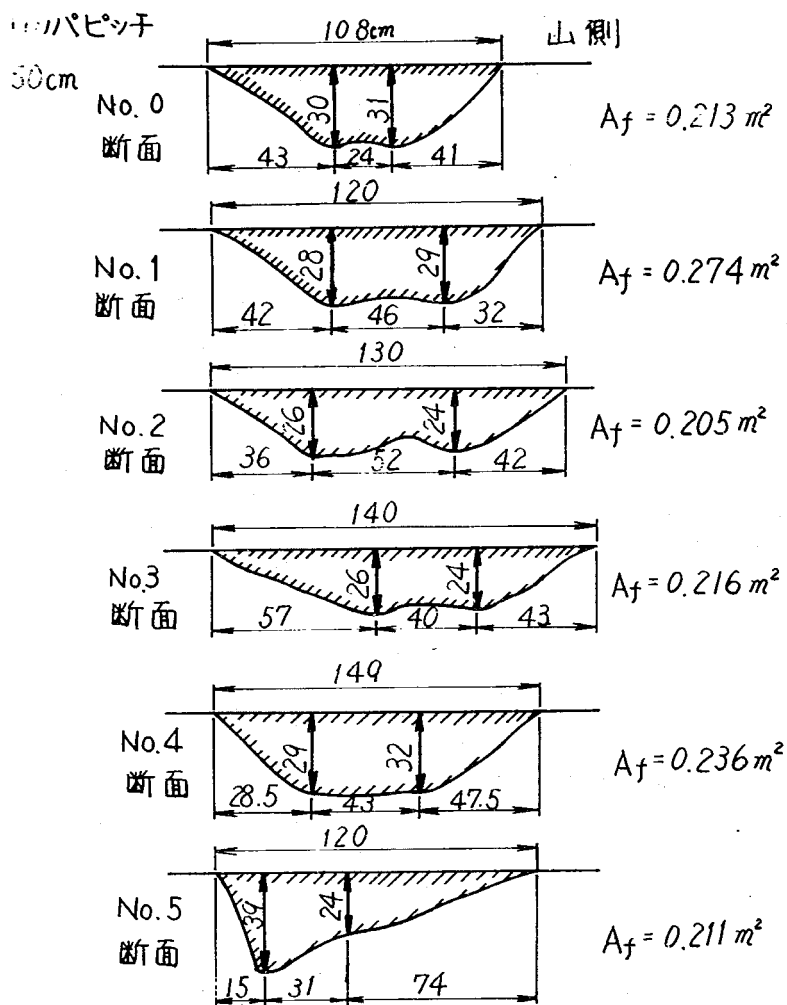
標尺	標高	深度	層厚	柱状図	色調	地質名	記事	コアの状況	最大コア長	平均コア長	コア採取率(%) R Q D (%) ☐				コアの種類 チューブ	孔内水位	標尺
											20	40	60	80			
0.5							全体は横方向へ割れたコアが多いが下部では縦横共に亀裂が散見。右図の15cmコアでは特に縦方向への亀裂が顕著である。		15cm	8cm							
1.0					暗灰色	泥岩	<①15cmコアの割れた面の観察>  凹凸の著しい割断面								コア採取率 80%	外径長さ 50	



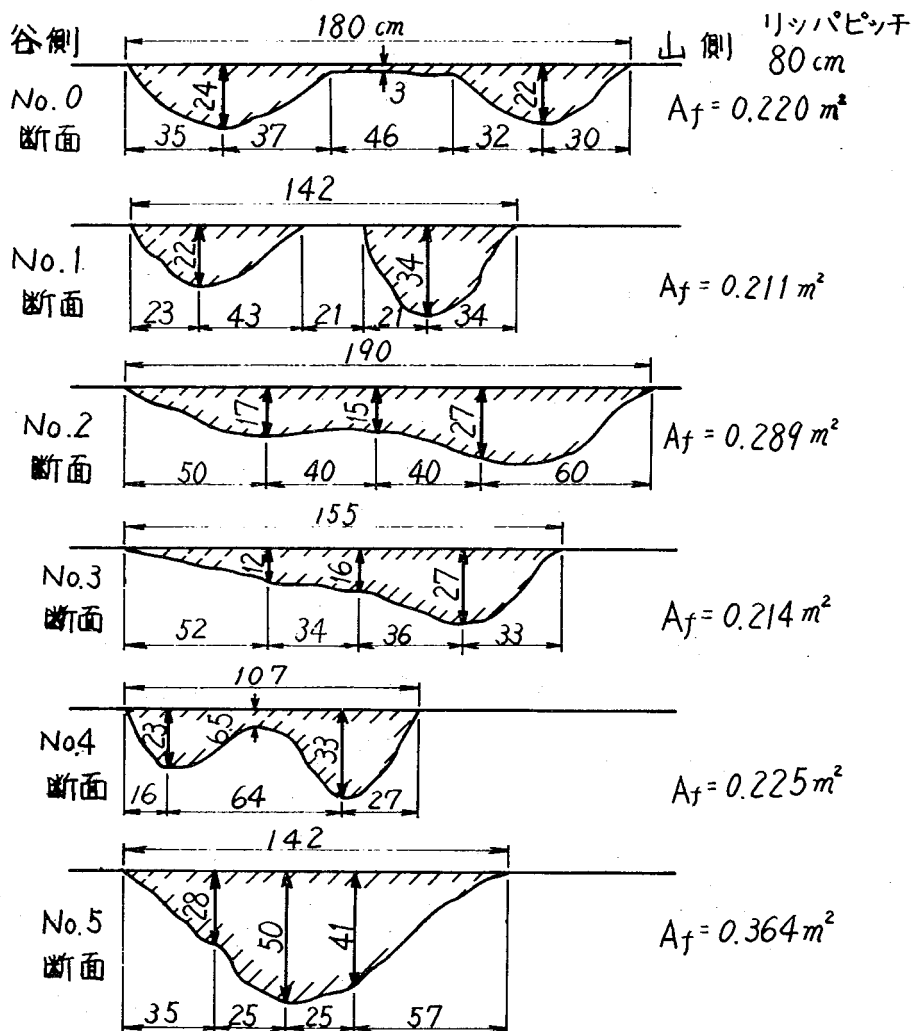
附図-13 ホーリング探採取位置図



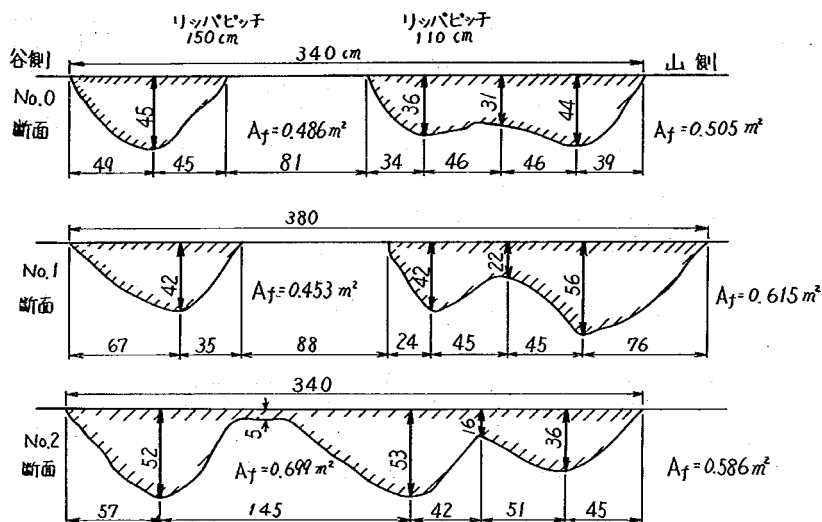
附図-14 ボーリング結果



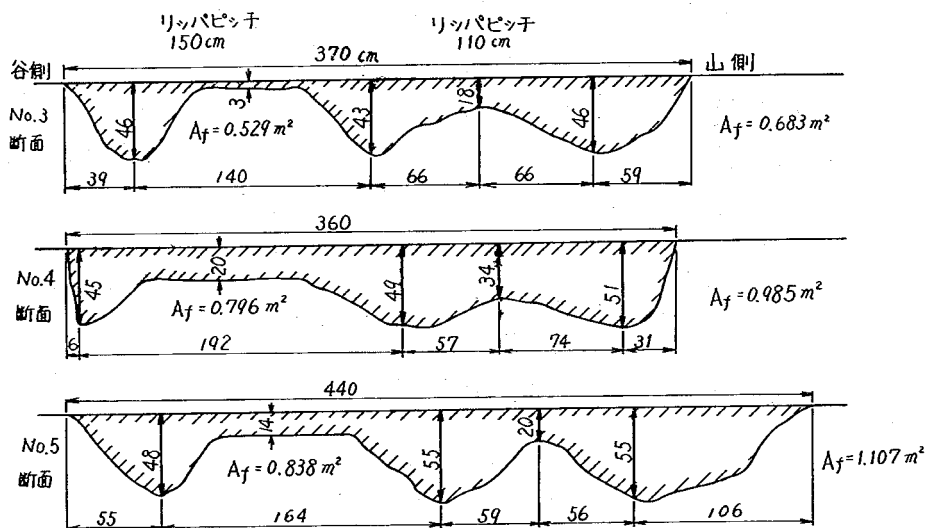
附図-1 5.1 リップパピッチによる踏坪測量結果



附図-15.2 リッパピッチによる踏坪測量結果



附図-15.3 リップパピッチによる路切測量結果



附図-15.4 リップパピッチによる路坪測量結果

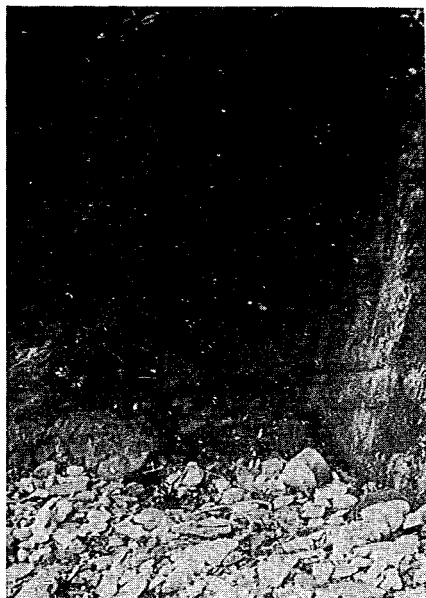
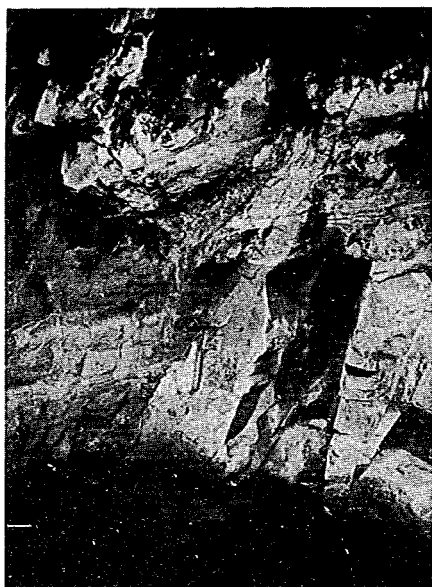


写真 - 1 実験場内の断層

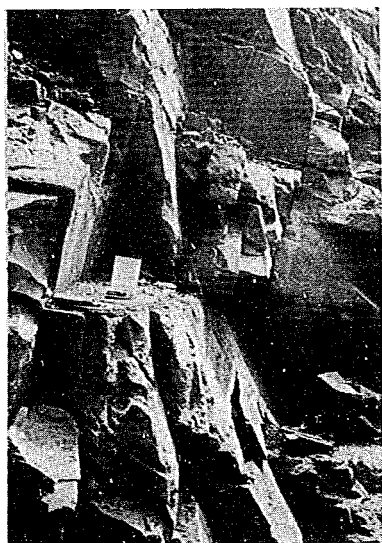


写真 - 2 実験場内の亀裂の状況

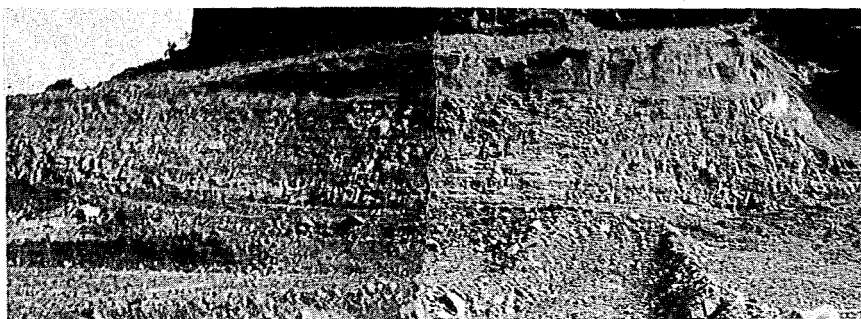


写真 - 3 調査地の露頭

リッパ掘削実験データ集計

附表-1.1

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No.1	49年 8月22日		0	49	50.	4.453	4.904	110	0.269	13.475
	時間	9時40分～	1	55	54.64	4.039	5.790	40	0.110	6.019
	天候	晴	2	55	54.64	5.456	4.881	47	0.129	7.066
	地層状態	順	3	52	59.88	7.463	7.322	48	0.124	7.473
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	52	59.88	5.154	9.407	120	0.312	18.683
	含水比(%)		5		75.19	7.646	5.754			
	リップスライ角(°)	40°	mean	52.6	59.04	5.702	6.343	73.0	0.189	10.54
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	2.51	8.75	1.521	1.744	38.6	0.09	5.4

附表-1.2

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No.2	49年 8月22日		0	37	12.18	6.893	10.231	50	0.092	1.127
	時間	10時20分～	1	24	15.48	6.309	12.181	135	0.162	2.508
	天候	晴	2	30	22.83	3.779	2.428	37	0.055	1.267
	地層状態	順	3	22	58.48	2.541	1.329	55	0.060	3.538
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	26	10.91	3.626	0.929	70	0.091	0.992
	含水比(%)		5	44	58.48	6.073	4.840	55	0.121	7.076
	リップスライ角(°)	35°	mean	30.5	29.73	4.870	5.323	67	0.097	2.75
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	8.5	22.65	1.776	4.796	35	0.04	2.34

附表-1.3

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No.3	49年 8月22日		0	45	52.08	4.771	4.722	45	0.101	5.273
	時間	10時55分～	1	62	61.73	3.425	0.509	95	0.294	18.179
	天候	晴	2	70	55.87	9.023	5.423	60	0.210	11.732
	地層状態	順	3	65	55.87	8.173	5.603	60	0.195	10.894
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	44	36.90	7.747	5.782	130	0.286	10.554
	含水比(%)		5	30	21.23	3.000	6.140	70	0.105	2.229
	リップスライ角(°)	45°	mean	52.7	47.27	6.023	4.620	76.7	0.198	9.81
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	15.4	15.27	2.610	2.287	30.9	0.08	5.54

リッパ掘削実験データ集計表

附表-1.4

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (kn)	軸力 (kn)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m^3)	掘削率 (m^3/min)
	実験年月日									
No. 4	49年 8月22日		0	21	58.48	1.806	0.946	65	0.068	4.050
	時間	13時52分～	1	16	55.87	1.943	3.632	20	0.016	0.894
	天候	晴	2	21	59.88	1.327	-0.128	50	0.052	3.144
	地層状態	順	3	23	64.94	1.806	2.558	58	0.066	4.331
	一軸強度 (Kg/cm^2)		4	8	61.73	1.122	-0.307	60	0.024	1.481
	含水比(%)		5	20	66.67	1.738	-1.381	48	0.048	3.200
	リップスライ角($^{\circ}$)	40 $^{\circ}$	mean	18.1	61.26	1.624	0.887	50.1	0.045	2.85
	設定掘削深(cm)	40cm	偏差	5.5	4.04	0.323	1.894	16.1	0.022	1.38

附表-1.5

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (kn)	軸力 (kn)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m^3)	掘削率 (m^3/min)
	実験年月日									
No. 5	49年 8月22日		0	29	57.14	1.342	-1.131	65	0.094	5.386
	時間	14時00分～	1	32	58.48	3.755	1.662	77	0.123	7.205
	天候	晴	2	34	64.94	1.519	1.591	95	0.162	10.487
	地層状態	順	3	26	63.29	3.689	4.886	41	0.053	3.373
	一軸強度 (Kg/cm^2)		4	22.5	64.94	2.672	0.767	52	0.059	3.799
	含水比(%)		5	19	63.29	1.519	-0.558	58	0.055	3.487
	リップスライ角($^{\circ}$)	40 $^{\circ}$	mean	27.1	62.01	2.416	1.203	64.7	0.091	5.62
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	5.71	3.37	1.117	2.129	19.2	0.044	2.799

附表-1.6

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (kn)	軸力 (kn)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m^3)	掘削率 (m^3/min)
	実験年月日									
No. 6	49年 8月22日		0	17	58.48	1.627	0.946	69	0.059	3.430
	時間	14時40分～	1	27	59.88	3.146	1.304	48	0.065	3.880
	天候	晴	2	32	59.88	1.966	1.662	43	0.069	4.120
	地層状態	順	3	32	58.48	1.112	-1.023	55	0.088	5.146
	一軸強度 (Kg/cm^2)		4	32	64.94	2.102	3.346	55	0.088	5.714
	含水比(%)		5	50	66.67	2.427	3.632	88	0.220	14.667
	リップスライ角($^{\circ}$)	40 $^{\circ}$	mean	31.7	61.39	2.063	1.645	59.7	0.099	6.160
	設定掘削深(cm)	30cm	偏差	10.7	3.52	6.944	1.707	16.4	0.060	4.252

リッパ掘削実験データ集計表

附表-1.7

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No. 7	49年 8月22日		0	26.5	55.87	0.474	-0.665	45	0.059	3.331
	時間	15時20分~	1	22	61.73	0.678	-0.629	62	0.068	4.547
	天候	晴	2	24	100.00	0.813	-1.632	88	0.106	10.560
	地層状態	順	3	28	63.29	1.207	-1.417	69	0.096	6.114
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	22.5	57.14	2.441	-	99	0.111	6.364
	含水比(%)		5	36.5	75.19	2.034	2.665	73	0.133	10.017
	リッパスライ角(°)	40°	mean	26.6	68.87	1.275	-3.356	72.7	0.096	6.822
	設定掘削深(cm)	40cm	偏差	5.38	16.72	0.794	1.736	19.09	0.028	2.907

附表-1.8

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No. 8	49年 8月23日		0	26	57.14	2.259	0.588	80	0.104	5.943
	時間	9時00分~	1	25	46.73	1.449	2.021	61	0.076	3.563
	天候	晴	2	32.5	59.52	3.237	2.200	103	0.167	9.963
	地層状態	逆	3	37.5	58.14	1.910	5.782	87	0.163	9.484
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	39	56.18	4.131	0.660	97	0.189	10.626
	含水比(%)		5	38.5	57.80	4.913	6.248	83	0.160	9.236
	リッパスライ角(°)	40°	mean	33.1	55.92	2.983	2.917	85.2	0.143	8.136
	設定掘削深(cm)	30cm	偏差	6.32	4.64	1.352	2.496	14.68	0.043	2.767

附表-1.9

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No. 9	49年 8月23日		0	29.5	59.17	2.399	-3.597	48	0.071	4.189
	時間	9時35分~	1	38	67.57	2.022	0.624	51	0.097	6.547
	天候	晴	2	48	59.17	3.726	4.922	112	0.269	15.905
	地層状態	逆	3	40	56.18	3.447	0.373	111	0.222	12.472
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	36	50.51	6.073	2.881	79	0.142	7.182
	含水比(%)		5	32.5	46.73	5.053	3.131	70	0.114	5.313
	リッパスライ角(°)	40°	mean	37.3	56.56	3.787	1.389	78.5	0.153	8.601
	設定掘削深(cm)	30cm	偏差	6.45	7.32	1.549	2.974	28.1	0.077	4.579

リッパ掘削実験データ集計表

附表-1.10

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日	49年 8月23日	0	42	45.66	4.075	4.098	131	0.275	12.562
No.10	時間	10時30分～	1	38	52.36	3.447	3.454	84	0.160	8.356
	天候	晴	2	29	59.17	2.050	1.484	82	0.119	7.036
	地層状態	逆	3	35.5	63.59	4.005	0.230	66	0.117	7.458
	一軸強度 (Kg/cm²)		4	43	59.52	6.520	13.770	108	0.232	13.821
	含水比(%)		5	49	58.82	9.802	10.295	93	0.228	13.400
	リッパスクライ角(°)	40°	mean	39.4	56.52	4.983	5.555	94.0	0.189	10.44
	設定掘削深(cm)	40cm	偏差	6.89	6.43	2.769	5.318	22.8	0.066	3.147

附表-1.11

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日	49年 8月23日	0	27	67.57	2.749	7.215	74	0.0999	6.750
No.11	時間	11時00分～	1	32	67.57	2.050	2.558	73	0.1168	7.892
	天候	晴	2	41	65.79	1.142	0.946	39	0.0799	5.256
	地層状態	逆	3	42.5	59.88	3.098	0.51	94	0.1997	11.958
	一軸強度 (Kg/cm²)		4	48	50.25	3.447	0.230	87	0.2088	10.492
	含水比(%)		5	49	36.76	5.053	6.678	95	0.2327	8.555
	リッパスクライ角(°)	40°	mean	39.9	57.97	2.923	2.946	77.0	0.1563	8.484
	設定掘削深(cm)	40cm	偏差	8.78	12.32	1.327	3.227	20.89	0.0649	2.445

附表-1.12

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日	49年 8月23日	0	31.5	34.84	3.028	72	72	0.1134	3.951
No.12	時間	13時15分～	1	47	30.96	3.796	57	57	0.1339	4.146
	天候	晴	2	43	27.40	4.564	64	64	0.1376	3.770
	地層状態	逆	3	48.5	29.33	2.399	80	80	0.1940	5.689
	一軸強度 (Kg/cm²)		4	35	26.25	1.980	102	102	0.1785	4.685
	含水比(%)		5	29	21.88	2.539	89	89	0.1290	2.823
	リッパスクライ角(°)	40°	mean	39.0	28.44	3.051	77.3	77.3	0.1477	4.177
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	8.28	4.405	0.967	16.6	16.6	0.0313	0.959

リッパ掘削実験データ集計表

附表-1.13

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No. 13	49年 8月23日		0	25	54.35	6.212	8.418	59	0.0737	4.005
	時間	13時45分～	1	50	58.82	10.919	16.528	65	0.1625	9.559
	天候	晴	2	65	58.48	7.008	10.080	72	0.2340	13.684
	地層状態	逆	3	55	54.95	5.332	6.498	84	0.2310	12.692
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	47	56.18	3.098	3.096	113	0.2655	14.916
	含水比(%)		5	45	63.29	6.380	10.618	78	0.1755	11.108
	リップスタイ角(°)	40°	mean	47.8	57.68	6.492	9.206	78.5	0.1904	10.994
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	132.7	3.283	2.562	4.509	19.1	0.069	3.910

附表-1.14

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No. 14	49年 8月23日		0	43	52.36	12.747	12.946	87	0.1870	9.790
	時間	14時30分～	1	53.5	53.48	7.742	4.994	175	0.4681	25.032
	天候	晴	2	—	58.14	3.988	0.946	200	—	—
	地層状態	逆	3	—	63.69	11.565	10.260	175	—	—
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	44.5	56.82	10.008	14.844	54	0.1201	6.824
	含水比(%)		5	61.5	51.55	7.046	3.275	62	0.1906	9.825
	リップスタイ角(°)	35°	mean	50.6	56.01	8.849	7.878	125.5	0.2415	12.867
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	8.606	4.556	3.226	5.611	64.93	0.1545	8.231

附表-1.15

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No. 15	49年 8月23日		0	45	64.10	4.417	4.887	72	0.1620	10.385
	時間	15時00分～	1	33	68.49	2.759	2.809	104	0.1716	11.753
	天候	晴	2	39	66.23	2.759	3.167	92	0.1794	11.881
	地層状態	逆	3	46	60.98	3.602	2.737	76	0.1748	10.658
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	37	63.29	4.162	1.842	61	0.1128	7.139
	含水比(%)		5	42.5	61.35	2.618	-0.128	57	0.1211	7.429
	リップスタイ角(°)	45°	mean	40.4	64.07	3.403	2.552	77.0	0.1536	9.874
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	5.00	2.89	0.812.7	1.650	18.1	0.029	2.093

リッパ掘削実験データ集計表

附表-1.16

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No.16	49年 8月23日		0	52	54.95	4.075	1.663	145	0.3770	20.714
	時間	15時35分～	1	43.5	54.95	3.237	4.170	67	0.1457	8.005
	天候	晴	2	55.5	60.61	4.983	3.812	63	0.1748	10.594
	地層状態	逆	3	53	53.76	5.262	4.887	48	0.1272	6.839
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	56.5	55.25	5.682	9.364	76	0.2147	11.862
	含水比(%)		5	56.5	62.11	4.285	2.916	85	0.2401	14.913
	リッパスクイ角(°)	オベマかせ	mean	52.8	56.94	4.587	4.469	80.7	0.2133	12.15
	設定掘削深(cm)		偏差	4.94	3.495	0.893	2.644	3.39	0.0905	5.077

附表-1.17

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No.17	49年 8月23日		0	58.5	54.64	4.285	5.782	90	0.2047	11.186
	時間	16時00分～	1	49	47.85	10.081	6.678	59	0.1445	6.914
	天候	晴	2	58.5	51.02	9.592	15.024	44	0.1287	6.566
	地層状態	逆	3	48	74.63	3.768	2.021	106	0.2544	18.985
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	56.5	68.49	4.145	4.887	57	0.1610	11.027
	含水比(%)		5	52	65.79	6.170	10.260	68	0.1768	11.632
	リッパスクイ角(°)	オベマかせ	mean	54.86	60.40	6.340	7.442	70.7	0.1784	11.052
	設定掘削深(cm)		偏差	4.19	10.72	2.837	4.576	2.31	0.0456	4.484

附表-1.18

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日									
No.18	49年 8月24日		0	58	56.82	6.838	4.060	97	0.2813	15.983
	時間	8時30分～	1	52	53.48	10.731	13.530	75	0.1950	10.428
	天候	晴	2	43.5	37.88	6.212	1.897	52	0.1131	4.284
	地層状態	逆	3	39.5	47.39	3.710	1.826	27	0.0533	2.527
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	36	82.64	4.544	2.358	48	0.0864	7.140
	含水比(%)		5	30	64.94	3.640	4.060	54	0.0810	5.260
	リッパスクイ角(°)	45°	mean	43.2	57.19	5.946	4.621	58.8	0.1350	7.604
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	10.36	15.43	2.685	4.480	24.2	0.0865	4.913

リッパ掘削実験データ集計表

附表-1.19

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日	49年 8月24日	0	48.5	53.48	6.834	8.919	62	0.1503	8.037
	時間	9時20分～	1	34	63.29	4.517	2.358	63	0.1071	6.778
	天候	晴	2	66	63.29	5.735	10.160	64	0.2112	13.367
	地層状態	逆	3	64.5	56.82	6.763	12.643	76	0.2451	13.926
	一軸強度 (Kg/cm ²)		4	60.5	51.55	9.002	7.500	61	0.1845	9.510
19	含水比(%)		5	58	43.86	9.144	10.692	83	0.2407	10.557
	リッパスライ角(°)	35°	mean	55.3	55.38	6.999	8.712	68.2	0.1898	10.363
	設定掘削深(cm)	50cm	偏差	12.1	7.46	1.814	3.560	9.1	0.0539	2.855

リッパ掘削実験データ集計表

附表-2.1

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日	50年12月10日	1	51	42.8	36.12	24.15	70	0.179	1.338
No.1 4コース	時間	14時45分～	2	46	25.0	36.12	24.15	68	0.156	1.164
	天候	曇	3	52	50.4	35.28	20.29	80	0.208	1.593
	地層状態	水平	4	41	21.4	15.96	2.68	56	0.115	1.945
	一軸強度 (kg/cm ²)	160～490	5	51	50.8	33.60	4.83	60	0.153	1.230
	含水比(%)	1.58～3.24	6	57	38.9	18.48	4.29	82	0.234	3.424
	リップスライ角(°)	45°	mean	49.7	38.2	29.3	13.4	69.3	0.17	1.78
	設定掘削深(cm)	約 50 cm	偏差	5.5	12.5	9.4	10.5	10.4	0.04	0.85

附表-2.2

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日	50年12月10日	1	29	46.1	25.67	19.53	78	0.113	1.178
No.2 5コース	時間	14時55分～	2	35	33.1	42.78	39.07	70	0.123	0.772
	天候	曇	3	36	38.6	10.27	2.71	85	0.153	4.023
	地層状態	水平	4	47	55.4	12.84	5.43	76	0.179	3.751
	一軸強度 (kg/cm ²)	160～490	5	43	55.0	17.11	4.34	62	0.133	2.114
	含水比(%)	1.58～3.24	6	49	45.1	18.83	6.51	60	0.147	2.107
	リップスライ角(°)	45°	mean	39.8	45.6	21.3	12.9	71.8	0.14	2.3
	設定掘削深(cm)	約 40 cm	偏差	7.8	8.8	11.8	14.2	9.7	0.02	1.32

附表-2.3

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m ³)	掘削率 (m ³ /min)
	実験年月日	50年12月10日	1	32	42.8	4.31	1.365	63	0.101	6.354
No.3 6コース	時間	15時05分～	2	38	50.8	9.47	1.365	50	0.095	2.715
	天候	曇	3	36	44.1	7.75	1.365	36	0.065	2.288
	地層状態	水平	4	24	54.5	21.53	1.365	40	0.048	5.768
	一軸強度 (kg/cm ²)	160～490	5		35.4		28.390	38	0.029	0.185
	含水比(%)	1.58～3.24	6	22	44.9	31.00	10.373	44	0.048	0.405
	リップスライ角(°)	45°	mean	27.8	45.4		7.37	45.2	0.064	2.954
	設定掘削深(cm)	約 30 cm	偏差	9.0	6.6		10.9	10.1	0.029	2.613

リッパ掘削実験データ集計表

附表-2.4

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日									
No. 4 1コース	実験年月日	50年12月10日	1	41	37.1	26.88	10.57	61	0.125	1.255
	時間	15時33分～	2	51	43.8	20.16	4.93	55	0.140	1.866
	天候	曇	3	56	51.7	31.36	9.86	80	0.224	1.935
	地層状態	水平	4	53	53.1	39.20	21.13	90	0.239	1.649
	一軸強度 (Kg/cm²)	160～490	5	55	40.3	41.44	29.59	60	0.165	1.072
	含水比(%)	1.58～3.24	6	53	47.6	16.80	4.93	110	0.292	4.696
	リップスライ角(°)	45°	mean	51.5	45.6	29.3	13.5	76.0	0.20	2.08
	設定掘削深(cm)	約50cm	偏差	5.4	6.3	10.0	9.9	21.4	0.06	1.33

附表-2.5

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日									
No. 5 2コース	実験年月日	50年12月10日	1	38	47.0	42.56	21.13	90	0.171	1.084
	時間	15時40分～	2	35	171.4	40.32	28.18	73	0.128	0.849
	天候	曇	3	36	34.1	33.60	2.82	80	0.144	1.152
	地層状態	水平	4	40	46.5	16.80	4.93	60	0.120	1.928
	一軸強度 (Kg/cm²)	160～490	5	36	44.1	14.56	12.68	90	0.162	3.019
	含水比(%)	1.58～3.24	6	41	32.5	6.72	3.52	80	0.164	6.609
	リップスライ角(°)	45°	mean	37.7	62.6	25.8	12.2	78.8	0.15	2.44
	設定掘削深(cm)	約40cm	偏差	2.42	53.7	15.0	10.5	11.3	0.02	2.19

附表-2.6

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日									
No. 6 3コース	実験年月日	50年12月10日	1	32	60.2	28.05	17.47	88	0.141	1.355
	時間	15時43分～	2	34	184.0	22.44	6.99	100	0.171	2.037
	天候	曇	3	28	89.0	17.95	4.89	56	0.078	1.172
	地層状態	水平	4	34	34.1	23.56	8.39	90	0.153	1.754
	一軸強度 (Kg/cm²)	160～490	5	32	28.2	29.17	18.17	128	0.205	1.880
	含水比(%)	1.58～3.24	6	23	43.4	28.05	23.06	88	0.101	0.981
	リップスライ角(°)	45°	mean	30.5	73.2	24.9	13.2	91.7	0.14	1.53
	設定掘削深(cm)	約30cm	偏差	4.22	58.5	4.3	7.4	23.2	0.05	0.42

リッパ掘削実験データ集計表

附表-2.7

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日	年月日								
No. 10.11	・ 時 間	時 分~	0	1. 31 2. 30	39.5 36.0	9.59 28.86	46.05 35.99	P 24 108	0.2133	2.996
	天 候		1	1. 29 2. 28	34.1 37.2	17.27 13.47	15.91 17.08	P 46 120	0.2736	4.806
	地 層 状 態		2	1. 24 2. 26	40.1 40.5	14.39 1.94	12.85 4.27	P 52 130	0.2052	6.786
	一 軸 強 度 (Kg/cm²)		3	1. 24 2. 26	36.0 36.0	12.47 6.73	12.24 6.10	P 40 140	0.2164	6.086
	含 水 比 (%)		4	1. 32 2. 29	36.2 36.0	22.07 7.70	7.95 6.71	P 43 119	0.2356	4.274
	リッパスライ角(°)		5	1. 24 2. 39	30.5 33.0	16.31 9.62	6.73 18.30	P 31 120	0.2112	4.398
	設定掘削深(cm)		mean	28.3		13.37			0.2259	7.891
			偏差	4.46		7.24			0.0255	1.359

附表-2.8

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/ps.hr)
	実験年月日	年月日								
No. 12.13	・ 時 間	時 分~	0	1. 22 2. 24	28.8 34.8	20.42 18.52	27.53 2.45	P 115 180	0.2196	3.045
	天 候		1	1. 34 2. 22	26.4 31.8	18.57 9.26	17.13 15.91	P 84 142	0.2108	4.090
	地 層 状 態		2	1. 27 2. 17	39.6 36.6	29.71 1.85	18.35 11.01	P 80 190	0.2888	4.941
	一 軸 強 度 (Kg/cm²)		3	1. 27 2. 12	38.1 36.3	18.57 9.26	9.79 3.67	P 70 155	0.2144	4.160
	含 水 比 (%)		4	1. 33 2. 23	33.9 54.6	12.07 3.70	6.12 4.28	P 64 107	0.2248	7.698
	リッパスライ角(°)		5	1. 41 2. 28	25.8 31.2	9.28 9.26	9.18 5.51	P 50 142	0.3640	10.602
	設定掘削深(cm)		mean	28.5		13.37			0.194	5.756
			偏差	4.32		7.94			0.061	2.849

附表-2.9

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日	年月日								
No. 7.8	・ 時 間	14時35分~	0	1. 44 2. 36	40.3 27.4	43.17 15.35	12.30 7.42	P 92 165	0.5048	4.658
	天 候	曇	1	1. 56 2. 42	26.4 28.4	26.86 11.51	20.30 9.28	P 90 190	0.6148	8.655
	地 層 状 態	水 平	2	1. 36 2. 51	36.5 36.2	19.19 16.31	16.61 14.85	P 93 193	0.5864	8.920
	一 軸 強 度 (Kg/cm²)	160~490	3	1. 46 2. 43	32.8 44.0	47.01 12.47	33.84 9.90	P 132 230	0.6832	6.203
	含 水 比 (%)		4	1. 51 2. 49	38.8 45.2	28.78 10.55	15.38 11.76	P 131 220	0.9852	13.527
	リッパスライ角(°)	45	5	1. 55 2. 55	36.7 32.9	22.07 15.35	14.76 8.04	P 115 276	1.1068	15.972
	設定掘削深(cm)		mean	47.0		22.39			0.7469	9.656
			偏差	6.99		12.07			0.2417	4.320

リッパ掘削実験データ集計表

附表-2.10

実験番号			位置	掘削深 (cm)	作業速度 (m/min)	剪断力 (ton)	軸力 (ton)	掘削巾 (cm)	掘削量 (m³)	掘削率 (m³/min)
	実験年月日	50月12月12日	0	43	37.6	$\frac{15.35}{50.03}$	34.12	P160 98	0.4864	4.017
No.9	時間	14時47分～	1	42	37.7	$\frac{11.51}{24.05}$	9.31	P147 134	0.4532	6.882
	天候	曇	2	52	40.4	$\frac{16.31}{15.39}$	11.17	P145 114	0.6992	11.911
	地層状態	水平	3	46	38.6	$\frac{12.47}{7.70}$	14.27	P140 78	0.5288	14.157
	一軸強度 (Kg/cm²)	160~490	4	45	33.6	$\frac{10.55}{0.96}$	11.17	P192 12	0.7956	20.361
	含水比(%)		5	48	20.0	$\frac{15.35}{9.62}$	13.03	P164 110	0.8384	18.131
ピッチ										
150 cm	リッパスライ角(°)	45	mean	46.0		16.21			0.6336	12.577
	設手掘削深(cm)		偏差	3.63		9.03			0.1659	6.326

附表-3 2次元切削試験データシート (甲)

試験期日	昭和51年	1月26日	P.M.	1時25分	天候	気温	(°C)	湿度	(%)
カッター種類	リッパ	型、	カッター巾13(mm)	すくい角(α)5°	にげ角(β)12°	チップ材質			
供試体種類	砂	岩	一軸圧縮強度	(Kg/cm ²)	試験状態	wet	dry		
加振方法	振動方向	x	振動数2950(vpm)						

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	9.17	1.250	40.47	0	0	0				0.1	10.0	0.500	0.068
1-150	9.12	6.245	29.13	1.83	0.46	0.25	2.4×10^{-1}	5.8×10^{-2}	1.3×10^{-1}	0.1	11.72	0.586	0.1108
1-180	9.25	308.50	54.1	0.57	1.50	0.63	6.5×10^{-1}	1.7×10^{-1}	7.1×10^{-2}	0.1	12.24	0.061	0.0623
1-210	9.16	365.96	174.85	0.46	0.92	0.5	4.6×10^{-2}	9.8×10^{-2}	5.0×10^{-2}	0.36	12.30	2.214	0.0698
2-0	9.15	362.21	219.92	0	0	0				1.74	20.74	29.354	0.7355
2-150	9.19	502.09	246.87	0.46	0.81	0.50	5.0×10^{-2}	8.7×10^{-2}	6.3×10^{-3}	1.86	24.30	34.689	0.7743
2-180	9.18	640.74	327.65	0.34	0.86	0.50	8.5×10^{-2}	8.6×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.60	24.66	30.128	0.5067
2-210	9.21	565.80	358.25	0.46	0.69	0.44	4.6×10^{-2}	6.9×10^{-2}	4.9×10^{-3}	2.08	27.22	41.829	0.6434
3-0	9.21	569.54	446.16	0	0	0				2.96	36.34	73.023	0.8631
3-150	9.17	639.52	445.98	0.29	0.69	0.50	3.1×10^{-2}	6.9×10^{-2}	5.0×10^{-2}	2.78	38.84	72.058	0.8903
3-180	9.30	614.51	469.97	0.229	0.46	0.25	2.3×10^{-2}	4.6×10^{-2}	2.8×10^{-3}	3.22	47.14	96.825	1.1353
3-210	9.27	624.50	493.48	0.46	0.75	0.38	4.6×10^{-2}	7.4×10^{-2}	9.3×10^{-3}	2.90	48.40	89.03	0.9941
4-0	9.29	776.88	715.35	0	0	0		8.		3.32	48.30	101.758	0.7839
4-150	9.29	788.12	936.21	0.34	0.81	0.38	3.7×10^{-2}	8.7×10^{-2}	7.7×10^{-3}	4.04	48.54	124.311	0.7317
4-180	9.26	888.04	1010.59	0.40	0.52	0.38	4.0×10^{-2}	5.1×10^{-2}	9.3×10^{-3}	4.24	48.86	131.143	0.7151
4-210	9.24	814.35	1021.98	0.34	0.81	0.38	3.8×10^{-3}	8×10^{-2}	4.1×10^{-3}	4.30	49.16	133.644	0.7206
5-0	9.45	553.31	540.60	0	0	0				7.90	52.54	258.883	2.6389

2次元切削試験データシート (甲)

№2

試験期日 昭和51年 1月27日 13時23分 (～15:15) 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 リンパ 型、 カッター巾13(mm) すくい角(α)5° にげ角(β)12° チップ材質
 供試体種類 花崗岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数2950(vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	9.22	137.39	86.50	0.117	0.079	0.126	7.3×10^{-4}	4.9×10^{-4}	7.8×10^{-4}	0.14	5.06	0.354	0.0226
1-150	9.17	387.21	138.18	0.293	0.293	0.378	3.2×10^{-2}	7.3×10^{-2}	4.1×10^{-2}		5.96	0.000	0.0119
1-180	9.21	555.81	215.38	0.456	0.456	0.415	4.8×10^{-2}	5.8×10^{-2}	4.3×10^{-2}	0.02	6.16	0.062	0.0016
1-210	9.21	718.18	284.63	0.649	0.649	0.397	6.8×10^{-2}	4.7×10^{-2}	4.2×10^{-2}	0.02	7.88	0.079	0.0015
2-0	9.23	1061.65	443.14	0.369	0.369	0.126	3.7×10^{-3}	3.3×10^{-3}	1.9×10^{-3}	0.1	10.26	0.513	0.0064
2-150	9.21	1055.41	577.65	0.72	0.72	0.34	7.9×10^{-2}	5.1×10^{-2}	3.8×10^{-2}	0.14	11.58	0.811	0.0077
2-180	9.19	936.75	721.91	0.778	0.778	0.265	8.1×10^{-2}	6.3×10^{-2}	2.8×10^{-2}	0.40	12.62	2.524	0.0193
2-210	9.16	1027.93	793.03	0.907	0.907	0.296	9.0×10^{-2}	3.6×10^{-2}	3.0×10^{-2}	0.60	14.22	8.166	0.0567
3-0	9.23	999.20	941.02	1.018	1.018	0.517	1.1×10^{-2}	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	0.64	15.10	8.992	0.0527
3-150	9.18	999.20	936.21	1.006	1.006	0.58	1.0×10^{-1}	1.1×10^{-1}	1.4×10^{-2}	1.00	17.58	15.290	0.090
3-180	9.18	999.20	907.34	0.965	0.965	0.378	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	3.8×10^{-2}	0.78	18.62	12.332	0.0749
3-210	9.14	977.98	949.36	1.071	1.071	0.353	1.1×10^{-1}	9.1×10^{-2}	3.5×10^{-2}	0.64	19.12	10.278	0.0597
4-0	9.19	957.98	963.36	0.948	0.948	0.554	8.2×10^{-3}	6.8×10^{-3}	3.1×10^{-3}	0.96	20.10	15.888	0.0909

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 1月29日 (～15=05) 13時30分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)

カッター種類 リンバ 型、カッター巾13(mm) すくい角(α)5° にげ仲(β)12° チップ材質

供試体種類 花崗岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry

加振方法 振動方向 x 振動数2950(vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	24.75	183.61	84.56	0.389	0.308	0.152	5.8×10^{-2}	4.6×10^{-2}	2.3×10^{-2}	0.04	20.26	0.665	0.0433
1-150	24.75	247.3	93.92	1.189	1.625	0.667	3.467	4.737	1.944	0.04	20.10	0.662	0.0388
1-180	24.26	683.20	319.77	0.876	0.485	0.267	2.35	8.0×10^{-2}	4.5×10^{-2}	0.10	19.70	1.635	0.0282
1-210	24.62	838.08	400.26	0.951	0.553	0.368	2.363	9.0×10^{-2}	6.0×10^{-2}	0.12	19.94	1.976	0.0272
2- 0	24.26	1002.95	639.00	0.934	0.827	0.603	1.7×10^{-1}	1.4×10^{-1}	1.0×10^{-1}	0.10	20.18	1.659	0.0138
2-150	24.38	1012.94	784.74	0.899	0.941	0.635	2.234	1.5×10^{-1}	9.9×10^{-1}	0.16	20.06	2.645	0.0186
2-180	24.26	1000.45	956.51	0.679	0.388	0.241	1.559	1.028	4.0×10^{-2}	0.26	20.10	4.303	0.0248
2-210	24.50	1027.93	1069.28	1.218	1.094	0.794	3.027	1.7×10^{-1}	1.2×10^{-1}	0.64	20.86	10.835	0.0558
3- 0	24.50	999.20	1049.82	1.154	1.453	1.226	3.01	2.1×10^{-1}	1.9×10^{-1}	0.52	21.70	9.022	0.0474
3-150	24.26	992.96	1027.42	1.641	1.57	1.365	1.9×10^{-1}	2.4×10^{-1}	1.9×10^{-1}	0.56	21.62	9.694	0.0520

2 次元 切 削 試 験 デ ー タ シ ー ト (甲)

試験期日	昭和 51 年 1 月 30 日	2 時 10 分	天候	気温 (°C)	湿度 (%)
カッター種類	MM-1 型	カッター巾	すくい角 (α)	にげ角 (β) 12°	チップ材質
供試体種類	花崗岩	一軸圧縮強度	(Kg/cm ²)	試験状態	wet dry
加振方法	振動方向 x	振動数 2950 (vpm)			

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	39.216	716.96	339.4	0.625	0.358	0.354	1.5×10^{-2}	8.9×10^{-3}	8.8×10^{-3}	0.22	21.86	3.835	0.0622
1-150	39.22	920.56	446.95	0.793	0.706	0.671	2.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1.9×10^{-2}	0.06	22.00	1.050	0.0129
1-180	39.84	1045.46	593.57	0.919	0.706	0.421	3.9×10^{-1}	1.9×10^{-2}	1.1×10^{-2}	0.12	22.02	2.101	0.0195
1-210	39.37	995.50	521.26	1.155	0.802	0.451	4.9×10^{-1}	2.3×10^{-2}	1.2×10^{-2}	0.04	22.06	0.701	0.0074
2- 0	39.37	978.01	525.35	0.898	0.644	0.305	2.3×10^{-2}	1.7×10^{-2}	7.8×10^{-3}	0.01	22.06	0.175	0.0018
2-150	39.22	1022.98	703.32	1.034	0.797	0.512	3.6×10^{-1}	2.0×10^{-2}	1.3×10^{-2}	0.06	22.12	1.054	0.0083
2-180	39.37	1010.49	790.39	1.181	0.751	0.641				0.10	22.02	1.751	0.0122
2-210	39.37	1011.74	738.47	1.155	1.271	1.159	2.0×10^{-1}	2.2×10^{-1}	0.202	0.16	22.06	2.805	0.0209
3- 0	39.37	993.00	872.44	1.181	0.859	0.763	1.8×10^{-1}	1.2×10^{-1}	1.1×10^{-1}	0.08	22.08	1.403	0.0089
3-150	40.65	993.00	827.20	1.355	1.062	0.714	0.1×10^{-1}	2.6×10^{-2}	1.8×10^{-2}	0.08	22.08	1.403	0.0093
3-180	39.53	995.50	875.43	1.286	0.904	0.763	5.5×10^{-1}	0.02×10^{-2}	1.7×10^{-2}	0.14	22.08	2.456	0.0155
3-210	39.53	993.00	792.56	1.234	1.017	0.793	4.9×10^{-1}	2.5×10^{-2}	2.0×10^{-2}	0.14	22.08	2.456	0.0171

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日	昭和51年 2月 2日	1時28分	天候	気温 (°C)	湿度 (%)
カッター種類	MM-1型	カッター巾13 (mm)	すくい角(α)5°	にげ角(β)12°	チップ材質
供試体種類	凝灰岩	一軸圧縮強度 (Kg/cm ²)	試験状態	wet	dry
加振方法	振動方向 x	振動数2950 (vpm)			

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	4.00		53.895	0	0	0				0.38	12.40	2.356	0.2409
1-150	4.00	171.12	43.62	2.006	1.811	0.325	5.721	4.239	9.5×10^{-2}	0.68	12.94	4.400	0.5557
1-180	4.0485	129.9	27.487	2.122	3.536	0.469	5.925	10.459	1.298	0.80	13.74	10.696	2.1441
1-210	39.16	137.4	30.68	2.136	3.444	0.569	7.412	10.046	1.524	0.80	18.5	12.600	2.2627
2-0	39.84	92.43	106.79	0.0708	0.069	0.075				1.90	20.82	32.129	1.6579
2-150	39.84	143.6	97.67	2.030	1.955	0.425	5.90	6.15	1.278	0.56	21.2	9.576	5.4021
2-180	40.00	281.04	148.2	1.003	1.984	0.388	2.724	5.387	1.052	3.06	23.98	56.579	2.1031
2-210	39.68	281.04	129.96	1.711	3.381	0.644	4.74	9.36	1.764	2.10	24.30	39.165	1.6606
3-0	39.84	204.84	232.68	0.0708	0.069	0.075				3.00	30.28	64.920	1.5374
3-150	39.84	224.83	198.86	0.932	2.484	0.525	2.314	6.968	1.704	2.94	33.6	68.502	1.8981
3-180	39.84	229.83	239.48	0.903	3.076	0.606	2.473	8.243	1.679	2.68	40.16	71.234	1.6390
3-210	41.32	241.07	234.17	0.974	2.891	0.613	2.84	7.746	1.747	2.74	40.52	73.322	1.7253
4-0	40.00	322.26	451.17	0.0708	0.069	0.075						112.275	1.3712
4-150	40.00	279.79	434.03	0.266	1.323	0.281	7.4×10^{-1}	3.709	7.8×10^{-1}	4.04	41.34	109.767	1.3936
4-180	39.68	286.03	485.29	0.224	1.800	0.306	6.0×10^{-1}	4.80	8.1×10^{-1}	3.94	43.4	111.108	1.2616
4-210	39.68	282.29	455.30	0.236	1.351	0.344	6.2×10^{-1}	3.559	9.1×10^{-1}	4.02	44.16	114.892	1.3905

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 2月 2日 P.M. 3時00分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 リッパ 型、 カッター巾13 (mm) すくい角(α) 5° 上げ角(β) 12° テップ材質
 供試体種類 凝 灰 岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 加振方向 x 振動数2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	24.57	76.19	126.33	0.118	0.115	0.125				0.66	1.368	8.804	0.3840
1-150	24.57	207.34	47.04	1.505	1.869	0.438	1.7×10^{-1}	2.1×10^{-1}	5.0×10^{-2}	0.44	15.66	6.305	0.7386
1-180	24.51	272.30	67.04	1.505	1.944	0.463	1.6×10^{-1}	2.1×10^{-1}	5.1×10^{-1}	0.66	17.18	9.959	0.8186
1-210	24.45	236.07	74.21	0.944	2.214	0.438	1.3×10^{-1}	6.1×10^{-1}	1.199	0.7	18.54	11.039	0.8197
2-0	24.45	186.11	183.79	0.118	0.115	0.125				1.80	20.76	30.384	0.9109
2-150	24.45	279.79	137.60	1.015	2.473	0.531	3.05	7.777	1.671	1.90	22.54	33.763	1.3520
2-180	24.57	277.29	150.01	0.649	2.214	0.45	1.7623	5.969	1.206	1.48	23.10	26.714	0.9813
2-210	24.63	298.53	276.00	0.679	2.358	0.563	1.878	6.527	1.528	3.42	25.94	66.587	1.3294
3-0	24.63	157.38	410.70	0.236	0.489	0.344	2.1×10^{-1}	4.4×10^{-1}	3.1×10^{-1}	2.58	28.82	53.948	0.7238
3-150	24.69	128.65	400.85	0.649	2.329	0.656	1.893	7.003	2.064	3.74	30.36	81.083	1.1146
3-180	24.69	103.67	371.91	0.679	2.07	0.513	1.979	5.904	1.462	2.78	31.18	61.410	0.9098
3-210	24.63	149.89	371.89	0.767	1.811	0.5	2.068	4.788	1.322	3.14	32.02	70.681	1.0473
4-0	24.69	648.10	111.75	0.472	1.782	0.563	1.420	5.361	1.692	4.66	34.96	11.747	0.9501
4-150	24.75	242.32	692.33	0.631	1.898	0.469	1.729	5.253	1.284	4.4	37.3	110.660	0.8807
4-180	24.51	213.59	696.92	0.472	2.065	0.563	1.248	5.478	1.507	3.64	41.56	99.260	0.7848

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 2月 4日 P.M. 1時20分 (〜2:28) 天候 気温 (C) 湿度 (%)
 カッター種類 MM-1 型、 カッター巾13 (mm) すくい角(α) 5° にげ角(β) 12° チップ材質
 供試体種類 凝灰岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (rpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	9.31	93.68	105.88	0.071	0.069	0.075				0.2	11.72	1.172	0.0610
1-150	9.29	97.43	79.08	1.646	1.127	0.375	1.9×10^{-1}	1.3×10^{-1}	4.3×10^{-2}	1.16	11.72	6.798	0.4736
1-180	10.02	99.92	31.06	1.516	1.455	0.34	1.6×10^{-1}	1.6×10^{-1}	3.7×10^{-2}	0.64	16.14	9.325	1.7069
1-210	9.28	153.63	27.50	1.44	1.546	0.500	1.5×10^{-1}	1.6×10^{-1}	5.3×10^{-2}	0.42	17.64	6.434	1.2891
2- 0	9.26	124.90	156.24	0.71	0.69	0.075				1.78	22.72	31.791	1.1212
2-150	9.32	181.11	98.89	1.328	1.806	0.594	1.5×10^{-1}	2.1×10^{-1}	6.8×10^{-2}	1.44	22.62	25.646	1.4290
2-180	9.24	299.77	84.53	1.062	1.754	0.594	1.2×10^{-1}	2.0×10^{-1}	6.5×10^{-2}	1.4	23.04	25.228	1.6445
2-210	9.26	337.24	124.57	0.944	1.955	0.613	1.0×10^{-1}	2.1×10^{-1}	6.5×10^{-2}	1.56	23.44	28.423	1.2572
3- 0	9.24	166.13	294.61	0.671	0.069	0.075				3.52	27.3	70.928	1.3266
3-150	9.28	307.27	252.30	0.448	2.099	0.556	5.5×10^{-2}	2.6×10^{-1}	6.8×10^{-2}	2.98	22.74	53.253	1.1811
3-180	9.29	256.06	265.59	0.448	1.748	0.563	4.9×10^{-2}	1.9×10^{-1}	6.2×10^{-2}	3.0	28.96	62.940	1.3058
3-210	9.28	106.07	305.9	0.59	1.955	0.688	6.5×10^{-2}	2.2×10^{-1}	7.6×10^{-2}	2.76	30.42	59.920	1.08
4- 0	9.28	193.60	474.75	0.071	0.069	0.075				4.1	30.92	90.039	1.0450
4-150	9.24	181.11	493.48	0.561	2.185	0.688	6.2×10^{-2}	2.4×10^{-1}	7.6×10^{-2}	4.6	30.62	100.326	1.1202
4-180	9.25	218.72	451.72	0.578	1.886	0.563	6.2×10^{-2}	2.0×10^{-1}	6.1×10^{-2}	4.06	30.5	88.305	1.0772
4-210													

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 2月 5日 P.M. 2時18分 (〜3:16) 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 MM-1 型、 カッター巾13 (mm) すくい角(α)5° 上げ角(β)12° チップ材質
 供試体種類 モルタル 一軸圧縮強度 (Kg/cm^2) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	9.22	568.32	249.58	0.153	0.068	0.676				0.2	11.80	1.1800	0.0261
1-150	9.28	736.95	261.34	0.566	0.77	0.603	6.5×10^{-2}	8.5×10^{-2}	6.5×10^{-2}	0.22	12.32	1.3552	0.0286
1-180	9.20	920.56	369.96	0.531	0.314	0.229	5.5×10^{-2}	3.5×10^{-2}	2.4×10^{-2}	0.36	13.38	4.7484	0.0707
1-210	9.29	1011.74	392.96	0.472	0.371	0.267	4.9×10^{-2}	3.8×10^{-2}	2.8×10^{-2}	0.56	15.82	8.0696	0.1132
2- 0	9.24	1155.38	538.43	0.649	0.770	0.508	4.6×10^{-3}	5.5×10^{-3}	3.7×10^{-3}	0.78	19.3	12.5970	0.1289
2-150	9.22	1096.67	617.82	0.661	0.616	0.286	7.5×10^{-2}	7.0×10^{-2}	3.3×10^{-2}	1.28	22.18	22.5152	0.2008
2-180	9.18	1024.23	638.89	0.885	0.798	0.508	9.4×10^{-2}	8.5×10^{-2}	5.4×10^{-2}	1.52	26.64	30.1264	0.2598
2-210	9.23	999.25	690.80	0.885	0.599	0.508	9.2×10^{-2}	6.2×10^{-2}	5.3×10^{-2}	1.98	27.66	40.2534	0.3211
3- 0	9.28	999.25	864.03	1.168	0.844	0.826				2.44	26.46	48.1412	0.3070
3-150	9.30	999.25	965.08	1.446	1.169	0.762	1.6×10^{-1}	1.3×10^{-1}	8.2×10^{-2}	2.82	32.28	63.8448	0.3645
3-180	9.71	968.02	958.99	1.564	1.65	0.825	1.6×10^{-1}	1.7×10^{-1}	8.6×10^{-2}	2.7	37.06	67.5810	0.3883
3-210	9.29	980.51	959.50	2.213	1.168	0.953	2.3×10^{-1}	1.2×10^{-1}	1.0×10^{-1}	3.3	39.08	85.9320	0.4935
4- 0	9.01	1080.44	679.71	1.387	0.941	0.572				4.4			

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 2月6日 P.M. 1時18分 (～2:08) 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 MM-1 型、 カッター巾13 (mm) すくい角 (α) 5° 逃げ角 (β) 12° チップ材質
 供試体種類 モルタル 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	24.51	256	160	0.354	0.278	0.125	2.4×10^{-1}	1.9×10^{-1}	8.6×10^{-2}	0.08	1.08	0.432	0.0149
1-150			180	0.561	0.416	0.238	1.552	1.16	6.7×10^{-1}	0.12	11.8	0.708	0.0217
1-180			240	0.696	0.433	0.20	1.855	1.154	2.7×10^{-2}	0.16	12.6	1.008	0.0231
1-210			275	0.59	0.461	0.244	1.466	1.145	6.5×10^{-1}	0.26	12.92	1.6796	0.0337
2-0			450	0.631	0.550	0.281	9.8×10^{-2}	8.5×10^{-2}	5.4×10^{-2}	0.28	13.48	3.7072	0.0231
2-150	24.45	995.5	565.53	0.797	0.722	0.363	3.5×10^{-1}	3.5×10^{-1}		0.8	18.1	12.4400	0.1212
2-180	24.51	940.54	627.75	0.974	0.833	0.656	4.2×10^{-1}	3.3×10^{-1}	2.2×10^{-2}	1.34	21.54	23.1418	0.2031
2-210	24.45	934.30	663.10	0.856	0.888	0.75	3.4×10^{-1}	3.5×10^{-1}	2.1×10^{-2}	1.84	23.46	33.5432	0.2787
3-0	24.4	940.54	771.15	1.021	1.138	0.775	2.5×10^{-2}	3.0×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.22	28.8	46.3980	0.3315
3-150	24.21	940.54	851.03	0.867	0.988	0.594	3.8×10^{-1}	2.8×10^{-2}	1.6×10^{-2}	2.3	31.9	51.6350	0.3343
3-180	24.39	938.04	957.75	1.092	0.971	0.813	4.7×10^{-1}	3.9×10^{-1}	2.4×10^{-2}	2.48	32.02	55.8248	0.3212
3-210	24.39	930.55	1005.56	1.387	0.860	0.781	5.5×10^{-1}	3.4×10^{-1}	1.9×10^{-2}	2.72	41.5	74.1200	0.4062
4-0	24.51	936.80	896.10	1.741	2.891	1.00	1.1×10^{-1}	7.2×10^{-2}	7.9×10^{-2}	3.4	54.8	115.2600	0.7087
4-150	24.57	950.53	934.20	3.33	2.387	0.656	3.774	9.5×10^{-1}	1.6×10^{-2}	3.42			

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 2月 6日 P.M. 1時18分 (～2:08) 天候 気温 (℃) 湿度 (%)
 カッター種類 MM-1 型、 カッター巾13 (mm) すくい角 (α) 5° にげ角 (β) 12° チップ材質
 供試体種類 モルタル 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	39.53	242.32	191.88	0.177	0.128	0.125	8.3×10^{-2}	5.8×10^{-2}		0.14	11.96	0.8372	0.0240
1-150	39.37	604.55	315.56	0.325	0.167	0.075	3.56	1.825		0.14	12.2	0.8540	0.0149
1-180	39.37	780.66	393.07	0.354	0.167	0.083	1.5×10^{-1}	7.1×10^{-1}		0.36	12.72	2.2896	0.0321
1-210	39.37	913.06	463.00	0.307	0.178	0.125	1.4×10^{-1}	8.3×10^{-1}		0.42	13.2	5.5020	0.0655
2-0	39.53	966.77	520.07	0.325	0.194	0.250				0.82	19.5	13.3250	0.1412
2-150	39.53	1025.48	568.69	0.501	0.305	0.269	1.362	8.3×10^{-1}	4.2×10^{-2}	1.38	21.82	24.0258	0.2328
2-180	39.37	961.78	618.03	0.684	0.266	0.569	2.024	0.662	8.8×10^{-2}	1.72	23.4	31.3040	0.2790
2-210	39.37	945.54	674.15	0.59	0.389	0.375	1.774	1.020	6.2×10^{-2}	2.04	25.42	39.1884	0.3203
3-0	39.22	910.56	743.93	0.767	0.416	0.50	7.624	6.5×10^{-2}	1.1×10^{-1}	2.10	37.36	52.8780	0.3917
3-150	39.68	911.81	825.78	0.679	0.416	0.5	1.686	1.035	8.2×10^{-2}	2.36	39.22	61.6196	0.4112
3-180	39.22	904.32	955.40	0.944	0.611	0.844	2.648	1.673	1.7×10^{-1}	2.5	41.42	68.0250	0.3923
3-210	39.22	895.58	1019.52	1.741	0.856	1.656	4.33	2.126	2.6×10^{-1}	2.7	41.4	73.4400	0.3969
4-0	39.53	918.06	1026.22	2.449	1.166	1.969	6.8×10^{-1}	3.4×10^{-1}	3.6×10^{-1}	3.44	43.98	98.0056	0.5262
4-150	38.91	911.81	1022.11	3.776	2.775	1.438	2.346	2.48	3.2×10^{-1}	3.12	44.1	89.0760	0.4802

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 2月23日 P.M. 2時00分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 リッパ 型、 カッター巾 13 (mm) すくい角 (α) 5° 逃げ角 (β) 12° チップ材質
 供試体種類 大理石 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	39.84	34.13	34.13	0.402	0.198	0.065	0.020	0.011	0.003	0.2	11.78	1.1780	0.0691
1-150	40.00	124.97	124.97	1.106	1.836	0.793	0.217	0.613	0.265	0.22	12.48	1.3728	0.0537
1-180	40.00	186.41	186.41	0.957	1.578	0.878	0.298	0.492	0.274	0.38	14.58	5.2402	0.1585
1-210	40.00	238.40	238.40	1.056	1.134	0.767	0.153	0.367	0.254	0.48	15.94	6.9456	0.1576
2-0	39.84	373.35	373.35	0.319	0.174		0.015	0.09		0.48	18.12	7.4688	0.1115
2-150	39.84	487.29	487.29	0.484	0.210	0.182	1.326	0.143	0.065	0.92	23.02	16.5692	0.1603
2-180	39.68	454.21	454.21	0.391	0.312	0.182	1.053	0.828	0.098	1.30	22.7	23.2570	
2-210	39.53	457.36	457.36	0.539	0.342	0.273	0.563	0.300	0.109	1.5	24.5	28.1250	0.2230
3-0	39.68	416.40	416.40	0.275	0.630	0.715	0.046	0.065	12.188	1.68	27.44	33.9696	0.2359
3-150	39.53	443.71	443.71	0.501	0.630	0.819	0.078	0.090	0.116	1.98	30.84	43.4016	0.2690
3-180	40.00	445.81	445.81	0.633	0.678	0.754	0.207	0.113	0.126	2.76	33.0	63.48	0.3724
3-210	40.00	439.51	439.51	0.682	0.900	1.073	0.099	0.147	0.176	2.92		3.6992	
4-0	39.84			0.303	0.420	0.436	0.052	0.071	0.074	4.04		8.1608	

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年、2月24日 A.M. 10時37分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 リッパ 型、 カッター巾 すくい角(α) 5° にげ角(β) 12° チップ材質
 供試体種類 大理石 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (mm ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	24.69	72.99	76.32	0.204	0.156	0.169	0.0013	0.001	0.001	0.1	6.8	0.3400	0.0245
1-150	24.57	212.14	194.21	0.737	0.444	0.429	0.078	0.047	0.046	0.06	8.5	0.2550	0.0072
1-180	24.63	287.75	326.39	0.682	0.294	0.228	0.071	0.031	0.024	0.18	11.34	1.0206	0.0172
1-210	24.63	370.20	387.48	0.583	0.348	0.195	0.060	0.035	0.020	0.56	14.14	7.5992	0.1081
2-0	24.57	517.75	544.01	0.726	0.378	0.169	0.063	0.019	0.026	0.62	16.02	8.9962	0.0911
2-150	24.51	644.82	682.85	0.484	0.210	0.202	1.326	0.575	0.031	0.8	17.98	12.3920	0.1000
2-180	24.57	406.95	758.64	0.391	0.198	0.215	0.510	0.521	0.033	0.98	19.82	16.0818	0.1168
2-210	24.57	470.49	824.22	0.424	0.234	0.228	0.991	0.611	0.039	0.98	20.92	16.62	0.1111
3-0	24.45	547.15	898.68	0.352	0.252	0.319	0.060	0.043	0.054	1.52	22.2	26.7520	0.1640
3-150	24.39	608.59	949.78	0.545	0.402	0.676	1.507	1.101	0.115	1.54	23.58	28.17	0.1634
3-180	24.63	859.59	978.16	0.53	0.414	0.384	1.430	0.073	0.068	1.78	29.1	37.47	0.2111
3-210	24.57	670.03	945.06	0.732	0.672	0.715	1.941	0.115	0.122	2.08	24.66	39.1664	0.2284

2 次元 切 削 試 験 デ ー タ シ ー ト (甲)

試験期日	昭和51年	3月10日	P.M.	4時10分	天候	気温	(°C)	湿度	(%)
カッター種類	リッパ	型、	カッター巾13(mm)	すくい角(α)5°	にげ角(β)12°	チップ材質			
供試体種類	大理石	一軸圧縮強度	(Kg/cm ²)	試験状態	wet	dry			
加振方法	振動方向	x	振動数2950(vpm)						

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	7.66	35.71	130.54	0.215	0.319	0.122	1.7×10^{-3}	2.5×10^{-3}	0.9×10^{-3}	0.1	9	0.4500	0.019
1-150	9.21	6.30	174.3	0.599	0.353	0.124	6.6×10^{-2}	3.89×10^{-2}	1.37×10^{-2}	0.2	10.5	1.0500	0.0332
1-180	9.22	103.97	261.64	0.706	0.604	0.229	7.4×10^{-2}	6.4×10^{-2}		0.2	11.8	1.1800	0.0249
1-210	9.23	119.73	338.90	0.644	0.661	0.260	6.4×10^{-2}	6.6×10^{-2}		0.5	13.2	6.5500	0.1065
2-0	9.24	115.52	452.40	0.859	0.661	0.260	6.8×10^{-3}	5.3×10^{-3}	2.1×10^{-3}	0.9	16.4	13.2300	0.1614
2-150	9.20	115.52	552.49	0.853	0.638	0.298	6.3×10^{-2}	4.7×10^{-2}		1.16	18.22	18.11	0.18
2-180	9.17	110.27	648.64	0.864	0.695	0.267	9.1×10^{-2}	1.0×10^{-1}	5.3×10^{-2}	1.42	21.1	24.21	0.21
2-210	9.14	107.12	708.25	0.836	0.53	0.236	1.9×10^{-1}	9.1×10^{-2}	3.9×10^{-2}	1.28	21.74	22.23	0.17
3-0	9.17	105.02	871.83	0.480	0.599	0.589				1.72	26.26	33.76	0.21
3-150	8.49	89.27	946.62	0.763	0.536	0.217				1.98	26.08	38.69	0.23
3-180	9.13	46.2	1057.52	0.797	0.587	0.304	9.0×10^{-1}	8.1×10^{-2}	4.2×10^{-2}	2.38	27.26	47.91	0.25
3-210	9.15	60.91	973.08	0.763	0.735	0.304	2.0×10^{-1}	9.6×10^{-2}	4.3×10^{-2}	3.26	30.4	70.74	0.40
4-0	9.09	92.42	659.88	1.017	0.838	0.316				6.72	34.4	159.26	1.33
4-150	9.14	110.27	384.94	0.424	0.314	0.149	2.0×10^{-1}	6.4×10^{-2}	2.6×10^{-2}	6.32	34.5	150.10	2.15
4-180	9.17	69.31	338.04	0.599	0.405	0.167	2.3×10^{-1}	1.9×10^{-1}	2.2×10^{-2}	5.7	36.32	140.56	2.29

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月11日 P.M. 2時21分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 型、 カッター巾 すくい角(α) 5° にげ角(β) 12° チップ材質
 供試体種類 砂 岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	9.23	196.39	147.74							0.2	7.2	0.7200	0.0269
1-150	9.21	259.40	211.38	0.216	0.274	0.113	6.1×10^{-1}	7.7×10^{-1}		0.4	12.4	2.4800	0.0646
1-180	9.23	267.81	231.74	0.182	0.245	0.088	1.1×10^{-1}	6.6×10^{-1}	2.0×10^{-2}	0.66	15.58	9.431	0.224
1-210	9.23	293.01	245.64	0.17	0.268	0.063	4.7×10^{-2}	7.0×10^{-1}		1.84	26.54	36.377	0.816
2-0	9.27	325.57	284.70	0.171	0.137	0.114	2.4×10^{-2}			1.74	26.75	34.58	0.670
2-150	9.26	283.56	293.60	0.365	0.216	0.156	1.1×10^{-1}	6.0×10^{-1}	3.0×10^{-2}	2.32	27.6	47.096	0.884
2-180	9.24	302.46	296.81	0.222	0.274	0.1	7.0×10^{-2}	7.3×10^{-1}	2.2×10^{-2}	1.8	27.46	36.414	0.676
2-210	9.22	352.87	439.15	0.2288	0.359	0.163	6.7×10^{-2}	9.4×10^{-1}	3.1×10^{-2}	2.46	28.8	51.414	0.645
3-0	9.39	332.92	607.23	0.171	0.137	0.169	2.7×10^{-2}	2.5×10^{-2}	2.6×10^{-2}	3.48	38.78	90.097	0.818
3-150	9.35	306.66	476.86	0.274	0.302	0.15	1.1×10^{-1}	8.4×10^{-1}	2.6×10^{-2}	2.94	40.68	78.910	0.912
3-180	9.37	335.02	376.29	0.279	0.33	0.175	8.7×10^{-2}	8.7×10^{-1}	3.0×10^{-2}	3.0	41.76	82.140	1.203

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月11日 P.M. 3時50分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 リッパ 型、 カッター巾13 (mm) すくい角 (α) 5° にげ角 (β) 12° チップ材質
 供試体種類 砂 岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0													
1-150	39.68	85.07	156.41	0.428	4.104	1.075	1.4×10^{-1}	11.97	7.9×10^{-1}	0.08	8.90	0.3560	0.0125
1-180	39.84	113.42	188.66	1.881	3.369	0.831	6.2×10^{-1}	9.326	2.6×10^{-1}	0.10	10.36	0.5180	0.0151
1-210	39.84	187.99	215.93	1.642	4.315	0.906	0.464	11.562	1.518	0.26	11.56	1.5028	0.0383
2- 0	40.00	262.56	260.52	0.485	0.228	0.239	6.2×10^{-2}	2.7×10^{-2}	3.7×10^{-2}	1.66	22.44	29.4152	0.6222
2-150	40.00	251.00	203.54	1.818	5.301	1.500	6.1×10^{-1}	15.94	2.8×10^{-1}	2.62	37.18	65.7358	1.7796
2-180	40.00	297.21	242.83	1.374	2.405	0.688	1.6×10^{-1}	6.41	1.2×10^{-1}	1.16	37.22	29.1276	0.6610
2-210	40.00	335.02	255.03	1.368	1.938	0.85	3.97×10^{-1}	5.047	1.4×10^{-1}	1.84	37.36	46.3312	1.0010
3- 0	40.00	440.04	287.63	1.02	0.502	0.387	1.4×10^{-2}	6.6×10^{-2}	5.1×10^{-2}	2.68	37.42	67.5628	1.2943
3-150	40.00	506.21	259.90	1.636	2.736	0.863	5.1×10^{-1}	7.675	1.5×10^{-1}	3.50	48.56	107.7300	2.2840
3-180	40.49	521.96	248.62	1.989	3.523	0.844	5.9×10^{-1}	9.345	2.5×10^{-1}	3.30	48.64	101.7060	2.2541
3-210	40.32	402.23	224.42	1.499	2.668	0.875	4.4×10^{-1}	7.002	2.297	3.14	48.84	97.0888	2.3838

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月22日 A.M. 10時05分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 リッパ 型、 カッター巾13(mm) すくい角(α)5° 上げ角(β)12° チップ材質
 供試体種類 凝灰岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数2950(vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	40.16	63.01	37.66	0.125	0.154	0.103				1.26	18.28	19.7064	2.8837
1-150	40.82	57.76	73.17	4.076	1.921	1.525	1.971	1.624	3.3×10^{-1}	0.92	18.96	14.7016	1.1071
1-180	40.82	81.92	30.28	6.27	8.21	2.75	18.29	23.94	7.59	0.64	18.54	10.0928	1.8366
1-210	40.82	86.12	73.66	6.008	4.628	1.175	16.20	12.40	2.5×10^{-1}	0.84	19.24	13.5408	1.0129
2-0	41.49	74.57	65.76	0.205	0.137	0.114	5.7×10^{-2}			1.4	19.6	22.8200	1.9120
2-150	40.32	86.12	56.34	4.104	7.575	1.388	1.279	21.61	9.7×10^{-1}	2.04	20.2	33.8640	3.3121
2-180	39.84	151.23	186.42	0.234	1.356	0.231	1.7×10^{-1}	3.869	9.0×10^{-2}	3.3	26.94	65.90	1.95
2-210	39.84	155.43	122.01	1.984	0.416	0.394	1.373	1.14	2.0×10^{-1}	1.98	29.24	41.82	1.89
3-0	39.68	143.88	247.89	0.103	0.0793	0.0875				2.29	34.86	54.80	1.22
3-150	39.68	161.73	218.36	0.1596	1.106	0.169	9.0×10^{-1}	3.154	1.1×10^{-1}	2.84	34.78	67.85	1.71
3-180	40.00	121.83	186.88	0.428	2.166	0.406	2.1×10^{-1}	6.178	9.0×10^{-2}	2.94	35.66	71.53	2.11
3-210	40.65	110.27	207.85	0.49	2.394	0.469	3.6×10^{-1}	6.828	1.6×10^{-1}	3.26	36.34	80.42	2.13

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月22日 A.M. 10時54分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 リンバ 型、 カッター巾 すくい角(α) 5° 上げ角(β) 12° チップ材質
 供試体種類 凝灰岩 一軸圧縮強度 (kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	9.302	52.51	93.29	0.046	0.07	0.102				1.06	19.82	17.39	1.0274
1-150	9.22	80.87	11.02	1.636	2.34	3.81	1.9×10^{-1}	2.7×10^{-1}	4.5×10^{-1}	0.96	19.68	15.686	9.847
1-180	9.217	86.12	12.07	1.52	2.328	0.362	1.7×10^{-1}	2.6×10^{-1}	4.1×10^{-2}	0.64	19.6	10.432	4.763
1-210	9.35	97.67	46.91	1.595	2.266	0.324	1.7×10^{-1}	2.4×10^{-1}	8.5×10^{-3}	1.2	21.1	17.39	2.043
2- 0	9.20	77.92	142.81	0.058	0.070	0.089				2.12	23.9	39.11	1.51
2-150	9.40	72.47	65.73	1.778	2.837	0.381	2.1×10^{-1}	3.5×10^{-1}	5.0×10^{-2}	1.84	22.84	32.97	2.79
2-180	9.40	95.57	23.78	2.03	3.130	0.235	2.2×10^{-1}	3.5×10^{-1}	6.7×10^{-3}	1.96	24.68	36.93	8.57
2-210	9.22	101.87	56.61	2.006	2.849	0.267	2.2×10^{-1}	3.0×10^{-1}	2.8×10^{-2}	1.94	24.90	36.76	3.58
3- 0	9.17	79.82	259.30	0.046	0.070	0.089				2.52	31.52	56.09	1.19
3-150	9.25	107.12	104.82	0.87	3.03	0.445	1.1×10^{-1}	3.7×10^{-1}	5.5×10^{-2}	2.96	35.58	71.90	3.78
3-180	9.31	109.22	135.65	1.288	3.405	0.413	1.4×10^{-1}	3.9×10^{-1}	4.6×10^{-2}	2.98	35.6	72.41	2.941
3-210	9.416	117.62	186.81	1.247	2.147	0.229	1.3×10^{-1}	2.3×10^{-1}	2.4×10^{-2}	3.34	36.44	82.56	2.435
4- 0	9.320	78.76	233.30	0.046	0.070	0.085				4.44	39.9	117.44	2.774

2 次 元 切 削 試 験 デ ー タ シ ー ト (甲)

試験期日 昭和 51 年 3 月 22 日 P.M. 1 時 20 分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 型、カッター巾 すくい角 (α) にげ角 (β) チップ材質
 供試体種類 花 崗 岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	9.28	118.67	97.31							0.05	4.2	0.11	0.01
1-150	9.24	129.18	123.49	0.638	0.418	0.141	6.79×10^{-2}	4.4×10^{-2}	1.5×10^{-2}	0.05	4.2	0.11	0.0047
1-180	9.25	226.85	212.75	0.638	0.406	0.16	6.6×10^{-2}	4.2×10^{-2}	1.66×10^{-2}	0	5.20	0.00	0.00
1-210	9.23	298.26	305.40	0.684	0.552	0.179	2.8×10^{-2}	3.4×10^{-1}	5.2×10^{-2}	0	5.54	0.00	0.00
2- 0	9.24	550.32	471.42	0.649	0.75	0.397	1.0×10^{-1}	7.3×10^{-1}	7.5×10^{-2}	0.06	7.00	0.21	0.0025
2-150	9.22	735.15	576.62	0.87	0.957	0.16	6.6×10^{-2}	1.7×10^{-1}	2.8×10^{-2}	0.02	9.42	0.094	0.00
2-180	9.21	951.50	713.15	0.998	0.829	2.432	1.7×10^{-1}	1.4×10^{-1}	4.2×10^{-1}	0.18	11.28	1.02	0.01
2-210	9.20	1216.15	817.79	1.119	0.789	0.269	6.0×10^{-2}	1.3×10^{-1}	4.4×10^{-2}	0.46	12.88	2.96	0.02
3- 0	9.17	1435.65	911.07	0.957	1.392	0.653	3.7×10^{-2}	1.883	1.1×10^{-1}	0.36	13.80	4.82	0.03
3-150	9.23	1586.88	964.68	1.438	1.723	8.512	1.1×10^{-1}	3.0×10^{-1}	1.251	0.74	15.66	10.60	0.06
3-180	9.20	1575.33	965.45	1.665	1.752	1.752	1.3×10^{-1}	1.421	1.421	1.08	17.64	16.55	0.09
3-210	9.27	1584.78	966.57	1.288	1.125	0.8	5.2×10^{-2}	1.2×10^{-1}	1.2×10^{-1}	1.08	19.12	17.34	0.10

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月23日 P.M. 1時25分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 型、 カッター巾 すくい角(α) ° にげ角(β) ° チップ材質
 供試体種類 花崗岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm^2) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Psh ² r)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	40.00	96.62	102.72							0	4.6	0.00	0.00
1-150	40.32	155.43	162.43							0	4.8	0.00	0.00
1-180	39.84	268.86	259.66							0.1	5.5	0.28	0.01
1-210	40.00	361.28	331.51							0	6.8	0.00	0.00
2-0	40.00	577.62	483.44							0.03	7.62	0.11	0.00
2-150	39.84	797.12	627.73							0.13	11.78	0.77	0.01
2-180	40.00	990.36	751.35							0.20	12.92	1.29	0.01
2-210	39.84	1158.39	839.90							0.24	13.66	3.20	0.02
3-0	39.84	1400.99	940.31							0.56	14.52	7.71	0.05
3-150	39.53	1543.82	962.98							0.74	16.92	11.07	0.06
3-180	39.53	1582.68	958.84							0.87	18.18	13.56	0.08
3-210	39.53	1596.33	951.37							0.99	19.48	16.08	0.09

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月23日 P.M. 2時05分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 型、 カッター巾 すくい角(α) ° 逃げ角(β) ° チップ材質
 供試体種類 モルタル 一軸圧縮強度 (Kg/cm^2) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm^3)	切削能率 $\eta (m^3/Pshr)$
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1-0	40.32	10.50	41.56							0	5.84	0.00	0.00
1-150	40.00	232.10	260.96							0.34	10.16	0.00	0.04
1-180	39.84	260.45	280.69							0.72	13.26	1.73	0.19
1-210	40.00	258.35	276.81							0.82	15.54	9.45	0.23
2-0	39.84	329.77	354.07							1.14	17.60	11.70	0.27
2-150	40.00	364.43	426.84							1.76	19.32	17.44	0.37
2-180	40.16	343.42	432.26							1.78	19.74	28.44	0.37
2-210	39.84	287.76	420.71							1.36	19.50	29.14	0.29
3-0	40.00	390.68	566.84							1.92	19.90	22.10	0.31
3-150										2.12	24.36	31.58	
3-180	40.00	520.91	746.17							2.42	34.38		0.42

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月31日 A.M. 10時00分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 型、 カッター巾 すくい角(α) ° 上げ角(β) ° チップ材質
 供試体種類 モルタル 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	9.31	102.97	82.61	0.132	0.115	0.075	0.002	0.002	0.0001	0.16	11.56	0.92	0.06
1-150	9.33	157.53	124.94	0.212	0.690	0.219	0.023	0.075	0.024	0.20	12.46	1.25	0.06
1-180	9.29	205.84	169.08	0.315	0.863	0.156	0.034	0.093	0.017	0.24	13.32	3.16	0.10
1-210	9.28	276.21	225.14	0.315	0.835	0.200	0.033	0.087	0.021	0.16	13.46	2.12	0.05
2- 0	9.29	438.99	363.64							0.26	17.98	4.03	0.06
2-150	9.24	372.83	357.69	0.287	0.633	0.156	0.031	0.068	0.017	2.90	27.44	58.64	0.90
2-180	9.21	342.37	389.89	0.315	0.748	0.219	0.034	0.079	0.023	2.22	27.64	45.11	0.64
2-210	9.23	341.32	444.73	0.287	0.863		0.030	0.090		2.26	29.60	48.14	0.60
3- 0	9.18	405.38	582.49		0.144			0.003		2.40	30.12	51.74	0.49
3-150	9.27	406.44	706.66	0.459	0.547	0.156	0.049	0.059	0.004	3.10	32.48	70.49	0.55
3-180	9.21	407.49	729.78	0.516	0.719	0.188	0.054	0.075	0.020	2.80	33.14	64.60	0.49
3-210	9.22	444.24	817.99	0.373	0.604	0.188	0.039	0.063	0.019	2.82	36.92	70.39	0.47
4- 0	9.14	504.11	848.86		0.115			0.002		3.72	37.76	94.41	0.61
4-150	9.07	461.05	849.08	0.344	0.518	0.125	0.036	0.054	0.013	4.34	44.06	123.82	0.80

2 次元 切 削 試 験 デ ー タ シ ー ト (甲)

試験期日 昭和51年 3月31日 P.M. 1時30分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 型、 カッター巾 すくい角(α) ° にげ角(β) ° チップ材質
 供試体種類 砂 岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm²) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			突切削深 t (mm)	突切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	9.29	42.01	5.53							0.02	5.10	0.05	0.05
1-150	9.28	105.02	40.30							0.00	6.10	0.00	0.00
1-180	9.23	190.09	138.97	0.373	0.604	0.188	0.039	0.063	0.020	0.20	11.0	1.10	0.04
1-210	9.25	216.35	165.41	0.258	0.518	0.125	0.027	0.053	0.013	0.78	12.66	4.94	0.16
2- 0	9.26	287.76	231.12							1.22	16.20	17.81	0.42
2-150	9.27	281.46	237.74	0.373	0.374	0.125	0.040	0.041	0.013	1.60	18.18	24.94	0.58
2-180	9.22	265.71	260.57	0.315	0.403	0.094	0.033	0.042	0.010	2.58	24.06	47.81	1.01
2-210	9.33	281.46	227.16	0.430	0.259	0.188	0.045	0.027	0.019	1.68	24.32	31.35	0.76
3- 0	9.37	341.32	382.17							2.52	29.30	53.30	0.77
3-150	9.30	1000.86	575.41	0.402	0.345	0.125	0.043	0.037	0.014	2.84	34.18	67.00	0.64
3-180	9.40	341.32	586.20	0.488	0.403	0.188	0.051	0.042	0.020	3.02	38.32	77.49	0.73
3-210	9.29	383.33	689.91	0.574	0.345	0.156	0.060	0.036	0.016	3.34	38.54	86.07	0.69
4- 0	9.28	413.79	900.24							3.64	38.84	94.35	0.58
4-150	9.44	829.67	822.70	0.488	0.403	0.125	0.051	0.042	0.013	3.86	42.74	107.58	0.72

2次元切削試験データシート (甲)

試験期日 昭和51年 3月31日 P.M. 2時30分 天候 気温 (°C) 湿度 (%)
 カッター種類 型、 カッター巾 すくい角 (α) ° つけ角 (β) ° チップ材質
 供試体種類 砂 岩 一軸圧縮強度 (Kg/cm^2) 試験状態 wet dry
 加振方法 振動方向 x 振動数 2950 (vpm)

試験番号	切削速度 (mm/sec)	鉛直力 W (Kg)	水平力 F (Kg)	発生加速度 (G)			発生振幅 (mm)			実切削深 t (mm)	実切削巾 b (mm)	切削量 Q (mm ³)	切削能率 η (m ³ /Pshr)
				上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z	上下方向 x	前後方向 y	左右方向 z				
1- 0	40.16	124.98	38.72							0.1	6.3	0.32	0.04
1-150	40.16	197.44	152.57	0.631	0.460	0.188	0.067	0.049	0.020	0.16	11.22	0.90	0.03
1-180	40.16	237.35	215.81	0.688	0.547	0.219	0.072	0.057	0.001	0.68	14.10	9.2	0.24
1-210	40.32	255.20	234.41	0.717	0.518	0.282	0.074	0.052	0.028	0.68	15.42	9.66	0.23
2- 0	40.16	305.61	322.85	0.689	0.403	0.219	0.004	0.002	0.001	1.74	22.42	30.82	0.53
2-150	40.16	301.41	346.84	0.459	0.345	0.188	0.049	0.037	0.020	2.10	24.50	39.38	0.63
2-180	40.32	284.61	361.95	0.430	0.403	0.156	0.046	0.042	0.017	1.88	24.92	35.64	0.54
2-210	40.16	283.56	403.32	0.430	0.460	0.188	0.044	0.047	0.019	1.96	26.04	38.26	0.52
3- 0	39.84	314.02	585.74	0.402	0.288	0.156	0.002	0.005	0.001	2.76	28.32	57.02	0.54
3-150	40.16	321.37	750.43	0.631	0.460	0.219	0.070	0.049	0.002	2.98	35.18	71.79	0.53
3-180	40.00	307.71	807.94	0.488	0.460	0.156	0.051	0.049	0.004	3.18	36.02	77.94	0.53
3-210	40.00	332.92	834.36	0.459	0.460	0.125	0.048	0.047	0.003	2.80	35.90	68.46	0.45
4- 0	40.00	401.18	943.33	0.746	0.604	0.219	0.005	0.009	0.003	3.64	35.74	88.71	0.52
4-150	30.74			0.689	0.633	0.313	0.072	0.063	0.004				

参 考 資 料

目 次

I 各種の岩掘削工法	127
1. ウォータージェットによる掘削	127
2. 火炎ジェットによる掘削	129
3. 電磁波による掘削工法	132
4. 岩石溶解による掘削工法	134
5. レーザ光線を利用した岩掘削工法	135
6. 機械的な掘削工法	135
(1) ドラグ形カッタによる掘削	135
(2) パーカッション形カッタによる掘削	137
(3) ロータリ形カッタによる掘削	138
7. その他の岩石掘削工法	139
II 岩石の破壊に関する特性について	140
1. 岩石の破壊理論の紹介	140
(1) 内部摩擦角説	140
(2) 最大せん断応力説	141
(3) 応力円包絡線説	141
(4) せん断ひずみエネルギー説	144
(5) 最も一般的な破壊応力条件	145
(6) グリフィス理論による破壊	145
2. 弾性波速度と強度	147
(1) 弾性波速度と密度の関係	147
(2) 弾性波速度と有効間隙率、吸水率	149
(3) 弾性波速度とヤング率	150
(4) 弾性波速度と一軸圧縮強度	150
(5) 弾性波速度と含水比による影響	151
(6) 弾性波速度と作業限界	152
3. 岩石の各種試験法	154
(1) 一軸圧縮試験	154
(2) 引張り強度試験	154

(3) せん断強度試験	155
(4) ショア硬度試験	155
(5) シュミットハンマ試験	156
(6) ページ衝撃試験	156
(7) プロトジャコノフ試験	157
4. 亀裂と風化の影響	157

I 各種の岩掘削工法

1. ウォータジェットによる掘削

水力掘削の研究は、我国において昭和35年頃より開始されている。この水力掘削による岩の破碎過程は次の通りである。

まず、高圧水ジェットが当たる部分が破壊される。次にこの時に発生したクラックに高圧水が入り込んで、この水の圧力によって破壊された部分がはぎとられ、剝離を生じさせる。掘削はこの工程をくり返して、高圧水のエネルギーが岩の強度エネルギーより小さくなるまで続けられる。一般に効率よく破壊するためには800～1,200 m/sec以上の噴流速度が必要で、このような高速噴流を得るためには3,000～7,000 Kg/cm²以上に水を加圧して噴射してやらなければならない。水力掘削装置は、まだ実験段階であり、石炭の採鉱など一部の分野を除いて実用化には、まだいたっていない。

ここで水中における水力掘削の模型実験として運輸省港空湾技術研究所で行なった例を図-1に示す。

すかし溝の切削深さ ℓ (cm) は、ノズル直径 d (cm)、水噴流の噴出速度を V_j (cm/sec) とすると

$$\ell \propto (d^2 V_j^2)^{\frac{1}{3}}$$

具体的に圧力 $P = 40 \text{ Kg/cm}^2$ 、流量 $Q = 0.69 \text{ m}^3/\text{min}$ のポンプを用いたモルタルの掘削実験によれば、すかし溝切削深さ ℓ は

$$\ell = (11.8 - 3.1 V_s - 0.39 L)$$

$$(2 P_j / \sigma - 0.7) \times d^{1.7} \dots\dots\dots 1$$

という実験式を得た。しかしこの式は試料強度 σ (Kg/cm²)、ノズル口における動圧 P_j (Kg/cm²)、ノズル移動速度 V_s (cm/sec)、ノズルから岩石表面までの距離 L (cm)、ノズル口径 d (cm)などの制約をうけ、ある範囲内においてのみ適用できるものとされている。一方、空気中における水力掘削の研究として、公害資源研究所の山内、横田氏はノズル口における動圧が200～700 Kg/cm²の水噴流によって、モルタルや岩石にすかし溝を掘る際の掘削深さ ℓ に対して、次の実験式を得ている。

$$\ell = \frac{K d^d}{L^m} \left(\frac{1}{V_s} \right)^n \left(\frac{P_j - P_e}{P_e} \right)^p \dots\dots\dots 2$$

ここに P_e : 必要破壊圧力 (Kg/cm²)

V_s : ノズル移動速度 (cm/sec)

P_j : ノズル口における動圧 (Kg/cm²)

L : ノズルより試料表面までの長さ (cm)

d : ノズル口径 (cm)

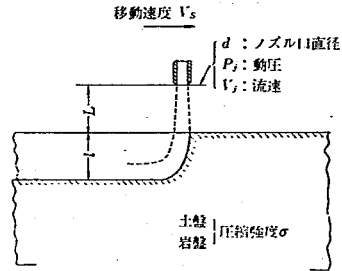


図-1 すかし溝の掘削実験例

上記は、水中掘削と同様、実験条件に制約があり、上記の適用はある範囲に限られる。図-2に実験式より求めた空気中と水中における掘削深さ l の関係を示す。

今の段階でウォータージェットによる岩石掘削の適用性を拡大予測してみると、水噴流による全断面掘削を行なう方法は得策ではなく、水噴流ですかし溝をつくり図-3に示すように、別の機械的

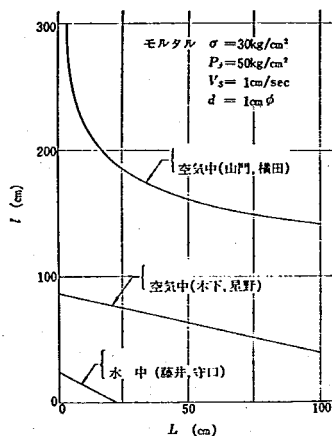


図-2 空気中と水中における水力掘削

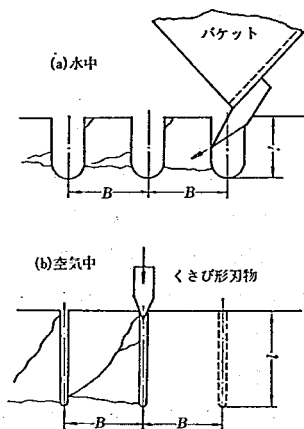


図-3 すかし溝の形状と破壊方法

な方法によって除去する方法が得策であると考えられる。なぜならば、ノズル口径を大きくすると幅広い掘削ができるが、現段階においてはこれに必要な速いジェット水流が、大量にしかも連続的に得られないためである。また、水力掘削での高圧ジェットの発生方法として現在開発されているものは、図-4に示すような方法がある。

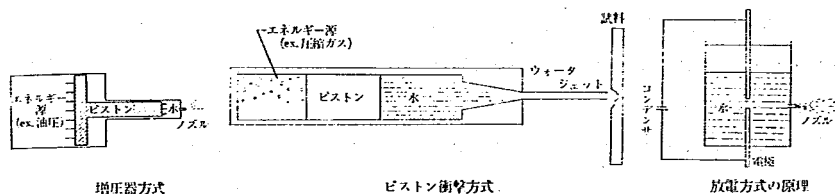


図-4 高速ジェット発生方法

(i) は断面の異なるピストンを使用する方法

(ii) はシリンダ内で圧縮ガスあるいは爆発負荷などのエネルギーを利用する方法

(iii) は液中に放電ないし爆発を起こしてこの液中に高圧を発生させる方法

である。しかし、これらの高圧水発生装置は、高速流が間けつ的にしか発生できないため、従ってこれを長く持続するための方法が今後開発される問題の一つとされている。

2. 火炎ジェットによる掘削

ロケットジェットによる岩石掘削への試みは、すでに米国、ソ連において始められている。米国では1947年より、鉄鉱石の火炎ジェットによる削孔が行なわれ、1956年には20台の火炎ジェット削孔機を利用して、9 in 径のボアホールを総延長50万ftまでの削孔を行ない、500万tonの鉄鉱石の採掘を行なった例がある。また、花崗石を建築用材として切り出す場合にも利用されており、最近では火炎ジェットと機械力を並用したトンネルマシンの開発に力を注いでいるといわれる。ソ連における火炎ジェットの開発は米国にやや遅れて着手したが、現在では鉄鉱石の露天採掘場での削孔や花崗岩の切り出し、大塊岩石の2次破碎、凍結岩盤の削孔、コンクリートの切断など広い範囲での実用化に成功している。また火炎ジェットを使用した高効率のトンネルボーリングマシンの開発も進められている。

一方、日本においては、15年前頃より大学の研究室での研究が進められて、酸素とケロシン（灯油）による試験機が製作された。後に、海底岩盤用として酸素とケロシンを使用するロケットメカニズムによるもの、陸上用として空気とケロシン、空気とガソリンを使用するジェットメカニズムのものを、ほぼ実用機として使用しうる段階に到達させている。

これまでに開発されたサーモドリルは、大別して3種類があり、それぞれ特徴をあげると次のようになる。図-5は、酸素とケロシンを使用したサーモドリルで、水中（海底岩盤等）削孔用とし

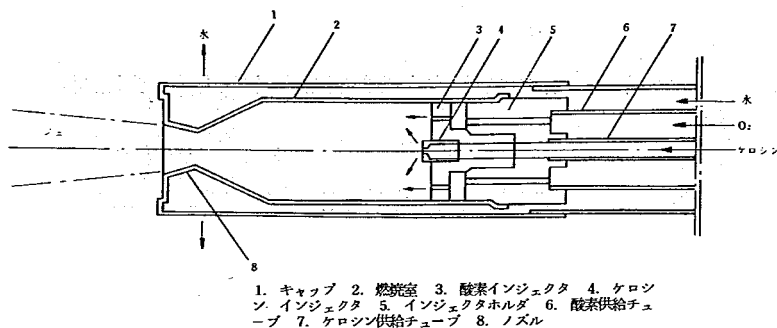


図-5 酸素ケロシン系火炎ジェット

て使用される。この方法によると非常に高圧のジェットを発生させることができる。水中削孔には、10 atm以上の高圧ジェットが必要とされている。またジェット温度が高く燃焼室内のジェットガス温度は、3,400～3,700 °K程度まで上げることができる。しかし、酸素を多量に使用するので運転コストが高くなる。

図-6は、エアーケロシン系のサーモドリルの構造を示す。エアーケロシン系では、酸素を使用しないために運転コストは低廉となるが、反面そのために削孔能力では酸素ケロシンに比べ劣る。

それはまず、高圧ジェットの発生が難しく、コンプレッサ圧が7atm前後であるとする、サーモジェット圧は5～6atmとなり、ジェット温度(2,300～2,400 °K)ジェット速度とも、酸素、ケロシンに比較して低いものとなる。また空気を得られないために水中での使用は、不可能で陸上専用となる。

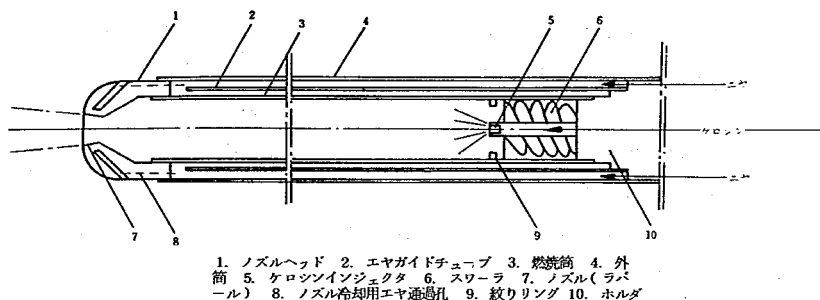


図-6 空気ケロシン系火炎ジェット

図-7は、エアーガソリン系サーモドリルの構造を示す。エアーケロシン系とはジェット自体はほぼ変わらないが、着火時にも酸素を使用しないので便利とされている。

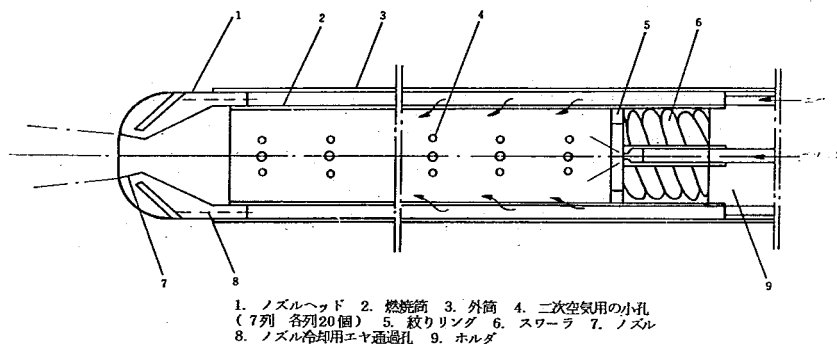


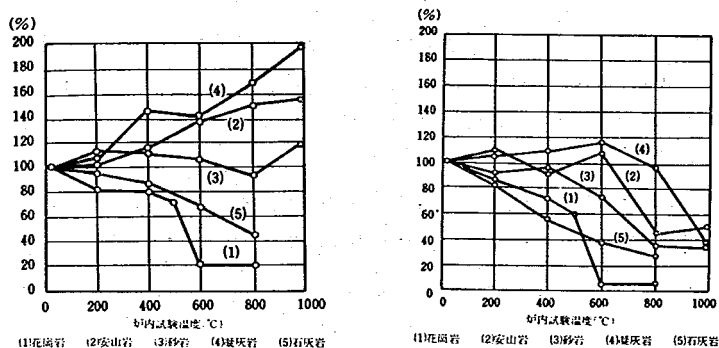
図-7 空気ガソリン系火炎ジェット

これらのサーモドリルの共通点は、燃焼筒または燃焼室の先端についているノズルから噴射される火炎ジェットは超音速となる点である。エアーを使用する場合の速度は1,200～1,300m/sec、酸素を使用する場合の速度は1,700～2,000m/sec程度である。このためサーモドリルを現場作業で手持で簡単な装置によって使用するとすれば、火炎ジェットの推力に耐え得る特別な装置を用いなければならない。

一般に岩石の強度は、常温における強度で示されるが、温度と岩石強度との関係は図-8に示す

如く、加熱することによってその圧縮強度が著しく減少するもの（花崗岩系）、ほとんど変化しないもの（砂岩系）、逆に強度が増加するもの（安山岩等）の3種類がある。花崗岩などは加熱することによって圧縮、引張りの強度が著しく減少し、線膨張係数は573℃を境に急激な変化をきたす。従って、このような岩石が熱削孔に適することは容易に想像できる。このうちで、最も熱削孔に適しているのは珪岩、花崗岩、石英粗面岩、岩など石英を含む岩石とされている。

岩石の熱削孔は火陥ジェットの噴射によって発生する熱応力で、岩石を破砕してゆくもので熱溶



図一 8 岩石加熱時の圧縮、引張強度の変化

融させるものではない。熱削孔による掘削メカニズムは、岩石表面にその直角方向から熱衝撃を与えた場合、図-9に示すように表面に最大の圧縮応力が発生し、岩石体内への深さ方向にその圧縮応力は次第に減少し、ある深さで引張り応力に変わり更に圧縮応力に変化する。そして、表面からある深さのところ、最大の引張り応力が発生する。

一般に岩石は、圧縮強度は大きい引張り強度が非常に小さい。例えば、花崗岩では圧縮強度は $2,400 \text{ Kg/cm}^2$ 程度で非常に大きい、引張り強度は 100 Kg/cm^2 と非常に小さい。従って、このような岩石は発生した引張り熱応力で、その引張り熱応力が最大のところ（表面から数ミ

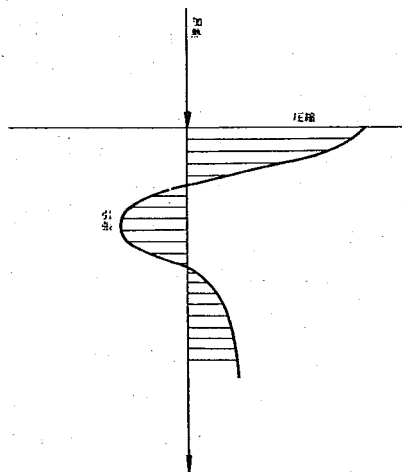


図-9 岩石内に生ずる熱応力

りのところ)で引張り破壊を起こすとされている。今後、熱削孔による建設工事への応用はいろいろな面で可能になるものと考えられ、現在までに実用段階に達しつつあるものとして岩盤の削孔、切断、破碎、鉄筋コンクリートの削孔、切断、地盤の削孔、海中作業への応用、トンネルマシンへの応用等、いろいろあるが、この他にも地盤改良、ヘドロ処理にも現在開発中のものがある。

3. 電磁波による掘削

電磁波による岩掘削の研究は、ソ連において開発され一部鉄鉱石の2次破碎に実用化されている。電磁波は、一般に周波数 $300 \sim 3,000 \text{ MHz}$ 、波長 $10 \sim 100 \text{ cm}$ の電波でこの電磁波を岩石に照射すると、岩石内部に熱が発生し、この熱を利用して岩石の破壊を行なうものである。

このような誘電加熱によって岩石が熱されると、始めに岩石自体の熱による構成物質の組織的、化学的变化による破碎が行なわれ、熱応力の発生に伴う破碎が誘発される。そして岩石内部に発生した過熱蒸気圧による破碎が起る。

電磁波の発生装置としては、種々の方法が開発されているが、図-10 にマグネトロンによる発振管方式のものを示す。図の装置は周波数 915 MHz 、波長 33 cm 、最大出力 30 kW である。マグネ

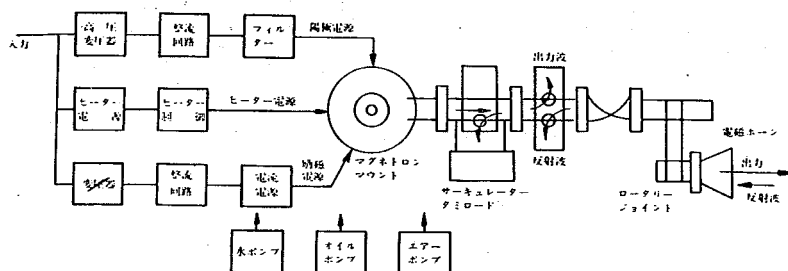


図-10 マグネトロンによる電磁波の発生装置

ネトロンより放射された電磁波は、導波管で伝送し電磁ホーンにより岩石に放射する。

実際の運転に際しては、反射波の影響を出来るだけ少なくするために、連続出力は 20 kW に抑えてある。またマグネトロンの冷却には、圧力 2 Kg/cm^2 、流量 8 l/min の水道水と圧力 3.5 Kg/cm^2 、流量 $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ の圧縮空気を用いている。この時の試料に用いた供試体としては、花崗岩 ($1,490 \text{ Kg/cm}^2$)、玄武岩 ($1,530 \text{ Kg/cm}^2$)、凝灰質泥岩 (300 Kg/cm^2) である。そして、それぞれの供試体には図-11 のように温

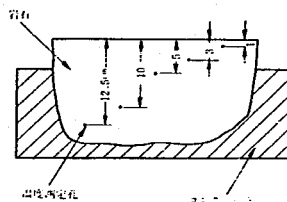


図-11 岩石供試体と熱電対

度測定用として、熱電対を挿入している。

実験の結果によると、図-12 に示す如く電磁波出力と温度上昇の関係は比例している。また温度と照射距離の関係を示す図-13 によれば、照射距離が大きくなると単位面積当たりの照射密度が低くなり、ほぼ照射距離の1~2乗に逆比例する温度上昇が生じる。物質に対して電磁波を照射した場合の浸透深さは、電界強度が表面の $1/e$ に減衰する深さで、一般に次式で示されている。

$$D = 9.56 \times 10^7 / f \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot \tan \sigma \quad \dots 3$$

ここで D : 電磁波の浸透深さ (cm)、 f : 周波数 (Hz)、 ϵ_r : 物質の比誘電率、 $\tan \sigma$: 物質の誘電正接。そして、 $\tan \sigma$ についてはさらに表面抵抗率の小さい岩石は静電容量、誘電正接の値が大きく、これらは試料の含水率の大小による影響とされている。岩種別の表面ならびに岩石孔内の温度の距離による減衰勾配を図-14 に示す。図によれば同一照射条件でも岩種により当然浸透深さが異なって岩石内の温度分布も異なった結果が表われている。また、間接的に影響を与えるものとして、結晶の含水比の影響や、岩石の透電率のように電気的な性質でも照射による圧縮引張り強度の変化を生じさせるものである。

照射前後における岩石の圧縮強度は、泥岩のように 300 Kg/cm^2 であったものが、 450 Kg/cm^2 と照射により50%も増加したものもあるが、一時的には低下の傾向を示した。引張り強度の方は照射により強度増加したものは、見当らず玄武岩のように50%近く低下しているものもある。強度低下に関しては

照射条件等により、その低下の割合は異なり、昇温速度の速い場合は以下の割合も大きく、逆に昇温速度の速い場合は低下の割合も大きく、逆に昇温速度が遅い場合には焼結作用を起こし、強度増加する傾向もある。

これらのことより、誘導加熱を利用して岩石やコンクリートを破壊ないし劣化させる試みは、定

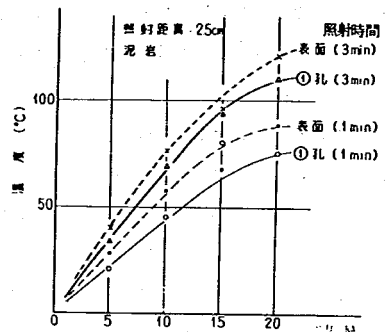


図-12 電磁波の出力と温度上昇

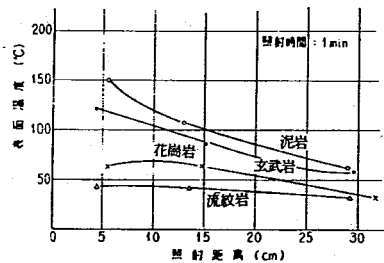


図-13 岩種別の温度減衰

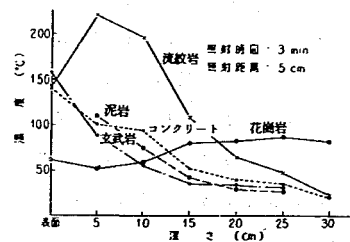


図-14 温度と浸透深さ

性的には基礎試験を終ったということができ、今後は実用化のための現場試験を行なって破砕に要するコストや時間、供用機械など効果的な施工法などが今後の問題とされている。

4. 岩石溶解による掘削工法

岩石溶解法 (Rock Melting) は、地質探査、トンネル掘削機として採来その活躍が予想されている。米国原子力委員会の委託で国立科学財団から資金援助を受けて、カルフォルニア大学が運営しているロスアラモス科学研究所においては、高精度のコアサンプルを採取し得る地下深掘削機の調査、研究が進められている。この研究の最終的目標は、岩石の溶解を熱破砕に組み合わせ、原子力を動力源としたトンネル掘削機を開発することにある。ロスアラモス研究所で図-15に示すような小型の電気加熱式装置を用いて実験を重ね

ている。この装置によれば、砂から花崗岩にいたる全てのものを、ごく少量のエネルギーで溶解して削孔する能力があることが認められた。溶解された岩などの物質は、ガラス状にスムーズに孔壁にライニングされて、砲孔状の孔を形成してゆく。また軟岩や土においては、ずりや残土を残さずに溶解しながら孔を形成する。この装置は、先端に加熱貫入体を有し、溶解した岩を船のへさきが水を側方に押し付けるように進んでいくもので、ガスまたは液体で冷却されているモリブデン製ペネレータ胴体が、ガラス

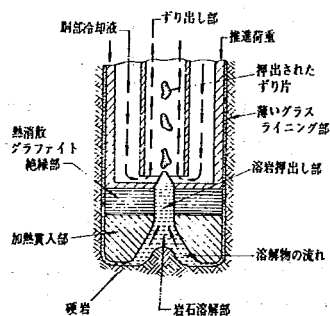


図-15 岩石溶解試験装置

ス状に溶解した溶岩を冷却し、それが硬化しながら孔壁をライニングしていくものである。花崗岩や片麻岩等の硬くて密度の高い岩石用の貫入装置と冷却装置は、ガス流が溶石を胴体に沿って後方に移動させるように、凹形の胴体に装置してある。溶解した岩石が、ガスで冷却されるとガラス粒子と岩綿が容易に調合されて結合する。現状では十分な基礎固めは出来ていないが、ロウリー氏以下スタッフは、シュブテレーネ原理の新しい応用(利用法)を探究している。

この方法による特徴は、普通トンネル工事を施工する場合は、次の3つの要素が基本とされる。それは穴を造成すること、その穴を支えること、掘削ずりを移動することであり、シュブテレーネはこの3つの仕事を同時に施工できる。

実際、この試験機を現場(バージニア州のホートブアルボイヤ)にて試験した結果、約3.5kWの電力を消費して、時間当り20 feetの速度で砂質土の実験地にガラスライニングされた穴を造成し、また硬質岩においても砂質土と同様に溶解押し出し形ペネレータを用いてガラスロックウール状のずりを作りながら孔の造成ができたと伝えられている。

5. レーザ光線を利用した岩掘削工法

本工法は、炭素タングステン系のガスレーザ光線を岩石に集中照射し、熱膨張による岩の脆性化を利用して掘削を行なうものであり、米国で研究が進んでいる。米国空軍実験研究所の報告によれば、花崗岩、砂岩を対象として基礎的な研究を行なった後、トンネル掘削機械への適用を試みている。

トンネル掘削に対しては、図-16に示すようにゲージカッタの部分にレーザ光線を照射し掘削能率を高める方向で研究が進められている。

研究によれば6m径以上大口径、圧縮強度 $1,800\text{Kg/cm}^2$ 以上の硬岩掘削の場合には経済的な掘削ができるとされており、問題点としては光線が岩石間の干渉や塵埃、水分などで吸収されることはなく、如何に岩石表面に衝突させるかという点と指摘している。

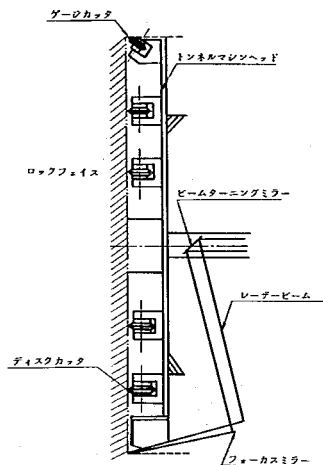


図-16 レーザによるゲージ切削

6. 機械的な掘削工法

(1) ドラグ形カッタによる掘削

ドラグ形カッタは、工作機械における旋盤のバイ

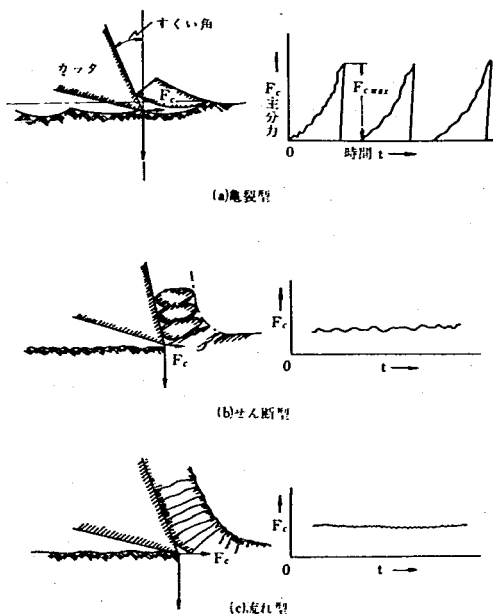


図-17 岩石切削のタイプ

トに類するもので、被切削材に対して押しつけて、引張りながら切削するカッタをいい、トンネルボーリングマシンのカッタやリッパがこれに当たる。ドラグ形カッタで掘削する場合、岩石試料の切粉の発生はカッタの形状、岩石試料の種類、掘削深さおよび掘削速度等によって図-17に示すように3種類の形が考えられる。

亀裂形は、セメント材や大部分の粘性の少ない岩石の掘削においてみられる形で、掘削において主成分 F_c （水平分力）が時間と共に変化し、変動比（掘削抵抗の最大値 F_{cmax} と平均値 F_c の比 F_{cmax}/F_c ）が最も大きい。

次にせん断形は砂質形岩石および亀裂形

の材質で掘削深さの小さい場合などの脆い材質にみられる形で、変動比は亀裂形よりも小さい。

流れ形は、金属の軟鋼や粘土質のような非常に粘性の大きな試料（岩石とはいえない程軟かい）に見られる形で、せん断間隔が小さく変動比がほぼ1にまでなる。また、掘削抵抗は以上に述べた主成分に担当するもので、この値は岩石試料の種類、カッタの種類、および掘削深さなどより求められるとされているが、岩石掘削は金属切削とは異なり、岩の複雑な成因等々により、その掘削機構の解明は非常に困難とされており、今までのところ、理論的な掘削の解明はなされていない。

ドラグ形カッタを利用した岩掘削工法の代表的なものとしてリップ工法がある。ここではリップ機構の概略を示す。リップの形状には3つのタイプがあり図-18にそれぞれのタイプを示す。

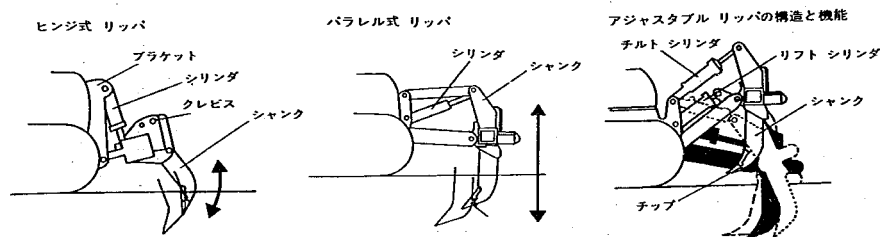


図-18 リップのタイプ

- (a) ヒンジタイプはリップシャंकの上げ下げにより、地面に接するシャंकのすくい角度が 30° 程度変化する。このため岩盤の硬さによる最適な貫入角と掘削深さをとることはできない。
- (b) パラレルタイプは、図のような平行四辺形リンク機構のため、シャंकが常に地面と一定角で上下を行なう。また、この時のリップすくい角度は、広範囲な岩に適用できるように大体 40° とされている。
- (c) アジャスタブルタイプは、パラレルタイプの利点に加えて岩盤の硬さに応じてリップのすくい角を可変できるようにチルトシリンダをつけ加えて、すくい角度を自由にとれるようにしたもので、作業中の車体後部の浮き上がりの防止と一定の掘削深さを維持することが、可能とされている。

これらのリップ作業は、リップのすくい角、ブルドーザの重量、馬力、速度等が関与して行なわれ、他の要因としては、岩盤の硬さの程度によってシャंकの数を増減している。また、シャंकの長さについても同様のことがいえ、非常に硬い岩盤などではシャंकを短かくし、逆の場合は反対に長くしたりして、リップ作業の高能率化を計っている。この他にシャंकの形状によるもの図-19等、先端チップの形状によるもの図-20等を用意して現場条件に合う

施工ができるようにしている。

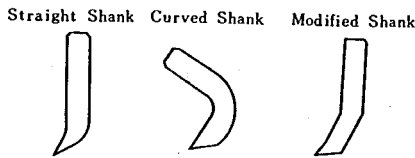


図-19 リッパシャングの形状

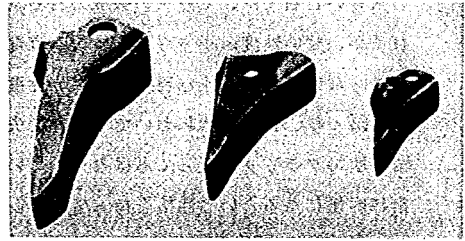


図-20 先端ポイントの形状

(2) パーカッション形カッタによる掘削

カッタが岩石に喰い込んで破砕する機構を局部分に見れば、ドラグ形の一部を除いて掘削のパターンは図-21のようなパーカッションの形を破壊の基本に考えることができる (Mohr の平面応力状態によれば)。今半無限の弾性板に線荷重 P が加えられた状態を図-22(a) に示すように仮定し、弾性板の内部任意の点 (r, θ) における応力の分布が図-22(b) のようになるとすれば、等せん断応力の軌跡は図-23(a) に示すように次式

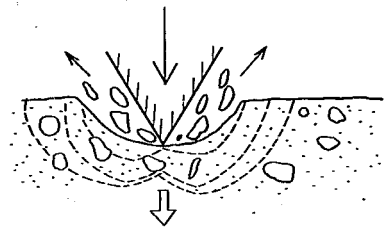


図-21 パーカッション形の破壊

の対数曲線で表わすことができる。

$$r = r_0 e^{\pm \cot \lambda \theta}$$

これから、パーカッション形カッタが掘削面に押し込まれるときの等せん断応力分布が、図-

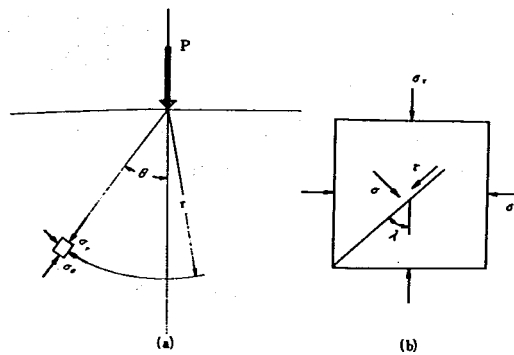


図-22 線荷重 P が加えられた時の応力分布

23(b) のようになり、最大せん断応力線に沿って破壊が起こることになる。この場合ぜい性度の大きい岩石では、カッタの衝撃で岩石試料が飛び散り、循環流に乗せられてクリーニングされるが、ぜい性度の小さな粘土層のような場合にはカッタが試料にめり込むだけで掘削作用は起こらない。このような現象は、ぜい性度の大きい岩や深度の深い高圧の泥水下で掘削する場合に起こり、岩の性状においてぜい性を失なうばかりでなく、高い泥水圧のため押し付けられて破壊のクラックが入ってもはりついていて、循環流の流速だけでクリーニングすることが非常に困難になるという性格を持っている。

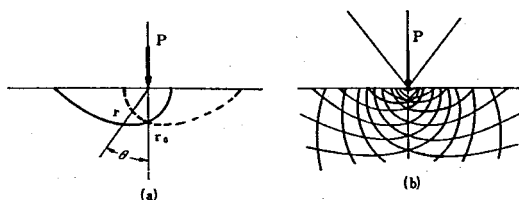


図-23 等せん断応力線図

(3) ロータリ形カッタによる掘削

ロータリ形カッタは、1909年に米国のハワード・ヒューズによって円錐状回転カッタが発明されて以来、石油さく井用や探査用ボーリングビットとして開発実用化され、現在では岩石掘削用として、堅孔掘削用としては口径約4mφ、トンネル掘削機用としては最大直径約10mφ級までのものが使用されている。ロータリカッタの岩掘削機構は先に述べたドラグ形とパーカッション形の複合された破壊機構となり、図-24のように圧壊作用を主体としてひねり起こし、引掻作用を伴う。

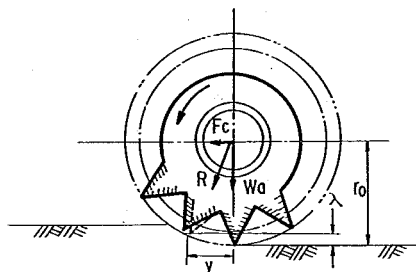


図-24 ロータリ形カッタの圧壊作用

ロータリタイプのカッタは、図のように連続的な掘削が可能であるから、トンネルボーリングマシンによく使用されている。また岩石種類などによって、各種のロータリカッタが製作されており、現在次の図-25に示すようなものがある。

(a) ディスクタイプカッタ

このタイプのカッタは、比較的軟かい岩質に適用され円板の外周がくさび状の刃先になっている形で、主にトンネルボーリングマシン400Kg/cm以下に用いられている。

(b) ミルドツース形カッタ

歯車状にミーリングされた刃先のもので、頁岩や砂岩のような比較的軟かい堆積岩に適用

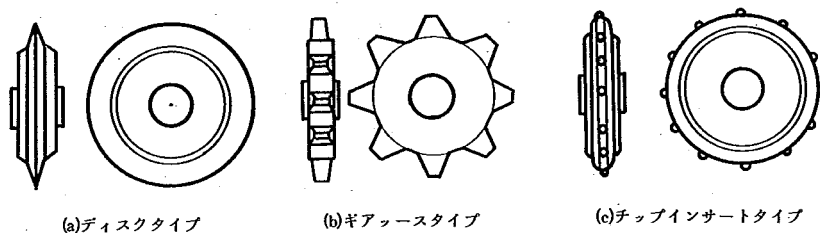


図-25 ロータリ形カッタの種類

され、その岩石強度は $400 \sim 800 \text{ Kg/cm}^2$ とされている。

(c) チップインサート形カッタ

カッタの外周にタングステンカーバイト鋼チップを植込んだもので、チップの先端に丸味のある円錐や平のみ状のチップを用いて、中硬岩や硬岩に適用され、岩石強度は $800 \sim 2,000 \text{ Kg/cm}^2$ が標準とされている。

7. その他の岩石掘削工法

現在では火薬が主流でありコストも安価であるが、最近公害問題での騒音・振動といった面からみれば、今後市街地での火薬の使用は制限されていくものと考えられている。

また、非常に興味のわく工法として、戦車の口径 105 mm 砲により 4.5 Kg のコンクリート弾を $1,525 \text{ m/s}$ の速さで発射し、トンネル掘削を行なった例もある。

Ⅱ 岩石の破壊に関する特性について

1. 岩石の破壊理論の紹介

破壊とは、応力の存在下にある物体が、2つ以上の部分に分離する現象を呼び、破壊には2通りの壊れ方がある。1つは図-26(a)に示す脆性破壊と呼ばれるもので、応力-ひずみ曲線に変形が小さいうちに破壊する。他の1つは、図-26(b)に示す延性破壊と呼ばれるもので、同じ岩石に周

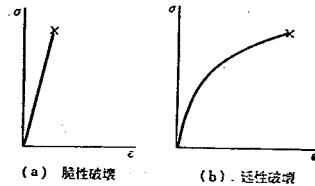


図-26 脆性破壊と延性破壊

囲から数百気圧の圧力を加えた上で、軸方向から加えると、図-26(b)応力-ひずみ曲線の勾配が著しく小さくなった後に、そして相当程度変形した後に破壊する。ある物体が脆性破壊をするか、延性破壊をするかは、これらの応力状態によって左右される他、温度やひずみ速度などによっても左右される。現在までに行なわれた各種の実験によって破壊と応力を対応させ、いろいろな破壊説が立てられてきている。

一般には実用上、簡単な説を用いているが、最も一般的ないくつかのものについて次に紹介する。

(1) 内部摩擦角説 (Coulomb の理論)

クーロンは岩石や土の圧縮試験の結果から、せん断応力が τ と垂直応力 σ の間に

$$|\tau| = \tau_0 - \mu \sigma \quad \dots\dots\dots 4$$

ここに τ_0 : せん断強度または粘着力

μ : 内部摩擦係数

σ : 圧縮強度

が成立する時、破壊が起きると考えた。図-27に示すように、断面積 A の柱状の試験片に垂直方向から荷重 P を加えて圧縮する場合を考える。この場合、荷重方向には垂直な断面 XX' では、 $\tau_x = 0$ 、 $\sigma_x = -P/A$ 荷重方向に角度 α だけ傾いた断面 BB' では

$$|\sigma_B| = \frac{P}{A} \sin^2 \alpha$$

$$|\tau_B| = \frac{P}{A} \sin \alpha \cos \alpha \quad \dots\dots\dots 5 \text{ 式}$$

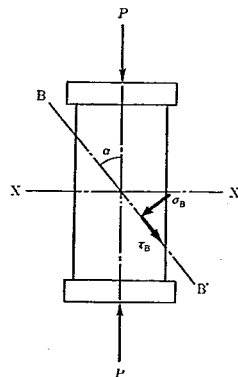


図-27 一軸圧縮の時に働く応力

となる。

ここで断面BB'の上下の部分が滑ろうとする時、その滑りを起こそうとする応力はせん断応力 $|\tau_B|$ であり、断面BB'の摩擦係数を μ とすると、滑りに抵抗しようとする力は $\mu|\sigma_B|$ である。従って $|\tau_B| - \mu|\sigma_B|$ が滑りを発生させるのに有効な応力とされている。しかしながらこの内部摩擦角説によれば、内部摩擦という概念の物理的な意味は、砂や土の場合は適用できるが岩石についてはあまり明瞭でないとされる。

(2) 最大せん断応力説 (Tresca の理論)

最大せん断力 $\tau_{\max}$ が一定値に達すると降状が起きると考え、すなわち物体中のある点での主応力を $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ とすれば、その点における最大せん断応力は、

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \dots\dots\dots 6.$$

によって表わすことができる(平面応力状態による)、したがって最大せん断応力説は

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 = \text{const} \quad \dots\dots\dots 7.$$

の時降状または破壊が起こることになる。この式では中間主応力 σ_2 は破壊に関与しないことになる。破壊が起こる時の応力状態をMohrの応力円で表わすと、7式より直径が $\sigma_0 = \text{const}$ の円になることがわかる。また6式から、 $\tau_{\max} = \sigma_0/2$ であるから7式は図-28に示すよう

に σ 軸に平行な直線で表わされ、破壊が起こる時の応力状態を表わす応力円は、この直線に接することになる。図-28から応力円0は $\sigma_1 = s_t = \sigma_0 > 0$ 、 $\sigma_3 = \sigma_2 = 0$ 、すなわち、一軸引張り状態を表わしている。ただし、 s_t を引張強度とする。

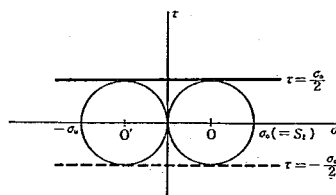


図-28 最大せん断応力説による降伏条件

これに対して応力円0'は、 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 、 $\sigma_3 = -s_c = -\sigma_0 < 0$ 、すなわち一軸圧縮状態を表

わす。ただし s_c は圧縮強度とする。この場合、図からもわかるように、 $s_t = s_c$ である。すなわち最大せん断応力説では、圧縮強度と引張り強度が等しくなる。

岩石やコンクリートは、圧縮強度が引張り強度よりもかなり大きいので、岩石やコンクリートには最大せん断応力説はあてはまらない。

(3) 応力円包絡線説

Mohrはせん断応力 τ が垂直応力 σ によって決まる一定値に達するか、または最大引張り応力が一定の値 T_0 に達するかした時に、破壊が起こると考えた。これは破壊が起こる時のせん断応力と垂直応力の関係が

$$\pm \tau = f(\sigma) \quad \dots\dots\dots 8$$

で与えられ、 $\sigma = T_0 > 0$ で $\tau = f(T_0) = 0$ であることを意味する。この場合も破壊が起こ

るときの応力状態をMohrの応力円で表わすと、8式はこれらの円の包絡線を示すこととなる。せん断応力 τ と垂直応力 σ の間に $\tau > f(\sigma)$ が成立するような点が存在することになる。

8式の関係の形は実験的に決定すべきものであるが、一般に8式が満足されるべき条件としては次のことが云える。まず物体は静水圧のもとで破壊しないから8式で表わされる曲線が $\sigma < 0$ で σ 軸を切ることはない。次に最小主応力 σ_3 がある程度以上大きくなると(たとえば0より大きくなると) σ_3 の値とは無関係に、最大引張り応力 σ_1 が一定値に達したとき破壊が起こるという事実から8式で表わされる。応力円包絡線は、 $\tau = 0$ で有限な半径を有する応力円に接することになる。したがって8式は σ 軸を垂直に切り、しかもこの点で一定の曲率半径を有する曲線の式でなければならないから、すなわち $\tau = 0$ で

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\tau} &= 0 \\ \frac{d^2\sigma}{d\tau^2} &\neq 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots 9$$

が成立する。ここで最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の間に成立すべき関係式を考えると、Mohrの応力円は、

$$\tau^2 + \left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \dots\dots\dots 10$$

で表わされる。上式より応力円は半径 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ および中心の座標 $((\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0)$ によって定まることがわかる。したがって破壊応力円が8式で表わされる曲線に接するという条件を満足させるため、主応力の σ_1 および σ_3 の間に一定の関係が存在する。今この関係が

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = F \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \dots\dots\dots 11$$

と書くことにする。ここで $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_m$ $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = P$ とすると10式は

$$(\sigma - P)^2 + \tau^2 = \tau_m^2 \dots\dots\dots 12$$

が成立する。そうすることは、 P をパラメータとした一群の円の方程式であることがわかる。

次に8式が比較的簡単な形の式である場合を考えてみる。始めにこれらの関係を直線包絡線にあてはめると次のようになる。最も簡単な場合図-29に示すように8式が σ 軸上を対称軸とする2つの直線を表わすものを考えると、この場合8式は、

$$\pm \tau = \tau_0 - c\sigma \dots\dots\dots 13$$

とかかれる1次式となる。ただし c は定数と

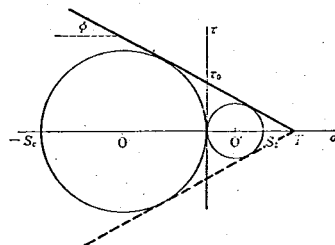


図-29 内部摩擦角説による破壊応力

する。これで13式と4式を比較すると13式は4式で $\mu=c$ とおいたものにすぎないことが判る。従って4式が破壊応力円の包絡線の式で、 τ_0 および μ は、この包絡線の式の単なる定数であるとする、内部摩擦角説は応力円包絡線説の特殊な場合でもあるといえる。このように考えると内部摩擦角説では、一軸圧縮の破壊応力円は図-29の円Oであり、一軸引張りの破壊応力円は図の円O'で表わされる。またこのことから引張り強度 S_c は、圧力強度 S_c より小さい値で岩石についての実験結果とよく一致する。

次に放物線包絡線について考えてみる。破壊応力円の包絡線を直線と考えた時には、垂直応力が引張り応力である領域で不都合があることがわかった。そこで次に4式が σ 軸を対称軸とする放物線の一般式は、

$$\tau^2 = mT_0(T_0 - \sigma) \quad \dots\dots\dots 14$$

と書くことができるが、これを6.1式と同じ形にするには、両辺の平方根をとって

$$\pm \sqrt{mT_0(T_0 - \sigma)} \quad \text{とすればよい。}$$

また14式に12式を代入すると

$$(\sigma - P)^2 + mT_0(T_0 - \sigma) = \tau_m^2 \quad \dots\dots\dots 15$$

となるが、この式で σ の共通条件を求めると

$$\tau_m^2 + mT_0P + m\left(\frac{m}{4} - 1\right)T_0^2 = 0 \quad \dots\dots\dots 16$$

が得られる。これがこの場合の11式に相当するとされる。従って14式で表わされる包絡線は $\sigma > 0$ 、すなわち垂直応力が引張り応力の時だけ σ 軸と交わる。さらにこの場合 $\tau = 0$ で $\sigma = T_0$ でこの放物線に接する応力円のうち、半径最大のものを求めると14式を τ について微分して

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\tau} &= -\frac{2\tau}{mT_0} \\ \frac{d^2\sigma}{d\tau^2} &= -\frac{2}{mT_0} \quad \dots\dots\dots 17 \end{aligned}$$

が求められる。この応力円の半径は、 $\frac{mT_0}{2}$ となるから

$$\left\{ \sigma - \left(1 - \frac{m}{2} T_0\right) \right\}^2 + \tau^2 = \frac{m^2 T_0^2}{4} \quad \dots\dots\dots 18$$

で表わされる。従って、最大主応力 σ_1 が T_0 と等しく最大せん断応力(応力円の半径)が $\frac{mT_0}{2}$ より小さい時、すなわち最大主応力と最小主応力の間に

$$(m-1)\sigma_1 + \sigma_3 \geq 0 \quad \dots\dots\dots 19$$

が成立する時は、常に主応力 σ_1 が一定値に達した時に破壊が起こる。このように14式で表わされる放物線は、実際の岩石の実験結果とはほぼ一致するが、ある種の破壊応力円包絡線は、完全な放物線とはならない。

(4) せん断ひずみエネルギー説 (Von, Mises の説) (Huber-Hencky の説)

せん断ひずみエネルギーが一定値に達した時、破壊 (または降伏) が起こる考え方で、弾性ひずみエネルギーは主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ としてその時の主ひずみを $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ とするとこの応力状態の下で単位体積中に蓄えられるエネルギーとしては

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_2 \epsilon_2 + \sigma_3 \epsilon_3) \quad \dots\dots\dots 20$$

で与えられる。上式はまた、

$$W = \frac{1}{2E} \{ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) \} \quad \dots\dots\dots 21$$

とも書くことができる。ただし E はヤング率、 ν はポアソン比である。

このような弾性ひずみエネルギーのうち、体積の変化による分は

$$\frac{1}{6} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad \dots\dots\dots 22$$

であるから 21 式から 22 式を差引いたものは形の変化によるものであり、これをせん断ひずみエネルギーと呼ぶ。従って、せん断ひずみエネルギーは

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{6G} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_3 \sigma_1) \\ &= \frac{1}{12G} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} \quad \dots\dots\dots 23 \end{aligned}$$

で与えられることになる。

せん断ひずみエネルギー説では、この W が一定値に達した時、破壊または降伏が起こると考えられる。

一軸引張り試験を行なった時、ある物体応力 σ_0 で破壊が起こったとするとこの時の応力状態は

$$\sigma_1 = \sigma_0 \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

であるから、23 式より

$$W = \frac{1}{6G} \sigma_0^2 \quad \dots\dots\dots 24$$

が得られる。そして、これを 23 式に代入すると、この物体の破壊条件は

$$2\sigma_0^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad \dots\dots\dots 25$$

と書くことができる。また、23 式の代わりに

$$\tau_{oct}^2 = \frac{1}{9} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} \quad \dots\dots\dots 26$$

で定義される八面体せん断応力 (octahedral shearing stress) τ_{oct} が一定値に達した時、降伏もしくは破壊が起きるとする考え方がある。23 式と 24 式では定数項が異なるだけであり σ_0 と τ_{oct} との間には

$$\frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_0 = \tau_{0ct} \dots\dots\dots 27$$

の関係が存在している。また、6.2.2式で $\sigma_2 = \sigma_3$ とおくと

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

となり前に述べた最大せん断応力説による破壊条件と一致する。このことは、もしせん断ひずみエネルギー説が正しければ、特別な応力条件の下では最大せん断応力説も正しいということを意味している。

一軸引張りの場合は、 $\sigma_1 > 0$ 、 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ であるから25式より $\sigma_1 = \sigma_0$ が得られる。他方一軸圧縮の場合には、 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 、 $\sigma_3 < 0$ であるから25式より

$$\sigma_3 = -\sigma_0$$

が得られる。従って、せん断ひずみエネルギー説では引張り強度と圧縮強度が等しいことになるが、これは岩石の実験結果とは矛盾する。

(5) 最も一般的な破壊応力条件

今までの破壊応力条件のうち一般的な破壊応力条件である応力円包絡線説では中間主応力の影響が無視されている。これに対して、せん断ひずみエネルギー説では中間主応力の影響が考慮されているが、引張り強度と圧縮強度が等しいことになる。そこでこの両者を融合してより一般的な破壊条件を表わすことが試みられている。この説の考え方は破壊の時の八面体せん断応力（3つの主応力軸の上にその6個の頂点を有する正八面体の面上に働くせん断応力の値で τ_{oct} と表わす）が平均垂直応力

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \dots\dots\dots 28$$

の関数で表わされるとする説で、従って、この場合の破壊応力の条件式は、

$$\tau_{oct} = f(\sigma_m) \dots\dots\dots 29$$

と書かれる。2つの主応力が等しい時、すなわち

$$\sigma_2 = \sigma_3 \quad \text{または} \quad \sigma_1 = \sigma_2 \quad \text{の時は29式}$$

26式より

$$\frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) = g(\sigma_1 \cdot \sigma_3) \dots\dots\dots 30$$

を得られるが、上式を変形することによって11式と同じ形の式が得られることになる。すなわち、この場合は27式で表わされる降伏条件と、応力円包絡線による降伏条件が一致する。

(6) グリフィス理論による破壊

ガラスのようなぜい性材料には、全て潜在的なクラックを含んでいて力が加えられると、クラックの周囲には非常に大きな応力集中が起こる。クラックの縁における引張り応力は、クラックの大きさ、形、そして方向によって異なるが、材料に加えられた応力よりも遙かに大きく

なる。この応力集中によって生じた応力は、ある場合には加えられた応力の100倍にも達する。

例えば、図-30のような平らの板に非常に狭いクラックが板の平面に垂直な方向にあっているとすると、板の厚さがクラックの長さ $2c$ に比して小さく、クラックの長軸の方向が σ に垂直な時には外力が一定であると考え、クラックがある場合と、ない場合との板の単位当たりひずみエネルギーの差 W_s は

$$W_s = \frac{\pi c^2}{E} \sigma^2 \dots\dots\dots 31$$

で計算される。また、クラックの表面の持つ単位長さ当たりの表面エネルギー W_a は、

$$W_a = 2.2 c \alpha = 4 c \alpha \dots\dots\dots 32$$

で与えられる。

一方、このクラックができるための外力による仕事 W は、板全体を考えるから6.26式で与えられる W_s の2倍となり

$$W = 2W_s = 2\pi^2 c \sigma^2 / E \dots\dots\dots 33$$

である。そこで、クラックの長さが増した場合には、弾性ひずみエネルギーおよび表面エネルギーの増加と外力によるポテンシャルエネルギーの減少が起こる。そして、この系全体としてのポテンシャルエネルギー ΔW は、

$$\begin{aligned} \Delta W &= (W_s + W_a) - W \\ &= \frac{\pi c^2}{E} \sigma^2 + 4 c \alpha - \frac{2 \pi c^2}{E} \sigma^2 \\ &= 4 c \alpha - \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \dots\dots\dots 34 \end{aligned}$$

これをクラックの大きさ c に対してプロットすると、図-31のようになる。そこで、クラックが $c=c$ より大きくなると、クラックはこの系のポテンシャルエネルギーを連続的に減らす過程によって自から拡大していく条件であり、ここで得られる σ が、その応力、すなわち破壊強度である。

破壊応力 σ は、このようにクラックの長さ $2c$ の平方根に逆比例することが判ったが、クリフスはシリカガラスの板に人工的に長楕円形のクラックを作って実験を行ない定数 $\sigma\sqrt{c}$ を求め

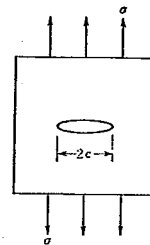


図-30 グリフィス (Griffith) クラック

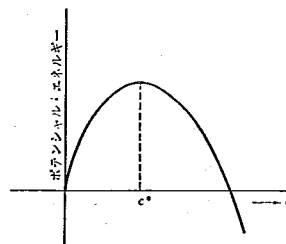


図-31 ポテンシャル・エネルギーの減少

$$\sigma = \sqrt{c} = \sqrt{\frac{2E\alpha}{\pi}} = \text{定数} \dots\dots\dots 35$$

の関係から、人工的クラックがない時にシリカガラスの中に潜在するクラック長さは 10^{-3} mmのオーダーであることを求めている。

岩石が多数の結晶の集合体であることはよく知られていることで、肉眼でも結晶と結晶の境界をはっきりと区分することのできるものも多い。このようにいろいろ欠陥を含み、しかもそれが肉眼で識別できる位大きいものは、これらのクラックは岩石の強度に非常に大きな影響を与えることが想像される。と同時に鉱物の結晶同士あるいは方向などによってもグリフィスクラックとして応力集中を行なうことは考えられることで、従ってその破壊機構の究明はまだまだ困難とされているようである。

2. 弾性波速度と強度（岩石の物理的性質と弾性波速度）

岩盤の1点に極めて短い時間の間に急速に変化する力が加わった場合には、その点における力の平衡は応力波の伝播という形で考えなくてはならない。衝撃波塑性波を生ずるような特殊な状況を別にすると、この応力波の伝播は弾性波の伝播として扱われる。

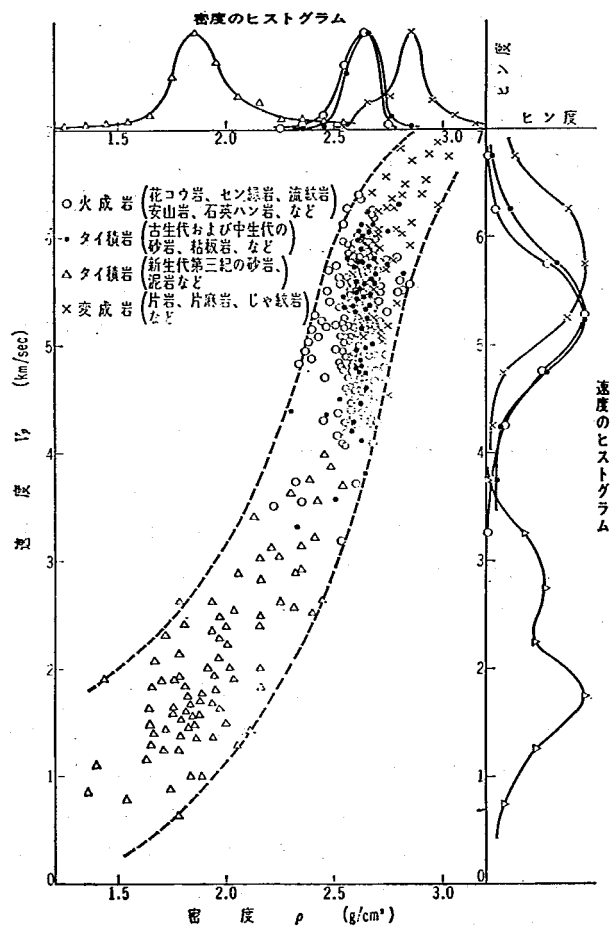
岩盤の中を伝わる弾性波には縦波（P波）と横波（S波）の2つのタイプがあり、他に Rayleigh波と呼ぶ表面波が伝播することが知られている。

岩盤（あるいは岩石片）の中を伝播する弾性波の速度は、岩盤の力学的諸性質（弾性係数E、剛性率G、粘性率 ν 、密度 ρ ）によってはほぼ定まるが、自然条件（成因、き裂、風化程度etc）にも影響される。従って岩盤の中を伝播する弾性波の測定から、これら岩盤の力学的な性質を求めることが可能とされる。この弾性波は地殻や岩盤のための研究、地震学や物理探鉱学では最も有力な手段の一つとされている。岩石の中を伝わる音の速度に対して、岩石に圧力が加えられると音速度は大きくなり、割れ目などの欠陥があると、音速度は小さくなる。自然的要因の実験的なこれらの弾性波速度に関する文献を調べると、岩石の密度に関しては、大体次のようにいわれている。

(1) 弾性波速度と密度の関係

弾性波速度と密度のヒストグラムについてみると図-32のようになり、弾性波速度はある程度のグループ毎に正規分布となる。火成岩では最頻値は $5.0 \sim 5.5 \text{ Km/sec}$ で集中度がかなりよい結果となっている。堆積岩では、古世代、中世代の岩石は $5.0 \sim 5.5 \text{ Km/sec}$ が最頻値で、その分布の形もよく火成岩と似ているが、新世代第3紀の砂岩、泥岩などでは分布が広範囲におよびピークは、 $1.5 \sim 2.0 \text{ Km/sec}$ の他に $2.5 \sim 3.0 \text{ Km/sec}$ のピークも表われている。また変成岩では分布は火成岩とよく似ているが、最頻値が $5.5 \sim 6.0 \text{ Km/sec}$ でやや大きくなっている。

密度のヒストグラムも同様の特徴が表われ、火成岩では最頻値は $2.6 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ 位となり、集中度はかなりよくなっている。堆積岩では古世代の岩石で $2.6 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ にピークが存在す



図一32 弾性波速度と密度のヒストグラム

る。そしてこの第3紀の岩石は、速度のヒストグラムと同様に分布は固結度などの違いにより広範囲に及ぶ。変成岩の密度は $2.8 \sim 2.9 \text{ g/cm}^3$ にピークが表われ、火成岩、古世代、中世代の堆積岩に比べ、やや大きくなっている。

以上のように岩石の速度および密度は、従来からいわれているように、岩種によってそれぞれある一定範囲内に集中する傾向を示している。図一32からもわかるように、 $V_p - \rho$ 分布にある傾向が認められ、これらは2つの曲線の間に包絡される。 V_p は ρ の増加に対して、 $\rho \geq 2.5$ では、対数関数的に $\rho \leq 2.5$ では指数関数的に増加する傾向となっている。この $\rho \approx 2.5$

の位置は大略的に、火成岩、変成岩、中世代の堆積岩などの堅い岩石グループなど、新世代第3紀の柔らかい岩石グループの境界値ともいえる。

(2) 速度と有効間げき率、吸水率

弾性波速度と有効間げき率との相関を図-33に示す。図-33から有効間げき率の増加と共に速度が急激に低下していることがわかる。火成岩や変成岩のような堅い岩石は、有効間げき率は0.3~8%程度で、これが第3紀の柔らかい岩石では10~15%とかなり大きな値となっている。これらの速度と間げき率との関係式を近似的に表す次式が得られる。

$$n = b \cdot e^{-a \cdot V_p} \dots\dots\dots 36$$

ただし、 $a \cdot b$: 定数 n : 有効間隙率 V_p : 縦波速度

次に速度と吸水率(W_f)との関係をみてみると、前記の $V_p \propto n$ 曲線と同じように、吸水率の増加と共に速度は急激に低下している。この関係を図-34に示す。また、有効間隙率(n)

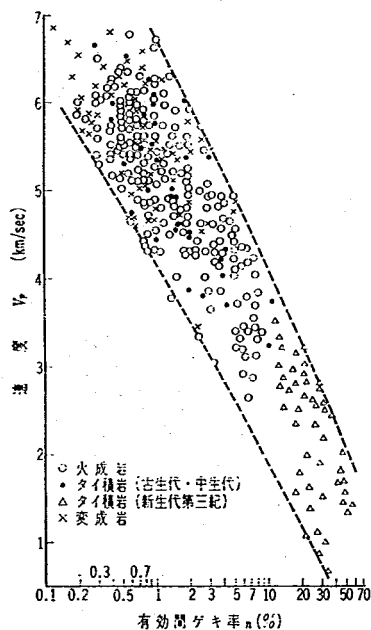


図-33 弾性波速度と有効間隙率

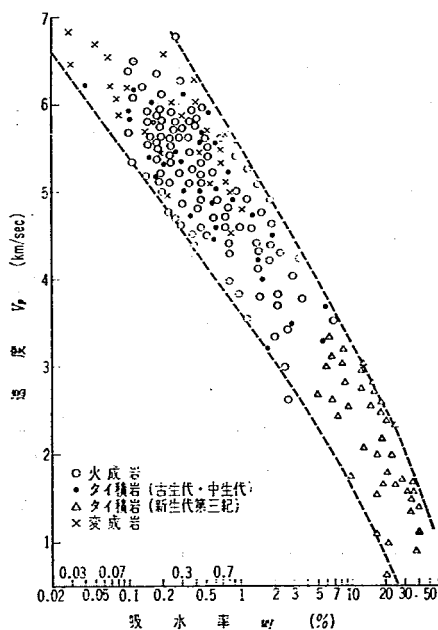


図-34 弾性波速度と吸水率

と吸水率(W_f)との間には次の関係がある。

$$n = \rho_d \cdot W_f \dots\dots\dots 37$$

ここで、 ρ_d : 強制乾燥状態の密度

(3) 速度とヤング率

岩石の応力-ひずみ曲線から求めた静的ヤング率 (E_s) と弾性波速度 (V_p) との関係を図-35に示す。静的ヤング率は、火成岩や古世代、中生代の堆積岩および変成岩では $(10 \sim 50) \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ であり、第3紀の岩石では $(0.4 \sim 2.5) \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ 程度の値となっている。図から $V_p - E_s$ の分布は2つの曲線間にあり、この曲線は次式によってほぼ表わされている。

$$E_s = 2 V_p^3 \dots\dots\dots 38$$

これをもし理想状態の等方性の弾性体の理論によると、ヤング率 E と速度 V_p との間には、次式のような関係にあることが知られている。

$$E = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \dots\dots\dots 39$$

ここで ρ : 密度

ν : ポアソン比

(4) 速度と一軸圧縮強度

弾性波速度と一軸圧縮強度の関係を図-36に示す。図からもわかるように両者の関係は非常にばらついたものとなっており、この傾向は火成岩などのような堅い岩種において、むしろ著しく表われているということは、堅い岩種ほど潜在的な割れ目やすべり面などが多く存在し、一軸圧縮強さに大きな影響を与えることを意味している。なお、これまでの

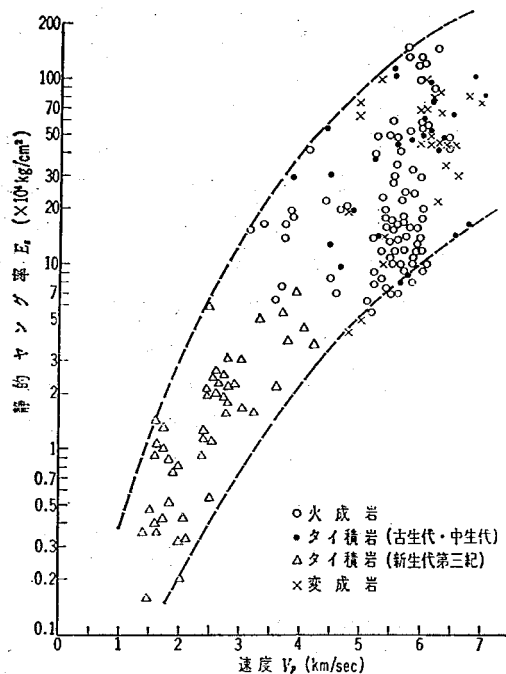


図-35 弾性波速度と静的ヤング率

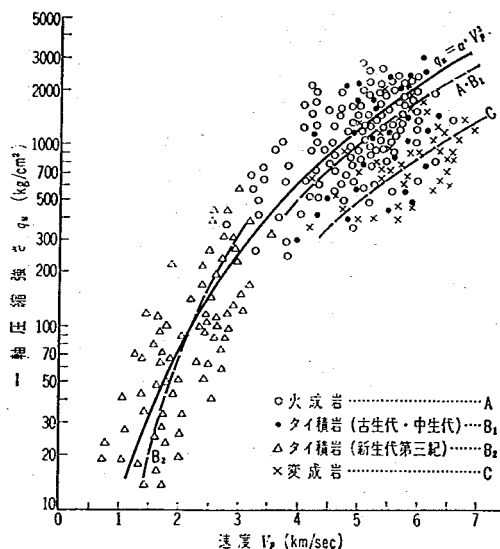


図-36 弾性波速度と一軸圧縮強度

データからは、 v_p と σ_c との間には次式によって関係づけられることが明らかにされている。

$$\sigma_c = 10 V_p^3 \dots\dots\dots 40$$

しかし、上式は岩種より若干傾向が異なり、たとえば変成岩では火成岩に比べて全般的に速度は大きい、一軸圧縮強度はむしろ小さくなっている。

(5) 速度の含水比による影響

速度の含水比による影響を調べるため、強制乾燥状態の速度 v_d と強制湿潤状態の速度 v_w との関係を図-37 に示す。全体的な傾向としては $V_d \geq 3.0 \text{ Km/sec}$ では含水することによって速

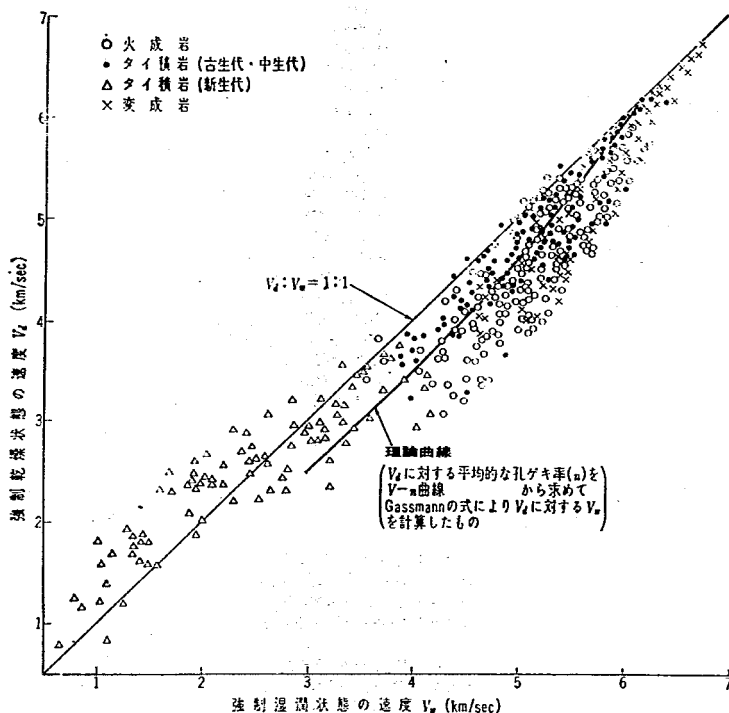


図-37 強制湿潤状態と強制乾燥状態の弾性波速度

度が増加しているが $V_d \approx 6.0 \text{ Km/sec}$ では含水による速度の増加率は極めて小さくなっている。これに対して $V_d \approx 3.0 \text{ Km/sec}$ 以下の領域では含水によって逆に速度の減少するものもあり、この傾向は $V_d \leq 2.0 \text{ Km/sec}$ において特に著しい。岩質が均質等性であるとするればその P 波速度は、体積弾性率および剛性率の関数として次式のように表わすことができる。

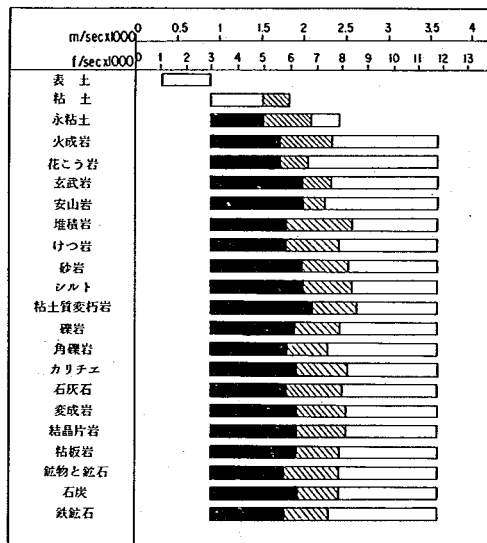
$$V_p = \sqrt{\frac{K + 3/4 G}{P}} \dots\dots\dots 41$$

ただし、K：体積弾性率 G：剛性率 P：密度

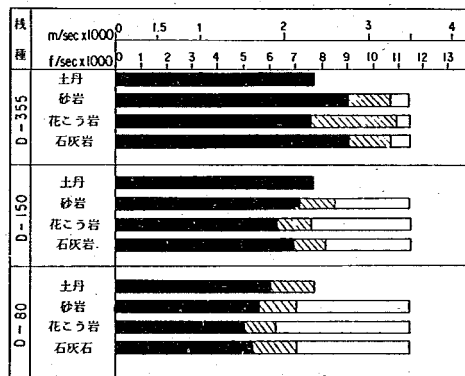
ここで体積弾性率は剛性率に比べ、孔隙に水があるかないかで大きく左右されるため、含水による速度への影響の変化は主として体積弾性率の変化によって定められる。

(6) 弾性波速度とリッパ作業

現在、リッパ作業の際にブルドーザ各メーカーが示している標準的な作業限界は、表-1に示



D8H8Bレングルンヤフ (キヤタビラ社1970)



(小松製作所1971)

リッピング可能 リッピング不能
リッピング限界

表-1 リッパの作業限界

すような弾性波速度によるものが目安にされていて、主にこの表より現場岩盤条件に対応するブルドーザ機種の選定を行なっている。そして、リッパ作業量の決定によく使用されるものとして、掘削断面積を細分してリッピングに要した時間を個々に記録する方法、リッパ作業の時間を計り、これを別なスクレーパのようなものでリッピング量を計る方法、あるいは、一定距離のリッピング時間を計り、リッピング断面積と作業距離から求める方法等がある。また、これらによる方法の他に、実際よく現場において積算に使用されているものとして、道路土工指針では、時間当たりの作業量の積算に次のような式を用いているものもある。

$$Q = \frac{60 a \cdot \ell \cdot E \cdot f}{C_m} \dots\dots\dots 42$$

ただし、Q：時間当たり作業量（ m^3/hr ）、a：サイクルタイム（min）、 ℓ ：1回当たり作業距離（m）、E：作業効率、a：リッピング断面積（ m^2 ）、f：土量換算係数。そして、これらの数値は以下の表－2～5によって次のように示されている。また、リッピング断面積 a は次式によって与えられる。

表－2 21ton級リッパ作業効率

区分	つめの本数	弾性波速度 (m/sec)	標準作業効率 (E)
軟	3本	500	0.85
		700	0.65
		900	0.50
中	2本	700	0.80
		900	0.60
		1,200	0.40
硬	1本	1,000	0.90
		1,300	0.50
		1,600	0.30

表－3 32ton級リッパ作業効率

区分	つめの本数	弾性波速度 (m/sec)	標準作業効率 (E)
軟	3本	600	0.85
		800	0.65
		1,000	0.45
中	2本	900	0.70
		1,200	0.50
		1,400	0.40
硬	1本	1,200	0.80
		1,500	0.50
		1,800	0.30

$$a = \beta h^2 \cdot n$$

ここで β : 岩質による係数

h : 掘削深さ

n : つめの本数

また、サイクルタイム C_m も次式に

よって与えられる。

$$C_m = \ell / v_1 + \ell / v_2 + t_g$$

ここで ℓ : 1回の作業距離

v_1 : リッピング速度

v_2 : 後退速度

t_g : ギアの入換え時間

表-4 土量換算係数: f

作業量を地山(跡坪)土量で求める場合	$f = 1$
破碎してゆるんだ土量で求める場合	$f = L$
締固め後の土量で求める場合	$f = C$

表-5 岩種による係数

規格	1回当たりリッピング断面積(m^2)		
	1本つめ	2本つめ	3本つめ
21t級	0.14	0.28	0.42
32t級	0.20	0.40	0.60

従って、以上のような数値を代入することによってリッパ作業量を算出する方法もあるが、これでも実際の施工現場における作業量を予測することは困難である。

3. 岩石の各種試験法

(1) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験に用いる試料は円柱や角柱であるが、最も一般的なのは、単位長さの稜を持った立方体かまたは高さや直径の比が2倍となっている円柱である。試験片には軸方向にのみ圧縮力を加えて試験を行ない、破壊が起こる面に圧縮応力だけ作用させて破壊が起こった時の圧縮応力を圧縮強度としている。すなわち、圧縮強度 σ_c は試験片が破壊を起こした時の全荷重 P_c と試験片の軸方向の断面積 A とから

$$\sigma_c = P_c / A \quad \dots\dots\dots 43$$

で与えられている。また、圧縮強度に影響を与える要因として次の点に注意を払う必要がある。

- | | |
|-------------------|-----------|
| (i) 試験片の形 | 試験片の縦横比 |
| (ii) 試験片の大きさ | 寸法効果 |
| (iii) 試験片の仕上げの程度 | 特に加圧面の平坦度 |
| (iv) 圧縮試験機の加圧板の状態 | 加圧板との摩擦 |
| (v) 試料の状態 | 岩石の空隙率 |
| (vi) 荷重の加え方 | 荷重速度 |

(2) 引張り強度試験

断面積 A の試験片が一樣な引張り荷重 P_t で破断した時、引張り強度 S_t は

$$S_t = P_t / A \quad \dots\dots\dots 44$$

で定義される。この引張り試験は、岩石では非常に困難であり、代りに引張り強度を測定す

るため図-38に示すような試験方法が行なわれている。

円板形の岩石試験片を上下から圧縮すると円板の内部には中心線に沿って左右に離れようとする引張り応力が生じ、ついにはこの応力によって引張り破壊を起こす。破断した時の応力すなわち、引張り強度 S_t は加えた全荷重 P 、円板の直径 d 、円板の厚み ℓ (円柱の高さ) に対して

$$S_t = \frac{2P}{\pi d \ell} \dots\dots\dots 45$$

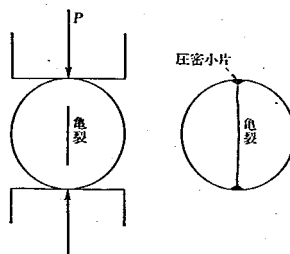


図-38 引張試験

で引張り強度が与えられることとなる。ここで標準的な試験片の形状としては、円柱試験片の直径と高さの比を $\ell/d = 1.5$ としている。

引張り強度試験では、一軸圧縮試験とほぼ同様な方法によって行なうため試験に際しては、やはり上述の注意点に気を配らなければならない。

(3) セン断強度試験

せん断強度を求める時、最も簡単な方法は圧縮強度と引張り強度とを測定して、これからせん断強度を計算する方法もあり次式によって表わす。

$$\tau = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_c \sigma_t} \dots\dots\dots 46$$

しかし、上式で求めたせん断強度は、真のせん断強度よりも低い値となるのが普通である。直接にせん断強度を求める試験法は、一面せん断試験と二面せん断試験とがある。ここでは、一面せん断試験についてのみ記することとする。

一面せん断試験は、図-39に示すように、強制された破断面が一つしかないもので、この強制された破断面に平行な方向にせん断力を加えてその破断面に沿って試験片が破断した時、加えたせん断力を破断面で除してせん断強度とする。すなわち、破断時のせん断力を P_t 、破断面の面積を A とすれば

$$\tau = P_t / A \dots\dots\dots 47$$

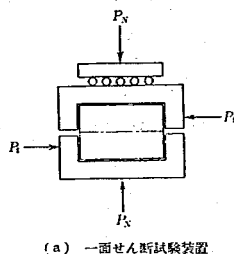


図-39 一面せん断試験

によって、せん断強度が求められる。

(4) ショア硬度試験

元来、金属などの表面硬度を計るために用いられた試験方法で、先端に小さなダイヤモンドの球をつけた重さ約 4 g の小さな錘を約 25 cm の高さから $25 \text{ mm} \phi \times 25 \text{ mm}$ の形状に整形した試

験片の表面に落下反発させ、その跳ね上がりの高さで硬度数を規定する。

一般に硬いもの程、跳ね上がりの高さが大きいことを利用するものである。

ショア硬度試験装置の概略を図-40に示す。

(5) シュミットハンマ試験

原理的にはショア硬度計と同じように反撥値を測定する試験機で相異点としては、ショア硬度計が定置型なのに比べて、シュミットハンマは携帯型であり現場での使用に適している。シュミットハンマの原理は、図-41に示すように予圧バネ(a)によって岩石、表面に押し付けられている衝撃棒(e)と衝撃錘(c)とから成っている。試験方法は始め反撥重錘を所定の位置まで引き上げておいて衝撃棒を測定すべき岩盤の表面に直角に押し付けると、予圧バネが一定の長さだけ縮んだ時に反撥重錘を支えていた爪がはずれて、

反撥重錘は衝撃バネの力によって衝撃棒の受け皿を叩く、反撥値Rは反撥重錘の衝撃前後の距離の比(百分率)で示される。シュミットハンマによる測定は何回もくり返して行ない(1測定20回程度)、同一個所は叩かないように注意する。

岩石の反撥値Rと一軸圧縮強度 σ_c との相関を求めると図-42のようなグラフによって示されている。

(6) ページ衝撃試験

ページ衝撃試験は岩石の打撃破壊に対する抵抗値を知る試験方法で、ハンマを試験片に落下させ、試験片が破壊した時の落下高さをもって試験片の打撃強度として表わす。

ページ衝撃試験装置の概略を図-43に示す。

落下高さは1回の落下において1cmずつ高くなって落下するようになり、硬い岩石ほどその強度は高さは高くなるが一軸圧縮強度などその他の強度との相関は低い結果となっている。

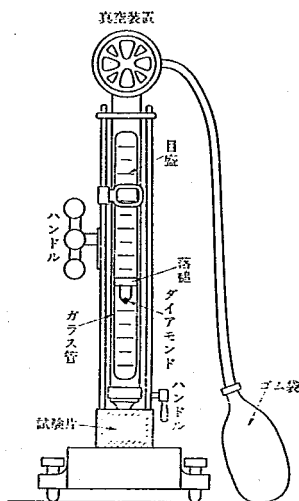


図-40 ショア硬度試験装置

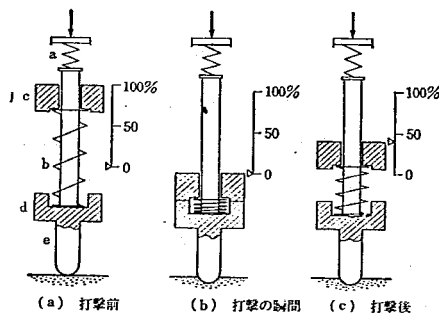


図-41 シュミットハンマの原理

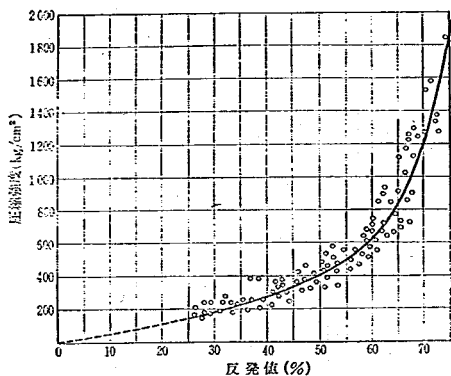


図-42 シュミットハンマ反発値と一軸圧縮強度の関係

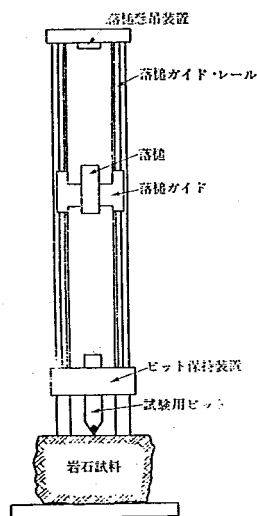


図-43 ページ衝撃試験装置

(7) プロトジャコノフ試験

この試験方法は、ソ連や英国などの採掘石炭の採鉱に対する強度を一軸圧縮強度や引張り強度のようなもので適切に表現できないような岩石の強度を表わす指数として注目され出している試験方法で、この方法によれば試験しようとする各種岩石試料を1個が75g前後となるように岩石を小塊なものにして5個づつ用意して、図-44(a)に示すような円筒形の試験容器の中に1個づつ入れて、その上から重量2.4kgの重錘を落下させ、これを何回(岩石のくずれ方によって異なる)かくり返すことにより岩石試料を破壊する。そして、破壊された試料を4.2mmフルイによってフルイ分けを行ない、これを通過した試料だけについて図-44(b)に示すような特別に製作された測定用メスシリンダに入れて高さを測定する。この高さ⁴⁴を ℓ としてプロトジャコノフ指数 f を次式によって求める。

$$f = \frac{20n}{\ell} \dots\dots\dots 48$$

ここで、 n ：重錘の落下回数とする。

このプロトジャコノフ指数と一軸圧縮強度の関係を図-45に示す。

4. 亀裂と風化の影響

地震に伴って地盤に大きな割れ目が生ずることがある。そして、そこから地層もずれることがある。そして、そこから地層もずれることがある、このような地層の割れ目のうち、割れ目沿って地層の喰い違いを起こしたものが断層であり、造山運動や地震によって地層に割れ目が生じると、水や空気や風などによって侵蝕が始まる。地表附近の岩石が温度の変化や水の作用によって破壊さ

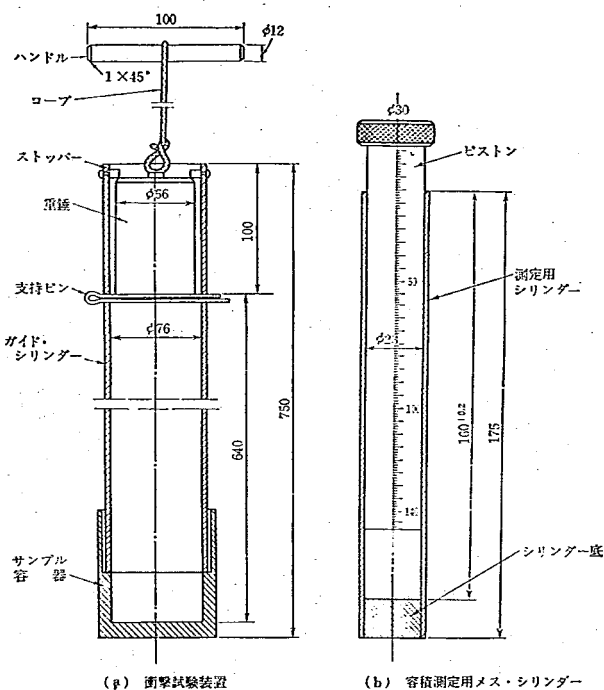


図-4-4 プロトジャコノフ試験装置

れ、長い年月を経て土にまで変化する過程が風化と呼ばれている。水の侵蝕がもたらすものとしては、断層、破碎帯、岩石の節理、層理、壁開および孔隙性などがある。そして、これらの発達の著しいもの程、風化を受けやすくなる。結晶片岩類（節理、壁開、片理）、花崗岩類（節理、亀裂）および砂岩類（多孔質、層理）などが水による風化の影響を受けやすい、一方、岩石の性状よりみると一般に火成岩や変成岩などは、風化に対して不安定な鉱物の含有が多いとされ、造岩鉱物の変質し結晶間の結合が弱まり土砂化が進む。これに反し堆積岩ではとくに水成岩などでは、風化に対して安定な鉱物が多いので個々の鉱物の変質崩

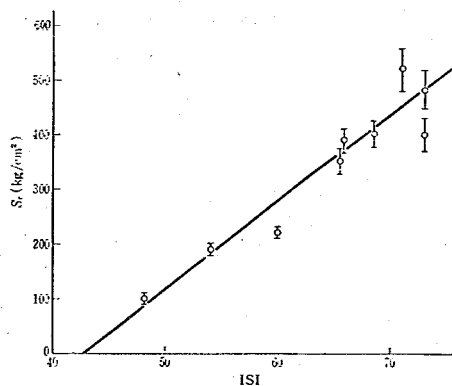


図-4-5 プロトジャコノフ係数と一軸圧縮強度の関係

壊よりは、むしろこれを固結された因子の解放により土砂化する。同じ火成岩でも完晶質、ガラス質、造岩鉱物の種類などにより抵抗性が異なる。堆積岩では圧密脱水の度合、膠質物および鉱物の種類により異なり、堆積岩についてみれば風化作用は岩石化作用とは逆の現象で、逆行的な続成作用であるとする考え方がある。

一般に堆積物には荷重圧密（脱水）、再結晶作用、粘土などによる膠質作用、またはこれら諸作用の相互作用により岩石化してゆくものである。

以上のことから水の浸透が著しく、化学的活性な岩石および固結度の低い岩石ほど深くまで風化し、浸蝕を考えなければ厚い風化帯が形成される。逆に水の浸透が悪く、不透水性で、化学的に不活性な岩石および固結度の高い岩石ほど風化に対する抵抗性が強く、深くまで風化が及ばないとされている。

以上、岩石の一般的な性格について述べた。