



土木研究所資料

第774号

削孔機械による岩石の掘削

(海外文献紹介)

昭和47年9月

建設省土木研究所
機械研究室

ま え が き

近年たて穴の掘削を含めてトンネル掘進機など大口径の岩石掘削機械が国内外において注目を集めている。

この報告書はこれら岩石の掘削に関して各地の掘削実績を収集したり、基礎的な岩石の掘削を究明するための実験研究を行なっている米国鉱山局の研究成果の一つとして発表されたものの一つで、わが国の関係研究者、技術者の参考になれば幸いである。

昭和47年 9 月

機 械 研 究 室

千 田 昌 平

目 次

1. 概 要	2
2. 最近のトンネル掘進機	4
3. TCMRC における研究概要	9
3-1 実 態 調 査	9
3-2 削孔試験装置 (MBU)	9
3-3 直線掘削試験装置 (LCA)	10
4. 直線掘削試験装置を用いたデスクカッタの試験結果	13
4-1 試 験 条 件	13
4-2 代表的なクレータ	13
4-3 垂直荷重の関数としてのクレータの深さ.....	13
4-4 垂直荷重の関数としての水平荷重	16
4-5 エネルギーとの関係	19
4-6 岩石の物理的性質からデスクカッタの掘削性の推定	22
4-7 結 論	25
謝 辞	26

削孔機械による岩石の掘削

PRINCIPLES OF ROCK CUTTING APPLIED TO MECHANICAL BORING MACHINES

by

William E. Bruce, Supervisory Mining Engineer

Roger J. Morrell, Mining Engineer

要 旨

鉱山局のTwin Cities Mining Research Centerでは効果的なトンネル掘進機を設計するための資料を得るために岩石の機械的掘削に関して実験研究している。

これらの研究には試験装置として、トンネル掘進機のカッタやたて坑掘削に用いるカッタなどを試験する多目的の試験機である削孔試験装置 (Multipurpose Boring Unit 以下MBU と呼ぶ)、およびカッタの作動を解析するための直線掘削試験装置 (Linear Cutter apparatus, 以下LCA と呼ぶ) が用いられている。

ここにのべるLCAの結果は削孔機械の設計技術者にとっても参考になるものと考える。

1. 概 要

ここにのべる鉱山局の研究目的は、各種岩石に対する各種荷重条件における模型のデスクカッタおよび原寸のボーリング機械のカッタの掘削性を求めるためのものである。

この実験では刃先角 60° および 90° の2種類 of デスクカッタについて行なった。岩石は、limestone 3種, marble 1種類で、この報告書にのべる実験の岩石の圧縮強度は9,000

表 - 1 鉱山で使われた

鉱 山 名	Climax Molybdenum Mine	Magma Mine	Star Mine	White pine Mine
場 所	Climax Colorado	Superior Arizona	Burke Idaho	White pine Michigan
施 工 年 [※]	1969	1969	1968	1968
トンネル径 ft in (m)	13ft 0in (3.9)	12ft 6in (3.75)	9ft 0in (2.7)	18ft 0in (5.4)
岩 の 種 類	Quartz Monzonite Porphyry and Granite	Limestone Quartzite and Dacite	Quartzite and Argillite	Sandstone and Shale
一 軸 圧, psi 縮 強 度 (Kg/cm ²)	— —	12000 ~ 20000 (840 ~ 1400)	17,000 ~ 50,000 (1,190 ~ 3500)	12000 ~ 31,000 (840 ~ 2,170)
掘 進 速 度 $\frac{fph}{(m/h)}$	— —	— —	4.5 (1.35)	6 ~ 7 (1.8 ~ 2.1)
カ ッ タ 形 式	Smith TC7 SHTC7 and MH TC7	Single Disk with carbide Buttons	Reed Q C	Disk type
回 転 速 度 rpm	Center : to 25 Main Head : 8	9	15.5	4.5
製 作 会 社	Calweld	Lawrence	Jarva	Robbins
形 式	— —	HRT 12	Mark 8	181-122
推 力 lb (Kg)	1,000,000 (450,000)	1500,000 (675,000)	559,250 (251,663)	1,580,000 (711,000)
トルク ft·lb (Kg·m)	347,000 (48,580)	450,000 (63,000)	132,405 (18,537)	1,720,000 (240,800)
備 考				Originally was 4.5 and 7 rpm

※ 掘削開始の年又は掘削開始が予定されておった年

psi ($\div 630 \text{ Kg/cm}^2$) $\sim 17,000 \text{ psi}$ ($\div 1,170 \text{ Kg/cm}^2$) の範囲のものである。今後は約 $27,000 \text{ psi}$ ($\div 1,900 \text{ Kg/cm}^2$) の Valders limestone にまで拡張、この結果は、鉱山局がトンネル掘進機やたて坑掘削機のために製作したMBUにも役立てる考えである。

これと似たような研究は各所で行なわれており、すでに発表されている論文もいくらかあり、更にトンネルの設計や機械の設計および支保工などについても各地の鉱山局で研究されている。

(表-1)

トンネル掘進機一覧表

White pine Mine	Mather "B" Mine	Adirondack Mine	Homer Wauseca Mine	Bonanza Mine	Kernac Nuclear Fuels Section 33 Mine
White pine Michigan	Neyaaunee Michigan	Mineville New York	Iron Rinen Michigan	Bonanza Utah	Grants New Mexico
1966	1967	1967	1963	1961	1960
7 ft 0 in (2.1)	13 ft 0 in (3.9)	10 ft 0 in (3)	7 ft 0 in (2.1)	4 ft 6 in (1.35)	9 ft 0 in (2.7)
Sandstone and Shale	Gray wake and Irone Ore	Magnetite Hornblende Bistite Geniss and Gray Granite Geniss	Iron Ore	Gilsonite and Sandstone	Wet Sandstone
12,000~3,100 (840~2,170)	10,000 (700)	10,000~35,000 (700~2450)	8,000~14,000 (560~980)	very weak ~17,000 (1,190)	1,000 ~ 2,400 (70 ~ 168)
5.5 (1.65)	5 (1.5)	1 ~ 4 (0.3~1.2)	3 (0.9)	5 ~ 20 (1.5~6)	2 ~ 3 (0.6~0.9)
Disk Type Milled tooth Type and Disk type with carbide studs	Reed QKC	Reed Q.C.	Disk type	Milled Tooth type	Hughes Milled Tooth cutters
1.5	9.5	9.2	10	16.5	8 ~ 10
Hughes	Jarva	Jarva	Robbins	Hughes	Robbins
	Mark 14	Mark 11	7 1 A	— —	103
600,000 (270,000)	866,000 (389,700)	866,000 (389,700)	393,000 (176,850)	226,000 (101,700)	100,000~170,000 (45,000~76,500)
120,000 (16,800)	275,000 (38,500)	235,000 (32,900)	85,000 (11,900)	— —	55,400 (7,760)
		Operated successfully on 27 degree down grade	Operated successfully on 18~22 degree up grade		Cutting head modified by Hughes

2. 最近のトンネル掘進機

近年採用されているトンネル掘進機は土を掘削するもの（Earth-Boring Machine, 以下EBMと呼ぶ）と硬岩を掘削するもの（Hard-Rock-Boring Machine, 以下RBMと呼ぶ）の2種類に分けられる。

EBMは、いわゆるシールド機械で、コンクリート又はスチールのライニングを必要とし、水の出るところには圧気を開いて地下水圧とのバランスをとるようにしなければならない。

「硬岩掘削」（Hard Rock Tunneling）という言葉は誤った呼び名であり、今までに硬岩を機械掘削で完成させた例は殆んどない。現在言われている「硬岩掘削」と言う言葉は、大部分堆積岩か支持力の小さい、低圧縮強度の火山岩の掘削について言われているのである。

岩石掘削のRBMとシールドのEBMとは構造上明らかに異なる。例えば推力機構においてRBMは壁に直角方向にグリッパを張出して反力をとるのに対してEBMは後部のライニングセットかブッシュリングに反力をとる（写真-1参照）。

更に、EBMのカッターはトラグ形のカッターかブラウ形が主で時には、デスクカッターまたは併用したものが用いられている（写真-2参照）

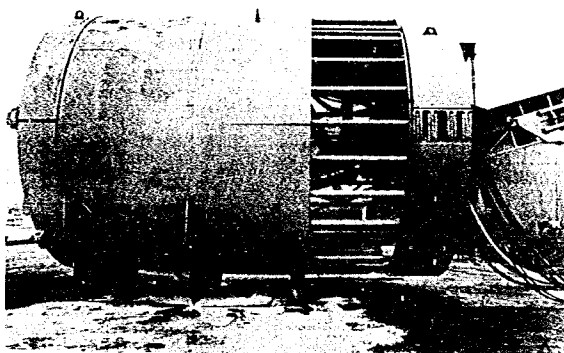


写真-1

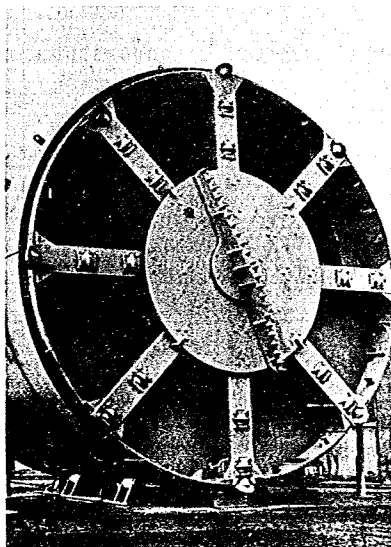


写真-2

RBMではトラグ形のカッタが用いられるのがまれで、デスクカッタ (disk cutter) 又は、ミルドーツスカッタ (mild-tooth cutter) で (写真-3 参照) , 時にはこれらのカッタに炭素鋼のチップを植込んだもの、または炭素鋼で表面処理したものが用いられている。

このようにEBMとRBMとは著しく異なるもので、一方が適する条件で、他方も適用できるということは殆んどない。

1) カuttingヘッド

現在最も一般的に採用されているカッタヘッドは一方回転式ヘッド (Unidirectional head) であろう (写真-4) 。この形式のヘッドは硬岩の掘削にもEBMにも使用される。これと似た形式のもので、左右どちら方向にも回転できる便利な可逆転形のカッタヘッドを写真-5に示す。これは原則的には

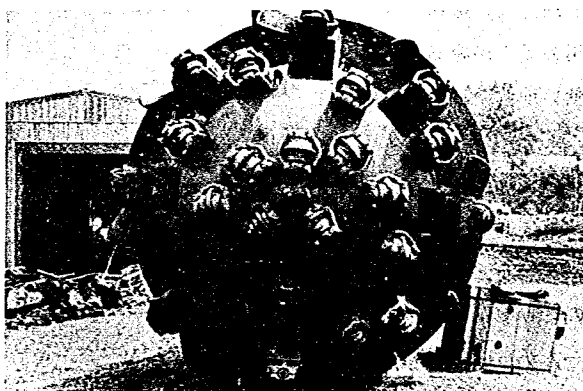


写真 - 3

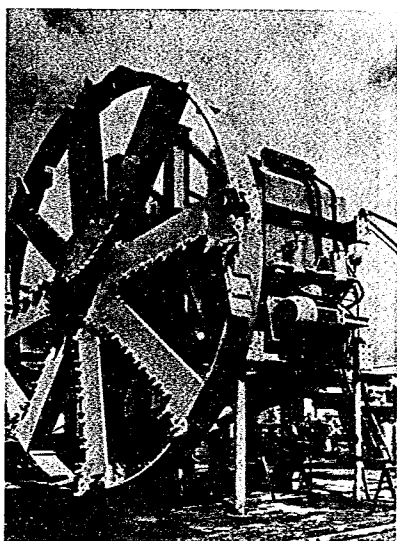


写真 - 4

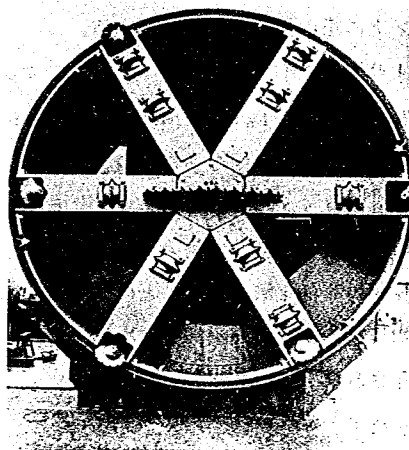


写真 - 5

EBMに用いられるもので次の特徴がある。①ブル歯車やピニオン歯車の摩耗が歯の両面均等に起こる。②掘削トルクの反力によって生ずるヘッドの回転方向と逆方向に機体が傾くチルト作用の矯正が容易である。これは軟い地盤の掘削において重要なことである。

第3のヘッドはオシレーティングヘッドに属するもので、ウィンドワイパ形とも呼ばれる。これらのヘッドは2個のカッティングアームから成るもの（写真-6）、および4個のカッティングアームから成るもの（写真-7）がある。この形式の利点の一つは必要とされる軸に動力をかけることができることである。すなわち軟い地盤を掘削するときに切羽が崩壊して土砂が下になったとき、全動力を下部のセグメントに集中させることができる。

第4の形はツインコンセントリック・カッタヘッド（写真-8）（twin-concentric cutting head）で、これは同心軸に2つのヘッドを有するもので外周カッタ、内周カッタを有する。この特徴は外周カッタの速度を内側のカッタ速度より遅くしてカッタの摩耗を調整することにより全体の歯の摩耗を均等にする。この機械は初め同一のカッタ速度で製作されたものである。

第5はミリング形式（milling type）のヘッドとして知られているものである。これは写真-9に示すように1個以上の回転体を有するもので、トンネルの径を数インチの範囲で調整できるほかに、アンダ

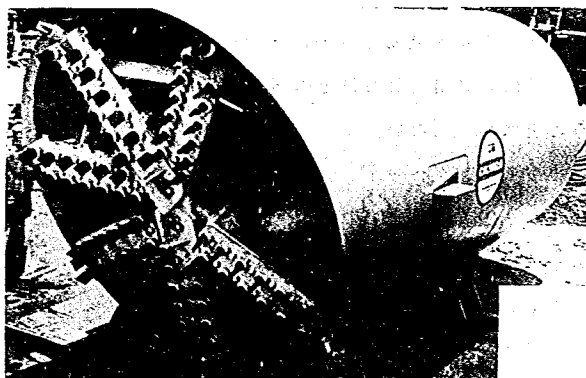


写真 - 6

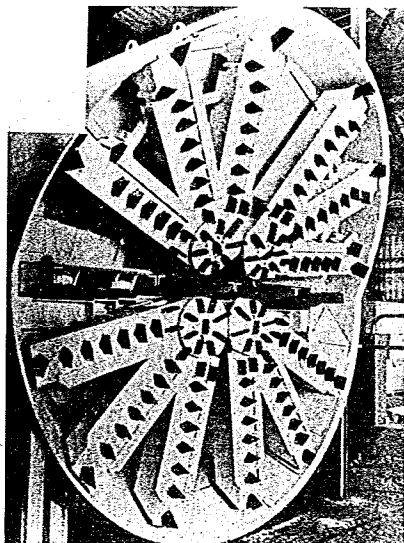


写真 - 7

ーカッティングの原理 (under cutting principle) と呼ばれる作用を応用しているのが特徴である。これによって他の方式の10~30%の推力で掘削できる。

第6は写真に示していないがパイロットで引張る原理のもの (pilot-pull) で、ヘッドの中心にパイロットドリルを有しこれが主ヘッドに先行し、アンカされる。一般にこのパイロットヘッドには3カッタビットを用いる。このアンカされるパイロットは主ヘッドに推力を与えるのに役立つばかりでなく孔曲りの防止にもなるのが特徴である。

最後に、写真-10に示すようなリッパーバケット形式 (Ripper-bucket type) がある。このバケットはシールドの中に関節のある腕を有し、地盤を崩したり、土砂をコンベアにかき込む働きをする。このバケットには切羽を崩すために裏側に何本かのリップのツメを取付けることができる。この機械は土質地盤を掘削するものであるが、大きな玉石のあるところでも、軟い岩の掘削にも適用できる。この機械の特徴は掘削する刃に全動

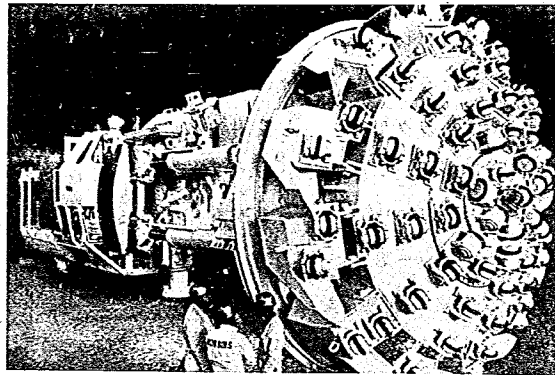


写真 - 8

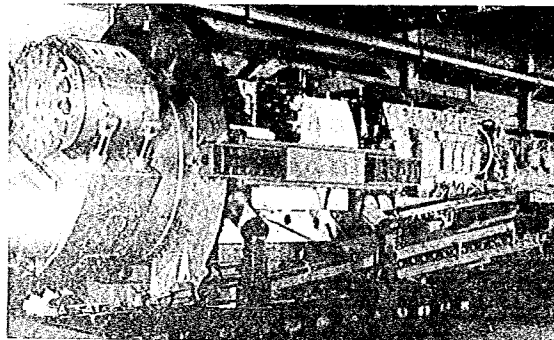


写真 - 9

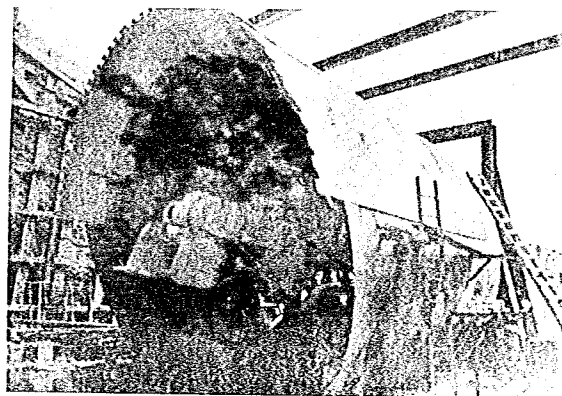


写真 - 10

力を集中できることである。

2) カuttingエレメント

前にも述べたようにカラタには色々な種類がある。EBMは一般にドラグ形ビットを使用するが、デスクカッタ又は併用したものをを用いることもある。硬岩には1条又は数条のデスクカッタが有用である(写真-11, 写真-8)。

カッタには炭素鋼の刃先をはめ込んだもの、または炭素鋼でコーティングしたものがある。ミルドツースカッタも硬岩に用いられているが(写真-3のセンターカッタ)、最近硬岩用として炭素鋼チップを植込んだものがよく用いられている。

3) 最近の傾向

機械によるトンネルの掘削は上下水道、交通トンネルのほか、鉱山でも採用される傾向にある。鉱山会社でもトンネル掘進機の試験をしており、この傾向は更に増加するであろう。このトンネル掘進機は鉱山の広い分野にわたって有用であり今後も増々利用される傾向が強い。

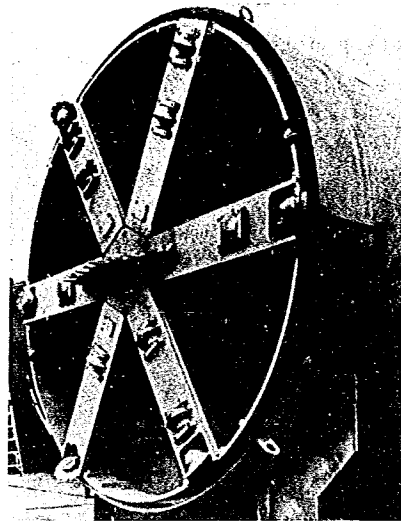


写真-11

3. TCMRC における研究概要

Twin Cities Mining Research Center (TCMRC) では、米国をはじめ各国におけるトンネル掘進機の採用を推進しトンネル掘削やたて坑掘削に有用な資料を有するために、これらに関する研究を行なっている。

3-1 実態調査

この研究プログラムではトンネル掘削に関する過去・現在、また今後の資料を収集するもので、施工業者や製造会社と常に連絡をとるとともにトンネルやたて坑の施工現地をまわって調査するものである。

収集した特別な工事や機械の資料は表にまとめ、多くの岩のサンプルは物理試験のために TCMRC に送られている。そこで得られたデータは現場に返され施工に役立てる。この岩石の物理的性質とトンネル掘進機の推力、トルク、掘進速度などの関係はこれらパラメータの相互関係を調べるのに役立つし、岩石と掘削機構による掘削性を知るためにも有効である。

今後は現場作業において、作動中の機械の駆動軸やカッタの部分に計器を取付け、カッティングヘッドにかかる荷重や荷重の分布、カッタやベアリングの温度などを測定するようになるであろう。現在、我々は2台のFMの送受信装置を利用して歪や温度の測定を行なっている。

3-2 削孔試験装置 (MBU)

大形の掘削試験装置は3カッタビットや、トンネル掘進機やたて坑掘削機などのカッタおよび模型のカッタヘッドを試験するもので、推力やトルクが測定できるものである。このMBUは最大推力100,000 lb ($\div 45\text{ t}$)、最大トルク18,000 ft·lb ($\div 2,500\text{ Kg}\cdot\text{m}$)、回転速度15 rpm 以上のものである(写真-12, 写真-13)。

回転速度はマグネット式のピックアップを用いて、アナログに変換して読取るもので、トルクや推力はFM発信器によりストロークをオシログラフに記録させる。推進速度は特別に製作したポテンションメータからアンプを通してオシログラフに記録する。この外に機械的な計器として、圧力計で推力の状態を直読できるようなものなどを備えている。水の流量はタービン式の流量計を用いアナログで指示する。

これからのMBUの実験では、Indiana limestone, Kasota stone, Tennessee marble, Valdars limestone の4種類の岩について行なう予定である。試料の大きさは1辺の長さ約3 ftの正方形で、圧縮強度は9000 psi ($\div 630\text{ Kg/cm}^2$) のIndiana limestoneから27,000 psi ($\div 1,900\text{ Kg/cm}^2$) のVolders limestoneの範囲のものである。

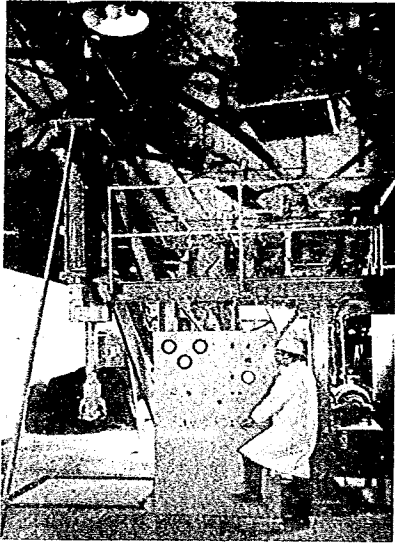


写真-12



写真-13

MBUの実験は間もなく始められ、色々の掘削方式およびカッタの形状による単位量の岩石を破碎するのに要するエネルギーについてデータをとる予定である。この装置では従来のロータリドリルとしての試験ができるほかにカッタにかかる応力や温度を遠隔計測できるのが特徴である。

3-3 直線掘削試験装置 (LCA)

岩石の機械的掘削について最も進んでいるプロジェクトは、ダイヤモンドソーで削られた岩の表面を1個のデスクカッタ(写真-14)を直線に移動させて掘削する装置である(写真-15)。垂直および水平荷重ならびにデスクの移動は2本のシリンダで制御される。これまでに4種類の岩石が試験された(表-2)。すなわち、2種の



写真-14

Indiana limestone, Kasota stone および Tennessee marble である。

カッタにかかる水平、垂直荷重はストレンゲージを用いて、それぞれ移動距離の関数として X-Y レコーダに記録した (図-1)。コントロールはコントロールコンソールの圧力計を見て行なった。

この装置から得られたデータはトンネル掘進機の設計者には有用なものであろう。ここにその一部を紹介する。

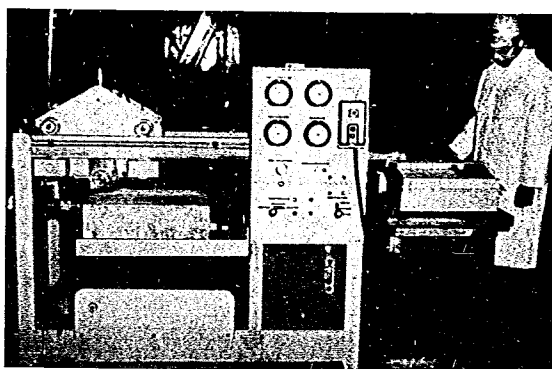


写真-15

表-2 試験した岩の物理的性質

地質学的岩石名	Saleme limestone	Saleme limestone	Oneota member Prairie du Chien formation	Holston limestone
岩石の俗称	Indiana limestone type 2	Indiana limestone type 1	Kasota stone	Tennessee marble
産地	Bedford, Ind.	Bedford, Ind.	Kasota, Minn.	Knoxville Tenn.
一軸圧縮強度 psi (㏩)	9,126 (639)	9,991 (699)	13,184 (923)	16,809 (1,177)
引張り強度 psi (㏩)	679 (475)	502 (351)	792 (551)	1,219 (85.3)
ショア硬度	27	32	37	55
見掛け比重 g/cm^3	2,302	2,395	2,487	2,681
静的ヤング率 10^6 psi (㏩)	3.5 (0.24)	4.4 (0.30)	5.7 (0.39)	9.0 (0.63)
P波速度 fps (m/s)	14,570 (4,380)	14,610 (4,380)	17,519 (5,140)	20,058 (6,020)
バース速度 fps (m/s)	13,062 (3,920)	12,007 (3,602)	14,708 (4,410)	16,845 (5,050)
S波速度 fps (m/s)	11,482 (3,450)	8,489 (2,550)	9,360 (2,810)	10,590 (3,180)
動的ヤング率 10^6 psi (㏩)	529 (0.37)	4.65 (0.32)	742 (0.51)	10.29 (0.72)
ポアソン比	0.27	0.32	0.28	0.32
せん断弾性係数 10^6 psi (㏩)	2.09 (0.14)	2.32 (0.16)	2.90 (0.20)	4.07 (0.28)

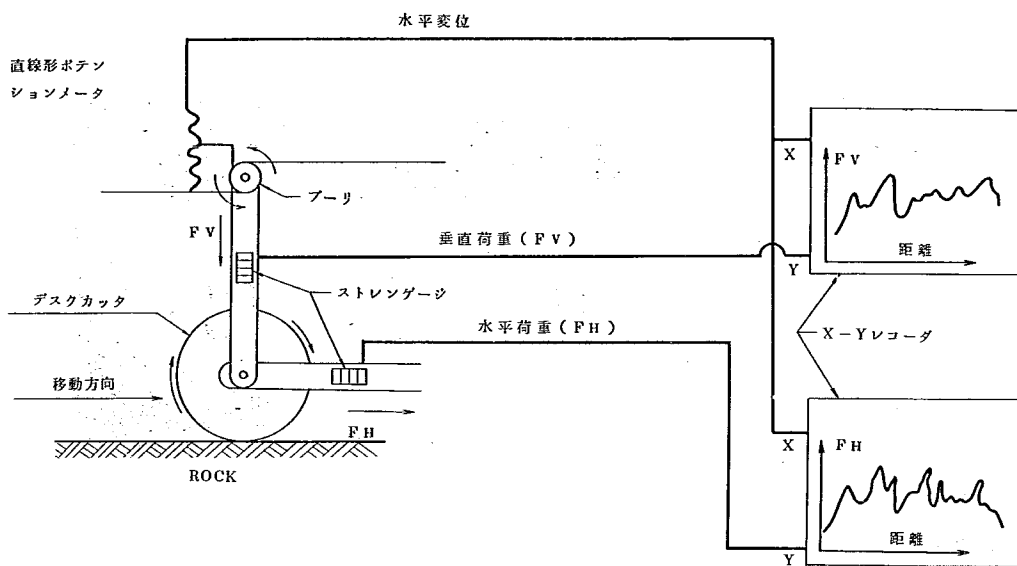


図-1 直線掘削装置作動説明図

4. 直線掘削試験装置を用いたデスクカッタの試験結果

4-1 試験条件

この実験ではカッティングエッジの角度の異なる2種類のデスクカッタを用いて行なったものでデスクの径は共に7 inである。垂直荷重は最初に設定し、水平力は岩の表面をデスクが直線に移動するときに起こる。

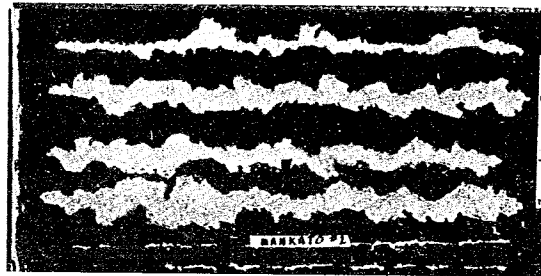
各個のデスクが作るクレータは各々1個であって他のクレータの影響を受けないようにしてある。

4-2 代表的なクレータ

写真-16にこのデスクカッタの試験で得られたいくつかの代表的なクレータを示す。このクレータは limestone に90°の刃先角をもつデスクカッタで得られたもので長さ約21 in、巾0.1~2 in、深さ0.01~0.5 inであった。大きい方のクレータは垂直力9,000~10,000 lb(約4000~4500 Kg)で小さい方は約2,000 lb(約900 Kg)のものである。

4-3 垂直荷重関数としてのクレータの深さ

掘削中デスクにかかる垂直荷重が変動するので、1回の試験の長さを通して垂直荷重を平均値で示す。各種クレータの深さも同様に一定間隔で測った深さを全長について平均した値で示す。



各種岩石試料全体を通して垂直荷重と深さの代表的な関係を

写真-16

Tennessee marble について60°, 90°の刃先角のものを図-2に示す。プロットは垂直荷重を独立変数、深さを従属変数として示してある。他の岩石試料についての関係は曲線の式にして表-3に示す。この荷重と深さの関係は全ての岩について次の2つの式で表わすことができる。

$$D = D_0 + KF_v \quad (1)$$

$$D = KF_v^X \quad (2)$$

ここに X = 指数 0.78~0.89

D = クレータの深さ、又は食い込み量 in.

D₀ = 切点

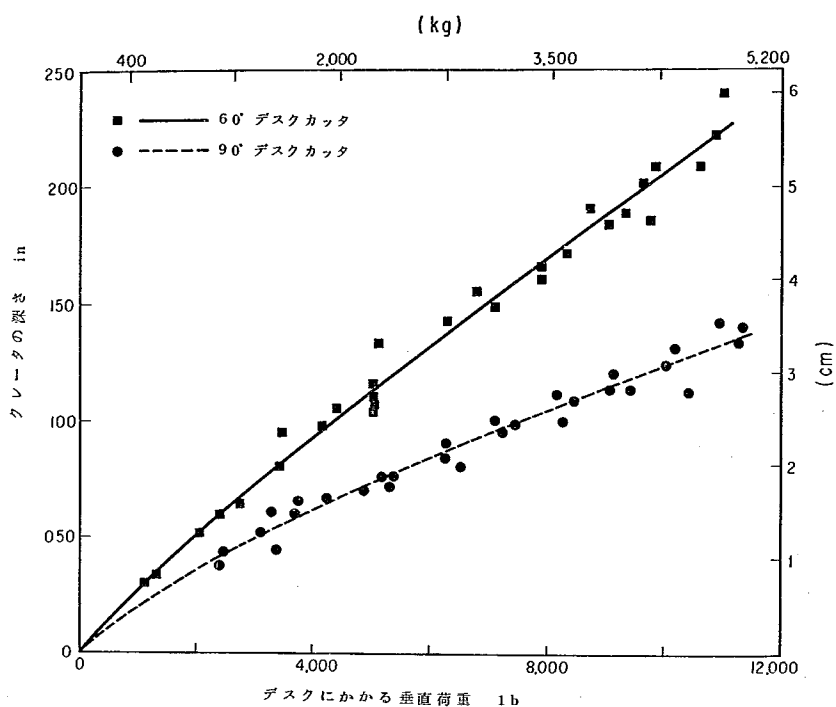


図-2 クレータの深さと垂直荷重の関係

表-3 垂直荷重の関数としてのクレーターの深さ

岩の種類	垂直荷重と深さの関係	標準誤差
Indiana limestone type 1	$D_{60} = 7.901 \times 10^{-5} F_v$	0.011
	$D_{90} = 0.00145 + 1.914 \times 10^{-5} F_v$	0.003
Indiana limestone type 2	$D_{60} = 0.0250 + 3.074 \times 10^{-5} F_v$	0.015
	$D_{90} = 0.00862 + 2.056 \times 10^{-5} F_v$	0.011
Kasota stone	$D_{60} = 0.01166 + 3.519 \times 10^{-5} F_v$	0.016
	$D_{90} = 0.002456 + 1.797 \times 10^{-5} F_v$	0.009
Tennessee marble	$D_{60} = 5.536 \times 10^{-5} F_v^{0.8930}$	0.024
	$D_{90} = 9.368 \times 10^{-5} F_v^{0.7791}$	0.0056

$$K = \text{定数} \quad \text{in./lb}$$

$$F_v = \text{平均垂直荷重} \quad \text{lb}$$

表-3の垂直荷重と深さの関係の一つを図示したものが図-2である。図から3つの重要な結果が得られた。

第1に、刃先角に関係なく垂直深さと食い込み量の関係は直線的であって、この結果は3,000 lb以上の荷重で4種の岩のどれについても同様である。

第2に、刃先角60°のクレータの深さは同じ垂直荷重で90°の深さより常に大きい。

第3に刃先角と垂直荷重が一定の条件のもとでは岩石が軟くなる程食い込み量が大きい。

ここでいう岩石の硬い、軟いは一般的な言い方で特に決った岩石の物理的性質を表わすものではない。

この垂直荷重と深さの直線的な関係は軟い方の3種類のテストでは確実に現われたが type 1 の Indiana limestone を60°で行なったときは例外となった。この岩でこの角度の場合直線的な関係とならない範囲は垂直荷重が2,000 lb以下のところであった。これ以上の荷重のところでは直線になった。これと同じような結果が Tennessee marbleでも起きた。すなわち、荷重-深さの関係式で指数が、両方の刃先角について1.0より小さく出た。これも垂直荷重が3,000 lb以下の場合のことでこれ以上の荷重では再び直線の関係が得られた。

すなわち、試験した全ての岩について、垂直荷重とクレータの深さの関係で、Tennessee marble では両方の刃先とも3,000 lbが直線関係になるための最低の荷重であり、type 1 の Indiana limestone では刃先角60°の場合のみ直線関係が得られる荷重の最低が2,000 lbであった。

次にクレータの深さとカッタの刃先の関係を解析する。刃先の代表的な関係は図-2に示すように刃先角の鋭い60°のカッタが90°のカッタより同じ岩石の場合で同じ荷重で食い込み量が大きい。刃先角の効果を更に詳しく調べるために、垂直荷重と深さの関係のデータのうちに最も直線に近いプロットの勾配を基準にして比較すると試験した全ての岩石について試験した範囲内では、垂直荷重と深さの関係の曲線に近似した直線が得られる。各種岩について求めるとき、各刃先の場合の勾配の比から試験した二つの刃先角の効果の違いを表わす定数が得られる。

$$\text{すなわち} \quad D = KF_v \quad (3)$$

$$\frac{D_{60}}{D_{90}} = \frac{K_{60}F_v}{K_{90}F_v} \quad (4)$$

平均垂直荷重 F_v が同じであれば(4)式は更に

$$\frac{D_{60}}{D_{90}} = \frac{K_{60}}{K_{90}} = C \quad (5)$$

ここに D : クレータの深さ in 添字は刃先角

K : 直線の勾配 in/lb

Fv : 垂直荷重 lb

C : 刃先の違いによって得られる定数

(5)式を使ってこの比を計算すると, type 1, 2 の limestone, Kasota stone, Tennessee marble はそれぞれ 1.59, 1.50, 1.87 および 1.78 となった。

これを使うとどちらかの刃先でのクレータの深さが分かれば他の刃先の場合の深さの近似値を求めることができる。

ここで試験した岩石試料以外の種類の岩石についてもおよそ岩の物理的性質が似たものであれば(5)式から計算して求めることができる。更に 60°の刃先については(5)式から求まるが、この場合、比はここで試験した岩のうちで最も近似している比、すなわち定数Cを用いればよい。(5)式から最も重要な岩の物理的性質はショア硬度と密度である。

最終的には各種岩に対するクレータの深さの関係が得られたが、それは常識になっているように軟い岩程食い込み量が大きいのところである。この関係をもっと正確に現わすために、各岩についてユニークな物理的性質を表わす方法(ショア硬度、密度)をとった。そしてこの性質とクレータの深さについて統計解析を行なった。その結果(5)式に示す。クレータの深さに対する垂直荷重および物理的性質の関係式が得られた。

4-4 垂直荷重の関数としての水平荷重

図-3にはこの試験で得られたデスクカッタの代表的な推力と水平荷重の関係を示す。この記録はカッタが移動するときに作用する推力と水平荷重の平均値を求めるためのものであり、これらの力の平均が以下にのべる解析に有用であるが、カッタにかかる最大値についてもカッタを設計する場合には重要なことである。解析の結果推力の最大値は平均値より10~40%大きく、水平荷重の最大値は平均値より30~80%大きくくなっている。これらの最大値はカッタの角度や岩石の種類には一般に関係がない。ここに現われた最大値は多分、試験機のせいとも考えられるが、実際の掘削機械でもこのような力の変動があることは確かである。

図-4はTennessee marbleについて行なった60°および90°の刃先角のデスクカッタの垂直荷重と水平荷重の関係を示す。この曲線は他の3種の岩の実験結果と同じ傾向を示している。図は垂直荷重を独立変数に、水平荷重を従属変数にして示したものである。

表-4には他の岩についてこれらの関数を示す曲線の式で表わしたもので、この関係式は次

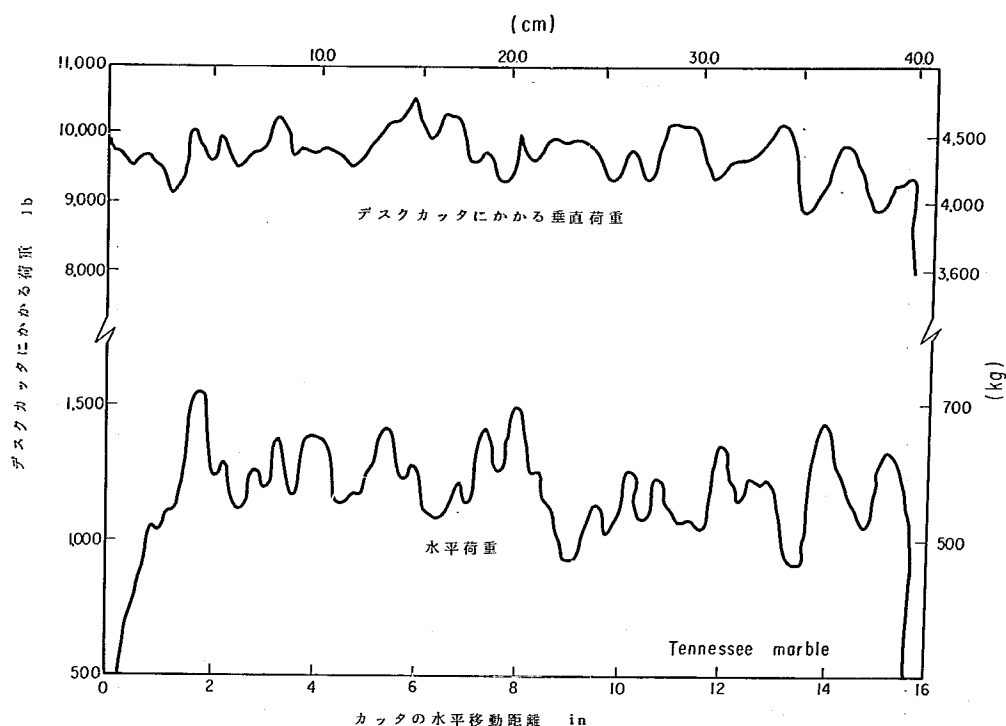


図 - 3 水平荷重と垂直荷重

表 - 4

岩 の 種 類	水平荷重 - 垂直荷重の関係	標準誤差
Indiana limestone, type 1	$F_{h60} = 7.98 \times 10^{-4} F_v^{155}$	5 7.4
	$F_{h90} = 8.42 \times 10^{-4} F_v^{150}$	4 1.5
Indiana limestone, type 2	$F_{h60} = 2.32 \times 10^{-3} F_v^{145}$	6 5.8
	$F_{h90} = 1.443 \times 10^{-4} F_v^{172}$	5 9.0
Kasota stone	$F_{h60} = 9.37 \times 10^{-4} F_v^{155}$	7 9.8
	$F_{h90} = 5.79 \times 10^{-4} F_v^{158}$	5 4.0
Tennessee marble	$F_{h60} = 2.98 \times 10^{-4} F_v^{169}$	5 0.6
	$F_{h90} = 3.43 \times 10^{-4} F_v^{164}$	2 4.7

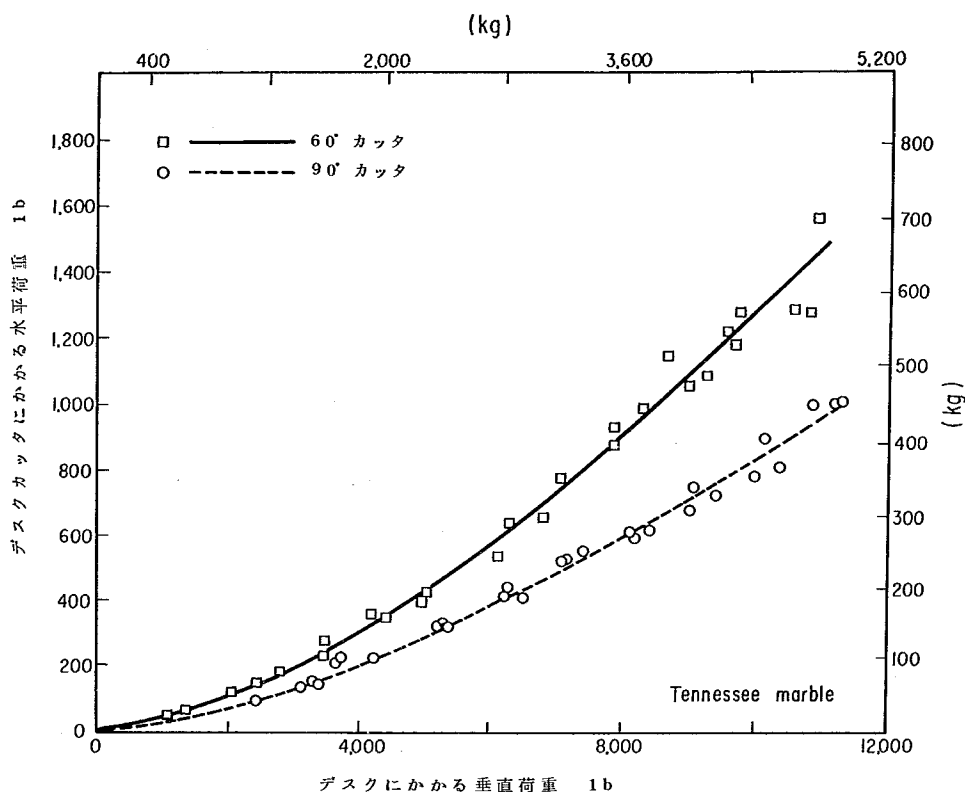


図-4 水平荷重と垂直荷重の関係

の形で表わされる。

$$F_n = K F_v^X \quad (6)$$

ここに X = 指数 1.4 ~ 1.7

F_n = 平均水平荷重, lb

K = 定数

表-4に示す垂直荷重と水平荷重の関係の解析の結果, 次の3点が明らかにされた。

- ① デスクカッタにかかる水平荷重は垂直荷重が増加するとともに増加する。
- ② 岩石の表面をデスクカッタを転がすのに要する水平荷重は, 垂直荷重が同じ場合に90°のカッタが60°のカッタより小さくてすむ。この試験は最大荷重の4/5 (約7500 lb) のところで行なったものである。計算の結果岩の種類にもよるが, 60°のカッタでは垂直

荷重の 0.1 ~ 0.14 倍が水平荷重で、更に 90° の場合は 0.08 ~ 0.1 倍が水平荷重であった。

③ 岩石が硬くなる程、カッタを転がすための水平荷重は小さくなる。

このように垂直荷重と水平荷重の関係が各カッタについて試験されたが、外の一般のカッタについてもこの関係は有用である。指数の範囲は 1.4 ~ 1.7 と得られたが、特にカッタの刃先角や岩の種類に対する関係は認められなかった。

次にカッティングエッジの効果について解析した。

カッタを転がすに要する水平荷重は刃先の鋭い方の 60° のカッタが 90° より大きいことは上に述べた。しかし刃先角各種についてその影響を正確に求めることはできない。何故なら岩の種類と刃先角の色々な組合せによって指数の値が変わることが予想される。基礎的な比較をするために表-4 の力の関係式を垂直荷重に沿って 0 ~ 10,000 lb まで積分すると、それぞれの曲線の下面積が求まる。これは物理的には何の意味もないが、これらの面積は、これら曲線の力の関係に直接関係している。

この面積の比は、試験した全体の垂直荷重の範囲内で 60° と 90° のカッタの水平荷重の平均の差を示す。

$$\text{すなわち} \quad F_h = K F_v^x \quad (7)$$

$$\text{面 積} = K \int_0^{10000} F_v^x dF_v \quad (8)$$

$$\frac{F_{h60}}{F_{h90}} = \frac{\text{Area } 60}{\text{Area } 90} = C$$

$$\frac{F_{h60}}{F_{h90}} = C$$

ここに C : 刃先角の水平荷重に対する効果を比較する定数

これらの比は type 1, 2 の Indiana limestone, Kasota stone, Tennessee marble についてそれぞれ、1.49, 1.42, 1.29, 1.37 であった。

F_{h60} 又は F_{h90} のどちらかが分かれば他方の同じ荷重 F_v に対する値は同じ岩について、それぞれの岩に対する指数を用いることによって求めることができる。

4-5 エネルギーとの関係

デスクカッタでクレータを作るエネルギー又は仕事量はカッタの垂直および水平方向の仕事量の合計で表わされる。垂直方向の仕事量はカッタにかかる垂直荷重の平均とクレータの深さ

の平均の積で表わされる。また水平方向の仕事量は平均水平荷重と掘削距離の積から与えられる。垂直方向の仕事量は小さく、一般に水平方向の仕事量の6～10%である。

試験した岩石の中で代表的な例としてTennessee marbleのクレータの量とエネルギーの関係を示したのが図-5である。エネルギーを独立変数、クレータの量を従属変数として表わ

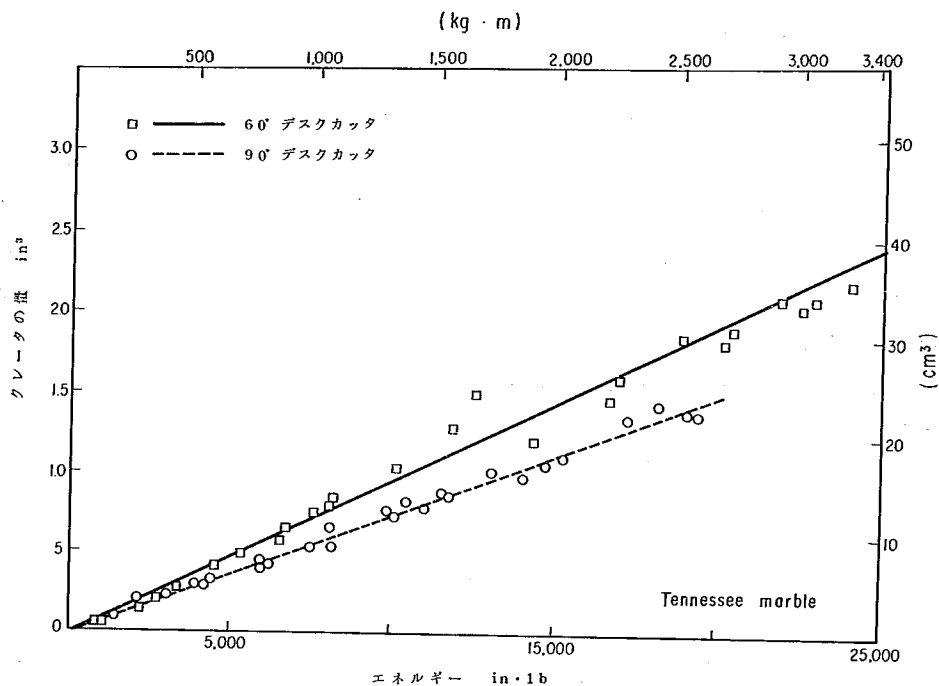


図-5 クレータの量とエネルギーの関係

したものである。他の岩石についてはこの関係を式で表-5に示してある。試験全体を通して次の2種類の式の形式が得られた。

$$V = V_0 + KE \quad (11)$$

$$V = KE^X \quad (12)$$

ここに X : 指数 1.12 ~ 1.20

V : クレータの量 in^3

V_0 : 切点の量 in^3

K : 定数 in^2/lb

E : デスクに与えたエネルギーの合計 in-lb

表-5 入力エネルギーの関数としてのクレータの量

岩 の 種 類	クレータの量とエネルギーとの関係式	標準誤差	単位 当 り エネルギー
Indiana limestone type 1	$V_{60} = 4.904 \times 10^{-5} E^{1.122}$	0.357	¹ 6,548
	$V_{90} = 0.07319 + 1.305 \times 10^{-4} E$	0.158	8,200
Indiana limestone type 2	$V_{60} = 3.368 \times 10^{-5} E^{1.195}$	0.479	² 4,100
	$V_{90} = 0.08537 + 1.702 \times 10^{-4} E$	0.234	6,350
Kasota stone	$V_{60} = 0.1761 + 1.708 \times 10^{-4} E$	0.252	6,850
	$V_{90} = 0.0590 + 1.041 \times 10^{-4} E$	0.174	10,100
Tennessee marble	$V_{60} = 0.0153 + 9.607 \times 10^{-5} E$	0.114	10,400
	$V_{90} = 0.00347 + 7.079 \times 10^{-5} E$	0.043	13,800

表-5に示すこれらの関係式から次の3つの点が明らかにされた。

- ① クレータの量は試験した全ての岩と両方の刃先角のデスクカットについて、与えたエネルギーと直線関係にある。これは関係式が②式で示される場合にも、指数Xが1に近くほぼ直線とみなすことができる。
 - ② 与えたエネルギーが同じ場所に90°のカットよりも60°のカットでできたクレータの量が多い。
 - ③ 同じ量のクレータを得るのに岩が硬くなる程大きなエネルギーを必要とする。
- クレータの量と岩石の種類に関する回帰解析の結果は後にのべる。

偏差は小さいけれども、この式の標準誤差が示すようにこれはデータのバラツキによるもので、むしろエネルギーとクレータの量の関係の根本的な違いによるのは少ない。

クレータ量がこの根本的な関係の違いを除けばエネルギーと直線的な関係にあるということが分ったが、単位クレータ量当りのエネルギーはカットの垂直荷重に関係なく一定であった。更に解析の結果90°のカットのクレータの量当りエネルギーは60°のカットより25~30%大きい。

単位量当り要するエネルギーは90°カットについて試験した岩の圧縮強度の70~80%である。この単位当りエネルギーの各岩、各カットについて表-5に示す。

刃先角とクレータの量の関係を求めるために、エネルギーと量の関係の勾配を直接比較した。エネルギー量の関係式として最も適合した直線の勾配を用いた。そこで、同じ岩における異な

る2種類のカッタの刃先角の比が岩の種類に対するカッタ角とエネルギーの関係を求めるために用いられた。

$$V = KE \quad (13)$$

$$\frac{V_{60}}{V_{90}} = \frac{K_{60}}{K_{90}} \frac{E}{E} \quad (14)$$

Eが同じであれば

$$\frac{V_{60}}{V_{90}} = \frac{K_{60}}{K_{90}} = C \quad (15)$$

ここにCはカッタの刃先角とクレータの量の関係を比較するための定数である。(14)式を用いて type 1, 2 の Indiana limestone, Kasota stone, Tennessee marble について求めるとそれぞれ 1.28, 1.40, 1.55, 1.30 の結果が得られた。この割合を用いて、一方の刃先角のものについて分かれば、(15)式から同じ岩について、他の刃先角を有するカッタについても求めることができる。

ここに試験した岩以外でも物理的性質の似ているものであれば(15)式を用いて刃先角90°のクレータ量を計算することができる。更に(15)式から60°のカッタについても求めることができる。(15)式から最も重要な因子は、ヤング率、密度および引張り強度であった。

4-6 岩石の物理的性質からデスクカッタの掘削性の推定

試験結果から90°でも60°でも式は基本的に変わらないのでここでは90°の刃先角をもつカッタについて求めた。そして60°の場合はすでに述べた定数を用いて変換すればよい。統計的回帰の基本のモデルは次の式で表わされる。

$$\hat{Y}_{90} = \hat{\beta}_0 + X \left\{ \frac{\hat{\beta}_1}{RP_1} + \frac{\hat{\beta}_2}{RP_2} + \dots + \frac{\hat{\beta}_n}{RP_n} \right\} \quad (16)$$

ここに Y : 従属変数(クレータの深さ, 又はクレータの量)

X : 独立変数(垂直荷重又はエネルギー)

β_i : 回帰解析より得られる係数

RP_i : 岩石の物理的性質

(16)式のカッコ内の値は岩石の種類による影響を表わすもので、最初の式の定数を細かく分析したものである。岩石相互の性質がこの式の中に含まれているのは岩石の性質の値が変わったときに、従属変数の値を論理的に変える原因になるからである。例えば、岩の種類が変わったため岩

石の食い込みが困難になったとき、これら岩石相互の性質は低下し、クレータの深さや量を論理的に減少させる原因となる。

1) 食い込み深さ又はクレータの深さの推定

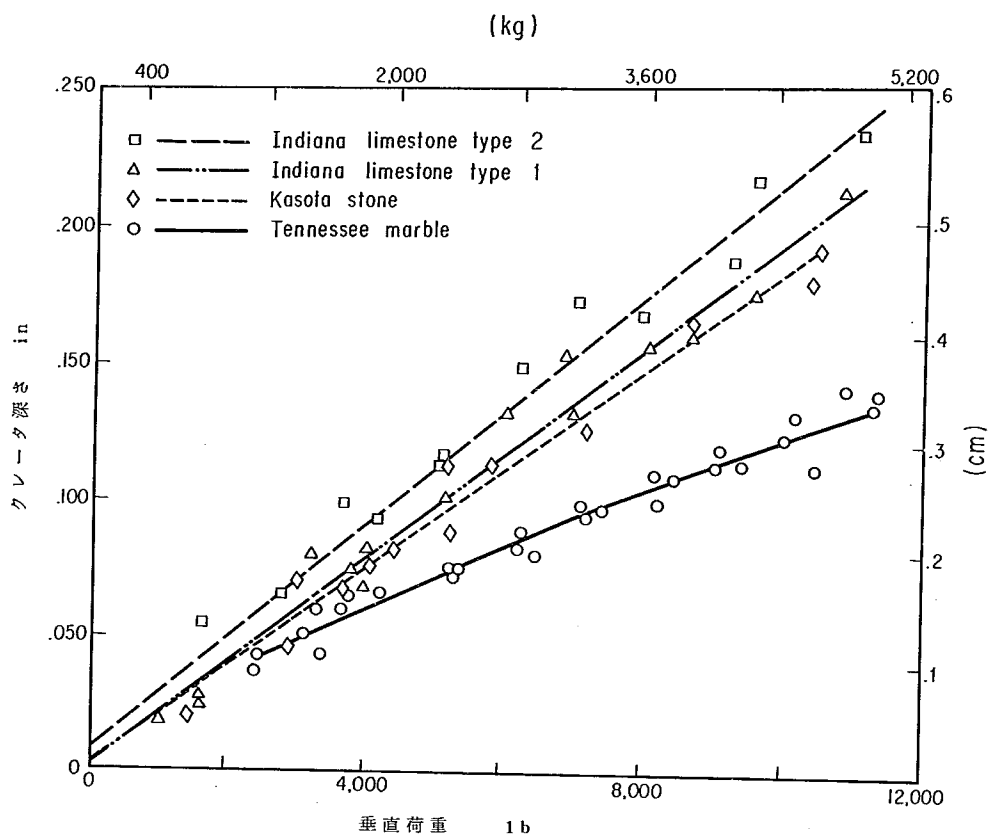


図-6 クレータの深さと垂直荷重の関係

図-6に90°の刃先角のカッタについて、試験した4種の岩について力と深さの関係を示す。直線の勾配の差は岩の種類を示すものでここでは他の独立変数は一定してある。前に述べたステップワイズの回帰方法を用いてクレータの深さを求めると次の通りである。

$$D_{90} = 0.01155 + F_v \left[\frac{5.425 \times 10^{-4}}{SH} + \frac{5.940 \times 10^{-6}}{\rho} \right] \quad (17)$$

ここに D_{90} : 90° カッタを用いたときのクレータの深さ in

F_v : 90° カッタにかかる平均の垂直荷重 lb

SH : ショア硬度,

ρ : 岩の密度 slugs/ft.³ (slug $\times$ g ($\div$ 32) = lb)

この式の重相関係数は 0.979 で標準誤差は 0.010 in である。(4) 式の岩の性質でショア硬度が最も相関が強く、続いて岩の密度であった。他の全ての岩の性質は危険率 5% で棄却できた。

(4) 式から 90° のカッタの食い込み深さを求めると、(5) 式から更に 60° のカッタについて食い込み深さを推定することができる。

(5) 式の定数は試験した岩についてのものであるから、他の岩について求める場合にもこの範囲内で適用されなければならない。

2) クレータの量の推定

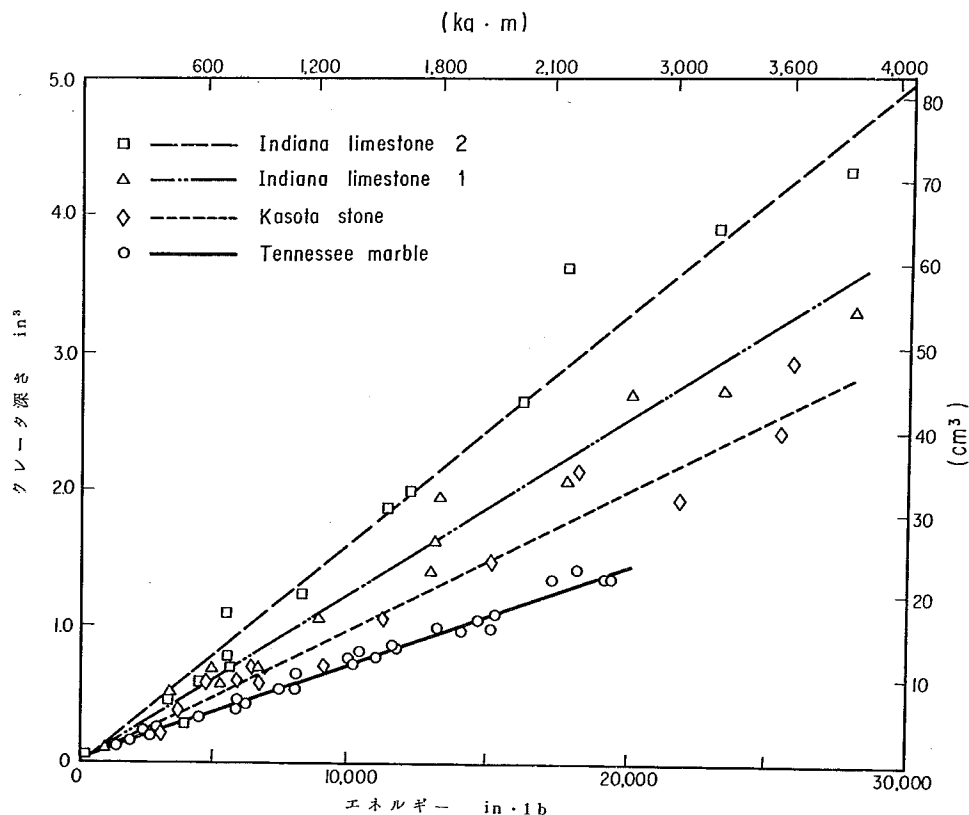


図-7 クレータの量と入力エネルギーの関係

図-7に4種類の岩で行なった90°のカッタについてのエネルギーと量の関係を示す。各直線の勾配の差は岩の種類を示すもので、他の独立変数は全て一定にしてある。計算方法は前と同じで、クレータの深さを与える式を次に示す。

$$V_{90} = 0.0437 + E \left[\frac{5.367 \times 10^2}{YM} + \frac{12185 \times 10^{-4}}{\rho} - \frac{1.001 \times 10^{-2}}{\sigma_t} \right] \quad (18)$$

ここに V_{90} : 90°カッタのクレータの量 in^3

E : カッタに与えられた全エネルギー $\text{in} \cdot \text{lb}$

YM : ヤング率 psi

ρ : 岩の密度 slug s/ft^3

σ_t : 岩の引張り強度, psi

この式の重相関係数は0.989, 標準誤差は0.148 in^3 で(18)式の岩の性質は①ヤング率 ②岩の密度 ③岩の引張り強度の順に相関が強い。

これを60°カッタに適用する場合は更に(18)式を用いて行なえばよい。但しこれらの値も試験した岩の性質の範囲内で適用されるべきである。

4-7 結 論

これらのデスクカッタの実験はデスクカッタの作動について基礎的な関係を得るために設計されたカッタで行なったものであるから、実験の条件も狭い範囲で行なったものである。また、この実験は直線運動であること、1本のクレータの解析であったこと、諸条件の影響が欠けていること、一定のカッタ形状であることのためにここに示した式を一般に適用するのは不適当で、ここに試験した範囲の条件の岩に適用されるものである。しかし、従属変数や独立変数について得られた一般的関係は有用であると考ええる。

i) カッタの刃先角の選定

60°のカッタの方が90°のカッタより食い込み性はすぐれている。すなわち同じ推力で60°カッタの食い込み量が90°カッタの1.69倍であった。またエネルギー当りクレータの量についても60°の方が優れている。すなわち90°カッタで得られる量を掘削するのに60°のカッタでは90°のカッタの20~35%減のエネルギーで間に合う。

ここにカッタの選定の基準として食い込み能力とエネルギーだけの点から評価すれば60°のカッタの方が有利であるということになる。

精度よく制御された実験室の条件下では、食い込み深さや、掘削量が、各種岩に対する垂直荷重やエネルギーを含む式によって正確に求めることができる（式17, 18）。しかし、実際の施工においての一般的な、クレータの深さや量を求める式を得ることはまだ可能になっていない。しかし、実験の結果からクレータの深さも量もそれぞれ、垂直荷重、エネルギー関数として直線的に変化するという仮定はたてられる。

$$D \propto F_v \quad (19)$$

$$V \propto E \quad (20)$$

クレータの量を求める関係はクレータの深さを求める方法と相互関係にある。例えばエネルギーとクレータの関係はトンネルを掘削するときに得られる理論的な量を計算するのに用い、円筒の量を求める式は食い込みの深さを求めるのに用いることができる。

$$D = \frac{V}{\pi R^2} \quad (21)$$

R トンネルの半径

2) 水平荷重の推定

まだデスクカッタについて実際の現場での水平荷重を求める一般的な式は出ていない。しかし、水平荷重は垂直荷重の何乗かの割合で連続的に変るだろうということは実験から推定できる。すなわち

$$F_h \propto F_v^x$$

表-4に示す力の式をデスクカッタにかかる水平荷重を求めるのに使う場合にこれらの式は直線の掘削にのみ適用されることに注意しなければならない。

カッターヘッドの中心近くの水平荷重は実際にはもっと大きくなるであろう。

最大の水平荷重は平均より80%も大きくなるという事実もカッタにかかる水平荷重の計算に当って考慮しなければならない。

謝 辞

これら鉦山局の研究計画の遂行にあたってトンネル機械メーカーやカッタ・メーカーから多大な協力が得られた。ここに厚く謝意を表する次第である。

削孔機械による岩石の掘削
(海外文献紹介)

土研資料第774号
昭47.9(1972)
千 田 昌 平

キーワード

トンネル掘進機, デスクカッタ, 岩石の掘削, 岩石の物性

要 旨 この報告書は米国鉱山局において, 主としてトンネル掘進機
に関するその現状を紹介するとともに, 基礎的な岩石の掘削に関して削
孔試験機および直線掘削試験機を用いた実験研究成果をとりまとめたも
のである。



郵便はがき

十円切手
をはいて
下さい

2 8 0 - □ □

千葉県千葉市穴川

四丁目十二番五二号

建設省土木研究所

機械研究室

御中

No. 50

No. 50

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 774 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印

