

ダイヤモンド砥石による石材の研削切断に関する研究

(第1報)

—基礎実験—

中島 繁・田中秀穂・是枝賢一・友野春久・豊福暢史

(受理 昭和56年5月27日)

Studies for Cut off of Stone with Diamond Wheel. (1st Report)

—Fundamental Experiments—

Shigeru NAKAJIMA, Hideho TANAKA, Ken'ichi KORE'EDA,
Haruhisa TOMONO and Masafumi TOYOFUKU

The experimental data for machining of stones with Diamond Abrasive wheel have been little published. It is necessary to be employed the most suitable wheel that suited to the qualities of the stone because of using expensive Diamond Abrasives in machining the stones.

In this paper, as a fundamental experiment, the performances of Diamond cut off wheel are examined; a cut off wheel is used to cut the various kinds of stone to estimate the cut off abilities and the cut off powers.

The effects of peripheral speeds of the wheel, feeding speeds of the stones, and the qualities of the stones on the cut off powers and the abilities are estimated from the ratio of contribution by applying the Experimental Factorial Design.

1. はじめに

1.1 本研究の必要性和その目的

石材は古くから建築物に用いられた材料であった。コンクリートの発達と耐震的考慮から構造物としての使用量は近年大幅に減ってはきたものの、ビルディングの外装、内装の張石、石柱、基石や記念碑、工芸品、また機械工作用定盤などに今なお需要があり石材のもつ特性から今後ともその需要を維持するであろう。

一方、硬ぜい材料である石材の加工に対して加工能率と加工精度の向上が強く要望されるにいたり、ダイヤモンド砥石（以下D砥石という）が広く用いられるようになり、加工技術は急速な進歩をとげている。石材加工に使用されるD砥石には切断作業に使用するブレード、研磨作業に使用するポリシャ、往復運動で切断作業をするガングソーなどがある。

しかしながら、これらの石材加工は試行錯誤的方法で行っているものが多く、とくに石材用D砥石に関す

るデータはメーカ側のノウハウに関係するものが多くD砥石の性能に関しては全くといっていい程、公表がなされていない現状である。したがって加工に関する体系的な研究はほとんどなされておらず合理的、経済的に加工を行うために加工体系を確立する必要がある。

そこで、本報告では、D砥石により合理的かつ経済的に研削切断作業を遂行するための基礎を確立することを目的として基礎的実験的研究を行った結果について報告するものである。

石材の研削切断挙動、研削切断動力、および研削切断能について調べ、また実験計画法¹⁾の応用により研削切断動力、研削切断能におよぼす砥石周速度、送り速度、石材の種類の影響をその寄与率から調べた。なお、D砥石の減耗については、高価なD砥石の経済性から当然最も重要視されるものであるが、その測定法に問題があり今回は取り上げなかった。この点については、測定方法およびその精度を確立し後日検討を加える予定にしている。

1.2 石材の研削切断に関する従来の研究

石材の研削切断加工体系を確立するための研究はきわめて少なく、公表された基礎的な資料もほとんどないのが現状である。数少ない文献の中から興味ある実験結果を紹介する。

Wood ら²⁾ はD砥石の冷却性に着目し冷却水に石けん添加による切断速度の影響を調べている。図1は砥石周速度と切断速度の関係である。水だけの場合、最高切断速度を示す砥石周速度は 15.3m/s であるのに対し、石けん水を0.2%、0.4%、添加した場合には砥石周速度 25.4 m/s で最高の切れ味を示し、その結果切断速度を大きくすることができると述べている。

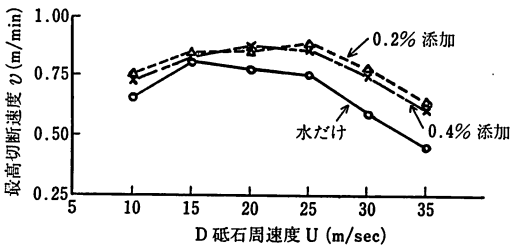


図1 石けん添加による影響²⁾ (Wood ら)

Walker ら³⁾ は、D砥石寿命におよぼすコンセントレーションと砥石周速度の影響を3種の花崗岩を研削切断しコンセントレーション45のD砥石が寿命が最も長く(表1)、砥石周速度 21 m/s のとき推定寿命が伸びたと報告している(表2)。

吉永ら⁴⁾ は各種石材を研削切断するときの砥石周速度を表3のように推奨し、各種硬ぜい材料の一般的な

表1 ブレード寿命に及ぼすコンセントレーションの影響³⁾ (Walker ら)

石種	コンセントレーション	所要動力 (kW)	寿命 (m ³)	切断コスト (円/m ²)
Norite Granite (軟質花崗岩)	25	3.3	60	610
	35	3.4	108	390
	45	3.5	131	360
Pearl Granite (中硬質花崗岩)	25	3.5	29	1270
	35	3.8	41	1010
	45	4.4	51	930
Paryl Granite (硬質花崗岩)	25	3.8	14	2620
	35	3.8	20	2050
	45	5.0	23	1990

ブレード: φ400, 粒度: 40/50, プロンズボンド, 機械出力: 20HP, 周速度: 41.5m/s, 切込み: 10mm, 送り: 1.8m/min

推奨切断速度を示している(表4)。また硬質の花崗岩などの研削切断で冷却液に水を用いる場合には推奨周速度よりもさらに低い 1000m/min (16.7m/s) 前後が適当であるとしている⁵⁾。

松井⁶⁾ は山口県産のはんれい岩を単一 Diamond 砥粒(以下D砥粒という)で引っかき試験を行い、はんれい岩の引っかき溝は低荷重では普通の金属の場合と

表2 ブレード寿命に及ぼす周速の影響³⁾ (Walker ら)

石種	ブレード周速 (m/s)	1m ² 当たりの平均摩耗量 (mm)	推定ブレード寿命 (m ²)	平均動力 (kW)
Bon Accord	21	0.0353	143.9	2.9
	41	0.0390	130.3	3.3
	(ノーライト)	56.5	0.0662	76.7
Pearl Granite (花崗岩)	21	0.0882	57.6	3.0
	41	0.1139	44.6	3.8
	56.5	0.1677	30.3	4.7

表3 各種石材の推奨速度⁴⁾ (吉永ら)

石種	砥石周速度(m/min)
砂岩(軟)	3000
石灰岩・大理石	2400
大理石(硬)・花崗岩(軟)	2100
花崗岩(硬)・砂岩	1800
玄武岩・石英	1500

表4 各種材料の切断速度⁴⁾ (吉永ら)

材料	切断速度(cm ² /min)
スレート	600~900
アスベストセメント	700~1500
セメントタイル	150~300
軟質セラミック	80~100
硬質セラミック	50~80
陶器	100~150
ガラス	40~100
耐火物(軟)	250~380
耐火物(硬)	100~150
電鍍耐火物(硬密)	30~70
電鍍耐火物(軟)	100~150
水晶	4~8
み影石(硬)	80~120
み影石(軟)	150~300
大理石	500~800
石灰岩	800~1200
硬質砂岩	200~500
軟質砂岩	500~700

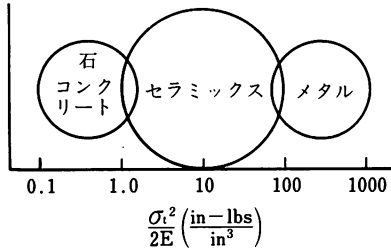


図2 弾性エネルギー係数による被削材の性格づけ⁷⁾ (Ratterman ら)

同様な引っかきみぞが得られるが、荷重を増すとともにぜい性破壊の貝殻状のみぞが発生することを明らかにした。

石材の被削性について弾性エネルギー係数⁷⁾により概括的に分類したものが図2である。この弾性エネルギー係数 MOR は硬せい材料のセラミックの被削性を評価する一つの方法として Ratterman らにより提案されているもので次式で定義される。

$$MOR = \frac{\sigma_t^2}{2E}$$

$$MOR: \text{Modulus of Resilience} \left(\frac{\text{in} \cdot \text{lb}}{\text{in}^3} \right)$$

$$\sigma_t: \text{被削材の引張り強度} \left(\frac{\text{in}}{\text{lb}^2} \right)$$

$$E: \text{弾性係数} \left(\frac{\text{in}}{\text{lb}^2} \right)$$

これは材料が破壊されるまでに与えることのできる単位体積あたりの最大歪エネルギーを表し、この MOR 値が低いほど容易に研削できるというものである。

この図より石材の被削性はセラミックより一般的に良いことになる。

以上、従来の研究経過から石材の研削切断機構はセラミック、ガラス等のいわゆる硬せい材料と本質的に変わることなく、これらを石材にも応用できるものと考えられる。

2. 実験装置および方法

石材の詳細は文献⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾にゆずり本実験に使用した4種の石材を表5に示す。また本実験に使用した石材が石材全般のどの程度の品種にランクされるか圧縮強度で比較したものを図3¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾に示す。イマハシ製ダイヤ鋸引割機 AC-2型(砥石軸出力 0.75kw)を使用し表6に示す実験条件にて行った。D砥石は旭ダイヤ製のカッティングソーブレードで、表6に示す寸法の石材を図4のように切断機に取りつけ石材1個あたりの研削切断面積はほぼ 200cm²であり冷却液は水を用いた。実験前のD砥石の条件を一定にするために砥石面を#46のGCスティックを用いて目直しを行い、消費動力は砥石軸用電動機の動力をクランプオン電力計(日置電機製 3133型)で測定した。

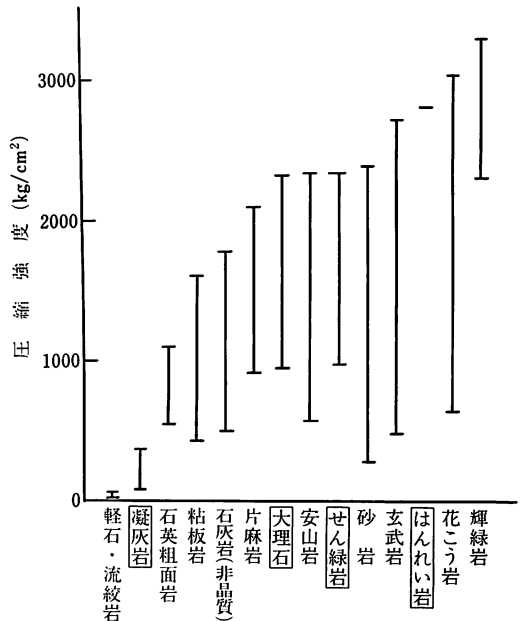


図3 石材の圧縮強度による比較¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾

表 5 本実験に使用した石材の種類ならびに機械的性質⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

石種	産地	ヤング係数 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ショア硬さ		真の比重
				乾式	湿式	
凝灰岩	鹿児島県	(1.0~2.0)×10 ⁵	15	37.5	37.4	2.61
大理石	山口県	(5.0~8.0)×10 ⁵	53	43.1	49.7	2.72
はんれい岩	南アフリカ	(9.6~9.7)×10 ⁵	—	77.0	84.1	2.92
せん緑岩	鹿児島県	(11.6~13.0)×10 ⁵	—	85.3	87.3	2.85

表 6 実験装置ならびに条件

切 断 機	ダイヤモンド引割機AC-2型, イマハシ製, モータ出力0.75kW	
石 材 寸 法	(長さ)×(幅)×(高さ)=400mm×200mm×100mm	
砥 石	旭タイヤ製, タイヤモンドソーブレード, 直径460mm, 幅3.55mm 粒度# 40, 集中度25, ブロンズボンド(2810)	
研削切断条件	砥石周速度 U (m/min)	1243, 1885, 2650
	送り速度 v (cm/min)	1.0, 1.5, 2.0, 2.5
	冷却液	水, 17ℓ/min
消費動力測定	日置電機製, クランプオン電力計	

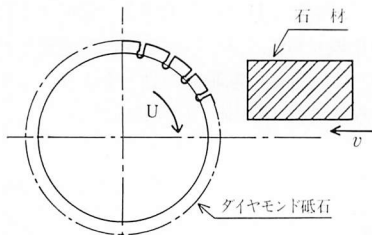


図4 加工物の切断位置

3. 実験結果および検討

3.1 研削切断挙動

わが国の地質構造はきわめて複雑なため, 石材の種類も著しく相違し石質においても差異があることが認められている¹⁵⁾. 他の多くの非金属材料は人工的に製造されるのに対し石材は天然の材料であり, このことが他の非金属材料との大きな相違点でもある. ゆえに石材の機械的, 物理的性質は同一産地の同一丁場から切出される同一品種でも時によって差がある.

そこでD砥石で石材を研削切断する場合, 研削切断機構より大別すると次の三つに分類できる.

- (a) 構成粒子が硬く結合状態の強いもの: 花崗岩, せん緑岩, はんれい岩.
- (b) 構成粒子が硬く結合状態の弱いもの: 安山岩, 凝灰岩, 砂岩.
- (c) 構成粒子が軟らかく結合状態の強いもの: 大理石, 石灰岩.

上記の (a), (b), (c) に属するはんれい岩, 凝灰岩および大理石の研削切断中に消費動力を測定したのが図5である. 消費動力が凝灰岩では小さきみに変動しているのに対し, はんれい岩, 大理石はほぼ安定した値を示している. これは凝灰岩は組織が均一でなく硬度も場所によって違いがあり, はんれい岩, 大理石はほぼ均一である, という石質を構成している造岩

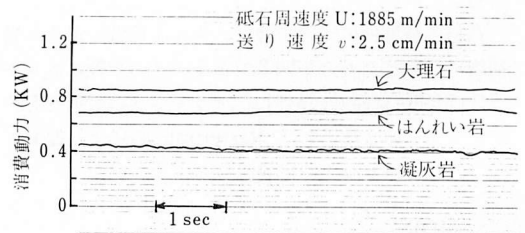
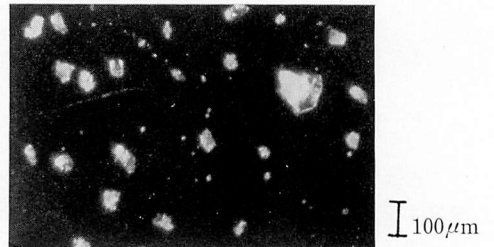


図5 消費動力の測定例



凝灰岩, 砥石周速度: 1885m/min, 送り速度: 2.5cm/min

図6 切粉の形状

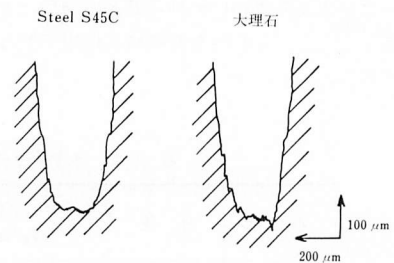


図7 研削面の断面図

鉱物の結合状態, 含有鉱物の種類, 大きさ, 硬度などの違いによりこの結果が生じたものである.

鋼類の研削では糸状の切粉が発生するが石材では図6に示すように材料の割れにより破壊されたと思われる切粉が発生している。また鋼（S45C）と大理石を研削した転写断面図が図7である。鋼は通過した砥石断面を再現しているが、大理石では試片の内部に向かって大小の割れ目がみられる。さらに凝灰岩の切粉粒径分布（図8）をみると100 μm にもおよんでいるものがある。この条件での砥石1回転あたりの切込み量は計算上で約15 μm であるから砥粒切込み深さはさらに小さくなるはずである。以上のことより石材の研削（切断）では他の硬い材料同様、割れの集積によって材料表面が破壊され切粉が発生するとみてよい。微視的観察でも材料の塑性流動により発生したと思われる切粉は確認できなかった。

図9は大理石で砥石周速度を変えた場合の切粉粒径分布の変化を示したものである。切粉の粒径は砥石周速度が増すと小さくなることからわかる。これは砥石1回転あたりの砥粒切込み深さの大小より説明できる。

D砥石は気孔が少なく、研削（切断）加工に不可欠とされているチップポケットが少ない。チップポケットの大きさは、ボンド面からのD砥粒の突出高さによってきまるといってよい。図10はボンド面からD砥粒先端までの測定結果を示す。大理石では累積切断面積が増えても砥粒突出高さはほぼ一定であり、D砥粒の先端摩滅も少なかった。これは本実験条件下では使用したD砥石が一定の大きさのチップポケットをもつことを意味し、大理石を研削切断する場合にはD砥石の目直しは一般に不必要ということになる。凝灰岩では突出高さは高くなる傾向にあり、一部のD砥粒は脱落している。これは前述したように凝灰岩の切粉が硬く大きいため、この切粉によりボンドの方が早く摩滅して、突出高さが高くなり十分仕事をせず砥粒先端が

鈍化しないまま脱落していくD砥粒もあるものと考えられる。目つぶれしたブロンズボンD砥石を目直しする際、石材工業界で安山岩、凝灰岩を使用する場合が多いことをみても、これらの石材には目直し作用、つまりボンド摩耗を促進させる作用があることがわかる。なおこれらの石材の研削切断にはボンドは非常に硬い超合金系が使用されている。せん緑岩では累積切断面積が少く、はっきりとはいえないが突出高さは減少傾向にあるといえる。はんれい岩、せん緑岩の研削切断後に砥石表面を観察するとD砥粒の摩滅、脱落（図11）が見られる。この摩滅については、D砥粒が

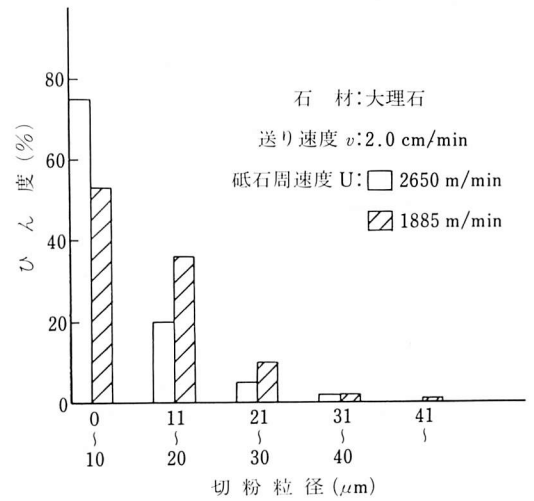


図9 砥石周速度による切粉粒径分布の変化

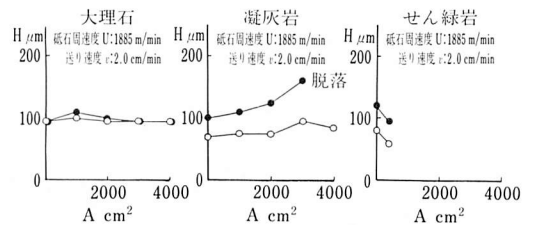


図10 累積切断面積Aによる砥粒突出高さHの変化

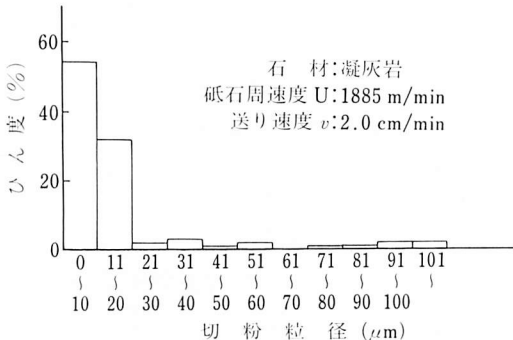


図8 切粉の大きさの分布

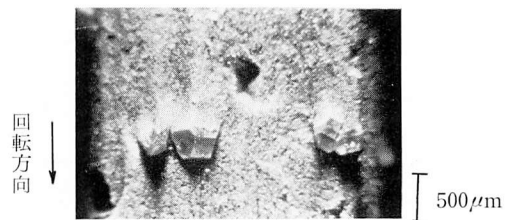


図11 ダイヤモンド砥粒の脱落ならびに摩滅的摩耗

石材と高温接触するための熱的摩耗と高速接触による衝撃微小破砕によるものと考えられる。この熱的摩耗については、研削液の注入不充分のため、砥粒先端が高温になり酸化摩滅したことによるものと考えられる。すなわち、一般にダイヤモンドは650℃付近より酸化によりCO₂ガスを発生することが認められており¹⁶⁾、また、急激な硬度低下も認められている¹⁷⁾ため、特に、研削液の注入については、D砥粒の化学的安定性を得るためにも充分留意すべき必要がある。一方、砥粒脱落については、石材切粉によるラッピング作用によるボンドの摩滅のため、D砥粒との接着面積減少による砥粒保持力の低下によるためであり、石材切粉洗浄のためにもやはり研削液については注入方法、注入量について、石材の種類に応じてより一層の留意すべき必要性を痛感する。

D砥石における石材の研削切断をモデル化すると図12のようになる。

3.2 研削切断動力

切断機の砥石軸回転用のモータから消費動力を測定し、無負荷時の消費動力をさし引いたものを正味消費動力とした。(負荷時の機械的ロスの増加は考慮していない)

各石材を研削切断したときの累積切断面積と正味消費動力との関係を図13に示す。累積切断面積の増加に

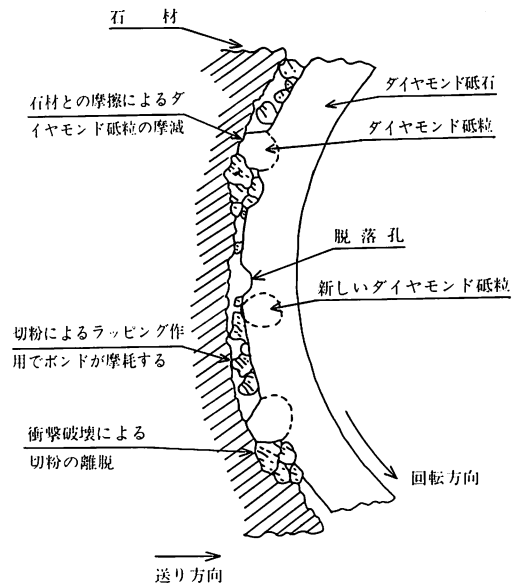


図12 石材研削切断模形図

対して大理石と凝灰岩は動力に絶対値の差異はあるものの、ほぼ一定値を示している。ちなみに大理石を砥石周速度 1885m/min, 送り速度 2.7cm/min の条件で 6000cm² 研削切断しても動力の増加、つまり、接線方向切断抵抗の増加は認められなかった。これに対

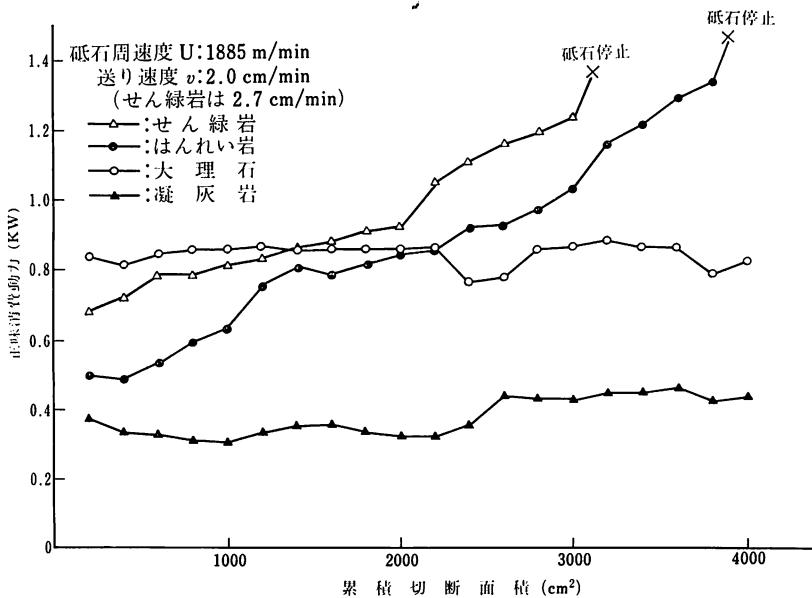


図13 累積切断面積による正味消費動力の変化

し、はんれい岩とせん緑岩は累積切断面積の増加とともに動力が徐々に増加しそれぞれ 3800cm², 3000cm²の時点で急激にふえ砥石回転の停止があった。これは切断機の出力不足が最大の原因であるが、前項で述べたように実験終了後に砥石表面を観察すると多くのD砥粒が摩滅、脱落していたことによるもので、本実験条件下ではD砥石性能を引き出すにはいたらず砥石仕様、周速度、冷却水注液法などに検討すべき点を残した。

図14は砥石周速度による正味消費動力の変化を示したもので砥石周速度を増すと動力は減少することがわかる。この結果は他の硬せい材料の研削切断においても同様¹⁸⁾であるが、この点については砥石周速度の増

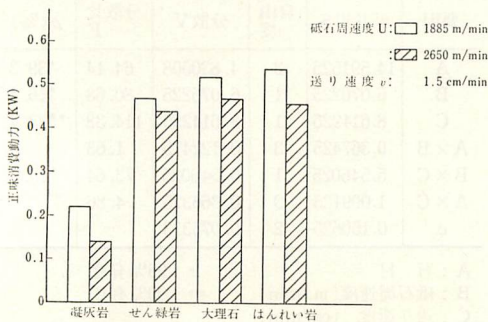


図14 砥石周速度による正味消費動力の変化

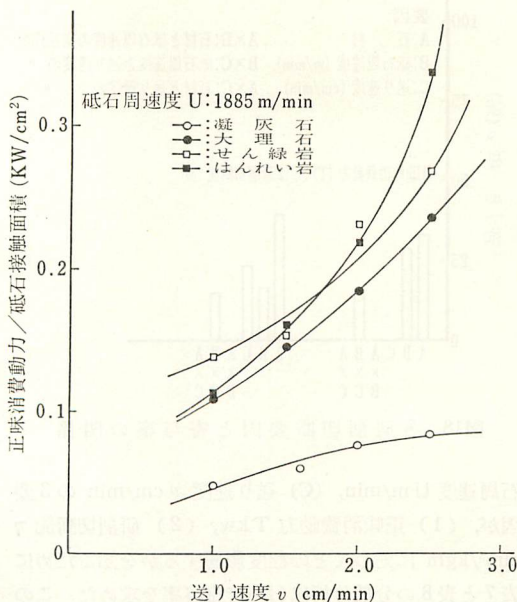


図15 送り速度による正味消費動力の変化

加による砥石の減耗とも併せて考えなければならない点である。図15は送り速度による動力の変化を示したものである。送り速度を増すと動力も増すが、とくに、はんれい岩において増加が急激である。

以上のことより研削切断動力の絶対値の違いは各石材の機械的性質、とくに圧縮強度、ヤング率の高低と相関し、累積研削切断面積を増やすことによる動力の変化は、前項で述べたD砥石表面の性状、つまり切れ味と関係することがわかる。

3.3 研削切断能および最適研削条件

材料の研削切断において研削切断能¹⁹⁾で評価される。この研削切断能 (mm³/kgm) は単位時間内の研削切断量 (mm³/min) を研削切断所要動力 (kw) で除したもので、単位エネルギーで研削切断できる材料の容積となる。研削切断能値の大きい材料ほど研削切断しやすい材料であるとみてよい。また、ある材料に対して研削切断能の値が大きくなる条件を見いだせば、その材料に対する消費動力からみた最適条件の選択ができることになる。

送り速度を変化させたときの研削切断能の変化は図16に示すとおりである。凝灰岩に対しては送り速度を

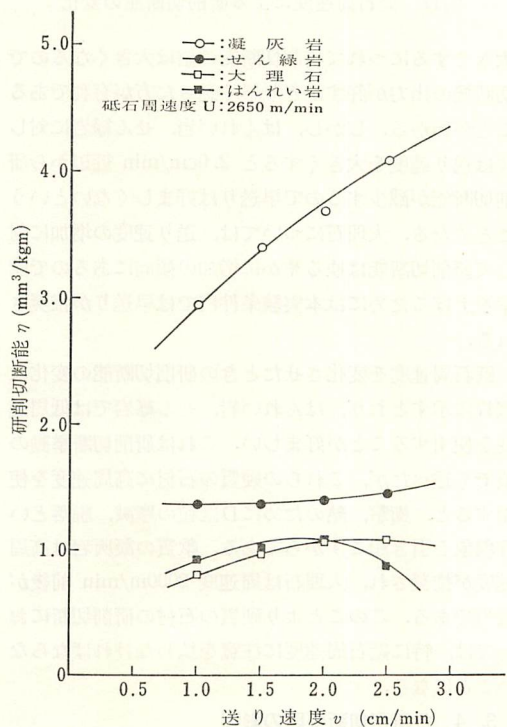


図16 送り速度による研削切断能の変化

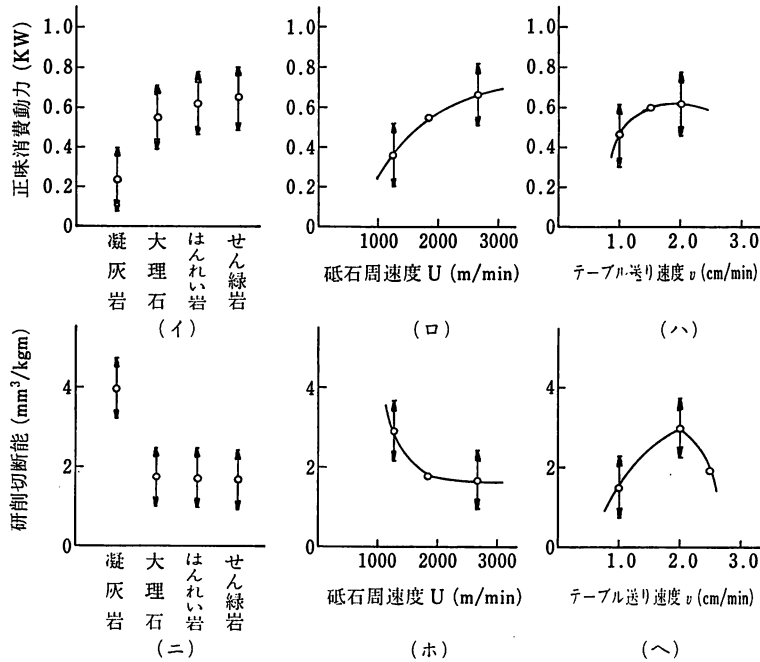


図19 正味消費動力，研削切断能と各要因の関係

各要因の影響の程度を知ることができる。しかし、各要因の変化に対する各測定項目の増減の傾向は同図ではわからないので、各水準における平均値で比較することにより、それぞれの要因が各測定項目の増減に与える定性的傾向を知ることができる。図中の矢印は95%信頼限界を示す。以下各測定項目について検討を加える。

i) 正味消費動力Tについて

正味消費動力に対しては、3要因のうち砥石周速度の影響が寄与率28.9%で最も大きく、送り速度の影響はでていない。また石材の種類の影響が90%有意差で33%でている。つぎに図19の(イ)(ロ)(ハ)からわかるように正味消費動力は石材の種類、つまり石材の機械的性質の差異が影響し、砥石周速度の増加に対してはともに増加し、テーブル送り速度の増加に対しても増加することが認められる。

ii) 研削切断能ηについて

研削切断能に対しては3要因のうち石材の種類の影響が最も大きく寄与率39%で、つぎに送り速度が23%影響し、砥石速度を変化させることによる影響は16%である。

また図19(ニ)より研削切断能は前述したとおり凝

灰岩が最も大きく、他の3種はほぼ同程度である。砥石周速度の増加に対しては、その増加とともに減少し(ホ)(なお凝灰岩についてはその傾向は逆である)、テーブル送り速度の増加に対しては2.0cm/minをピークに減少する(ヘ)。

以上のように図18と図19により各要因が各測定項目にどの程度の影響を与えるかがわかるわけであるが、正味消費動力では主に砥石周速度、石材の種類が影響し、研削切断能では石材の種類が最も影響するのはもちろんのこと、テーブルの早送りが影響することがわかる。3要因の中で石材は他の2要因とは異質の要因であり、今後、砥石減耗量、研削比、研削抵抗など測定項目を増やし砥石仕様を変え、さらに検討を加えなければならないと考える。

4. おわりに

D砥石で石材の研削切断作業を行なうに、合理的、経済的に遂行するための基礎を確立すべく研究を行い、研削切断挙動、研削切断動力、研削切断能、実験計画法の応用により各研削切断要因のおよぼす影響度を調べ、つぎのことがわかった。

1) 切粉の形状から石材は微細な割れによって加工

されているとみてよい。

2) 大理石の研削切断において本実験条件下では、D砥石の目直しは不必要である。

3) 軟質の凝灰岩は高周速度、早送り、大理石は砥石周速度 2000m/min 前後、早送り、硬質のはんれい岩、せん緑岩は低周速度で消費動力が急激に増加する点より少し低い速度で作業するのが最も望ましい能率をあげる。

4) 正味消費動力は砥石周速度、石材の種類が最も影響し、研削切断能は石材の種類、テーブル送り速度、砥石周速度が影響することを認めた。

あとがき

本実験の遂行にあたり、石材の鑑定などに有益な助言をいただいた理学部助手山本温彦博士に対し厚くお礼を申し上げます。また、実験に協力された、白石充、原口誠君に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 奥野忠一, 外 1 名: 実験計画法, 培風館, (1971).
- 2) Wood, 外 1 名: De Beers Diamond Reserch Laboratory, Johanesburg, South Africa, Paper 87/67 C, July (1967).
- 3) Walker, 外 1 名: Granite Sawing Technics, IDR, 1 (1971), 4.
- 4) 吉永博俊, 外 1 名: 石材のダイヤモンド砥粒加工, 精密機械, 41-7 (1975), 50.
- 5) 吉永博俊: 石材およびコンクリートのダイヤモンド研削, マシニスト, 9 (1969), 50.
- 6) 松井正己: 硬ぜい材料の超仕上げに関する研究, 精密機械, 32-8 (1966), 544.
- 7) Ratterman et al.: Ceramics Finishing with Diamond, Ceramics Industry, Feb, (1968).
- 8) 斉藤勲男: 石材定盤, 日刊工業新聞社, (1963), 131.
- 9) 藤松進: 建築材料, 森北出版, (1976), 72.
- 10) 小林昭, 外 2 名: 非金属材料の精密加工法 (下), 地人書館, (1964), 503.
- 11) 西村昭, 外 1 名: 最新土木材料, 森北出版, (1975), 220.
- 12) 日本建築学会編: 第 2 版建築学便覧 II 構造, 丸善, (1977), 686.
- 13) 建築学大系編集委員会編: 建築学大系 13 建築材料学, 彰国社, (1964), 11.
- 14) 猪野勇一: 建築学ハンドブック 7 資材, 彰国社, (1969), 89.
- 15) 土木学会編: 土木工学ハンドブック, 技報堂, (1955), 355.
- 16) 小野浩二: ダイヤモンドと CBN の特性と用途, 機械と工具, 23-10 (1979), 17.
- 17) 高沢孝哉, 外 1 名: 硬ぜい材料の摩耗, 機械の研究, 22-6 (1970), 865.
- 18) 小峰進, 外 1 名: 機械工作, 50-9 (1962), 77.
- 19) 小林昭: プラスティックの機械加工, 日刊工業新聞社, (1966).