

硬岩用自由断面掘削機の 掘削体積比エネルギーと岩盤物性

領家邦泰¹・青木智幸²・田村壽夫³・
福井勝則⁴・大久保誠介⁵・松本一騎⁶・宮本義広⁷

¹ 正会員 大成建設株式会社 土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

² 正会員 Ph.D. 大成建設株式会社 技術開発第二部 (〒169-0073 東京都新宿区百人町 3-25-1)

³ 正会員 高取山(北行)トンネル工事業所 (〒654-0121 兵庫県神戸市須磨区妙法寺円満林 6-7)

⁴ 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻
(〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

⁵ 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻 (同上)

⁶ 東京大学大学院 工学系研究科地球システム工学専攻修士課程 (同上)

⁷ 阪神高速道路公団 神戸管理部保全第一課 (〒650-0041 兵庫県神戸市中央区新港町 16-1)

本研究では高取山(北行)トンネルに使用した硬岩用自由断面掘削機(MM130R)の掘削中の掘削体積比エネルギーの分布を求め、岩盤物性と比較・検討を行った。まず本掘削機における掘削体積比エネルギーの求め方について述べた。次に、岩盤調査(弾性波速度、シュミットハンマー、岩盤観察)結果と掘削体積比エネルギーの分布を比較した結果、良好な対応を示し、岩盤物性の良い指標となることを示した。さらに、掘削体積比エネルギーのトンネル進行に伴う分布を調べた結果、掘削体積比エネルギーが小さい部分の分布は卓越する亀裂の方向とほぼ一致し、岩盤の構造を表現できることを示した。また、掘削体積比エネルギーと岩盤強度の比は1/3程度であり、TBMの場合と同程度であることがわかった。

Key Words: machine excavation, disc cutter, Tunnel Boring Machine, specific energy, hard rock, compressive strength, Schmidt hammer

1. はじめに

最近、安全性や騒音・振動などの環境改善の要求から、機械掘削が硬岩の掘削方法として脚光を浴びている。機械掘削はその特徴として、力学的な仕事をなすことによって岩盤を掘削するため、多くの場合、機械側にセンサーを装着することで容易に供給したエネルギーを求めることができる。掘削体積も同時に測定できる場合も多く、たとえばTBMでは推力用シリンダの変位を測定すれば、掘削体積が得られる。掘削に要したエネルギーを掘削体積で除したものは、Teale¹⁾によって提案されている掘削体積比エネルギー(Specific Energy)であり、掘削機械の能率を評価する指標として用いられている。同一条件で掘削した場合には、岩盤が堅硬になれば、掘削体積比エネルギーが大きくなることが知られている^{2),3)}。このことより、掘削体積比エネルギーと岩盤物性との間に相関関係が存在するものと考えられ、両者の関係を明らかにすることにより、掘削体積比

エネルギーから、岩盤物性のある程度把握できるのではないかと考える。

掘削体積比エネルギーと岩盤物性の関係を調べた研究は比較的少ない。Willoughby⁴⁾はPasmenco鉱山で、矩形断面掘削機MM130を用いて掘削体積比エネルギーの分布を求めているが、岩盤特性との関連は議論していない。一方、掘削抵抗と岩盤物性の関係について検討した研究はいくつか見られる。福井ら⁵⁾は、TBMの推力、トルクおよび掘進速度から岩盤強度を求め、岩盤調査結果やシュミットハンマー打撃試験と比較的良く一致していると報告している。唐澤ら⁶⁾はツースピットを用いた孔井掘削に関する室内試験で、トルクなどから岩盤強度が推定できるとしている。その他、削岩機に関する報告もいくつか見られる。

本研究では、硬岩用自由断面掘削機MM130Rによってトンネルを掘削した際の掘削体積比エネルギーを求め、岩盤物性と比較・検討し、さらに今後の利用方法を提案した。

2. トンネルおよび掘削機

高取山（北行）トンネルの位置を図-1に示す。本トンネルは、高速道路用2車線トンネルで、兵庫県の六甲山地西南縁の神戸市須磨区に位置し、須磨断層（走向NE、傾斜70°NW）、高取山断層（走向ENE、傾斜S）および横尾山断層（走向NNE～NE、傾斜35～50°SE）に囲まれる^{7),8)}。地表踏査の結果では、これら3つの断層に平行な亀裂が卓越していた。

本トンネル延長の内約510mの区間は硬岩区間で、地質は中生代白亜紀の六甲花崗岩であり、一部硬質のヒン岩脈が介在している。六甲花崗岩は中～粗粒の黒雲母花崗岩で、淡桃色のカリ長石を特徴的に含み、灰～淡桃灰色の塊状岩を呈する。この区間での地山分類（道路トンネル）は、B～C級が主体であった⁹⁾。

掘削機の仕様を表-1に、写真と構造の概要をそれぞれ写真-1、図-2に示す。この掘削機MM130Rは、ロピンス社の矩形断面用硬岩掘削機MM120およびMM130⁴⁾を基に、一軸圧縮強度50～250MPaの硬岩の掘削用に開発された。MM120およびMM130のカッタホイールは、水平移動のみ可能であり、掘削断面はカッタホイール径と等しい高さの矩形である。これに対して、新たに開発したMM130Rのカッタホイールは鉛直方向にも移動できるため、自由な断面の掘削が可能である。以下で、その概略と掘削原理に限定して述べるが、詳細については文献^{10),11)}を参照されたい。

図-2に示す外径4100mmのカッタホイールは15rpmで回転する。カッタホイールの外縁に沿って、直径432mm(17 inches)のディスクカッタが8個取り付けられており、掘削は主にこのディスクカッタによって行われる。カッタホイールには、さらに、トンネル側壁部掘削用のゲージカッタ(ボタンチップの埋め込まれたローラカッタ)8個と、ずり掻き込み用のパドル8個が取り付けられている。

掘削に当たっては、まず、肩部のグリッパー4個と、前後のクローラの間にある地盤サポート2個で本体後部を固定した上で、カッタホイールを回転させる。次に、ディスクカッタを切羽下半の中央部に当て、所定の切り込み深さ(10～25mm)だけ推力用シリンダにより本体前部を前進させる。推力シリンダの変位を固定した後、カッタホイールを移動させて岩盤を掘削する。なお、カッタホイールはコンピュータを使用した変位制御により、プログラムされた軌跡に沿って移動する。

図-3に、高取山トンネルにおけるカッタホイールの移動軌跡の模式図を示す。図中の楕円は各掘削位

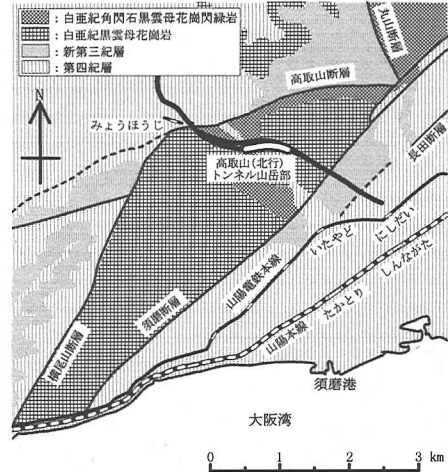


図-1 高取山トンネルの位置と地質

表-1 硬岩自由断面掘削機 MM130R 主な仕様

機械寸法	H=6.0m W=7.3m L=29m
カッタホイール直径	4.1m
カッタホイール回転速度	15rpm
ディスクカッタ直径	432mm
ディスクカッタ数	8個
ゲージカッタ数	8個
カッタホイールトルク	360kN・m
全装備出力	1.4MW
総重量	3.6MN

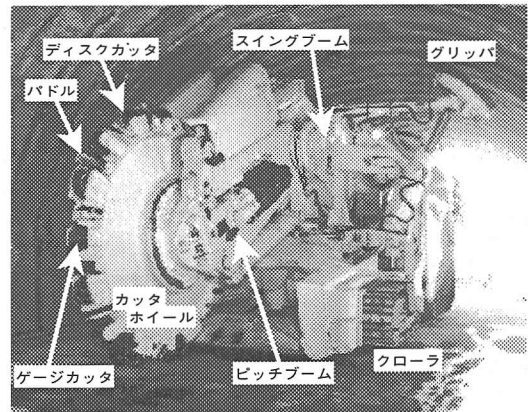


写真-1 硬岩自由断面掘削機 MM130R

置でカッタホイール外縁を掘削断面に投影したものである。掘削断面は幅11.6m、高さ7.4mで、断面積は約70m²である。位置1から出発し、カッタ

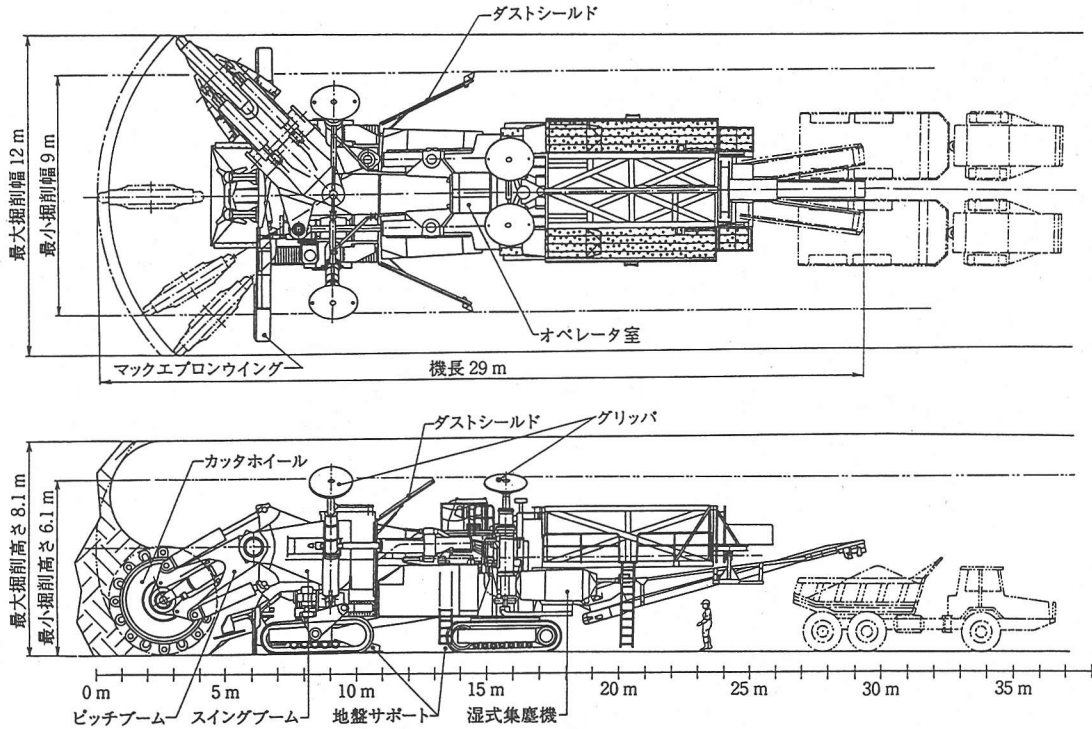


図-2 MM130Rの概略図

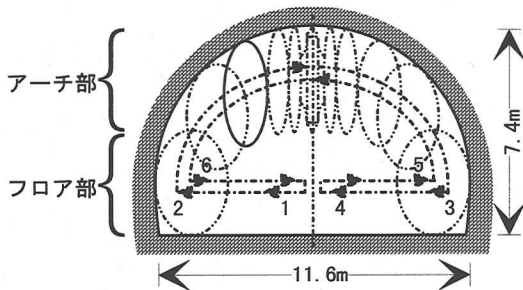


図-3 高取山トンネルにおけるカッタホイールの軌跡

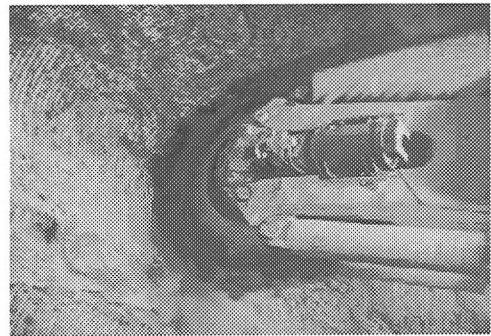


写真-2 MM130Rで掘削した切羽の様子

ホイールが切羽を1周し切羽中央4に至ると、移動方向を反転させて4→5→6→1の順に掘削を行う。掘削は下半のフロア部と上半のアーチ部に分けることができる。フロア部は、ピッチ(鉛直方向)ブームを固定して、スウィング(水平方向)ブームによりカッタホイールを水平方向に移動して岩盤を掘削する。他方、アーチ部の掘削ではピッチブームとスウィングブームとも動作させ、円弧状にカッタホイールを移動して岩盤を掘削する。

写真-2に切羽の写真を示す。写真で白く線上に見えるものが、ディスクカッタによる掘削溝である。

カッタホイールは、通常は、水平方向に200 mm/s程度で移動し、図に示すように水平方向に約100 mm間隔の掘削溝ができる。図-4に示すように、切羽上のある水平断面において位置Aに掘削溝が形成されたとする。0.5 s後に次のディスクカッタがBの位置を通過する。その際、Bよりサイドブレイク(side break)が生じてAB間の岩片が取り除かれる。TBMでも同じであるが、ディスクカッタが通過するごとにサイドブレイクにより掘削間が連結されること(single-path cutting)は、掘削能率の観点から望ましい。今回の掘削機ではこのような掘削溝の連結

がほとんどの場合観察され、何度か同一箇所をディスクカッタが通過し溝が深くなった後やっと掘削溝間隔が連結される掘削様式(multi-path cutting)は、ほとんど観察されなかった。なお、TBMの掘削溝間隔はディスクカッタの配置で決まってしまうが、本掘削機の場合には岩盤に応じてカッタホイールの移動速度を変化させることにより掘削溝間隔を調整することができる。

3. 掘削エネルギーと掘削体積比エネルギー

単位体積の掘削に要するエネルギーを掘削体積比エネルギーと称する^{1),2)}。掘削体積比エネルギーは、掘削能率を検討する目的でしばしば使用されるが、その計算方法は一定しておらず、特に掘削エネルギーの算出には色々な方法がある。本研究では、岩盤に対して消費されたエネルギーを、掘削エネルギーとすることにした。本掘削機において岩盤の掘削に消費されるエネルギーは、1)カッタホイールを切羽に押し込むためのエネルギー、2)カッタホイールを切羽に沿って水平に移動させるエネルギー、3)カッタホイールの回転に要するエネルギー、の3つに分類することができる。これに対応して岩盤を掘削する際、ディスクカッタに生じる力は、1)所定の切り込み深さを維持するための力 F_1 、2)水平方向に移動させる力 F_2 、3)鉛直方向に移動させる力 F_3 、の3つの分力にわけることができる。これらの力の大きさは、切り込み深さなどの条件によって変化するが、通常の掘削における設定であれば、 F_1 が最も大きく、 F_2 および F_3 はほぼ等しく、 F_1 の10~20%程度である¹²⁾。これらの力を移動距離で積分したものが掘削エネルギーとなる。切羽1周を掘削する場合の移動距離は、1)では切り込み深さ相当(10~30 mm)、2)ではカッタホイール中心部の移動距離(約 20 m)、3)ではカッタホイール外周の回転距離(約 300~400 m)となる。単純に力と距離を掛けてエネルギーの概算を求めると、3)によるエネルギーが最も大きい。1)による消費エネルギーは3)に比べて0.1%以下であり、2)では3)に対して5~7%となる。このように、掘削に要するエネルギーの大部分はカッタホイールの回転エネルギーであるので、掘削エネルギーを求める際には、1)、2)のエネルギーは無視することにした。

2台の三相電動モータによってカッタホイールを回転させているので、各々の電動モータに電力計を設置し積算電力量を測定することによって、カッタホイールの回転エネルギーを測定した。負荷が

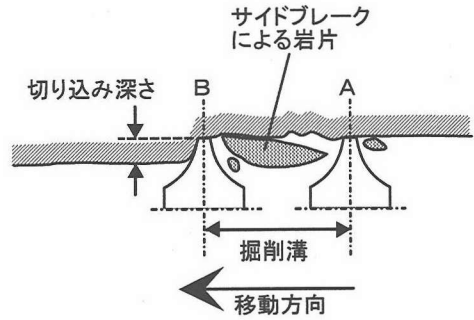


図-4 掘削機構の概念図

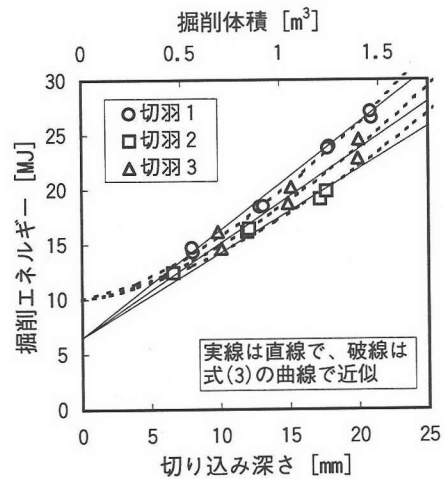


図-5 掘削エネルギーに対する切り込み深さの影響

小さいと電動モータの力率が小さくなるため、カッタホイール空転時の所要エネルギーを求めることが難しい。そこで、切り込み深さを变化させた掘削を行い、空転時のエネルギーを推定することにした。切り込み深さを変えた掘削試験を3地点でおこなった。図-5に、カッタホイールが切羽を1周(図-3で位置1から4まで)する間のカッタホイール回転エネルギーを示す。カッタホイールの空転時のエネルギーは切り込み深さ0 mmの時であるので、図-5の結果を外挿して求めることにする。外挿の方法にはいくつか考えられるが、ここでは簡単に実線で示すように直線で近似して求めることにした。図からカッタホイールを空転させるために要するエネルギーは6.5 MJであることがわかる。よって掘削エネルギーはカッタホイール回転エネルギーから、カッタホイール空転エネルギーを差し引いたもので表すことができる。掘削体積比エネルギーは、その掘削エネルギーを掘削体積(切り込み深さ×掘削断面積)で

除した値となる。

上記の掘削エネルギーには、切羽下部に溜まったずりを、パドルで掻き上げて排出するためのエネルギーも含まれている。このずり排出のためのエネルギーを参考までに見積もるため、パドルの効くフロア部と効かないアーチ部の掘削体積比エネルギー（100 m 区間の平均値）を比較したところ、フロア部の方が約 3 MPa 程度大きかった。

推力用シリンダのストロークは 150 mm であり、150 mm 弱の掘削が終了すると、クローラによって本体を前進させる。前進後最初の掘削時の切り込み深さは切羽全体で一定とならぬことが多かった。そこで、20 ~ 50 mm 掘削し切り込み深さが一樣になるまでのデータは検討の対象としないことにした。また、トンネル側壁部はゲージカッタで掘削されて輪郭が整えられるので、他の部分より多くのエネルギーを要する。そこで、トンネル側壁から 340 mm 以内の部分の掘削体積比エネルギーは検討の対象としないことにした。

本掘削機ではカッタホイールの移動速度を変えると掘削溝間隔が変わる。そこで、掘削溝間隔と掘削体積比エネルギーの関係について吟味した。図-6に、切り込み深さを 20 mm とし、掘削溝間隔を変えた時の掘削体積比エネルギーの一例を示す。図-6の横軸はカッタホイールが切羽を1周する掘削時間を表す。図では、切羽1周に要する掘削時間が短くなれば掘削体積比エネルギーは若干減少している。その理由は、カッタホイールの移動速度の増加で掘削溝間隔が増加し、サイドブレークによる掘削比率が増え、掘削体積比エネルギーが減少したと考えられる。しかし、図-6に示した以外にも数回同様の試験を行ったが、その大部分で上記の傾向は定性的には存在しているものの、ばらつきが大きかった。移動速度を速くした場合にはサイドブレークで破碎される部分の凹凸が大きくなり、掘削体積を切り込み深さと掘削断面積の積で求めたため、ばらつきが大きくなったものと考えられる。今回の掘削では、切羽を1周させる時間は一部の試験的な掘削を除けば 140 ~ 160 s 程度であるので、図-6の結果を見ても、カッタホイールの移動速度の影響は小さいといえる。

4. 岩盤調査結果との比較

岩盤調査として、約 1 m 離れた切羽 A, B で区間弾性波速度測定とシュミットハンマー打撃試験を、切羽 A より約 80 m 離れた切羽 C でシュミットハンマー打撃試験を実施した。区間弾性波速度の測定

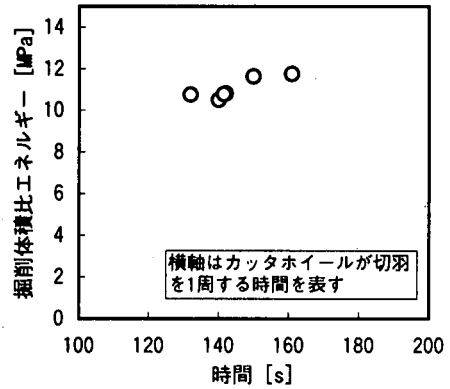


図-6 カッタホイール移動速度を変化させた場合の掘削体積比エネルギー

では、床面より約 1 m 上方の水平線上の切羽に 1 m 間隔で計 11 点の測点を設け、1 m および 2 m 区間毎の弾性波速度を測定した。

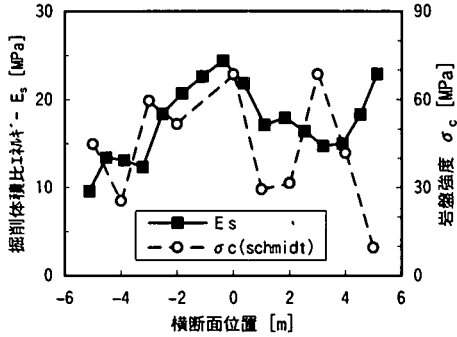
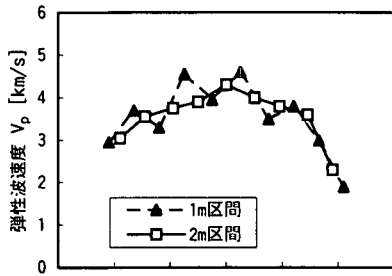
シュミットハンマー打撃試験は各測点近傍で実施し、5 回打撃してその測定値の平均値をその測点でのシュミットハンマー反発値とした。シュミットハンマー試験で現れる岩盤特性はせいぜい数 cm 程度の寸法の物性を代表している。したがって、対象とする寸法からすれば室内強度試験で使用される試験片と同程度といえる。しかしながら、室内試験では亀裂のない部分を選んで試験をしがちである。他方シュミットハンマーで打撃しているのは、亀裂が存在する岩盤である。数 cm 程度の領域に亀裂が存在した場合には、打撃値は当然低下し、これから求めた強度も低下する。

本研究での切り込み深さは平均で 20 mm 程度であるので、岩盤を掘削する際に消費されるエネルギーは切羽から数 cm 程度の岩盤特性によってほぼ決定される。すなわち、切羽から数 cm での岩石の強度に亀裂の影響が付加されたものが、岩盤を掘削する際の掘削抵抗として現れる。

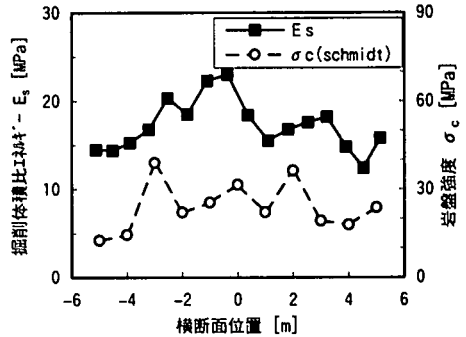
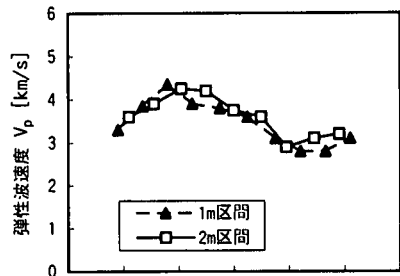
このように、掘削における掘削抵抗とシュミットハンマー反発値は、同程度の領域の物性を表していると考え、シュミットハンマー反発値 S から次式（富士物産、シュミットハンマー取扱説明書¹³⁾）を用いて計算した値を、岩盤強度 σ_c (Pa) と呼ぶことにする。

$$\log_{10}(\sigma_c) = 0.0307S + 6.393 \quad (1)$$

松本ら¹⁴⁾では、花崗岩の平谷トンネル（長野県と岐阜県の県境）における TBM 掘削で式(1)を用い



(a) 切羽A



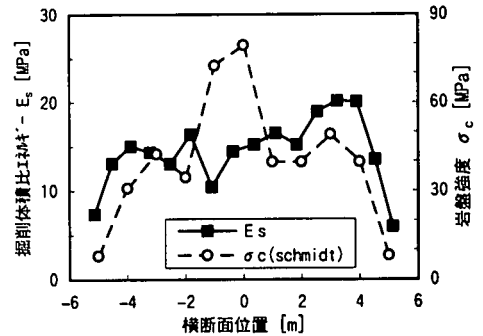
(b) 切羽B

てシュミットハンマー反発値から岩盤強度を計算し、TBMの掘削抵抗から推定した岩盤強度と比較し、軟弱部から硬質部まで比較的良く一致することを示した。本研究でも、松本らと同じ花崗岩であるので、式(1)を採用することとした。ただし、式(1)は様々な岩盤を打撃した際の平均的な関係式として提案されており、高取山トンネルの岩盤に適用した場合に、式(1)の定数などは変化することが考えられるが、この点は今後の検討課題とした。

一般的に機械化掘削という岩盤強度は、シュミットハンマー反発値¹⁵⁾、エネルギー解法率¹⁶⁾、ポイントロードインデックス¹⁷⁾などで評価されるが、殊にシュミットハンマー反発値は重視されており、Taber摩耗試験結果と組み合わせて使われることもある^{18), 19)}。注意すべきことは、原位置せん断試験などより求められる強度とはやや異なるものである。

図-7に原位置試験結果とフロア部での掘削体積比エネルギーの分布を示す。区間弾性波速度は測定した2点の中心にプロットした。

切羽Aから見ていくと、1m区間と2m区間の弾性波速度とはほぼ同じ傾向が見られ、切羽中央で約4 km/sであるが、中央から右に2m以上離れると、急激に低下している。左側でも同様の傾向はみられるものの、低下の度合いは少ない。シュミットハンマー打撃値から推定した岩盤強度は、ばらつきは大きいものの、傾向は区間弾性波速度と比較的一致している。掘削体積比エネルギーも中央で最大



(c) 切羽C

図-7 切羽における岩盤調査と掘削体積比エネルギーの変化

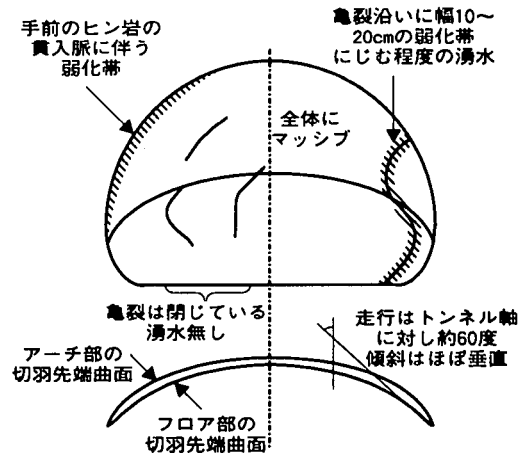


図-8 切羽Aの観察結果

値 25 MPa を取り、両側では低下する傾向があり、岩盤調査と比較的良く一致している。しかし、中央から右に 4 m 以上離れると掘削体積比エネルギー E_v が急激に上昇している点は岩盤調査と異なる。

図-8に切羽 A の切羽の岩盤観察結果を示す。中央では亀裂が少なく、全体的に堅硬である。右側 3.5 m 付近に幅 10 ~ 20 cm の風化帯を伴う亀裂が観察され、その走向はトンネル軸に対して反時計回りに約 60 度、傾斜はほぼ垂直である。また亀裂の右側は硬質な岩盤であった。区間弾性波速度の最も右側の2点は、この亀裂をはさむ形で計測されたため小さい値となったと考えられる。シュミットハンマー試験も、ちょうどこの亀裂のすぐ右側の測点で測定されたため、かなり小さな値となったものと考えられる。また左上方にはヒン岩の貫入が観察され、貫入岩脈に沿って細かい亀裂を伴って軟弱化した部分が広がっており、左側の岩盤も中央よりかなり軟らかいと考えられる。これらのことから、切羽 A では掘削体積比エネルギーの変化は地山の硬軟の特性を良く反映していることがわかる。

次に切羽 B では、区間弾性波速度、シュミットハンマー打撃値から推定した岩盤強度および掘削体積比エネルギーは中央より左側で若干大きくなるが、両側壁近くで小さくなる傾向が読みとられ、3者は定性的に一致している。中央部での弾性波速度は 4 km/s と比較的切羽 A と類似する結果であり、掘削体積比エネルギーも切羽 A と比較的近い値である。他方、シュミットハンマー打撃値は切羽 A に比べてかなり小さくなっている。

切羽 C では、シュミットハンマー打撃値は中央部の2点が他よりかなり大きくなっている。それを除けば、右側 3 m 付近で 50 MPa と大きく、中央部では 40 MPa 程度であり、両側壁で軟弱な傾向が現れている。他方、掘削体積比エネルギーは右側 2 ~ 4 m で最大値約 20 MPa となり、それより右では急激に低下する傾向が見られる。最大値を取ったところより左では若干低下傾向が見られ、左側壁近くでは急激に低下している。このように、切羽 C ではシュミットハンマー打撃試験と掘削体積比エネルギーは、中央部を除いて比較的良く一致している。

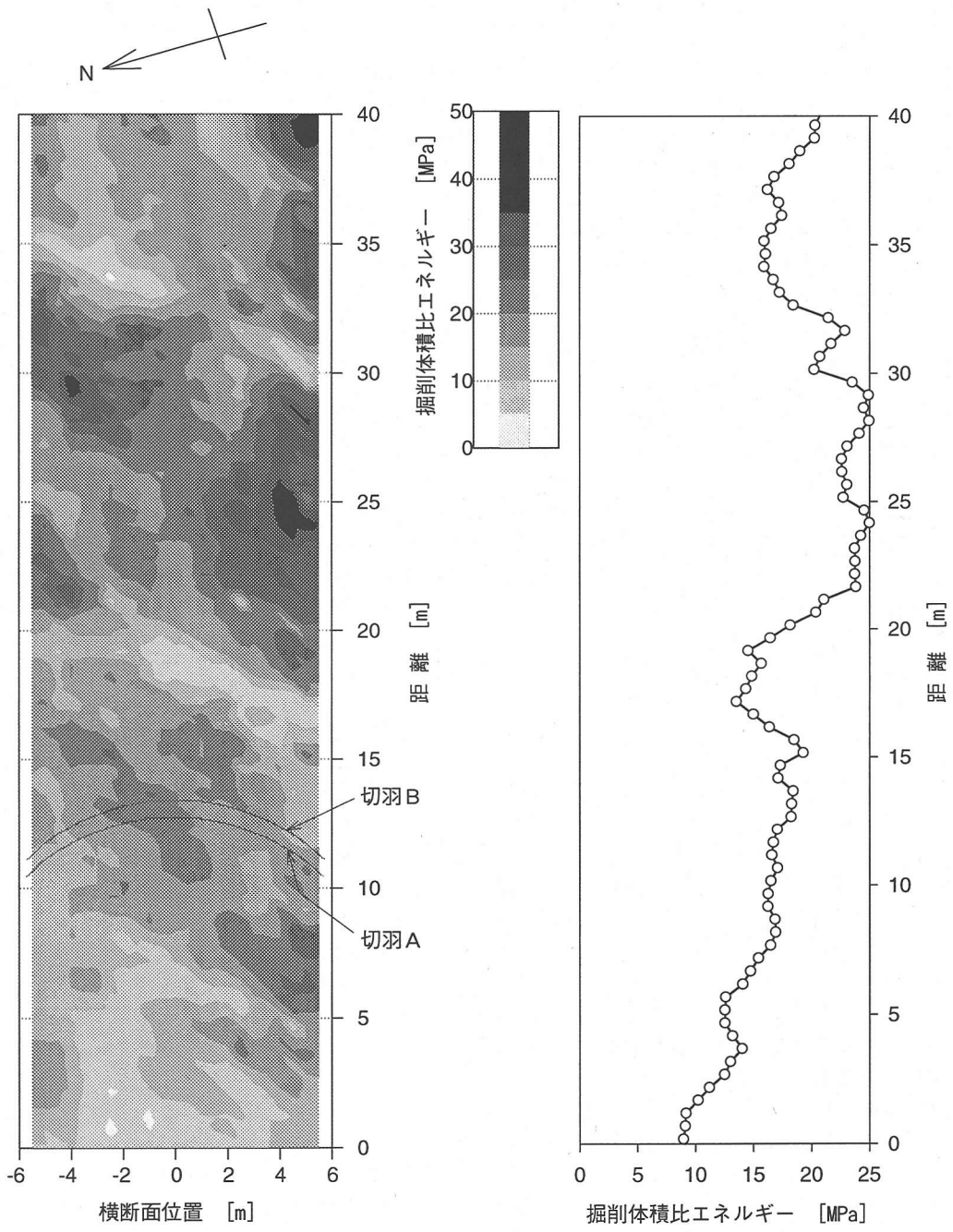
以上の3つの切羽での結果から掘削体積比エネルギーは、岩盤の硬軟の特性を反映していることがわかった。

5. 掘削体積比エネルギーの分布

掘削体積比エネルギーのトンネル進行方向の分布をコンター図として表した(図-9)。図は、トンネル軸方向に 40 m の区間を示し、フロア部とアーチ部とに分けてそれぞれ表示した。ただし切羽面は、図-2の下図に示したように、鉛直方向に曲線的な形状をしているので、カットホイールの最先端の位置を縦軸とした。また、図には前節で言及した切羽 A, B の位置も示した。ただし、切羽 C はこの図の領域外である。

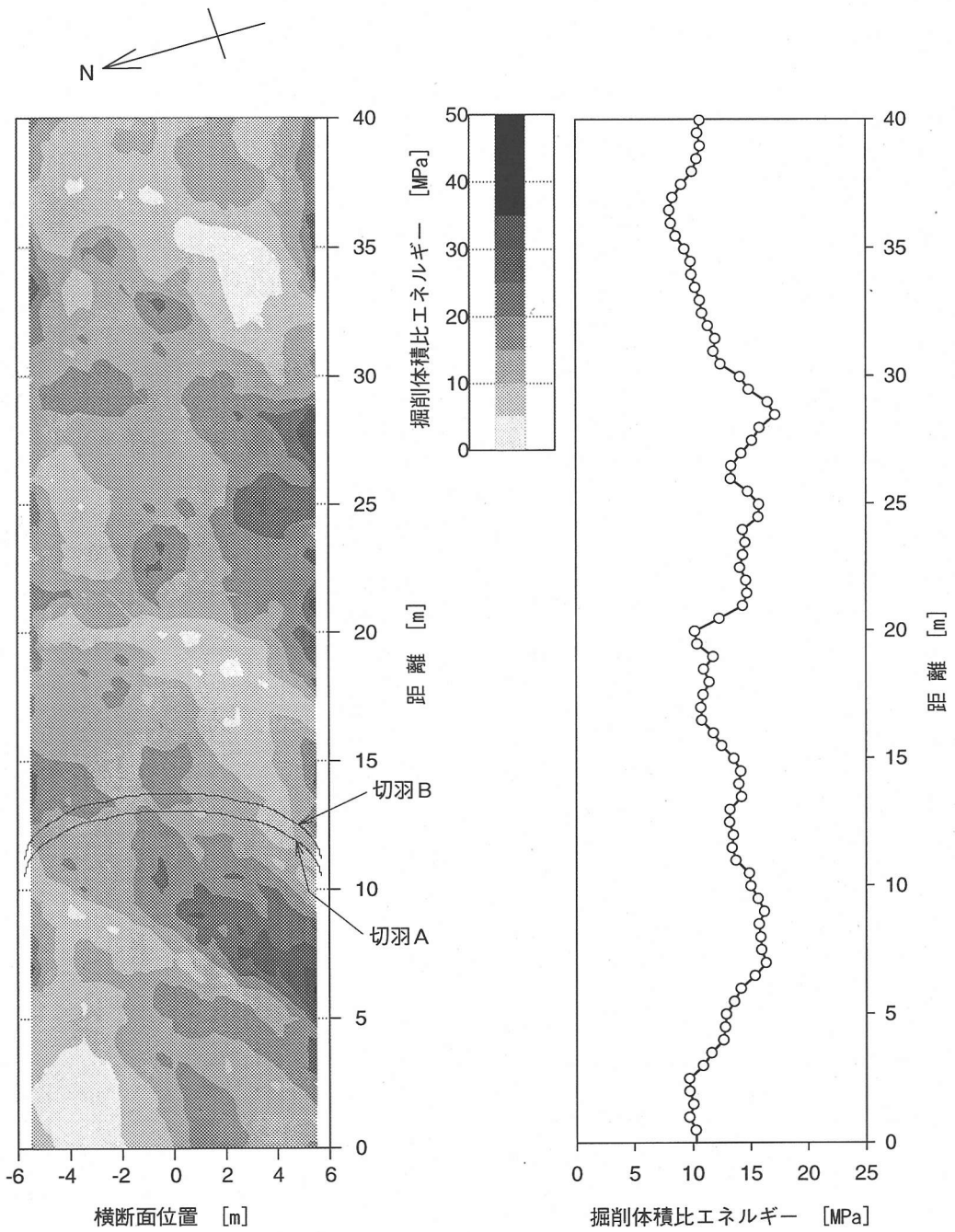
まず、図-9(a)のフロア部から見ていくことにする。この区間では、掘削体積比エネルギーは 5 ~ 50 MPa の間に分布しており、20~35 m 付近の掘削体積比エネルギーが最も大きく、0~5 m, 15 m 付近で最も小さくなっている。全体的に、トンネル軸に対して反時計回りに 45~60 度程度の方向の等高線が現れる傾向が見受けられる。たとえば、5~10 m の区間の右側壁近くでは掘削体積比エネルギーが 15 MPa 以上となっているが、左にいくにつれて前方に移り左側壁近くでは 12~17 m 付近に移動している。この帯状の範囲の中でも 20~25 MPa の掘削体積比エネルギーの大きな部分が帯状となって同じような角度で現れている。また、右側壁部で 17 m 近傍や 30 m 近傍では 10 MPa 以下の掘削体積比エネルギーが小さな帯状の部分が同様な角度で出現している。これは、掘削中の切羽観察で、風化を伴う亀裂がトンネルの進行に従い切羽の左側に移動していったことと一致している。

このトンネル軸に対して反時計回りに 45 ~ 60 度の方向は、図-8に示した亀裂と同じ方向であり、また、図-1に示した須磨断層にほぼ平行に存在する岩盤の亀裂の卓越方向と一致している。高取山トンネル周辺の岩盤は風化作用を受けており、亀裂周辺に風化が生じやすいことを考えると、今回の結果を説明することができよう。また図でトンネル軸に対して時計回りに 10 ~ 20 度の方向にも掘削体積比エネルギーが減少しているように見える。例えば、5~15 m の 20~25 MPa の領域は 10 m の位置で切断されているように見える。20 ~ 30 m の中央もまわりに比べて掘削体積比エネルギーが減少しているように見える。このようにほぼ直交する2方向に風化などによる劣化が進行することにより、22 m 付近の左側にあるように等高線が楕円状に閉じるような現象がいくつか見られる。花崗岩が風化などによって劣化した場合には、硬質な部分が塊状になることが知られている。高取山トンネルでも掘削中、硬質な岩盤が切羽に現れた場合には、徐々に切羽に



a) フロア部

図-9 掘削体積比エネルギー E_s の分布 (左はコンター図, 右は水平方向の平均)



b) アーチ部

図-9 掘削体積比エネルギー E_v の分布 (左はコンター図, 右は水平方向の平均)

占める割合が最初は徐々に増加しその後減少し、最終的には消滅することが観察され、掘削体積比エネルギーのコンターが楕円状になる現象と一致している。

次にアーチ部について見ると、フロア部と同じ角度で等高線が傾いており、フロア部と近い傾向が見られる。例えばフロア部で比較的強固であった5～15 m、20～30 mで、アーチ部でも掘削体積比エネルギーが大きくなっている。逆に掘削体積比エネルギーが小さい領域は、0～5 mの左側、10 mの右側から25 mの左側であり、フロア部とアーチ部とで比較的似た結果となっている。またアーチ部でも、須磨断層に平行な方向や直交する方向に風化が進行しているように見え、そのため等高線の閉合が生じている。アーチ部とフロア部との違いも見られ、25～40 mのアーチ部の中央で掘削体積比エネルギーが小さい傾向にあるが、フロア部では若干大きくなっている。

6. TBMとの関連性

掘削体積比エネルギーは、掘削の能率を表す指標としてしばしば使用される。しかしながら、岩盤の強度が異なる場合、掘削体積比エネルギーをそのまま使用して掘削能率を比較することはできない。そこで、掘削体積比エネルギー E_s を岩盤強度 σ_c で割って規格化した値 E_s/σ_c や、その逆数である掘削能係数が指標として用いられる²⁾。

図-7(a)に示した切羽Aの中央では、掘削体積比エネルギーが25 MPaであるのに対して、シュミットハンマー打撃値から推定した岩盤強度は75 MPaである。したがって、 E_s/σ_c は1/3となる。また、今回得られた掘削体積比エネルギーの最大値は50 MPaであり、文献⁹⁾によれば岩石試験による一軸圧縮強度の最大値は150 MPaであり、その比は1/3となる。したがって、本掘削機における規格化した掘削体積比エネルギー E_s/σ_c は1/3程度であるといえる。西松²⁾の文献に示されているデータより計算した代表的な掘削方法の E_s/σ_c を表-2に示す。表からわかるように、TBMの E_s/σ_c は0.2～0.5であり、本掘削機械の値はこの範囲の中ほどに位置する。この観点からも、本掘削機のエネルギー効率はTBMに劣らないといえる。

福井、大久保²⁰⁾は、TBMのカッターヘッドのトルクと、切り込み深さより、次式を用いて岩盤強度を推定した。

表-2 掘削方法における E_s/σ_c ²⁾

漏斗孔試験	0.05～0.2
TBM	0.2～0.5
回転作孔	0.8～1.4
さく岩機	1.0～1.6
水ジェット	1.1～14

$$(\text{岩盤強度}) \propto (\text{トルク}) / (\text{切り込み深さ})^{1.5} \quad (2)$$

例えば、高取山トンネルから数 km 離れた、同じ六甲花崗岩中の舞子トンネルで使用されたTBM掘削データを分析した結果²⁰⁾をみると、式(2)から求めた岩盤強度と、シュミットハンマーから換算した岩盤強度は比較的良く一致している。

舞子トンネルで式(2)から求めた岩盤強度は、十数 m 程度の周期的な変動がみられた。TBMでは全断面で掘削するため、式(2)から求めた岩盤強度は切羽での平均値を表す。そこでTBMと対応させるために、本掘削機の掘削体積比エネルギーのトンネル横断面での平均値を、フロア部とアーチ部についてそれぞれ図-9に示した。この場合も舞子トンネルと同様に、十数 m 程度の周期がみられる。TBMでは切羽を一度に掘削するために岩盤の平均的な硬軟しかわからないが、本掘削機では切羽面の分布として捉えられるため、亀裂間隔や亀裂幅などの状況が視覚的にわかり、地質構造を理解しやすいといえる。

カッターヘッド回転数が一定のTBMの場合、トルクは掘削エネルギーに比例する¹⁾。したがって、式(2)は次のように書き直すことができる。

$$(\text{掘削エネルギー}) \propto (\text{岩盤強度}) \cdot (\text{切り込み深さ})^{1.5} \quad (3)$$

式(3)に基づいて、掘削エネルギーと切り込み深さの関係を近似し、図-5に破線で示す。この場合には、切羽1周あたりのカッターホイールの空転エネルギー(縦軸切片)は、前に直線で近似した場合の値6.5 MJより50%程度増加して10 MJとなる。直線で近似した場合と比較して、式(3)で近似した場合の方が良好な一致をすると思われるが差はわずかである。

さて掘削体積比エネルギーは、

$$(\text{掘削エネルギー}) / (\text{切り込み深さ})$$

に比例する。これと式(3)より、岩盤強度は必ずし

も掘削体積比エネルギーと比例関係にない。そこで、図-7に示した切羽 A, B, C における掘削体積比エネルギーと、式(3)より計算した岩盤強度の関係を図-10に示す。図より、掘削体積比エネルギーと計算した岩盤強度の相関はかなり良いことがわかる。特に計算した岩盤強度が 30 MPa (掘削体積比エネルギーが 10 MPa) 以上では、両者はほぼ 0 を通る直線上にのる。したがって、ある程度の注意を払ったならば、掘削体積比エネルギーから岩盤強度を推定することが可能といえる。今回の高取山(北行)トンネルでの調査では、図-9からわかるように、ほとんどの場合掘削体積比エネルギーは10 MPa 以上であり、岩盤強度と掘削体積比エネルギーは比例しているとみなすことができる。

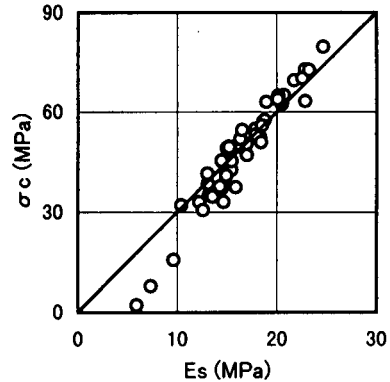


図-10 掘削体積比エネルギー E_s と式(3)より計算した岩盤強度 σ_c の関係

7. まとめ

本研究では、高取山(北行)トンネルで使用した硬岩自由断面掘削機MM130Rの掘削データを用いて掘削体積比エネルギーを求め、切羽で調査した岩盤物性と比較・検討を試みた。掘削体積比エネルギーの分布は、弾性波速度やシュミットハンマー打撃値の分布と比較的一致しており、岩盤の硬軟の特性変化を良く反映していることがわかった。また、図-9のように掘削体積比エネルギーのトンネル進行に沿ったコンター図を作成することにより、トンネルに沿った地質構造を可視化できることを示した。

最後に、今回得られた結果に基づいて、考えられる応用例を以下に示す。

- a) 軟弱部の予知：施工上問題となるのは断層や亀裂の含まれる軟弱部である。このような部分では掘削体積比エネルギーが小さくなるので、図-9のようなコンター図を観察しながら掘削することにより、軟弱部の出現を即座に把握することが可能である。また、掘削体積比エネルギーのコンター図を観察しながら変化の傾向を捉えることにより、外挿的に岩盤の変化を予知することが可能である。
- b) 岩盤分類：現状では、人間の判断に頼って岩盤を分類しているため主観が入りやすく、トンネル全線にわたって統一的に決定することが難しい。そこで掘削体積比エネルギーを使用して、岩盤分類をおこなうことが考えられる。しかしながら、岩盤分類にはかなりのノウハウが含まれており、たとえば岩種が変化する場合の対応など、実用化のための課題は多い。

- c) 掘削条件の自動設定：硬岩自由断面掘削機MM130Rはかなりの自動化がなされている。しかし、現状では切り込み深さやカットホイールの移動速度などの掘削条件は、オペレータが入力する。掘削体積比エネルギーの変化から岩盤の変化に応じた最適な掘削条件を自動で設定することは可能である。

参考文献

- 1) Teale, R. : The concept of specific energy in rock drilling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 2, pp.57-73, 1965.
- 2) 西松裕一：掘削方法とその評価方法について，日本鉱業会秋季大会分科会資料[L]，pp.1-4, 1972.
- 3) Hughes, H.M. : Some aspects of rock machining, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 9, pp.205-211, 1972.
- 4) Willoughby, R.A. : Field trials of the mobile miner MM130 at broken hill, *Mine Mechanization and Automation*, Almgren, Kumar & Vagenas (eds), Balkema, 1993.
- 5) 福井勝則，大久保誠介，本間直樹：TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定—二軒小屋トンネルの事例—，資源と素材，Vol.112, pp.303-308, 1996.
- 6) 唐澤廣和，大野哲二，小杉昌幸：ツースピットによる岩石強度と刃先摩耗の推定方法，資源と素材，Vol.112, pp.623-630, 1996.
- 7) 活断層研究会：新編日本の活断層，東京大学出版会，76および77章，1991.
- 8) 藤田和夫，笠間太郎：神戸地域の地質，京都(11)第49号，地質調査所，III-3章，1983.
- 9) 建設機械化研究所：硬岩トンネル自由断面掘削機(MM130R)性能確認試験報告書，日本建設機械化協会，1996.
- 10) 宮本義広，藤井康男，田村壽夫，白川賢志：超大型自由断面掘削機により硬岩地山に挑む，トンネルと地下，10月号，pp.15-23, 1996.

- 11) 領家邦泰, 佐藤和男, 内田正孝: 硬岩自由断面掘削機 (MM130R) の開発と施工, 建設の機械化, 8月号, pp. 20-26, 1996.
- 12) Fangming, G., 佐藤一彦, 浅井秀明: 円周軌道切削における岩石の切削抵抗-ディスクカッタによる岩石の切削に関する研究(第1報)-, 資源と素材, Vol.108, pp. 557-562, 1992.
- 13) 富士物産: シュミット・ロックハンマー取扱説明書, 1995.
- 14) 松本一騎, 福井勝則, 大久保誠介, 水上雅裕, 今井裕二, 酒井照夫, 浅井秀明, 西澤泉: TBMの掘削抵抗による岩盤特性の評価, 平成10年資源・素材学会春季大会前刷, vol. I, pp.14-17, 1998.
- 15) Tarkoy, J. P.: A study of rock properties and tunnel boring machine advance rates in two mica schist formations, *Proc. 15th Symp. Rock Mechanics*, pp. 415-447, 1973.
- 16) Nelson, P. P., Ingraffea, A. R. and O'rourke, T. D.: TBM performance prediction using rock fracture parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, pp.189-192, 1985.
- 17) Sanio, H. P.: Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.3, pp.153-161, 1985.
- 18) Tarkoy, J.P. and Smith M.I.: Assessment of tunnel boring machine performance, *Tunnels & Tunnelling*, December, pp.33-37, 1979.
- 19) Nelson, P. P., O'rourke, T. D. and Kulhawy, F.H.: Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks, *24th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp.227-237, 1983.
- 20) 福井勝則, 大久保誠介: TBMの掘削抵抗を利用した岩盤物性の把握, トンネルと地下, 2月号, pp. 35-43, 1997.

(1997.10.21 受付)

SPECIFIC ENERGY OF A HARD-ROCK TUNNELLER AND ROCK PROPERTIES

Kuniyasu RYOKE, Tomoyuki AOKI, Hisao TAMURA, Katsunori FUKUI,
Seisuke OKUBO, Kazunori MATSUMOTO and Yoshihiro MIYAMOTO

A hard-rock tunneller MM130R was used at Takatoriyama Northward Tunnel and the distribution of the specific energy of MM130R was measured. The procedure to accurately evaluate the specific energy of MM130R was discussed. The specific energy was found to be well-correlated with the rock properties such as Schmidt hammer rebound and seismic velocity measured at a few tunnel faces. The contour plots of the distribution of specific energy on the horizontal plane along the tunnel drive successfully visualized the geological structures with weathered joints, which were parallel to the major faults observed near the tunnel location. The excavation efficiency of MM130R was estimated to be comparative with a conventional hard-rock tunnel boring machine.