

硬岩自由断面掘削機による岩盤特性の推定

EVALUATION OF ROCK PROPERTIES BASED ON EXCAVATION DATA OF A HARD ROCK TUNNELLER

青木智幸^{*}・福井勝則^{**}・領家邦泰^{***}・宮本義広^{****}

Tomoyuki AOKI, Katsunori FUKUI, Kuniyasu RYOKE and Yoshihiro MIYAMOTO

A hard rock tunneller, Mobile Miner 130R (MM130R) is capable of excavating a tunnel of which cross section is non-circular and 50-80 m² in area. It has launched itself at Takatori-yama Tunnel Project in Kobe in 1996. This paper firstly describes the excavation mechanism of MM130R. Secondly, using the machine data while excavating, specific energy at each divided section on the tunnel face is derived in order to evaluate the distribution of rock strength property. The specific energy fits well the distribution of seismic velocity and Schmidt Hammer rebound measured on the tunnel face. The specific energy contour plots are useful for visualising the geology change on the tunnel face and along the tunnel drive.

1. はじめに

硬岩自由断面掘削機MM130Rは、硬岩掘削能力を高めた自由断面掘削機として開発され¹⁾、神戸市の高取山（北行）トンネルで使用された。この掘削機の場合、その独自の掘削方法から、切羽の各位置での掘削体積比エネルギーを求めることが可能である。掘削体積比エネルギー（Specific Energy）は掘削機械の効率を表す指標であり²⁾、岩盤が強固であれば掘削体積比エネルギーが増加することがわかっている。これは、掘削体積比エネルギーにより岩盤物性を評価できる可能性を示唆していると考えられるが、このような発想での研究は非常に少ない。Pasminco Broken Hill 鉱山では、矩形断面専用機（MM130）で切羽面上の掘削体積比エネルギーの分布を求めているが、岩盤物性との比較検討はなされていない³⁾。そこで、本研究では、硬岩自由断面掘削機MM130Rの掘削機構を利用して、掘削時の切羽上の位置毎の掘削体積比エネルギーを求めた結果についてまず述べる。次に地質観察および弾性波速度探索、シュミットハンマ試験と比較検討し、掘削体積比エネルギーにより岩盤特性を評価できるかどうかを調べた結果について述べる。

2. 掘削機およびトンネルの概要

硬岩自由断面掘削機MM130Rは、一軸圧縮強度50～250MPaの岩盤の掘削用として、米国ロビンズ社の矩形断面用硬岩掘削機MM120およびMM130を基に開発された。MM130Rの構造および性能の詳細については既報¹⁾で述べたのでそれを参照された。ここでは、その概略と掘削原理に限定して述べる。表-1にMM130Rの主な仕様を、図-1に構造の概要を示す。4基の肩部グリッパーと前後クローラの間にある2箇所の地盤サポートで本体を固定し、外周径4.1mのカッターホイールを縦横に移動することにより岩盤を掘削する。カッターホイールにはディスクカッターとゲージカッターがそれぞれ8個取り付けられているが、掘削は主にディスクカッターにて行われ、ゲージカッターは側壁部の掘削時にのみ使用される。掘削に当たっては、全グリッパーを固定し、カッターホイールを回転させてフロア中央部の切羽に当たった状態で、メインビームのスラストシリンダによりフロント部全体を前方に所定の貫入量（10～25mm、岩盤特性に応じて調節）だけ前進させてスラストシリンダを固定する。次に、スウィングブーム（水平方

* 正会員 PhD 大成建設（株）技術研究所 岩盤研究室
** 正会員 工博 東京大学工学系研究科 地球システム工学専攻
*** 正会員 大成建設（株）土木技術部 トンネル技術室
**** 阪神高速道路公団 神戸第一建設部

向)とピッチブーム(鉛直方向)により、回転するカッタホイールを移動させながら、図-2に示すように、ディスクカッタによる圧砕とチッピングにより岩盤を掘削する。

図-3に高速道路用トンネルである高取山(北行)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。掘削断面は幅11.6m、高さ7.4mで、断面積は約70m²である。図で示した楕円は各掘削位置でカッタホイール外周をトンネル横断面へ投影したものである。掘削は、フロア部の掘削(ピッチブームを図-1側面図のような位置に固定してスウィングブームの水平旋回のみにより掘削する)とアーチ部の掘削(スウィングブームとピッチブームをともに動かし、図-3に示した楕円の様な軌跡で掘削する)とに大別される。

高取山(北行)トンネルは、六甲山地の西南縁に位置する。山

表-1 MM130Rの主な仕様

項 目	仕 様
機械寸法	H=6.0 W=7.3 L=29 m
カッタホイール直径	4.1 m
カッタホイール回転速度	15 rpm
ディスクカッタ	φ432 mm、8 個装着
カッタ推力	平均 23 t/個
カッタホイールトルク	36.7 t・m
推進ストローク	150 mm
全装備出力	1,378 kW
総重量	368 t

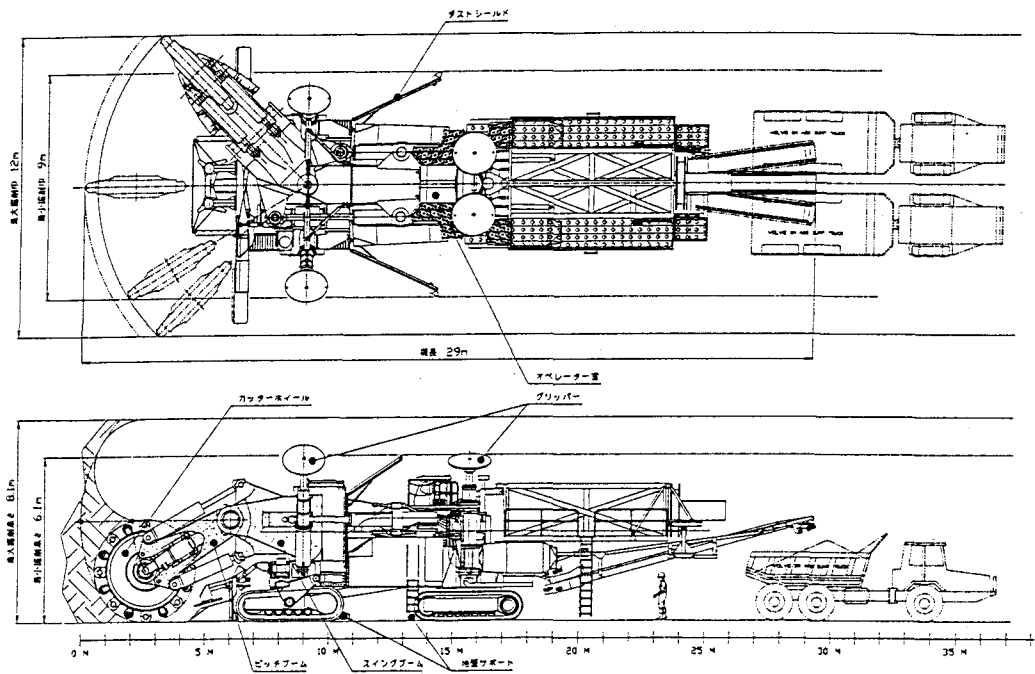


図-1 MM130Rの構造の概要

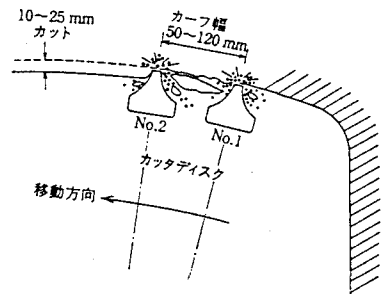


図-2 掘削原理

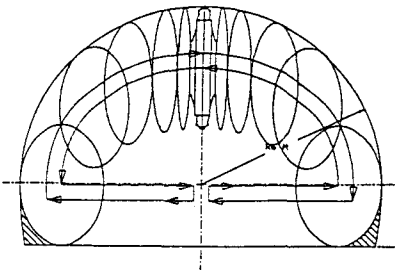


図-3 カッタホイールの移動

岳部の地質は、中生代白亜紀の六甲花崗岩よりなり、一部硬質塊状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。また3、4章で述べる区間の一軸圧縮強度は70～150MPaであった⁴⁾。

3. 掘削体積比エネルギー

MM130Rにおける掘削に要するエネルギーはスウィングブームやピッチブームの左右・上下動によるものとカッターホイールの回転トルクによるものと和であるが、前者は後者に比べ比較的小さい。そこで、掘削体積比エネルギー e_s はカッターホイールの消費エネルギーのみから求めることとした。ただし、掘削していない状態でのカッターホイールの回転に要するエネルギーはかなり大きいので、岩盤掘削に要したエネルギーを求めるという立場からその分を減じ、次式により掘削体積比エネルギーを算出した。

$$e_s = (W - W_0) / V \quad (1)$$

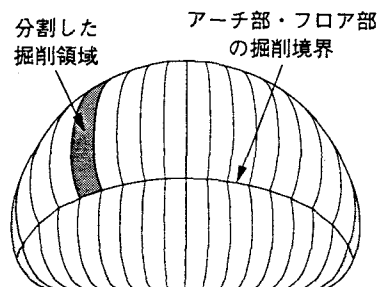


図-4 掘削領域分割

ここで、 W は、ある領域を掘削する際に要したカッターモーターの総消費電力量で、 W_0 はその領域を掘削しないでカッターホイールが空回りした場合の消費電力量、 V はその領域で掘削される体積である。図-4に示すように切羽を領域分割し、(1)式によって掘削体積比エネルギーを求めた。切羽は、曲面形状をしているが、図-4ではトンネル横断面への投影図として表している。各領域は、アーチ部、フロア部ともにスウィングブームのスウィング角度で中央部より5度毎に分割した。但し、図で薄いシェードで示した両側の領域は、ディスクカッタよりもゲージカッタで掘削する割合が大きいことから、掘削機構が異なると判断し評価対象から除外した。

高取山（北行）トンネルの40mの区間について掘削中の機械データを測定し、掘削体積比エネルギーを求めた。フロア部、アーチ部それぞれについて、トンネルに沿った平面上の切羽形状を考慮して掘削体積比エネルギー分布のデータセットを作成し、コンター図で表した（図-5、文末に表示）。図では、掘削体積比エネルギーがより大きい領域ほど濃いシェードで表現した。掘削体積比エネルギーは5～50 MJ/m³に分布しており、トンネル軸方向に12m程度の周期で掘削体積比エネルギーが上下しているように見える。a)のフロア部では20～30m付近で最も掘削体積比エネルギーは大きく、30～50 MJ/m³となっている。またa)、b)とも、トンネル軸に対して反時計回りに60度程度傾いた方向に、掘削体積比エネルギーの小さい部分の等高線が向いている傾向が見られる（トンネル右端部で5m、17m、30mの位置、フロア部でより顕著）。この地域は近くに須磨断層が存在し、地表踏査で高取山（北行）トンネルの路線上に須磨断層に平行な系の断層（ほぼNE走向で鉛直に近いN傾斜）が数本見つかった。上述したトンネルと約60度で交差する掘削体積比エネルギーの小さな部分は、これらの断層とほぼ平行であった。掘削中の切羽観察では、亀裂に沿って風化が進み岩盤が弱化している部分が多々観察された。従って、図-5のコンター図はこの地質構造と整合しており地質状況を良く反映しているといえる。

4. 掘削体積比エネルギーと原位置調査結果との比較

図-5のA、B二つの断面のフロア部において、切羽面上の区間弾性波速度測定とシュミットハンマ試験を実施した。区間弾性波速度測定は、切羽面の床面より約1m上がりの水平線上に中央部より左右に1m間隔で測点を設け、測点間で1m区間毎および2m区間毎の弾性波速度を測定した。また、各測点でシュミットハンマ試験を実施した。図-6にフロア部の掘削体積比エネルギー分布と原位置試験結果の比較を示す。両断面において、区間弾性波速度の分布は掘削体積比エネルギーと比較的良好一致している。また、シュミットハンマ反発係数は、ばらつきが大きいものの、掘削体積比エネルギーが大きい部分では、大きな反発係数が

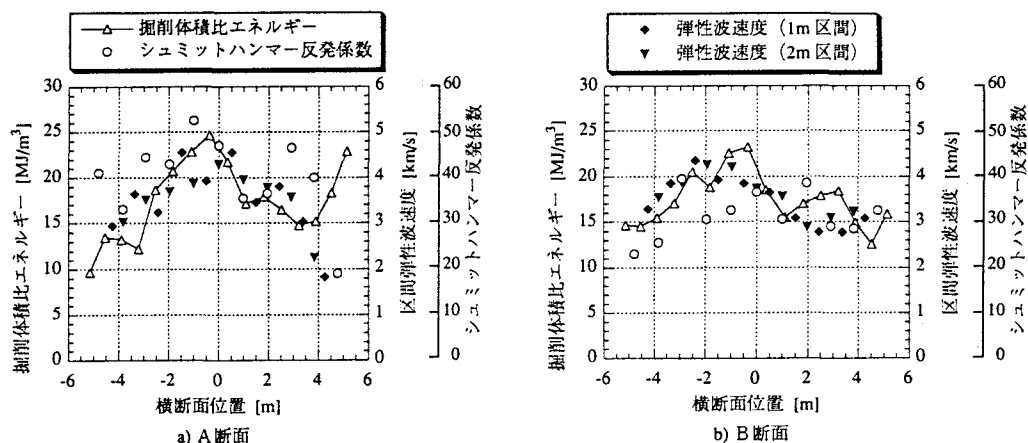


図-6 フロア部の掘削体積比エネルギー分布と原位置試験結果の比較

得られる傾向が認められる。

図-7にA断面の切羽観察結果を示す。全体にマッシュな淡桃色の花崗岩であるが、左側壁に近い部分とセンターより右側約4mの位置に亀裂に沿った風化による劣化部分がある。図-5bのアーチ部のA断面位置に沿った掘削体積比エネルギー分布を見ると、これらの劣化部分の位置に掘削体積比エネルギーの小さい部分が存在し、この劣化部の特性を反映しているものと思われる。切羽右下部では、亀裂の右側には硬質な岩盤が出ていた。図-6aを見るとフロア部の右側の掘削体積比エネルギーの変化はこの傾向を反映している。しかし、その部分の弾性波速度がかなり小さいが、これは、丁度この亀裂を跨ぐ形で計測されたためであると考えられる。また、シュミットハンマ試験は、丁度この亀裂のすぐ右側の測点で測定されたため、小さな値になった。

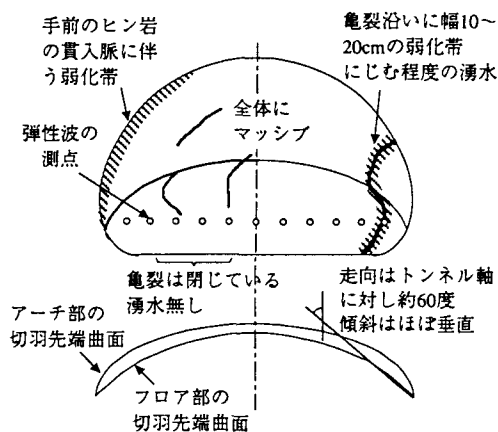


図-7 A断面の切羽観察結果

以上のことから、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と解釈することができる。

5. おわりに

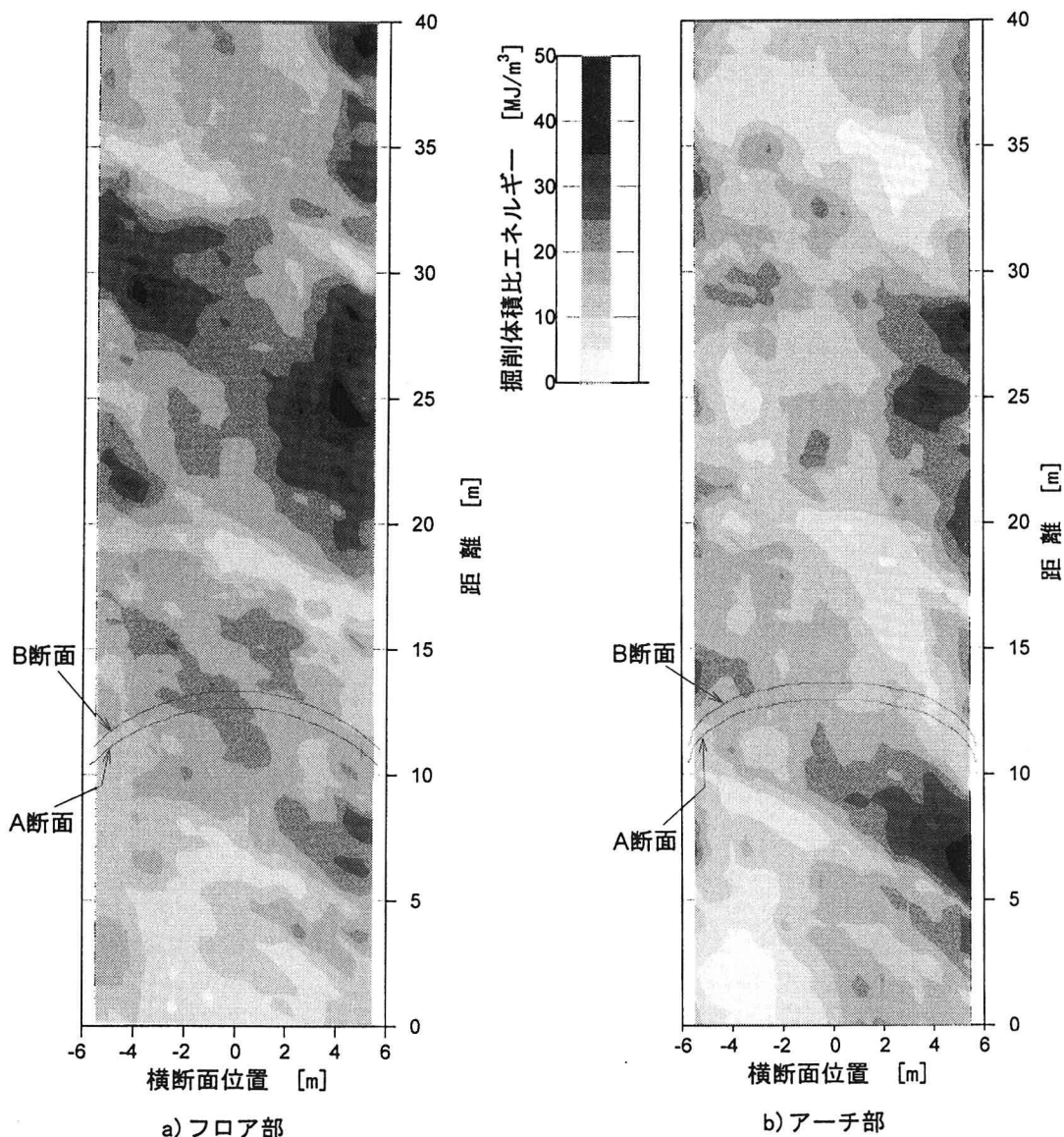
本報では、MM130Rの掘削中の機械データを用いて掘削体積比エネルギーを求め、岩盤特性の評価を試みた。掘削体積比エネルギーの分布は、弾性波速度やシュミットハンマ反発係数の分布と比較的一致しており、岩盤の硬軟の特性変化を良く反映していることがわかった。また、掘削体積比エネルギーのトンネル進行に沿った平面上の分布コンター図を作成することにより、トンネルに沿った地質構造の可視化の可能性を示した。岩盤物性と掘削体積比エネルギーの直接的な関係や掘削体積比エネルギーに及ぼすカッターの貫入量やスウィング速度の影響についての詳細な検討は今後の課題としたい。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、田村壽夫所長を始め高取山（北行）トンネル作業所の諸兄には甚大なご協力を頂いた。また、東京大学大久保誠介教授には貴重な御指導と御助言を頂いた。データ整理に当たっては、東京大学大学院松本一騎氏に御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 領家邦泰、他：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
- 2) Teale, R.: The Concept of Specific Energy in Rock Drilling. Int. J. Roch. Mech. Min. Sci., Vol. 2, pp. 57-73, 1965.
- 3) Willoughby, R.A.: Field trials of the Mobile Miner MM130 at Broken Hill. Mine Mechanization and Automation, Almgren, Kumar & Vagenas (eds), Balkema, 1993
- 4) 宮本義広、他：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



図ー5 トンネル進行に沿う掘削体積比エネルギー分布