

(46) コーン型プランジャーをもつシュミットハンマーによる岩盤評価と ロードヘッダーの掘削能力予測に関する研究

日本国土開発㈱	正会員	宮地明彦
日本国土開発㈱	正会員	羽立勝行
山口大学工学部	正会員	古川浩平
山口大学工学部	正会員	中川浩二
山口大学大学院	学生員	中原浩明

Rock Estimation by Schmidt Hammer with Cone Shaped Plunger and Cutting Rate of Road Header

Akihiko MIYAJI, JDC Corporation
Katsuyuki HADATE, JDC Corporation
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University
Hiroaki NAKAHARA, Yamaguchi University

Abstract

Development of machine has made road header applicable not only to soft rock but also to semi-hard rock. The cutting rate of road header is supposed by the strength and quartz content of rock to be bored. Uniaxial strength of rock, estimated from rebound number of Schmidt Hammer, may be a decisive factor of the cutting rate. Especially for hard rock, the estimation is not precise. To cope with this problem, Rock Schmidt Hammer with cone shaped plunger was applied to the estimation of rock strength. Cutting rate of road header was studied in relation with this estimated rock strength and observed information of tunnel face.

1. はじめに

岩盤の掘削において発破工法は最も効率的であるが、騒音・振動問題などの建設公害を引き起こしやすい。これに対し機械掘削は、騒音・振動問題に関して一般に発破工法より優れており、居住地周辺などのトンネル掘削に適しているといえる。比較的軟かい岩盤のトンネル掘削に対して用いられる重機としてロードヘッダーがある。ロードヘッダーの施工性の要因として、単位時間当り純掘削能力（以下掘削能力と呼ぶ）、単位時間当りビット消費量、稼働率などがあげられるが¹⁾、本研究は、主として掘削能力について考察した。ロードヘッダーの掘削能力は、対象岩盤から取り出された供試体の一軸圧縮強度や現場におけるロックシュミットハンマー反発度などを基準として予測されているが、岩石の種類、岩質、節理の状態、湧水などによって掘削性は変化し、予測は大変難しい。本研究においては、コーン型プランジャーをもつシュミットハンマーを用いて岩盤評価を行い、その結果を基に、ロードヘッダーの掘削能力予測を行うことを試みた。また、岩盤評価と合わせて、地山状態が掘削能力に対する影響についても調べ、ロードヘッダー掘削能力予測への利用を考えた。

2. 現場実験の概要

現場実験のデータは、Aトンネル工事で採取したものをを用いた。この現場の一軸圧縮強度試験値は150～800kgf/cm²程度で、ロードヘッダー（三井三池製作所製S200）による掘削が十分可能であつた。岩盤を構

成する岩石は大部分が変質した安山岩で一部に凝灰角礫岩も見られた。凝灰角礫岩部の掘削はわずかであったため掘削データが少なく本研究では使用していない。またこの現場において極端に脆弱な岩盤や非常に硬い岩盤はなく、ロードヘッダーによる順調な切削が行われた。岩盤等級はCまたはDであった。実測データは、日々切羽の10カ所で測定したロックシュミットハンマー反発度と、これとは別に一日の進行長より求めたロードヘッダー掘削能力 (m^3/hr)、現場技術者によって毎日記録された切羽の坑内観察記録を用いた。反発度は一つの掘削断面において10地点、各地点10回連続して測定を行なった。用いたシュミットハンマーは通常のプランジャーの代わりに、ロードヘッダーのビットを参考に製作したプランジャーを装着している。また比較のため通常のプランジャーを用いた計測も併せて行った。

3. ロードヘッダー掘削能力に対する過去の研究

ロードヘッダー掘削能力は掘削岩盤の一軸圧縮強度、節理および石英含有率と相関性があることが様々な研究により明らかになっている¹⁾²⁾。この中で岩盤の石英含有率は主として切削ビットの摩耗に、他の二つが主として掘削能力に関係する。このような結果よりロードヘッダーメーカーは、一軸圧縮強度を掘削能力の一つの基準として使用している。そのため、本研究で使用したロックシュミットハンマー反発度も一つの指標として利用されている。ロードヘッダーの掘削能力は、以上のような岩盤本来の強度値の他に、節理を含めた岩盤の状態によって変化すると考えられている。しかし、岩盤の状態は数値化が非常に難しく、また判定も一般に技術者の判断にまかされているのが実状である。岩盤状態のうち亀裂は、RQDを用いて掘削能力を予測あるいは補正することが試みられている³⁾。

4. 掘削能力予測とロックシュミットハンマー

ロードヘッダーの掘削能力予測に、ロックシュミットハンマーの反発度は一つの指標として利用されているが、予測値が実測値とずれることも少なくない。特に最近のロードヘッダーの大型化に伴い中硬岩までロードヘッダー掘削が行われるようになると通常のプランジャーによる計測では岩盤評価が困難になってきている。また、ロックシュミットハンマーは岩盤の反発度を測定するための試験機であり、ロードヘッダーの掘削特性に関する考慮はされていない。

本研究ではこの反発度に掘削特性を反映する一つの試みとして、形状の異なったプランジャーを試作した。ロードヘッダーは切削ビットが多数付いた切削ドラムを、切削面に、ある一定の推力で押しつけ、岩盤表面を局部破壊させ、ビットを岩盤内に挿入した後、横方向に力を加えることにより岩盤を掘削する。この切削ビットによる破壊現象とシュミットハンマーの反発度との関係をもたせるため、ロックシュミットハンマーのプランジャー形状をロードヘッダー切削ビットに似せて作ることで、反発度試験にロードヘッダーの岩盤掘削特性をある程度反映できるのではないかと考え、図-1に示すような形状のプランジャーを製作した（以後この形状のプランジャーをコーン形状のプランジャーとよぶ）。

5. 施工結果及び考察

5.1 ロックシュミットハンマー反発度とロードヘッダー掘削能力の 関係

反発度の平均の方法として以下の4つを考え掘削能力との関係をしらべた。

- ① 一断面10点、最初に得られた反発度、計10個の平均
- ② 一断面10点、初めの3回の反発度の中の最大値を平均
- ③ 一断面10点、各地点10回の反発度全ての平均
- ④ 一断面10点、各地点10回の反発度中の最大値の平均

以上のように平均された反発度とロードヘッダー掘削能力の関係を図-2～図-5に示す。図中の直線は各図に於て直線回帰を行なった結果であり、図中

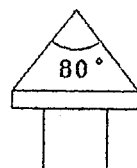


図-1 コーン形状のプランジャー

の r_s , r_c はそれぞれ標準形状、コーン形状プランジャーの反発度と掘削能力との相関係数である。これらの図は反発度が大きくなる、つまり岩盤が硬くなるとロードヘッダー掘削能力が下がることを示している。図-2は①を用いた結果であるが、コーン形状のプランジャーの場合も標準形状のプランジャーの場合も掘削能力との相関係数は、他の場合と比較して最も低い。最初の反発度の平均を用いた場合、岩盤表面の凹凸部のために岩盤本来の反発度が得られず、反発度がばらついたと考えられる。これに対して、他の場合においては、連続打撃をしたことによって岩盤表面の状態が平均化され、反発度測定値に岩盤本来の反発度が反映されたと考えられる。

掘削能力と最も相関性が高かったのは図-5の④の結果を用いた場合であった。標準形状及びコーン形状プランジャーによる1断面での連続打撃の1例を図-6に示す。この図からも明らかなように、連続打撃の結果反発度は最初急激に増加し、その後は徐々に増加して10回打撃するまでにはほぼ最大値が表れた。掘削能力に最も関係があるのは、岩盤の強度と考えられ、最大値に注目することは、妥当であると考えられる。図-3の②の場合はメーカーのロードヘッダー掘削能力算定法に基づいているが、この場合の相関係数は①よりは良いが③④と比較すると劣っている。以上より岩盤の測定の方法は10回程度の連続打撃によるものを用いた方が良く、掘削能力判定のためにはこの中で現れる最大値を利用することが望ましいと思われる。

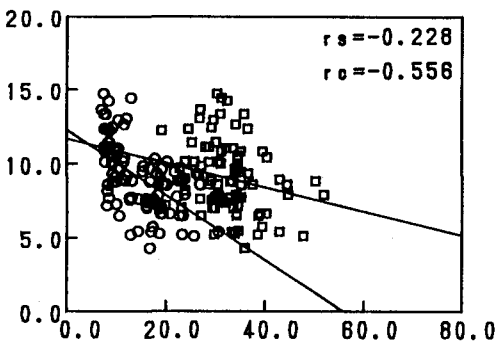


図-2 各地点の最初に得られた反発度と掘削能力との関係

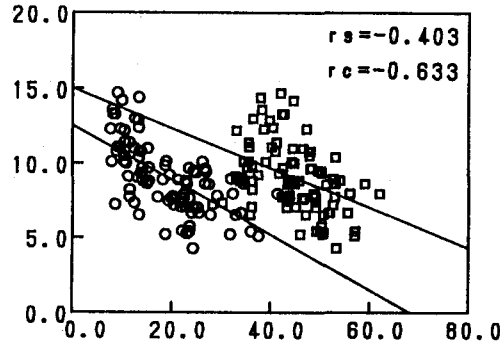


図-3 各地点の初めの3回の反発度の最大値と掘削能力との関係

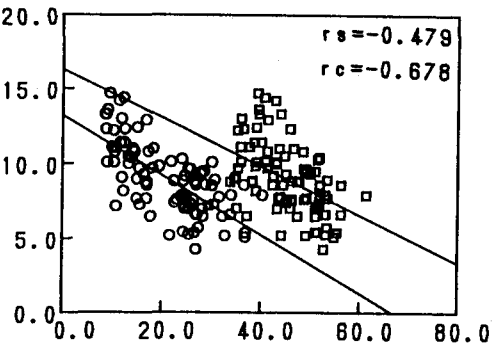


図-4 各地点10回の反発度の平均値と掘削能力との関係

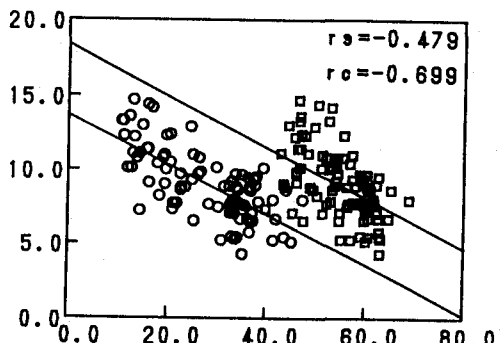


図-5 各地点10回の反発度の最大値と掘削能力との関係

図中の r_s , r_c の値を見て明らかに、全てについて標準形状のプランジャーを用いた反発度より、コーン形状のプランジャーを用いた反発度の方がロードヘッダーの掘削能力との相関性が高い。この結果から考えるとコーン形状のプランジャーを用いた方がロードヘッダー掘削能力予測に対しては有効と言える。しかし、コーン形状のプランジャーを用いると反発度が標準形状のプランジャーより小さめの値しか得られないため、軟岩に於ける適用性が小さいと思われる。

5.2 ロードヘッダー掘削能力の予測

これまでの結果よりロックシュミットハンマー反発度がロードヘッダー掘削能力とある程度の相関性をもつことが明らかになった。これに地山の状態を要因として加えることで、より正確に掘削能力が予測できるのではないかと考えた。そこで、目的変数をロードヘッダー掘削能力にし、説明変数に図-7に示す切羽観察記録中の地山の状態の各項目ごとの数値、標準形状のプランジャーとコーン形状のプランジャーの反発度測定値を用いて重回帰分析を行なった。この結果次式が得られた。

$$Y = 10.9 - 0.21X_1 - 1.11X_2$$

ここに、 Y はロードヘッダー掘削能力、 X_1 はコーン形状プランジャーによる反発度、 X_2 は割れ目の頻度である。この場合の重相関係数は0.72、寄与率は51.4であった。すなわち、重回帰分析では、今回のロードヘッダーによる掘削能力はコーン形状のプランジャー

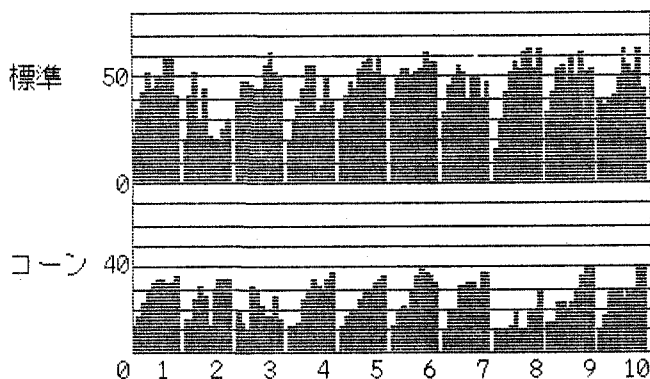


図-6 コーン形状及び標準形状のプランジャーによる連続打撃の例

④	切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出
⑤	素掘面の状態	1. 自立 (普請不要)	2. 時間がたつと緩み肌落ちする (後普請)	3. 自立困難掘削後早期に支保する (先普請)	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある
⑥	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先くい込む
⑦	風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結
⑧	割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 破砕、当初より未固結
⑨	割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさむ、当初より未固結
⑩	割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より未固結
⑪	湧水	1. なし、湧水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
⑫	水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出

図-7 切羽観察記録

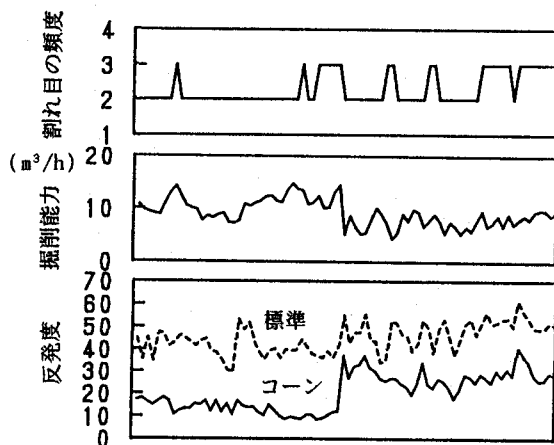


図-8 切羽の進行状況に伴う割れ目の頻度、ロードヘッダー掘削能力、コーン形状及び標準形状のプランジャーの反発度

を用いたロックシュミットハンマーによる反発度と割れ目の頻度によって説明でき、その他の要因は関係が認められなかった。この時に用いた割れ目の頻度、ロードヘッダーの掘削能力、コーン及び標準形状プランジャーの反発度を切羽の進行順に描いたのが図-8である。前半部の比較的岩が軟らかくて掘削能力が大きかった部分、後半の岩が堅くなり掘削能力が落ちた部分などコーン形状の反発度は岩盤の状況をうまく表していると考えられる。

本研究ではトンネル技術者の目によって判定された地山の状態と挙動を岩盤の状態数値化の手段としたが、重回帰分析によって、これらの値は割れ目の頻度以外、ロードヘッダー掘削能力に影響を与えなかった。これは、同一トンネルでの記録を用いたため地山の状態が掘削能力に関係するほど変化しなかったことが原因と思われる。したがって、より多くの岩種、状態の岩盤における調査を行うことで掘削能力に影響する要因を抽出する必要がある。

6. 結論

ロードヘッダーは軟岩から中硬岩の岩盤掘削に対して使用されているが、発破工法に比べて騒音、振動問題が発生し難いという利点を考慮すると、今後さらに高強度の硬岩の掘削ができるように改良が進むと考えられる。したがって、ロードヘッダーに対する施工性の評価は重要な問題である。現在、ロードヘッダーの掘削能力予測に利用されているものに、岩盤の一軸圧縮強度、ロックシュミットハンマー反発度などがある。しかし実際の掘削では掘削能力予測値と異なることが少なからずある。この問題を少しでも解消することが本研究の目的の一つであった。結果としては今回採用したコーン形状のプランジャーは掘削能力との相関性が高く、有効であるという結果が得られた。また、測定方法としては10回程度の連続打撃を行い、その中で現れる最大値をその地点における反発度として利用した方がよいことが確認できた。以上のことより、コーン形状のプランジャーを用いたロックシュミットハンマー試験はプランジャー形状などについて今後研究、実験を積み重ねることにより、よりよいロードヘッダー掘削能力予測の指標となると考えられる。

さらに坑内観察記録の中の地山の状態の値を用いてこれらとロードヘッダー掘削能力との関係を明らかにしようとしたが、同じトンネルのデータを用いたため、掘削能力と関係が生じるほど岩盤の状態が変化しなかったためか特に有為な結果が得られなかった。ロードヘッダー掘削効率と関係する岩盤の状態を切羽観察記録を用いて、数値化する今回の試みは、さらに他の岩盤について測定を行う必要があると思われる。

参考文献

- 1) 三谷 哲：ロードヘッダーの施工性評価基準案，熊谷技報，第45号，pp.1-7，1989年3月。
- 2) 向 正，岡 清一郎：武田山トンネルの施工，土木技術，42巻，5号，pp.33-42，1987年5月。
- 3) Aleman, V.M.: Prediction of cutting rates for boom type roadheaders, Tunnel & Tunnelling, pp.23-25, January, 1983.
- 4) 菊地宏吉，斉藤和雄：岩盤計測におけるロックハンマーの考案とその適用，発電水力，No.145，pp.1-7，1976年11月。