

# さく岩機のさく孔効率と岩盤特性 についての検討

山下 雅之<sup>1\*</sup>・石山 宏二<sup>1</sup>・福井 勝則<sup>2</sup>・大久保 誠介<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西松建設株式会社 技術研究所（〒105-8401東京都港区虎ノ門一丁目20-10）

<sup>2</sup>東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1）

\*E-mail: masayuki\_yamashita@nishimatsu.co.jp

さく孔探査の岩盤評価に用いられる掘削体積比エネルギーでは、さく岩機内のピストン運動エネルギーからさく岩機の仕事量が計算される。その際、ビットの着岩状況や岩盤特性等によって、さく岩機の仕事量の中で岩盤破碎に消費されるエネルギーの割合（さく孔効率）が変化することが知られている。今回、強度が既知の供試体や岩盤に対するさく孔試験データから求めた無次元化掘削体積比エネルギーを用いてさく孔効率の評価を試み、岩盤強度とさく孔効率の関係を経験的に得ることができた。その結果、岩盤強度が概ね30MPa以下の軟岩領域においてさく孔効率が著しく低下する傾向が明らかになった。さらに、岩盤強度とさく孔効率の関係から、掘削体積比エネルギーが岩盤強度のべき乗に比例する可能性を示した。

**Key Words :** *drilling survey, specific energy, drilling efficiency, rock mass characteristics*

## 1. はじめに

さく岩機のさく孔データを使用して岩盤性状を評価する手法は、これまでに山岳トンネルの切羽前方探査法としての適用事例が数多く報告されている<sup>1)~5)</sup>。岩盤性状の評価指標として用いられる掘削体積比エネルギー Specific Energy は、Teale<sup>6)</sup>によって提案された掘削に要したエネルギーを掘削体積で除した値であり、同一条件下の掘削においてこの指標は岩盤の強度特性によって変化するとされている<sup>7),8)</sup>。

とくに自由断面掘削機やTBM (Tunnel Boring Machine) などの回転破碎方式の掘削機では、回転エネルギーが比較的ロスなく岩盤破碎に消費されるため、掘削機の仕事量（発生エネルギー）から求めた掘削体積比エネルギーと岩盤強度の間には良好な関係があることが知られている<sup>9)~11)</sup>。これに対してさく岩機による打撃破碎では、ビットの着岩状況や岩盤特性等の種々の条件によりさく岩機の発生エネルギーに対する岩盤破碎に消費されるエネルギーの割合（さく孔効率）が複雑に変化する。したがって、さく孔時の掘削体積比エネルギーから岩盤強度をより正確に見積もるためには、さく孔効率と岩盤特性の関係を把握することが重要となる。

本論では、強度が既知の岩石ブロックやトンネル地山等に対して実施した14ケースのさく孔実験結果をもとに、

掘削体積比エネルギーと岩盤強度の比から求められる指標（無次元化掘削体積比エネルギー）を用いてさく孔効率の評価を試みた。

## 2. さく孔時の打撃エネルギー伝達の流れ

さく孔効率と掘削体積比エネルギーや岩盤特性の関係を検討するにあたり、さく岩機で発生したエネルギーが岩盤破碎へ至るまでのエネルギー変換・伝達の流れを図-1のように整理した。さく孔では、さく岩機内部において油圧駆動によるピストンで発生した運動エネルギー（発生エネルギー） $E_0$  がシャンクロッドとの衝突により弾性波エネルギー（歪エネルギーと運動エネルギー） $E_1$ に変換される。ロッド中を弾性波として伝播した $E_2$ は、ビット先端から岩盤へ $E_3$ として受容されて岩盤破碎に消費される。このとき、エネルギー効率 $\eta_1, \eta_2$ はエネルギー変換・伝達過程において種々の要因により変化する。

エネルギー伝達効率 $\eta_1$ は、ロッド伝播中の弾性波の減衰の程度を示しており、これはロッド継手（スリーブ）やロッドとビットの接合部通過時の減衰特性に大きく影響を受ける。スリーブにおける弾性波の伝播特性については、これまでに数値計算<sup>12)</sup>や室内実験<sup>13)~15)</sup>などを中心とした研究がなされてきたが、最近では複数のロッ

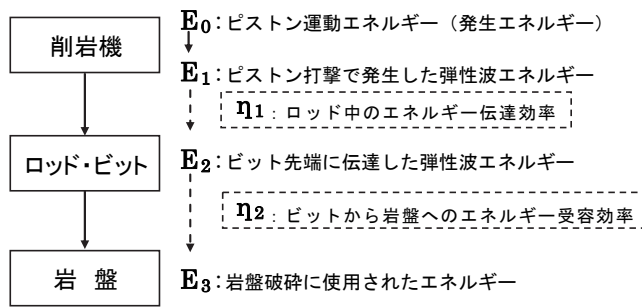


図-1 さく孔時のエネルギーの流れ



写真-1 岩石ブロックに対するさく孔実験状況

ドをスリーブで順次連結させていく長尺さく孔の原位置実験による検討も行われている<sup>16), 17)</sup>。これら既往の研究によると、それぞれのさく孔条件やスリーブ形状などが異なるものの、スリーブ1ヶ所あたりの弾性波の減衰は概ね1.5~10%程度となっている。

ビット先端に到達した弾性波エネルギーは岩盤に伝達されるが、その一部はビット先端部において反射するため、すべてが岩盤に伝達されるわけではない。エネルギー受容効率 $\eta_2$ は到達した弾性波エネルギーが岩盤に伝達される割合を示している。反射の程度については、岩盤物性（ビットと岩盤のインピーダンス比）や弾性波の特性（形状と波長）、ビットの着岩状況が複雑に関連して変化すると考えられるが、それを原位置で量的に見積ることは難しい。また、ビットの着岩状況はさく孔時にビットを岩盤に押付ける力（スラスト）に大きく影響を受ける<sup>18), 19)</sup>。したがって、ロッド・ビットやスラスト等のさく孔条件を一定とした場合、エネルギー受容効率 $\eta_2$ は岩盤特性によって変化する。

ここで、さく岩機の掘削体積比エネルギーは(1)式で求められる。

$$SE = (Ei \times bpm) / (Pr \times Ah) \quad (1)$$

ここで、

SE: さく孔による掘削体積比エネルギー (MPa)

Ei: さく岩機内のピストン運動エネルギー (J)

bpm: 打撃数 (blow/min)

Pr: さく孔速度 (cm/min), Ah: 孔断面積 (cm<sup>2</sup>)

上式においてEiの代わりに岩盤破碎に使用されたエネルギーE<sub>3</sub>を用いる案も考えられるが、実際には原位置でこれを測定することは困難であるため、通常は打撃圧などの計測値から容易に求めることができるピストン運動エネルギーE<sub>0</sub>が掘削体積比エネルギーの算出に用いられている。このように、式(1)で求められる掘削体積比エネルギーにはエネルギー効率 $\eta_1, \eta_2$ の総和であるさく孔効率（破碎エネルギー/発生エネルギー）の影響が含まれている。

### 3. 掘削体積比エネルギーと岩盤強度の関係

前章で述べたように、削孔部材やさく孔油圧等の諸条件をある程度一定にした場合においても、さく孔効率はエネルギー受容効率 $\eta_2$ の影響を受けて岩盤特性により変化し、それは掘削体積比エネルギーにも影響する。このような傾向を実測データから明らかにするため、表-1のような条件でさく孔実験を実施した。実験では、比較的均質で強度が一樣な岩石ブロック・塊状岩盤や脆弱層を模擬したコンクリートブロック・セメント改良土などの人工地盤に対して1~3m程度の短尺さく孔を実施し、得られたさく孔データから式(1)を用いて掘削体積比エネルギーを求めた。写真-1に岩石ブロックに対するさく孔実験状況を示す。

図-2に短尺さく孔実験で得られた掘削体積比エネルギーと一般的な岩盤特性である岩盤強度の関係を示すが、ここではコンクリート供試体・セメント改良土の一軸圧縮強さについても岩盤強度として扱った。また、図中に白四角(□)で示した花崗岩（一軸圧縮強さ: 263MPa）および石灰岩（一軸圧縮強さ: 135MPa）の掘削体積比エネルギーについては、今回の実験で得ることのできなかつた250MPaを超える高強度岩盤や延性的な岩盤の参考データとして既往文献<sup>7)</sup>から引用した。掘削体積比エネルギーと岩盤強度の関係は、原点を通る直線の傾き (SE /  $\sigma_c$ ) が1.0よりも大きい領域において全体的に上向きに凸の分布を示しているが、Case 1・2やCase 8・9の花崗岩のように全体の分布傾向からやや乖離するものも認められた。ここで、掘削体積比エネルギーの単位と応力の単位は同じであるため、直線の傾きは無次元となる。

図-2に示したさく孔データのビット径は $\phi 38 \sim \phi 102$ と幅があり、必ずしも同一のさく条件とはなっていない。式(1)に示したように、掘削体積比エネルギーの算出式には孔断面積としてビット径の違いが反映されているが、掘削径がさく孔効率に与える影響（寸法効果）までは考

表-1 さく孔条件および実験結果 (岩石ブロック等の短尺さく孔実験)

Case	さく孔機のさく孔条件				さく孔部材の仕様		岩盤強度 $\sigma_c$ MPa	岩種	備考	掘削体積比エネルギーSE	掘削体積比エネルギーSE ( $\phi 64$ 相当に補正)	無次元化SE	無次元化SE ( $\phi 64$ 相当に補正)
	機種	スラスト(N)	打撃圧(MPa)	打撃数(bpm)	ビット	さく孔ロッド				J/cm <sup>3</sup> (MPa)	J/cm <sup>3</sup> (MPa)	-	-
1	COP1838	9.6	18.6	3,240	$\phi 64$ ポタン	$\phi 32$ (Rねじ), M-F(L=3.0m)	181	花崗岩(福田)	対象: 供試体ブロック -- 軸圧縮試験より強度算出	172	172	0.95	0.95
2	COP1238	9.2	18.9	2,720			181	花崗岩(福田)	対象: 供試体ブロック -- 軸圧縮試験より強度算出	156	156	0.86	0.86
3	COP1838	9.1	18.1	3,190			20	コンクリート	対象: 供試体ブロック -- 軸圧縮試験より強度算出	87	87	4.35	4.35
4	COP1238	9.1	18.8	2,710	$\phi 45$ クロス	H32(Tねじ), M-M(L=3.6m)	20	コンクリート	対象: 供試体ブロック -- 軸圧縮試験より強度算出	83	83	4.15	4.15
5		12.0	20.0	3,860			181	花崗岩(福田)	対象: 供試体ブロック -- 軸圧縮試験より強度算出	278	235	1.54	1.30
6	COP1440	12.0	20.0	3,860			84	安山岩(三城目)	対象: 供試体ブロック -- 軸圧縮試験より強度算出	185	156	2.20	1.86
7		12.0	20.0	3,860	33	安山岩(戸野)	対象: 供試体ブロック -- 軸圧縮試験より強度算出	139	117	4.21	3.56		
8	COP1838	10.1	18.0	3,190	$\phi 64$ ポタン	H35(Rねじ), R32-R38 (L=3.7m)	178	花崗岩	対象: 供試体ブロック -- ポイントロード試験より強度算出	173	173	0.97	0.97
9	COP1238	10.0	18.6	2,700			178	花崗岩	対象: 供試体ブロック -- ポイントロード試験より強度算出	180	180	1.01	1.01
10	COP1838	9.6-15.4	20.0	3,360	$\phi 102$ ポタン	$\phi 45$ (Rねじ), M-F(L=3.0m)	66	ホルンフェルス	対象: 切羽岩盤 -- ポイントロード試験より強度算出	123	154	1.86	2.33
11	COP1238	7.7	14.0	2,340	$\phi 64$ ポタン	$\phi 45$ (Rねじ), M-F(L=3.0m)	2	セメント改良土	対象: 人工地盤 -- 針貫入試験より強度算出	17	17	8.50	8.50

慮されていない。福井・大久保<sup>20)</sup>は、刃物間隔や切り込み深さ等の掘削代表寸法が0.01mm~1mの11種類の岩盤掘削データに基づき掘削径の寸法効果について検討し、掘削体積比エネルギーを強度で除した無次元化掘削体積比エネルギー(無次元化SE)と呼ばれる指標が掘削代表寸法の $-0.4$ 乗に比例するとした。今回、Case 8の花崗岩に対してビット径のみの条件を変えてさく孔実験を行ったところ、図-3に示すようにビット径が小さくなるほど無次元化SEが大きくなる傾向が認められた。この傾向は次式のように表すことができ、掘削代表寸法とビット径の違いはあるが、福井・大久保<sup>20)</sup>とほぼ同様の関係となっている。

$$\text{無次元化SE} = 6.7 \times D^{-0.48} \quad (2)$$

ここで、 $D$ : ビット径 (mm)

式(2)を用いてCase 5~7, Case 10および西松<sup>7)</sup>から引用した花崗岩・石灰岩の掘削体積比エネルギーをビット径が $\phi 64$ に相当する値に換算し、図-2に示したデータから寸法効果の影響を除去した。図-4に示すように、ここでも換算前と同様に上向きに凸の傾向を示すが、その分布は掘削体積比エネルギーがより小さい領域となっている。また、個々の値を見てみると、岩盤強度が小さくなるほど原点を通る近似直線の傾きが大きくなる傾向が認められた。この傾きは前述の無次元化SEに相当しており、その傾向が掘削体積比エネルギーに含まれるエネルギー受容効率 $\eta_2$ の変化を示している可能性がある。

#### 4. さく孔効率に関する考察

ここでは、前章でさく孔効率の指標としての可能性が示された無次元化SEに着目し、岩盤強度とさく孔効率の関係について検討した。

Case 1~11のさく孔データから求めた無次元化SEと岩盤強度の関係を図-5に示す。図のように、無次元化SE

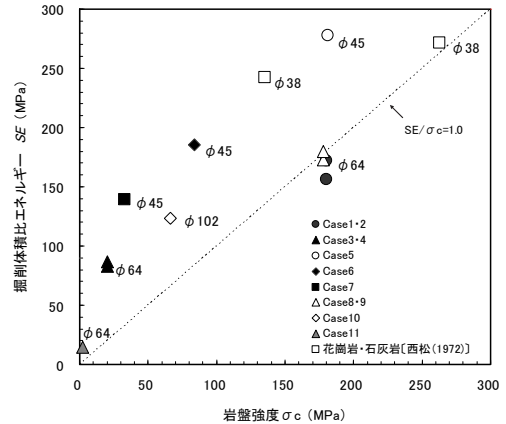


図-2 掘削体積比エネルギーと岩盤強度の関係 (図中の□は既往文献<sup>7)</sup>から引用)

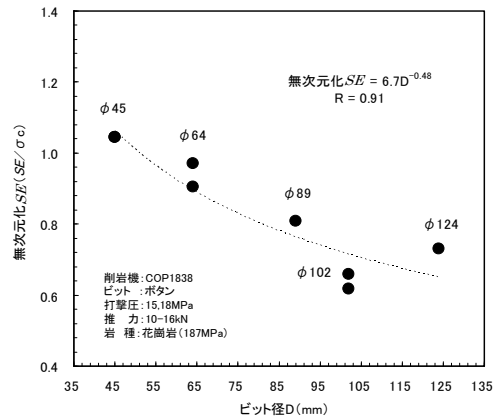


図-3 掘削体積比エネルギーに対するビット径の影響 (寸法効果)

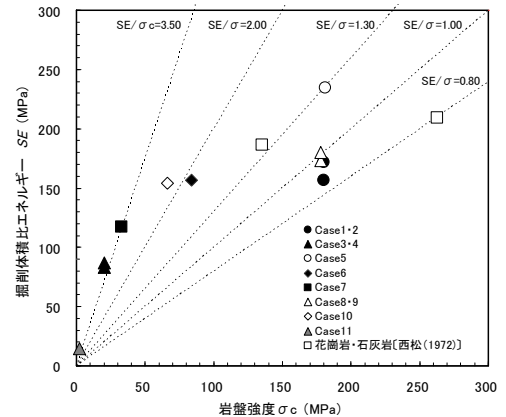


図-4 掘削体積比エネルギーと岩盤強度の関係 (寸法効果を考慮し $\phi 64$ 相当の値に換算)

表-2 さく孔条件 (原位置長尺さく孔実験)

Case	さく岩機のさく孔条件				さく孔部材の仕様		岩種	備考
	機種	スラスト(kN)	打撃圧(MPa)	打撃数(bpm)	ビット	さく孔ロッド		
12	COP1838	8.4	15.0	2,900	φ64 ボタン	φ32(Rねじ), M-F(L=3.6m)	花崗閃緑岩	・NATMトンネル(発破掘削) ・ポイントロード試験、ロックシュミットハンマー試験から強度算出
13	COP1440	10.0	17.5	3,500	φ64 ボタン	φ32(Rねじ), M-F(L=3.0m)	花崗岩	・TBMトンネル ・TBM機械データから岩盤強度算出
14							泥岩・砂岩	

は岩盤強度の低下に伴い増加する傾向が認められ、その傾向は次式で近似される。

$$\text{無次元化SE} = 17.0 \times \sigma_c^{-0.52} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_c$  : 岩盤強度 (MPa)

このような傾向は、打撃を主体とするさく孔においてさく孔効率が岩盤強度によって変化し、とくに強度が30MPa以下の軟岩領域でその効率低下が著しいことを意味している。従来から指摘されているように<sup>2)</sup>、到達した弾性波によってビット先端の最大変位は決まるため、1打撃あたりのさく孔長さには上限が存在する。岩石の強度が低いとその上限に近づくため、図-5に見られるような軟岩領域における著しい効率低下が認められたと考えられる。

次に、原位置岩盤に対して連続的に収集したさく孔データを用いて同様の検討を行った。検討Caseのさく孔条件を表-2に示す。これらはいずれもトンネル掘削時の切羽前方探査として連続的に実施された30~50mの長尺さく孔である。長尺さく孔ではロッド継ぎ手箇所が増加に伴いエネルギー伝達効率 $\eta_1$ が段階的に低下していくが、今回の検討では山下<sup>2)</sup>の手法を用いてその影響を予め除去したものを使用した。また、原位置岩盤の強度収集については、Case 12のNATMトンネルでは探査孔近傍の切羽においてロックシュミットハンマー試験や点载荷試験を実施し、Case 13, Case 14のTBMトンネルでは福井・大久保<sup>9)</sup>の式を用いてTBM掘進データから岩盤強度を算出した。

図-6および図-7に示すように、いずれの原位置長尺さく孔においても岩盤強度の低下に伴い無次元化SEが増加している。そしてその分布はばらつきがあるものの、大局的には前述の短尺さく孔実験から得られた式(3)の近似曲線に近い傾向を示している。ただし、岩盤強度が約20MPa以下の領域においては、強度低下に伴う無次元化SEの増加傾向が短尺さく孔実験の場合よりも大きくなる傾向が認められた。この原因は明らかではないが、今回採用した原位置強度試験法(ポイントロード試験、ロックシュミットハンマー試験)やTBMデータからの強度換算法は比較的硬質な岩盤を対象としているため、脆弱岩盤に対する強度換算誤差(例えば、強度を実際よ

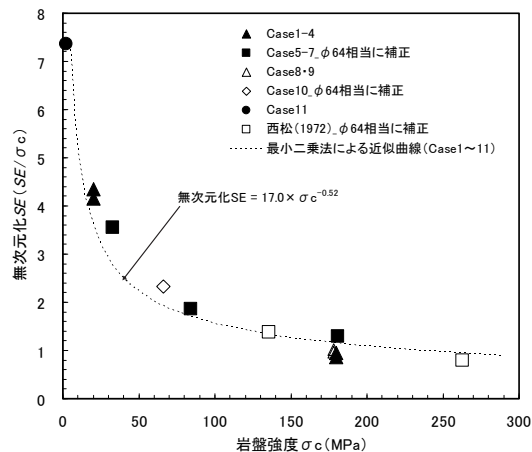


図-5 無次元化SEと岩盤強度の関係 (岩石ブロック等の短尺さく孔実験)

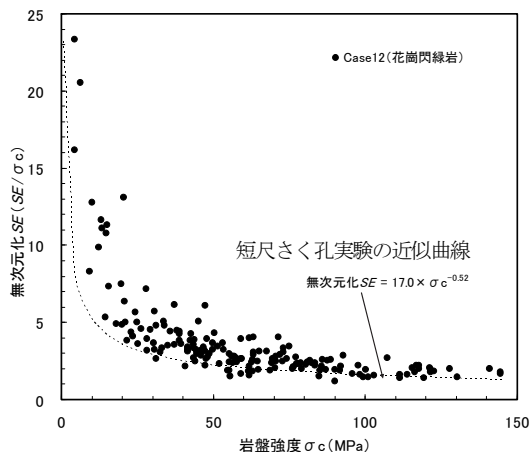


図-6 無次元化SEと岩盤強度の関係(Case 12) (NATMトンネルにおける原位置長尺さく孔実験)

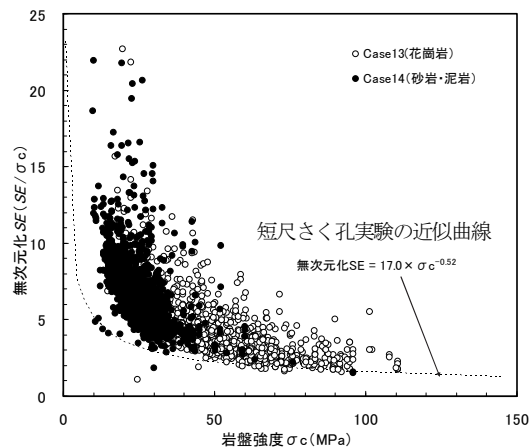


図-7 無次元化SEと岩盤強度の関係(Case 13,14) (TBMトンネルにおける原位置長尺さく孔実験)

り高く評価する等)が生じた可能性が考えられる。

本研究の最終的な目的は、さく孔効率の影響を考慮して掘削体積比エネルギーから岩盤強度などの岩盤特性を精度よく把握することにある。無次元化SEは掘削体積比エネルギーを岩盤強度で除した値であるので、式(3)の近似式を変換すると掘削体積比エネルギーの算出式となる。さらに、この近似式の乗数および定数をそれぞれa, Cとすると、掘削体積比エネルギーは次式のように岩盤強度のべき乗で表すことができる。

$$SE = C \times \sigma^b \quad (4)$$

ここで、C: 定数 (-), b: 乗数 (b=1-a)

今回の検討Caseに限ると式(4)の乗数bは約0.5となるが、この値は経験的に求められたものであり一般化されたものではなく、今後の課題である。

## 5. まとめ

強度が既知の供試体や岩盤のさく孔実験で、ピストンの運動エネルギーを用いて無次元化SEを求め、さく孔効率の評価を試みた。その結果、岩盤強度が30MPa以下の軟岩領域において無次元化SEが著しく上昇(さく孔効率が著しく低下)した。そこで、その傾向を岩盤強度の-0.5乗に概ね比例する式で近似した。さく岩機によるさく孔ではエネルギー伝達過程が複雑であり、とくに掘削体積比エネルギーから岩盤特性を評価する上でさく孔効率の影響は無視できない。その意味でも、今回のように実測データからさく孔効率を評価する手法について検討した意義は大きい。

また本論では、この近似式をもとに掘削体積比エネルギーが岩盤強度のべき乗に比例する可能性を示した。ただし、今回の検討ではその乗数の値を一般化させるまでには至らなかった。これについては今後の課題とし、今後も更なるさく孔データの蓄積・検討を継続していくつもりである。

## 参考文献

- 1) Schunnesson, H.: Rock characterization using percussive drilling, *Int. J. Rock Mech. Sci.*, 35, pp.711-725, 1998.
- 2) 木村 哲, 山下雅之, 西山 哲: ぜい弱地山における穿孔探査法の適用, *材料*, Vol.52, No.5, pp.494-499, 2003.
- 3) 山下雅之, 平野 享, 木村 哲, 石井洋司: 穿孔探査システムによる支保パターン事前想定を試み, *土木学会第 58 回年次学術講演概要集 III-155*, pp.309-310, 2003.
- 4) 山田浩幸, 原田雅也, 田中秀男, 三木秀二: トンネル地山評価システムを用いた補助工法選定に関する一考察: *トンネル工学論文集*, 第 16 巻, pp.93-100, 2006.
- 5) 桑原 徹, 畑 浩二, 稲川雄宣, 平川泰之: 変換解析システムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測技術, *トンネル工学論文集*, 第 16 巻, pp.1-10, 2008.
- 6) Teale, R.: The concept of specific energy in rock drilling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.2, pp.57-73, 1965.
- 7) 西松裕一: 掘削方法とその評価法について, *日本鉱業会合同秋季大会講演集*, pp.1-4, 1972.
- 8) M.Hughes, H.: Some aspects of rock machining, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.9, pp.205-211, 1972.
- 9) 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*, Vol. 28, pp.123-131, 1997.
- 10) 領家邦泰, 青木智幸, 田村尋夫, 福井勝則, 大久保誠介, 松本一騎, 宮本義広: 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, *土木学会論文集*, No.603, Part III-44, pp.89-100, 1998.
- 11) 福井勝則, 大久保誠介, 稲垣大介, 羽出山吉裕, 山本卓也: ブームヘッダの掘削体積比エネルギーと岩盤物性, *資源・素材学会秋季大会講演集*, Vol. AS, pp.109-112, 2009.
- 12) Lundberg, B.: Efficiency of percussive drilling with extension rods, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 24, pp.213-222, 1987.
- 13) 高岡三郎, 速水博秀, 三沢茂夫: さく岩機の長孔穿孔能率に及ぼす二三の影響について, *採鉱と保安*, Vol. 2, No.5, pp.1-7, 1956.
- 14) 大久保誠介, 大田彰則, 秋山政雄: 削岩機のスリーブにおける弾性波の伝播特性に関する基礎研究, *資源と素材*, Vol. 110, pp.895-901, 1994.
- 15) 大久保誠介, 大田彰則, 福井勝則: 削岩機のスリーブ式ロッド継手の弾性波伝播特性に及ぼす弾性波の波長とロッド径の影響, *資源と素材*, Vol. 111, pp.301-308, 1995.
- 16) 福井勝則, 大久保誠介, 山下雅之: 長尺さく孔におけるさく孔深さの影響, *資源と素材*, Vol.120, pp.146-151, 2004.
- 17) 福井勝則, 阿部裕之, 小泉匡弘, 友定英貴, 大久保誠介: 長尺さく孔におけるロッド応力の減衰, *Journal of MMIJ*, Vol. 123, pp.152-157, 2007.
- 18) Hustrulid, W.A. and C.Fairhurst: A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part 1-theory of percussive drilling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.8, pp.311-333, 1971.
- 19) 山下雅之, 石山宏二, 福井勝則, 大久保誠介: 油圧さく岩機の掘削体積比エネルギーを用いた坑道周辺岩盤の特性評価に関する検討, *土木学会第 66 回年次学術講演会*, III-109, pp.217-218, 2011.
- 20) 福井勝則, 大久保誠介: 掘削体積比エネルギーを用いた岩石強度の寸法効果の推定, *資源と素材*, Vol. 120, pp.55-59, 2004.
- 21) 福井勝則, 大久保誠介, 山下雅之: 長孔のさく孔特性に関する検討, *平成 14 年資源・素材学会春季大会講演要旨集*, pp.187-188, 2002.
- 22) 山下雅之, 福井勝則, 大久保誠介: さく孔深さの影響を考慮したさく孔データと岩盤特性の関係に関する検討, *資源と素材*, Vol.120, pp.508-514, 2004.

## STUDY OF DRILLING EFFICIENCY AND ROCK MASS CHARACTERISTICS

Masayuki YAMASHITA, Koji ISHIYAMA, Katsunori FUKUI and Seisuke OKUBO

Accurate estimation of drilling efficiency is important for evaluation of the rock mass property using drilling data. It is well known that the drilling efficiency may depend on the conditions between drill bit and rock characteristics, however it is hard to say that this was demonstrated on tunnel site.

In this study, relationship between rock strength, and drilling efficiency evaluated by dimension-less specific energy was considered based on drilling tests. As a result, the tendency that the drilling efficiency decreases with decreasing of rock strength could be clarified as a phenomenon. Especially, drilling efficiency significantly reduced in the range of rock strength less than approximately 30MPa.