PDC パーカッションビットの 性能評価と掘削コストの試算*

大野 哲二¹ 宮崎 晋行² 唐澤 廣和³ 高倉 伸一⁴
Eko AKHMADI⁵ 松尾 俊彦⁶ 寺倉 稚晃⁶ 大橋 忠一⁷

Performance Evaluation of PDC Percussion Bits and Calculation of Total Drilling Costs

by Tetsuji OHNO^{a*}, Kuniyuki MIYAZAKI^a, Hirokazu KARASAWA^a, Shinichi TAKAKURA^a,
Eko AKHMADI^b, Toshihiko MATSUO^b, Chihiro TERAOKURA^b and Tadakazu OHASHI^b

a. Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology (AIST), Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan
(*corresponding author, E-mail: t-ohno@aist.go.jp)

b. Central Research Institute, Mitsubishi Materials Corporation, 1002-14 Mukohyama, Naka,
Ibaraki 311-0102, Japan

Polycrystalline diamond compact (PDC) tips, which originated with the development of PDC cutters in 1973, have recently been used to fabricate percussion drill bits. In the present study, rotary-percussion drilling tests were carried out to evaluate the performance of two PDC percussion bits, both having a diameter of 65 mm, but containing different types of PDC tips. The drilling medium was hard abrasive granite. For comparison, a WC-Co percussion bit was also tested.

The WC-Co percussion bit reached the end of its life at a drilling length of 20.6 m due to large gage loss. In addition, its rate of penetration (ROP) decreased quickly with increasing drilling length due to large height loss at the gage tips. On the other hand, for both PDC percussion bits, a drilling length of 46.8 m was achieved without gage loss and with very small height loss. In addition, the decrease in the ROP with increasing drilling length was much less for the two PDC percussion bits. Thus, the PDC percussion bits exhibit much higher performance than the WC-Co percussion bit. Also emphasized is that we found the fact that the torque on bit detects the height loss on gage tips of all bits.

Finally, the drilling costs using the different bits were estimated based on the results of the drilling tests and several reasonable assumptions. It was found that for a drilling length of 80 m, the total drilling costs were almost the same for the PDC percussion bits and the WC-Co percussion bit, even though the bit cost of PDC percussion bits were considerably more expensive.

KEY WORDS: Percussion, PDC Tip, Height Loss, Gage Loss, Torque, Drilling Cost

1. は じ め に

パーカッション（打撃）掘削は、道路・鉄道トンネル工事における前方探査や水抜きなどを目的とした先進ボーリング、山岳トンネルの掘削や鉱山開発などにおける発破孔の削孔、各種土木

工事などに普及している。本掘削法の場合はロッドの接続長が大きくなるとビットに伝わる打撃エネルギー（打撃力）が減少するため、掘削長は最大でも 150m¹⁾ 程度である。このように掘削長に関しては大きな制約があるものの、花崗岩のような硬質岩をパーカッション掘削したときの掘削速度は最大で 50 ～ 100cm/min 以上に達している。このような掘削速度はロータリー（回転）掘削に比べて一桁大きく、極めて能率のよい削孔が達成されている。パーカッション掘削に用いられるビット、すなわちパーカッションビットは、専ら超硬合金（WC-Co）チップを用いて製作されてきている。しかし、最近では多結晶ダイヤモンド焼結体（Polycrystalline Diamond Compact: PDC）チップを取り付けた PDC パーカッションビットが実用化されつつある。

本研究では、PDC チップまたは WC-Co チップを取り付けたパーカッションビット（以下、それぞれ PDC パーカッションビットまたは WC-Co パーカッションビットという）と硬質で研磨性の高い花崗岩を用いて掘削試験を行い、両ビットの掘削性能を評価

*2014 年 5 月 22 日受付 2014 年 7 月 8 日受理 資源・素材学会平成 26 年度春季大会にて一部発表

1. 正会員（独）産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 主任研究員
2. 正会員 博士（工学）（独）産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 研究員
3. 正会員 博士（工学）（独）産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 上級主任研究員
4. 博士（工学）（独）産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 上級主任研究員
5. 三菱マテリアル（株）中央研究所 薄膜材料研究部 副主任研究員
6. 三菱マテリアル（株）中央研究所 薄膜材料研究部 研究員
7. 三菱マテリアル（株）中央研究所 薄膜材料研究部 部長

[著者連絡先] E-mail: t-ohno@aist.go.jp
キーワード：パーカッション、PDC チップ、ハイトロス、ゲージロス、トルク、掘削コスト

Fig. 1 PDC cutter. Thickness of polycrystalline diamond layer is approximately 0.5-0.7 mm.

Fig. 2 Crosssection of PDC tip.

Fig. 3 Configuration of percussion bit (a) and tips (b). Bit diameter is 65 mm.

した。また、掘削性能評価結果を用いて、掘削中の孔底状況（岩石強度やビット摩耗状態）の評価も試みた。現在のところ PDC パーカッションビットのビットコストは WC-Co パーカッションビットの数倍以上で、現場での使用については試験段階にあると推察される。そこで、PDC パーカッションビットの現場への投入に関してその可能性を検討するために、掘削試験結果と種々の簡単な仮定を基に掘削コストの試算を行った。

2. 本研究のバックグラウンド

2・1 PDC カッターの登場

掘削産業における先端技術の一つとして、多結晶ダイヤモンド焼結体 (Polycrystalline Diamond Compact: PDC) カッターが挙げられる。Fig. 1 に示すように、本焼結体は多結晶ダイヤモンド (Polycrystalline Diamond) 層と超硬合金 (WC-Co) 層とから構成されており、米国のゼネラル・エレクトリック社が 1973 年に開発した²⁾。この焼結体は PDC カッターと呼ばれている。靱性に優れた WC-Co 層は多結晶ダイヤモンド層を強固に支持するとともに、本カッターをビット本体に取り付ける際のろう付け面の役割も果たしている。

PDC カッターは、Co (コバルト) を含む粉末状の WC (炭化タングステン) と、粒径が数十 μm 程度の人造ダイヤモンド粒子から構成される積層体を焼結して製造される。焼結条件は圧力が 5 ~ 6 GPa、温度が 1500 ~ 1600°C 程度で、人造ダイヤモンドの合成条件と同様である。焼結中に触媒の役割を果たす Co がダイヤモンド層内に移動する結果、任意の方向に配列した単結晶ダイヤモンド同士が粒間結合して多結晶体となる。多結晶体のダイヤモンドは単結晶のダイヤモンドが有する劈開性がないため、耐衝撃性が向上する。周知のようにモース硬度が 10 のダイヤモンドは耐摩耗性が最も優れた物質であるので、本焼結体の開発により耐衝撃性と耐摩耗性に優れた大寸法の掘削工具の利用が可能となった。PDC カッターをビット本体に取り付けたビットは PDC ビットと呼ばれており、今日では世界における石油や天然ガス開発のための坑井掘削において主要なビットとなっている^{2,3)}。2010 年において、石油・ガス井の総掘削長の 65% が本ビットを用いて掘削されたと報告されている²⁾。

2・2 PDC チップの登場

Fig. 2 は、ドーム状 (砲弾状) の PDC チップの断面図である。このチップの製造プロセスや寸法は PDC カッターと同様である。開発時期は明確ではないが、1988 年にはローラコーンビットを構成するコーンのゲージ列用インサートとして本チップが使用されている⁴⁾。このビットを使用した結果、地熱地帯に賦存する研磨性が著しい硬質岩の掘削においてゲージロス (ビット外周

の摩耗によりビット直径が小さくなる現象) が解消されて、リーミング (拡径) 作業や掘管のねじ切れ (twist-off) などの孔内トラブルの削減に寄与したことが報告されている。

一般に本チップの先端部は多層構造 (3 ~ 4 層) となっており、多結晶ダイヤモンド層から超硬合金基体に向かって各層中のダイヤモンド含有量が徐々に少なくなる。Laursen ら⁴⁾ は、このような多層構造とすることによって熱膨張係数が大きく異なる多結晶ダイヤモンド層と超硬合金基体との間に生じる残留応力が緩和されて最小となり、PDC チップの耐衝撃性が向上すると述べている。

本章では、PDC カッターと PDC チップについて耐衝撃性や耐摩耗性などの観点から特徴を述べた。ただし、構造や岩石破壊様式が異なる両焼結体の特徴、特に耐衝撃性については同列に論じることはいできないことを強調しておく。すなわち、PDC カッターの場合は均質な軟~中硬岩を能率よく切削できるものの、硬岩の切削では多結晶ダイヤモンド層が欠損するため適用できないことである。

3. 試験用機材および試験条件

3・1 試験用機材

PDC パーカッションビットと WC-Co パーカッションビットの性能を比較するため、花崗岩を用いて掘削試験を行った。試験には、直径が 65mm の PDC パーカッションビット 2 個 (A, B) と WC-Co パーカッションビット 1 個、合計 3 個のビットを用いた (Fig. 3)。PDC パーカッションビット A は三菱マテリアル社が開発中の PDC チップを、PDC パーカッションビット B は市販の PDC チップを取り付けたビットである。いずれのビットもチップ配列を含めて本体形状は同一で、フェース部に 3 個、ゲージ部に 5 個の合計 8 個のチップを取り付けた。チップ形状もほぼ同一で、根元の直径が 11.0mm、先端部の円弧の半径が約 6mm のボタンタイプである。

掘削試験には、パーカッション掘削とロータリー掘削が可能な中型の試験装置⁵⁾を用いた。掘削試験において計測したデータは、ビット荷重、トルク、ビット回転数、変位 (掘削距離)、掘削流体流量、パーカッションドリルの入口および出口油圧、油流量、油温度である。また、チップ摩耗量を評価するために掘削長が数 m ごとに Fig. 3 (a) に示したチップ高さ h を計測するとともに、ビット直径についても 3 回の測定を行ってゲージロスを評価した。

掘削試験に用いた岩石は寸法が 50×50×80cm の沢入花崗岩で、合計 20 個の岩石ブロックを用いた。岩石ブロック 1 個当たりの削孔数は 9 で、深さは 0.65m とした。各岩石ブロックは多少の強度の相違があると予想されたため、各ビットの掘削データができるだけ同一条件で得られるよう、各ビットの削孔数は岩石ブロッ

Table 1 Mechanical properties of Sori granite used for drilling tests. Value in parenthesis is standard deviation of S_c .

S_c (MPa)	S_t (MPa)	E (GPa)	ν
203 (16.9)	10.3	56.6	0.285

S_c : Uniaxial Compressive Strength, S_t : Tensile Strength,
 E : Young's Modulus, ν : Tangential Poisson's Ratio

Fig. 4 Calibration curve to calculate output (percussion) energy W_{out} . Approximate percussion frequency is also shown.

クごとにはほぼ同数となるようにした。削孔後の各岩石ブロックから直径が 30 mm のコアを採取し、高さ約 60 mm と約 30 mm の試験片を 2 個ずつ作製してそれぞれ軸圧縮試験と圧裂引張試験に供した。得られた沢入花崗岩の物性を Table 1 に示す。

3・2 試験条件

掘削試験における試験条件は、ビット回転数 75rpm、ビット荷重約 6.5kN、掘削流体（清水）流量 60L/min、パーカッションドリルへの入力油圧 (P_{in}) 約 15.3MPa である。 P_{in} は岩石の掘削時にビットに伝わる打撃エネルギーを制御するパラメータである。掘削に要するエネルギーの観点からはパーカッション掘削が打撃エネルギーを原動力として岩石を破壊しているため、掘削試験から得られるデータの解析においてビットに伝わる打撃エネルギーの評価は重要となる。本研究では、予め作成しておいた Fig. 4 に示す較正曲線と、掘削試験中の計測データから求めることができる 1 分間当りのパーカッションドリルへの入力エネルギー W_{in} を用いて、1 分間当りの出力（打撃）エネルギー W_{out} を求めた。パーカッション掘削における較正曲線の作成方法の詳細については文献^{5,6)}を参照されたい。

4. 本研究の位置づけ

打撃エネルギー（打撃力）が大きいパーカッション掘削では、打撃力によってチップが岩石中に圧入されると、その反力によってビット全体が岩石表面から離れて浮き上がることが観察されている。このような状態ではビットにトルクはほとんど作用しないので、打撃エネルギーによって岩石が破壊されていることになる⁷⁾。一方、打撃エネルギーが大きい場合でも、掘削長が増大すると打撃エネルギーがロッド中で減衰するので、ビットに伝わる打撃エネルギーも減少する。福井ら⁸⁾は、パーカッション掘削において掘削長が増大するときの掘削速度の変化状況について稲田花崗岩を用いて調べた。その結果、掘削長が約 0m から約 37m に増大すると、掘削速度は約 120cm/min から約 42cm/min に減少すると報告している。また、中野ら⁹⁾は、パーカッション掘削工法を用いて掘削長が 85m に達する水平ボーリングを行っており、本ボーリングでは全掘削長にわたって打撃エネルギーのみならずトルクに起因する回転エネルギーも計測されている。本論文で

Fig. 5 Height loss of gage tips (Δh) on PDC percussion bit A, PDC percussion bit B and WC-Co percussion bit.

は、岩石の破壊を、主として打撃エネルギーによって行う工法を①パーカッション掘削、打撃エネルギーと回転エネルギーによって行う工法を②ロータリー・パーカッション掘削と呼ぶことにする。作業能率が重視される発破孔などの削孔では①の工法が採用されていると推察される。一方、掘削長が 100m 前後に達する水平ボーリング（水抜き、コア採取など）では②の工法が採用されていると推察される。

本研究で用いたパーカッションドリルは出力が小さいので、①のパーカッション掘削を行うことはできない。そのため、岩石の掘削中に絶えずトルクが生ずるので、掘削方式としては②のロータリー・パーカッション掘削に位置づけられる。本研究の場合は、1 分間当りの打撃エネルギーと回転エネルギーは約 63 ~ 66kN・m/min でほぼ同じであった。なお、1 章で述べたロータリー掘削は、回転エネルギーによって岩石を破壊する方式である。

5. 掘削試験結果

5・1 掘削長とハイトロス、掘削長とゲージロス

Fig. 5 に、掘削長とゲージチップのハイトロス $\Delta h (=h_{new}-h)$ との関係を示す。ハイトロス Δh はゲージチップ 5 個の平均値で、 h_{new} は新品チップの高さ、 h は掘削試験中に計測したチップ高さである。ここで、ゲージチップの測定結果を用いたのは、ゲージチップ 5 個の h がほぼ同じであることと、フェースチップの摩耗はゲージチップと比較して小さく、検討に向かないと判断したからである。図中の a は近似直線の傾きである。

図からわかるように、WC-Co パーカッションビットの場合はゲージチップのハイトロス Δh は掘削長とほぼ比例して増加しており、掘削長が 20.6m においてハイトロスが 0.91mm に達した。一方、PDC パーカッションビット A と PDC パーカッションビット B の場合は、掘削長が約 30m まではゲージチップの摩耗は生じていないことがわかる。掘削長が約 30m 以降ではゲージチップに多少の摩耗が認められ、掘削長が 46.8m の時点で 0.04 ~ 0.05mm のハイトロスが観察された。このように PDC チップの摩耗はわずかであり、WC-Co チップに比べて耐久性に関して格段に優れていることが明らかとなった。なお、掘削長が約 30m までの範囲において PDC チップのハイトロスの一部が負であるのは、ゲージチップ高さ h の測定の誤差のためである。

PDC パーカッションビットと WC-Co パーカッションビットのゲージロスの評価するために、掘削長が 20.6m, 29.3m, 46.8m のときにビット直径を測定した。その結果を Table 2 に示す。新品ビットの直径は測定しなかったため、製作図のデータを記載した。ゲージロスの測定結果と上記ゲージチップのハイトロスの測定結果を勘案すると、PDC パーカッションビットのゲージロス

Table 2 Bit diameter D at drilled length of 0 m, 20.6 m, 29.3 m and 46.8 m.

Bit	D at 0 m (mm)	D at 20.6 m (mm)	D at 29.3 m (mm)	D at 46.8 m (mm)
PDC A	$65 \pm 0.8^*$	—	64.26	64.23
PDC B	$65 \pm 0.8^*$	—	64.33	64.32
WC-Co	$65 \pm 0.8^*$	62.21**	—	—

*Data on drawing. **Maximum diameter of new bit body is 63.0 mm.

Fig. 6 Relationship between drilled length and rate of penetration.

はほとんどない小さいことがわかる。一方、掘削長が 20.6m のときの WC-Co パーカッションビットのゲージロス、ビットの製作誤差 $\pm 0.8\text{mm}$ を考慮すると 2.0 ~ 3.6mm の範囲である。また、新品時のビット本体の最大直径が 63.0mm であったので、ビット本体も直径で 0.8mm 摩耗していることがわかる。掘削現場において、ビット本体に達するような大きなゲージロスが生じると、ビット交換時に新品ビットによるリーミング作業が必要となるのみならず、新品ビットが孔底に着く前にビットのゲージロスが始まるという悪循環となる。また、ゲージロスが大きい場合は、ビットにおいて大きなトルクが発生する。後述するように、この現象は本研究の掘削試験においても観測された。ビットにおいて生じる過大なトルクは、ロッドのねじ切れなどの重篤な孔内トラブルの原因となる。このように、硬質岩を掘削したときの WC-Co パーカッションビットの最大の欠点は、ゲージロスが大きいことであるといえる。したがって、ゲージロスが極めて小さい PDC パーカッションビットは、硬質岩掘削におけるリーミング作業の軽減や孔内トラブルの防止に寄与できる。

5・2 掘削長と掘削速度

Fig. 6 は、PDC パーカッションビット A、PDC パーカッションビット B、WC-Co パーカッションビットを用いて沢入花崗岩を掘削したときの掘削長と掘削速度との関係である。PDC パーカッションビット A と PDC パーカッションビット B については直線近似を行った。上記のように、WC-Co パーカッションビットは掘削長が 20.6m の時点でゲージロスが大きくなりビットライフに達したと判断した。本図から以下のことがわかる。

- ①掘削試験の第 1 孔を除いて、いずれの掘削長においても掘削速度は WC-Co パーカッションビット、PDC パーカッションビット B、PDC パーカッションビット A の順に大きくなる。
- ② PDC パーカッションビット B と比べて PDC パーカッションビット A の方が掘削速度の減少割合（直線の傾きの絶対値）が小さい。

4・1 に記載したように、①の結果は WC-Co パーカッションビットに比べて PDC パーカッションビットのハイトロスが小さく、チップ先端が新品時の形状を保っていたことに起因している。したがって、PDC パーカッションビットは WC-Co パーカッショ

Fig. 7 Torque on bit-drilled length and W_{out} -drilled length plots.

ンビットと比べて耐久性のみならず掘削速度に関しても格段に優れていることが確認できた。①および②の結果の違いの原因の一つとしては、PDC チップの性状（チップの先端形状や多結晶ダイヤモンド層を構成するダイヤモンド粒子の粒径や物性、Co 含有量など）の違いが考えられる。これに関しては今後、両チップと沢入花崗岩などを用いた圧入試験を行って確認する予定である。PDC チップの性能向上を図る際はこれらのパラメータの検討は重要であるので、今後の課題であると考えている。

Fig. 6 において、掘削長が約 30m 以降において掘削速度のばらつきが大きくなっている。この区間の掘削試験に用いた岩石ブロックは、沢入花崗岩採石場の閉鎖間際に採取されたものが多かったため、岩石ブロックの一部において品質が異なるものが含まれていたことに起因していると考えられる。

5・3 掘削長とトルク

Fig. 7 (a) ~ (c) は、それぞれ PDC パーカッションビット A、PDC パーカッションビット B、WC-Co パーカッションビットの掘削長とトルク、掘削長と 1 分間当りの打撃エネルギー W_{out} との関係である。(c) 図に示したように、トルクの近似直線の傾きを b で表す。WC-Co パーカッションビットの場合は掘削長が約 17m 以降においてトルクが急増している。この急増はゲージロスがビット本体に達したために生じたと考えられるので直線近似から除外した。図中に記載したように、いずれのビットも 1 分間当りの打撃エネルギー W_{out} はほぼ一定の約 65 ~ 66kN・m/min であるので、Fig. 7 に示したデータはほぼ同一の試験条件から得られていることがわかる。Fig. 7 から、WC-Co パーカッションビットの場合は掘削長の増加につれてトルクが急激に増大しているのに

Table 3 Slope of height loss on gage tips a and slope of torque on bit (TOB) b in Sori granite.

	PDC A	PDC B	WC-Co*	WC-Co**
Slope of height loss (mm/m), a	≈ 0	≈ 0	0.0429	0.0526
Slope of TOB (N·m/m), b	0.273	0.231	5.50	3.92

*Button Type, **High-speed Type⁸⁾Table 4 Slope of height loss on gage tips a and slope of TOB b in Sori granite and Shinkomatsu andesite¹⁰⁾.

	k_1 Sori Gt*	k_2 Shinkomatsu An**	k_2/k_1 (%)
Slope of height loss (mm/m), a	0.0526	0.0232	44.1
Slope of TOB (N·m/m), b	3.92	1.81	46.2

 $S_c=219$ MPa, ** $S_c=192$ MPa

対して、PDC パーカッションビットの場合はトルクが緩やかに増大していることがわかる。

唐澤ら¹⁰⁾は、既往の研究において直径が 65mm のハイスピードビットと呼ばれる WC-Co パーカッションビットを用いて沢入花崗岩 ($S_c=219$ MPa) の掘削試験を実施した。このビットの WC-Co チップが本研究の WC-Co チップに比べて先端が鋭利であることを除いて、ビット形状はほぼ同じである。この研究 ($W_{out} \approx 55$ kN·m/min) において、掘削長が増加したときのゲージチップのハイトロス Δh の増大とトルクの増大は一对一の相関を示すことから、トルクがチップ摩耗を定量的に検知できるパラメータであることを報告した。Table 3 に、Fig. 5 と Fig. 7 の結果および既往の研究結果をまとめて示す。表から、両 PDC パーカッションビットのハイトロスの近似直線の傾き a は、両 WC-Co パーカッションビットの a と比べて非常に小さいことがわかる。また、両 PDC パーカッションビットのトルクの近似直線の傾き b についても a と同様の傾向を示すことが明らかである。この結果は、既往の報告、すなわち、トルクがチップ摩耗を定量的に検知できるパラメータであることと、矛盾しない。したがって、PDC パーカッションビットのチップ摩耗が進展した場合もトルクが増大すると推察され、トルクからチップの摩耗状態を推定できる可能性があると考えられる。今後、本研究で用いた PDC パーカッションビットの性能評価試験を継続して、本考察の妥当性について確認する予定である。

既往の研究において、上記のトルクとチップ摩耗に関する知見については岩石種類が変わっても成り立つことが確認されている。既往の研究結果を Table 4 に再掲した。表から、沢入花崗岩と新小松安山岩におけるゲージチップのハイトロスの直線の傾き a やトルクの直線の傾き b の比率 (k_2/k_1) はほぼ同じであることがわかる。なお、両岩石の一軸圧縮強度に大差はないにもかかわらず、新小松安山岩の a と b は沢入花崗岩と比べて 1/2 程度で小さい。この原因として、沢入花崗岩は粒径が数 mm に達する大粒の石英を多く含むため、岩石の摩耗能が大きいことが考えられる (薄片観察結果)。岩石の掘削において、ビットの摩耗は岩石の摩耗能 (abrasivity: 岩石が刃物を摩耗させる程度) と密接な関係を有することが確認されている¹¹⁾。本研究の掘削試験は、実際のビットを用いて岩石の摩耗能を評価する試験であるといえる。また、Table 4 中の k_2/k_1 が両岩石においてほぼ等しいことから、トルクも岩石の摩耗能を表していることがわかる。

5・4 掘削長と比エネルギー

比エネルギー SE (MPa) は単位体積の岩石の掘削に要するエネルギーで、次式から求めることができる^{5, 12)}。

Table 5 Uniaxial compressive strength (S_c) of Sori granite and minimum specific energy (mSE).

	PDC A	PDC B	WC-Co*	WC-Co**
S_c (MPa)	203	203	203	219
mSE (MPa)	256	298	290	180

*Button Type (this study), **High-speed Type (previous study)

Fig. 8 Relationship between drilled length and specific energy for PDC percussion bit A and WC-Co percussion bit. Specific energy for WC-Co percussion bit reached 1194 MPa at 20.6 m. Torque on bit (TOB), rate of penetration (ROP) and S_c are also shown.

$$SE = \frac{Fu + 2\pi NT + W_{out}}{1000Su} \quad (1)$$

ここで、 F はビット荷重 (kN)、 u は掘削速度 (m/min)、 N はビット回転数 (rpm)、 T はトルク (kN·m)、 W_{out} は1分間当りの打撃エネルギー (kN·m/min)、 S は掘削孔の断面積 (m^2) である。ロータリー掘削における比エネルギー SE は (1) 式中の W_{out} の項を削除して求めることができる。(1) 式中の分子の第1項 Fu はビット進行方向のエネルギー、第2項 $2\pi NT$ はビット回転方向のエネルギーで、一般に第1項は極めて小さい (本研究における Fu は 1 kN·m/min 以下)。Teale¹²⁾は、比エネルギー SE の最小値と掘削した岩石の一軸圧縮強度 S_c が大雑把に一致するという、工学的に極めて重要な事実を見出した。

Table 5 に、本研究と既往の研究において用いた沢入花崗岩の一軸圧縮強度 S_c と、各ビットの比エネルギーの最小値 mSE を示す。表から、PDC パーカッションビット A の場合は比エネルギーの最小値 mSE と掘削した岩石の一軸圧縮強度 S_c は大雑把に一致していることがわかる。一方、既往の研究に用いた沢入花崗岩の S_c は本研究より大きいものの、ハイスピードタイプの WC-Co パーカッションビットの mSE は小さい。また、PDC パーカッションビット A のチップと先端形状などが異なる PDC パーカッションビット B の mSE は大きい。これらの結果は、比エネルギーの最小値 mSE が岩石強度のみならずビットの掘削性能の影響を受けるパラメータであることを示している。比エネルギーを一軸圧縮強度の評価に用いる際は、この点について留意する必要がある。

Fig. 8 (a) は、PDC パーカッションビット A と WC-Co パーカッ

Fig.9 Relationship between drilled length and specific energy for PDC percussion bit B. Torque on bit (TOB), rate of penetration (ROP) and S_c are also shown.

ションビットの掘削長と比エネルギーとの関係である。掘削長の増大につれて PDC パーカッションビット A の比エネルギーが増大するのは、Fig. 6 に示した掘削速度の減少と、Fig. 7 (a) に示したトルクの増大に起因している。Fig. 8 (a) 中の破線で示した掘削長が 31 ~ 35m と 42 ~ 44m 付近において比エネルギーが減少する区間は、Fig. 8 (d) に示した一軸圧縮強度 S_c が小さい区間と対応している。 S_c の測定に用いた圧縮試験片 2 個が岩石ブロック全体の岩石強度を代表しているとはいえない。しかし、両区間において比エネルギーが低下していることから、両区間において岩石強度が低下していると判断できる。また、掘削長が約 20m までの範囲では岩石の一軸圧縮強度を大雑把に評価できていることもわかる。一方、WC-Co パーカッションビットの比エネルギーは、第 1 孔の 290MPa から 1194MPa まで急激に増大した。

Fig. 9 (a) は、PDC パーカッションビット B の掘削長と比エネルギーとの関係である。本ビットの場合も、PDC パーカッションビット A と同様に一軸圧縮強度が小さい区間において比エネルギーが低下し、岩石強度の変化を捉えていることがわかる。また、Fig. 8 (a) と Fig. 9 (a) の比較から、PDC パーカッションビット A の比エネルギーの方が小さいことがわかる。比エネルギーは値が小さいほどエネルギー効率がよいことを意味しているので、掘削に要するエネルギーの観点からは PDC パーカッションビット A の方が PDC パーカッションビット B より優れていると判断できる。

6. 考 察

上記 Fig. 8 (a) と Fig. 9 (a) の掘削試験結果の記載は、実験者が掘削試験に用いた岩石の強度やビットの摩耗状態を把握しているので可能となる。しかし、実際の掘削現場において既存の資料がない場合は、地層状況については不明なことが多く、かつ掘削中のビットの摩耗状態もわからない場合が多いので、比エネルギーから孔底の岩石強度を正しく評価することは容易でないとと思われる。そこで、本研究結果を用いて掘削中の孔底状況の評価を行ってみる。

Fig.10 Behavior of rate of penetration (ROP) and torque on bit (TOB) for hard and soft rocks.

Fig. 8 (c) と (b) に、それぞれ PDC パーカッションビット A の掘削長と掘削速度、掘削長とトルクとの関係を再掲した。同様に、Fig. 9 (c) と (b) に、それぞれ PDC パーカッションビット B の掘削長と掘削速度、掘削長とトルクとの関係を示した。Fig. 8 および Fig. 9 (a) ~ (c) は、掘削中にリアルタイムで計測できる掘削パラメータから求めた比エネルギー、トルク、掘削速度をディスプレイに表示したイメージ図である。トルクは掘削中に計測したトルクから掘削リグにおいて消費されたトルク T_{rig} を差し引いたものである。 T_{rig} に孔内において生じるドラッグトルクを含めることができれば、孔底状況の評価精度が一層向上する。Fig. 8 (b) と Fig. 9 (b) から、掘削長とトルクとの関係における直線の傾きが小さいので、ビットの摩耗は小さくほとんど変化していないと判断できる。したがって、Fig. 8 (a) と Fig. 9 (a) の破線で示した区間における比エネルギーの低下は、掘削中の岩石強度の低下に起因していることがわかる。また、上記の比エネルギーが低下している区間では、掘削速度の増加とトルクの減少が対応している。掘削ビットの種類や刃先摩耗状態にかかわらず、掘削条件が一定であれば掘削速度の増減から岩石強度の変化状況を判断できる。そのとき、トルクの増減が掘削速度の増減と反対の現象を示すことが確認できていれば、比エネルギーから得られた情報（岩石強度）が妥当かどうかについては掘削速度とトルクの両者から確認できることになる。また、Fig. 8 (b) に示すトルクからビットの摩耗状態を評価する際にも信頼性が向上すると考えられる。掘削している岩石が硬質から軟質に変化したときは掘削速度が増大し、掘削している岩石が軟質から硬質に変化したときは減少する。しかし、このときトルクがどのように変わるかについては明確になっていない。そこで、唐澤らが過去に行った掘削試験結果¹⁾を調べた。

Fig. 10 に、直径が 65mm のボタンタイプのパーカッションビットを用いて、沢入花崗岩 ($S_c=214\text{MPa}$) および新小松安山岩 ($S_c=131\text{MPa}$) を掘削したときの掘削速度とトルクのデータを示した。ビット回転数にかかわらず岩石強度が低下すると掘削速度が増大するのに対してトルクは低下する。また、岩石強度が増加すると反対の現象を示すこともわかる。ただし、掘削速度の増減割合に比べてトルクの増減割合は非常に小さい。本結果から、トルクは掘削速度とは異なる情報を含んでいることが明らかである。したがって、トルクがビットの摩耗状態を検知できるパラメータであるという知見も、トルクが持っている特性と密接に関連して

Fig.11 Illustration of horizontal force H_1 and H_2 acting on a gage tip against hard and soft rocks.

いることが推察される。Fig. 8 (a) および Fig. 9 (a) 中の両端矢印で示す区間において比エネルギーが増大する、つまり岩石強度が増大すると、掘削速度は減少してトルクは増大している。これらの結果から、岩石強度が変化したときに掘削速度とトルクの増減は反対の現象を示すことがわかった。なお、Fig. 10 に示したボタンビットは新小松安山岩の掘削ではチップ摩耗はほとんど生じなかった。しかし、沢入花崗岩の掘削では試験中に多少のチップ摩耗が生じており、Fig. 10 に示したデータはその影響を含んでいる。ビット回転数が 25rpm の掘削試験結果が最もチップ摩耗の影響が少ないデータである。

Fig. 10 において、岩石強度が変化したときに掘削速度と比べてトルクの変化が小さい理由について考察する。Fig. 11 に、チップ摩耗状態が同一であるときの硬質な岩石と軟質な岩石の掘削モデルを示す。荷重 F (打撃力とビット荷重の合力) が等しいとき、軟質な岩石では硬質な岩石に比べてチップの圧入深さが d_1 から d_2 に増大して岩石の切削体積が増える。これにより、軟質な岩石の方が硬質な岩石よりも、掘削速度が大きいことが説明できる。その一方で、軟質な岩石では硬質な岩石に比べて切削体積が大きい分、形成される破断面 (図中の破線) の面積が大きいものの、単位面積当たりの破断面を形成するのに必要なせん断力は小さいため、結果としてチップに作用する水平方向の力 H_1 と H_2 との間には、掘削速度ほどには大きな相違が見られない。よって H_1 や H_2 に回転半径を乗じたトルクについても同様のことがいえると考えられる。ただし、Fig. 11 に示したモデルでは、トルクの増減が掘削速度の増減に比べて小さいことは説明できるものの、掘削速度とトルクの増減が反対の傾向を示すことは説明できない。掘削速度に関しては非常に多くの研究が行われてきているが、トルクに関する研究は比較的少ない。今後、トルクについても研究を進める必要があると考えている。

以上のように、掘削中にリアルタイムで掘削速度、トルク、比エネルギーなどの情報を取得することは、掘削している地層状況やビット摩耗状態などの掘削状況の評価に寄与できると考えられる。さらに、地層に適したビット荷重、ビット回転数、打撃エネルギーなどの掘削条件の設定、地層に適したビットの選択、適切なビット交換などにも寄与できると考えられる。したがって、孔底状況の正確な評価は、古くて新しい課題である“掘削能率の向上と掘削コストの削減”に寄与できると考える。このような掘削作業の高度化は、その後に実施されるトンネル施工等における作業能率や安全性の向上に大きく貢献できると考えられる。また、掘削作業の高度化は将来における掘削作業の半自動化や自動化にも貢献できると考えられる。

7. 掘削コストの試算

超高圧下で製造される PDC チップは高額である。また、PDC

Table 6 Parameters used in drilling cost calculation.

	WC-Co	PDC A	PDC B
Drilled Length (m)	40	40	40
Bit Dia. (mm)	65	65	65
Rod Length (m)	1.5	1.5	1.5
Drilling Time (h)	8.0	5.0	6.2
Tripping Speed (m/h)	20	20	20
Round Trip Time (h)	4	2	2
Rig Cost (thousand yen/h)	20	20	20
Bit Costs (thousand yen)	45	350	350

ビットが試験段階にあるので PDC チップは量産化されておらず、現段階では PDC パーカッションビットの大幅なビットコストの削減は困難であると考えられる。しかしながら、本研究から明らかのように、PDC チップは WC-Co チップに比べて耐久性や掘削速度が格段に優れている。そこで、どのような掘削条件であれば PDC パーカッションビットの採用が可能となるかどうかについて検討するために、本研究において得られた試験結果と種々の簡単な仮定を基に掘削コストの試算を行った。

掘削コストの試算には次式を用いた¹³⁾。

$$C_t = \frac{B + C_r(t + T_r)}{L} \quad (2)$$

ここで、 C_t は掘削コスト (万円 / m)、 B はビットコスト (万円)、 C_r はリグコスト (万円 / h)、 t は掘削時間 (h)、 T_r は揚降管時間 (h)、 L は総掘削長 (m) である。(2) 式は所定期間における日々の掘削コストを記録するために用いることができるとともに、掘削ビットの経済性の評価にも使用できる。本研究においては、PDC パーカッションビットの性能向上を図るための改良点の抽出や開発目標の設定なども目的としている。

本掘削試験結果を基に掘削コストを試算するにはいくつかの前提条件を定める必要がある。掘削試験に用いた口径が 65mm のビットは、通常 50m 前後のボーリングに用いられている。本掘削試験結果では、WC-Co パーカッションビットの寿命は約 20m、両 PDC パーカッションビットは 50m を掘削して未だ寿命に至っていない状態であることから、40m の垂直ボーリング 2 本を掘削する、との条件を想定することにした。そのため WC-Co パーカッションビットにおいては、孔 1 本毎に 2 個のビット (1 回のビット交換) が必要になる。また、遭遇する地層は沢入花崗岩と同等の硬質層を想定した。通常、パーカッション掘削では、ロッド長の増大により打撃エネルギーが減衰し、掘削速度が低下する。打撃エネルギーの減衰については、簡便のため今回の試算では無視することとした。

Table 6 に、掘削長 40m、すなわち、1 本目のボーリングでの掘削コストの試算に用いた主なパラメータを示す。本掘削試験では、WC-Co パーカッションビットの場合、掘削長 20m までの掘削時間は 4.0h であったため、掘削長 40m までの掘削時間は 8.0h とした。掘削長 40m までの PDC パーカッションビット A と PDC パーカッションビット B の掘削時間は、本掘削試験結果に基づき、それぞれ 5.0h と 6.2h とした。したがって、(2) 式から掘削コストを求めると、WC-Co パーカッションビットでは 0.83 万円 / m、PDC パーカッションビット A では 1.23 万円 / m、PDC パーカッションビット B では 1.29 万円 / m となった。

続けて、総掘削長 80m、すなわち、2 本のボーリングでの掘削コストを試算する。WC-Co パーカッションビットの場合、2 本目のボーリングは 1 本目の繰返しになるため、(2) 式より求ま

る掘削コストは変化せず、掘削長 80m の場合も 0.83 万円 /m である。一方 PDC パーカッションビットの場合は、掘削長 80m までの掘削試験は行っていないため掘削時間が不明である。そこで、Fig. 6 に示した掘削速度と掘削長との関係から得られた近似直線を基に掘削長 80m までの掘削時間 t を求めたところ、PDC パーカッションビット A と PDC パーカッションビット B の掘削時間はそれぞれ 10.6h と 14.1h であった。これを用いて (2) 式から掘削コストを求めると、PDC パーカッションビット A では 0.80 万円 /m、PDC パーカッションビット B では 0.89 万円 /m となった。

上記掘削コストの試算から、ビットコストが高額な PDC パーカッションビットの場合でも、掘削長が大きくなると WC-Co パーカッションビットと同程度の掘削コストとなる可能性が見い出された。なお、本試算では簡単のために種々の仮定を設けるとともに、現場における種々のトラブルも考慮していない。また、(2) 式の掘削コスト C_f には、現場ごとに異なるリグ運搬費や設置・撤去費等は含まれていないことも付記しておく。

8. お わ り に

本研究では、最近において実用化されつつある PDC パーカッションビットの掘削性能を評価することを目的に、現在普及している WC-Co パーカッションビットと当該ビットを用いて掘削試験を行った。掘削試験に用いた岩石は一軸圧縮強度が 203MPa の沢入花崗岩である。高温・高圧条件で製造される PDC チップは高額であるので、PDC パーカッションビットのビットコストも高い。そこで、どのような掘削条件であれば本ビットの実用化が可能となるのかを把握するために、本研究から得られた試験結果と簡単な仮定を基に掘削コストの試算を行った。その結果、主として以下の点が明らかとなった。

- 1) 硬質で研磨性が高い沢入花崗岩の掘削において、PDC パーカッションビットはチップのハイトロスとゲージロスがほとんどなく、WC-Co パーカッションビットと比べて耐久性や掘削速度に関して格段に優れている。
- 2) パーカッションビットのチップ材料にかかわらず、掘削長と

ゲージチップのハイトロスとの関係における直線の傾き a と、掘削長とトルクとの関係における直線の傾き b は、一対一の相関を示すことが確認された。したがって、本研究で行った試験条件の範囲内では、既往の報告、すなわち、トルクがチップ摩耗を定量的に検知できるパラメータであることと、矛盾しない結果を得た。

- 3) 掘削中にリアルタイムで比エネルギー、トルクおよび掘削速度などを取得することによって、孔底の岩石強度とビットの摩耗状態を定性的あるいは定量的に評価できる可能性が見い出された。
- 4) ビットコストが高額な PDC パーカッションビットの場合でも、掘削長が大きくなると WC-Co パーカッションビットと比べて掘削コストの削減が図れる可能性が見い出された。

以上のように、PDC パーカッションビットは硬質で研磨性の著しい岩盤のパーカッション掘削において、極めて優れた耐久性を有することが確認できた。また、耐久性に優れた PDC パーカッションビットはレアメタルの W と Co の使用量の削減にも寄与できる。今後とも、PDC パーカッションビットの一層の性能向上を目指して研究開発に取り組んでいきたいと考えている。

References

- 1) H. Karasawa, K. Suzuki and K. Takahashi: Journal of MMIJ, **127** (2011), 682-688.
- 2) F. Bellin, A. Dourfaye, W. King and M. Thigpen: World Oil, Vol. **231** No.9 (2010), 41-46.
- 3) R. Lord: World Oil, Vol. **227** No.11 (2006), 71-80.
- 4) P. Laursen, C. Reinsvold, B. Salesky, S. Steinke and B. Campbell: International Symposium on Geothermal Energy (1988), pp.189-196.
- 5) H. Karasawa, K. Suzuki and K. Takahashi: Journal of MMIJ, **125** (2009), 13-20.
- 6) H. Karasawa, K. Suzuki and K. Takahashi: Journal of MMIJ, **127** (2011), 39-45.
- 7) S. Okubo: Personal Communication, 2012/2/22.
- 8) K. Fukui, H. Abe, M. Koizumi, H. Tomosada and S. Okubo: Journal of MMIJ, **123** (2007), 152-157.
- 9) Y. Nakano, A. Shibata, K. Kuraoka, D. Imamura and S. Ohno: 45th Proc. Japan National Conference on Geotechnical Engineering (Matsuyama, 2010), pp.25-26.
- 10) H. Karasawa, K. Suzuki and K. Takahashi: Journal of MMIJ, **128** (2012), 620-625.
- 11) S. Okubo, A. Ota, M. Akiyama, K. Fukui and Y. Nishimatsu: Journal of MMIJ, **113** (1997), 325-332.
- 12) R. Teale: Int. J. Rock Mech. Mining Sci., **2** (1965), 57-73.
- 13) P.L. Moore: *Drilling Practices Manual*, (PennWell Publishing Company, 1986), pp.19.