

PDCパーカッションビットの掘削性能と PDCチップの岩石貫入特性

宮崎 晋行^{1*}・大野 哲二¹・唐澤 廣和¹・高倉 伸一¹・Eko Akhmadi²

¹産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門（〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1）

²三菱マテリアル株式会社 中央研究所（〒311-0102 茨城県那珂市向山1002-14）

*E-mail: miyazaki-kuniyuki@aist.go.jp

2種類のPDCパーカッションビットを用いて硬質な花崗岩のパーカッション掘削試験を行い、その耐久性を評価した。PDCパーカッションビットの掘削長の増加に伴う掘削速度の低下やチップの摩耗は、超硬合金パーカッションビットと比較して、非常に小さかった。また、単一のチップの岩石に対する貫入特性を調べるため、チップの静的貫入試験を行った。これにより、実験的に取得したPDCパーカッションビットの掘削速度とPDCチップの貫入特性との間に、一定の相関性を見出すことができた。

Key Words : PDC (polycrystalline diamond compact), percussion, bit, drilling, penetration

1. はじめに

多結晶ダイヤモンド焼結体（Polycrystalline Diamond Compact, 以下、PDCと表記する）は、超硬合金（以下、WC-Coと表記する）よりも、耐摩耗性に優れていることが知られている。その特性から、打撃によって岩盤を掘削するパーカッションビットのチップ材として実用化されつつある。通常、パーカッション（打撃）掘削は、ロータリ（回転）掘削よりも、掘削速度の点で優れているものの、ロッドを伝播する打撃エネルギーの減衰¹⁾のため、掘削長は最大150 m程度²⁾である。この制約のため、パーカッション掘削は、主に、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利用されることが多い。

本研究では、2種類のPDCパーカッションビットと1種類のWC-Coパーカッションビットの掘削性能を実験的に評価するため、硬質な花崗岩を用いてパーカッション掘削試験を行い、掘削速度やチップの摩耗量、耐久性などの観点から、ビットの掘削性能を評価した。また、単一のチップを岩石に対して貫入させる静的貫入試験を行い、チップや岩石の種類による貫入特性の違いを調べた。パーカッション掘削試験においては、ビット先端のチップが岩石に貫入することにより、岩石が破碎され、削孔が進むことから、チップの貫入試験は、パーカッション掘

削試験の要素試験と位置付けられる。そこで、貫入試験により取得したチップの貫入特性と、パーカッション掘削試験により取得したビットの掘削速度との相関性について考察した。

2. パーカッション掘削試験

(1) 試験の位置付け

パーカッション掘削では、岩石の破壊は主として打撃エネルギーによって起こり、回転力に起因する仕事は小さい。これは、ビット先端のチップが岩石中に貫入された直後、反力によってビット全体が浮き上がり、チップが孔底から離れることで、ビットに対してトルクが作用しないためと考えられる。このようなパーカッション掘削であっても、掘削長が増大するとロッドを伝播する打撃エネルギーの減衰は大きくなり、ビットに到達する打撃エネルギーは減少する。この場合、岩石の破壊は、打撃エネルギーと回転エネルギーの両方によって起こると考えられる。本章で述べる掘削試験では、後述するように、打撃エネルギーと回転エネルギーとがおおよそ等しい。

(2) 試験方法と試験条件

本研究では2種類のPDCパーカッションビットAとB、および、比較のためWC-Coパーカッションビットを掘削

試験に供した．3つのパーカッションビットの寸法・形状はほぼ同じである．図-1に3つのパーカッションビットに取り付けられたチップの断面図を示す．チップはボタンタイプであり，根元の直径は11 mmで，チップ先端の円弧の半径は，チップごとにわずかに異なっている．PDCパーカッションビットAの上面図を図-2に示す．ビットのフェース部には3個，ゲージ部には5個，計8個のPDCチップが取り付けられている．PDCチップの断面模式図を図-3に示す．チップの表面は多結晶ダイヤモンド層で覆われており，その内部は図に示すように多層構造となっている．WC-Co基体から最外層である多結晶ダイヤモンド層に向かって，多結晶ダイヤモンドの含有量が段階的に増加していく中間層が存在している．

岩石は，硬質で研磨性の高い花崗岩を用いた．掘削長約47 mまでは沢入花崗岩（一軸圧縮強さ203 MPa（平均値））を用い，それ以降は滝根花崗岩（一軸圧縮強さ約253 MPa（参考値））を用いた．

掘削条件は，ビット回転数75 rpm，ビット荷重約6.5 kN，掘削流体（清水）流量60 L/min，パーカッションドリルの入口油圧約15.3 MPaとした．パーカッションドリルの

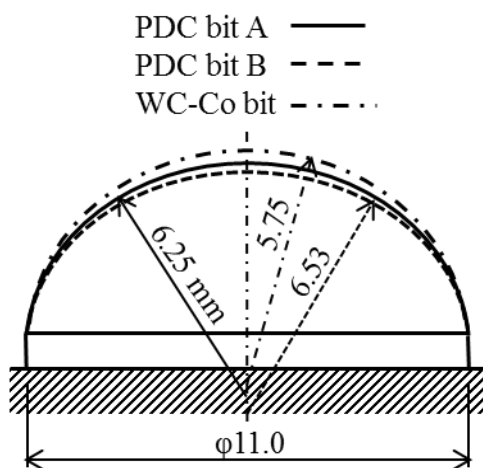


図-1 各ビットに取り付けられたチップの断面図

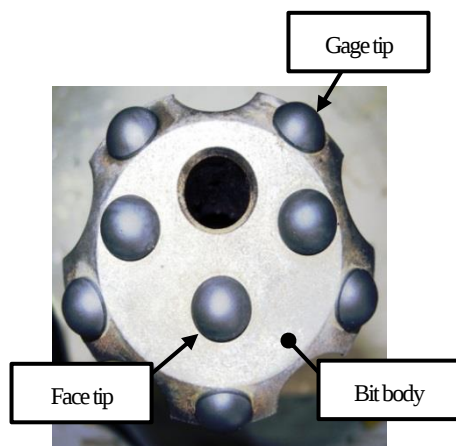


図-2 ビットの上面図

入口油圧をほぼ一定にすることによって，単位時間当たりの打撃エネルギーをほぼ一定に保つことができる．掘削試験中は，トルクや変位（掘削距離）などを測定した．また，チップ摩耗量を評価するため，掘削長さmごとにチップ高さを測定した．試験結果より算出された掘削試験中の打撃エネルギーと回転エネルギーは，それぞれ平均68 kN・m/minと71 kN・m/minであった．

(3) 試験結果

掘削速度と掘削長との関係を図-4に示す．まず，PDCパーカッションビットAの結果について述べる．沢入花崗岩の掘削中，掘削長約47 mまでは，ばらつきが大きいものの，掘削速度は減少傾向を示した．その後，滝根花崗岩の掘削中には，掘削速度はほとんど変化しなかった．沢入花崗岩を掘削中，掘削長31 mから35 mまで，および，42 mから44 mまでの区間において，掘削速度がやや大きい．試験に供した全ての沢入花崗岩ブロックからコアを採取し，一軸圧縮試験を行ったところ，上記の2区間の掘削に供した岩石ブロックの一軸圧縮強さは，他に比べて低いことがわかった．滝根花崗岩を掘削中，掘削長83 mから88 mまでの区間において，掘削速度がやや大きい．滝根花崗岩ブロックから採取したコアの一軸圧縮試験は未だ実施していないが，沢入花崗岩の場合と同様，この

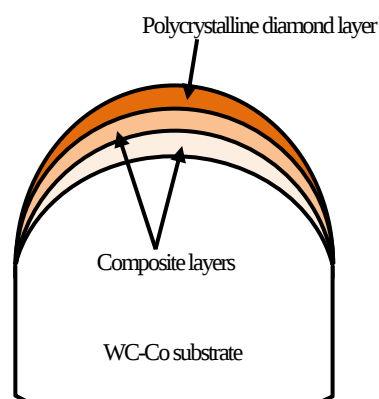


図-3 PDC チップの断面図

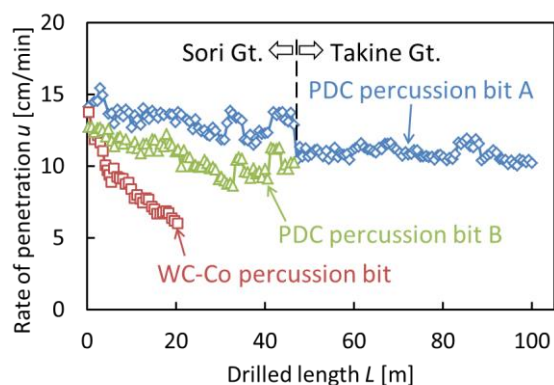


図-4 掘削速度と掘削長との関係

区間の掘削に供した岩石ブロックの一軸圧縮強さが他に比べて低かったことが推測される。PDCパーカッションビットAは、掘削長約100 mに達してもビットライフには至らなかった。次に、PDCパーカッションビットBの結果について述べる。沢入花崗岩のみを用い、掘削長約47 mまで掘削したが、この時点でビットライフには至っていなかった。PDCパーカッションビットAと同様、掘削開始以降、掘削速度はわずかに減少した。また、PDCパーカッションビットAとBの寸法・形状は、図-1に示したようにチップ先端の形状がわずかに異なることを除いては、ほぼ同じであったが、掘削速度は、PDCパーカッションビットAよりもBの方が約3 cm/min小さかった。一方、WC-Coパーカッションビットについては、掘削開始以降、掘削速度の減少は急であり、掘削長約21 mでビットライフに至った。以上から、PDCパーカッションビットはWC-Coパーカッションビットよりも、耐久性に関して非常に優れていることがわかった。

トルクと掘削長の関係を図-5に示す。また、ゲージチップのハイトロスと掘削長との関係を図-6に示す。トルクとハイトロスは、掘削が進むにつれ増加するが、その傾きはPDCパーカッションビットの方がWC-Coパーカッションビットよりも緩やかである。WC-Coパーカッションビットのトルクは、掘削長約17 m以降において急増している。これは、ゲージロスがビット本体にまで及んだ

ためである。また、PDCパーカッションビットAとBの間で、トルクおよびハイトロスの差は非常に小さいことがわかる。PDCパーカッションビットAの場合には、掘削長約47 m以降、滝根花崗岩を用いた掘削試験中において、ハイトロスが増加した。

掘削体積比エネルギーと掘削長との関係を図-7に示す。図には、岩石ブロックから採取したコアを用いて求めた一軸圧縮強さも示した。但し、滝根花崗岩の一軸圧縮強さとしては、参考値である253 MPaを用いた。掘削が進むにつれ、2つのPDCパーカッションビットの掘削体積比エネルギーは徐々に増加し、WC-Coパーカッションビットに比べその傾きは緩やかであった。PDCパーカッションビットAの結果について見ると、掘削体積比エネルギーは一軸圧縮強度の1.5倍から2倍程度であった。

以上をまとめると、PDCパーカッションビットはWC-Coパーカッションビットに比べ、掘削速度の低下が小さく、トルクの増加が小さく、チップの摩耗が小さく、よって効率的な掘削が可能となっている。

3. チップの静的貫入試験

(1) 試験方法と試験条件

チップの静的貫入試験に供したチップは、パーカッション掘削試験に使用したPDCパーカッションビットAとBおよびWC-Coパーカッションビットに取り付けられているチップであり、それぞれPDCチップAとBおよびWC-Coチップと表記することにする。試験時の写真を図-8に示す。载荷装置として、30 tf 万能試験機を使用した。単一のチップをロードセルに取り付けたジグで固定し、30 cm角の岩石ブロックの表面に対して垂直に貫入させ、このときの荷重（貫入抵抗）と変位（貫入量）を計測した。岩石は、来待砂岩、白浜砂岩、江持安山岩、三城目安山岩、稲田花崗岩、沢入花崗岩、本小松安山岩の7種類とした。

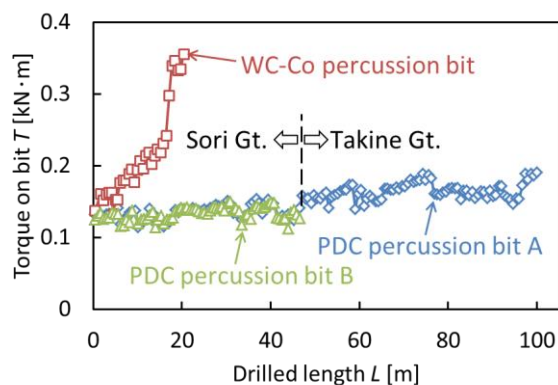


図-5 トルクと掘削長との関係

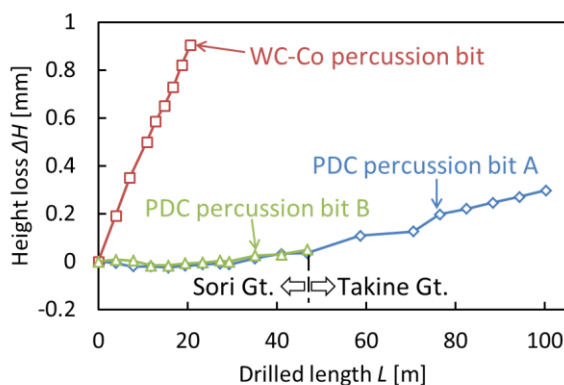


図-6 ゲージチップのハイトロスと掘削長との関係

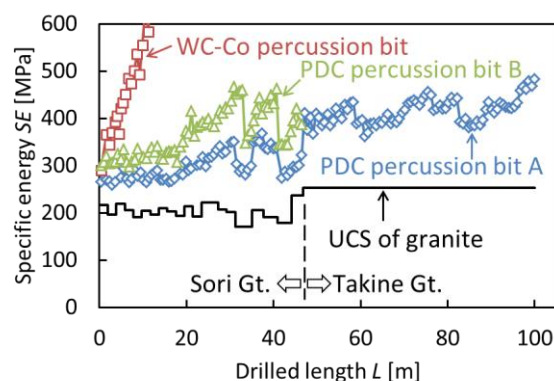


図-7 掘削体積比エネルギーと掘削長との関係

(2) 試験結果

a) 花崗岩を除く岩石での試験結果

三城目安山岩に対して、PDCチップAとBおよびWC-Coチップを貫入したときに得られる貫入抵抗曲線を、図-9に示す。貫入抵抗曲線は、貫入開始直後において、若干下に凸の形状を示すが、それ以降はほぼ直線となる。図示した例では、荷重75 kNから80 kN程度まで载荷した後、除荷を始めた。除荷時の曲線は、载荷時よりも急な傾きを示し、図示した例では、1 mmから1.5 mm程度の残留変位が見られる。

岩石やチップの種類による貫入特性の違いを調べるため、貫入量1 mmにおける接線の傾きを求めた。但し、本小松安山岩の場合は、貫入量0.5 mmにおける接線の傾きを求めた。貫入抵抗曲線の傾きと、岩石の一軸圧縮試験より求めた一軸圧縮強さおよび50%接線ヤング率との関係を、それぞれ図-10および図-11に示す。図から、岩石の一軸圧縮強さやヤング率が大きいほど、貫入抵抗曲

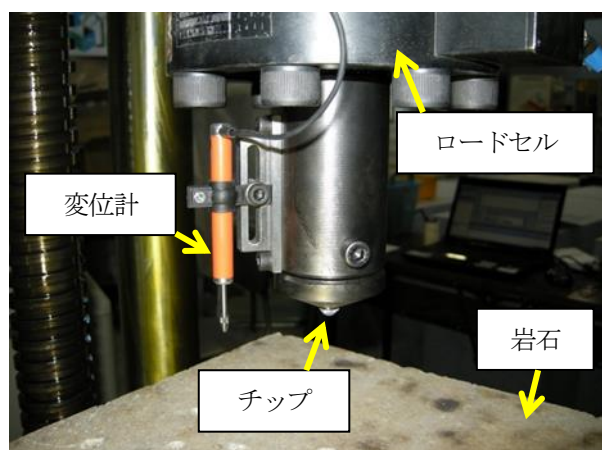


図-8 チップ静的貫入試験の様子

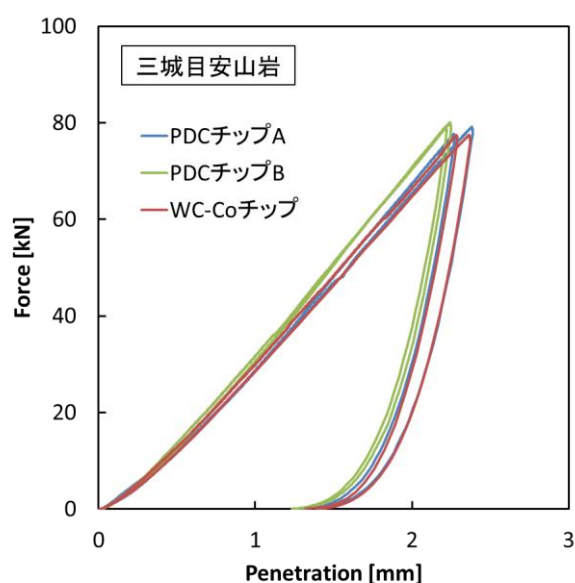


図-9 三城目安山岩に対する貫入抵抗曲線

線の傾きは大きくなり、チップが岩石に貫入し難くなることがわかる。来待砂岩、白浜砂岩、江持安山岩、三城目安山岩の4種類の岩石については、チップによる貫入抵抗曲線の傾きの差は小さい。今回の貫入試験で用いた中で最も硬質な岩石である本小松安山岩の場合には、チップによる貫入抵抗曲線の傾きの差が見られ、PDCチップAが最も貫入し易く、PDCチップBが最も貫入し難いことがわかる。このことは、前章で述べたパーカッション掘削試験において、PDCパーカッションビットAの方がBよりも、掘削速度が大きかった一因であると考えられる。

b) 花崗岩での試験結果

稲田花崗岩に対して、PDCチップAとBおよびWC-Coチ

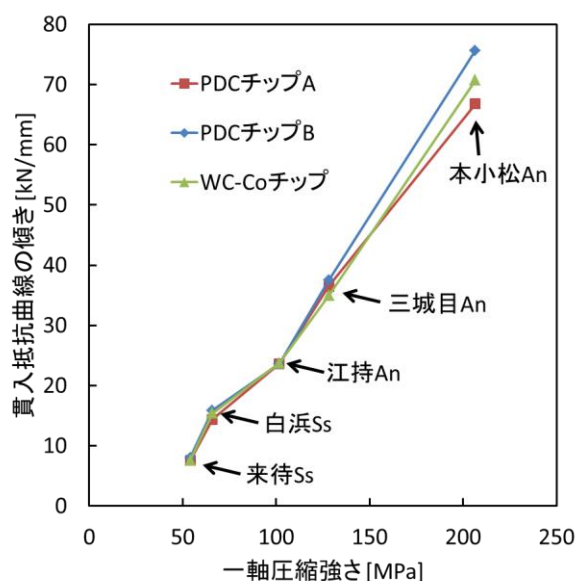


図-10 貫入抵抗曲線の傾きと一軸圧縮強さの関係

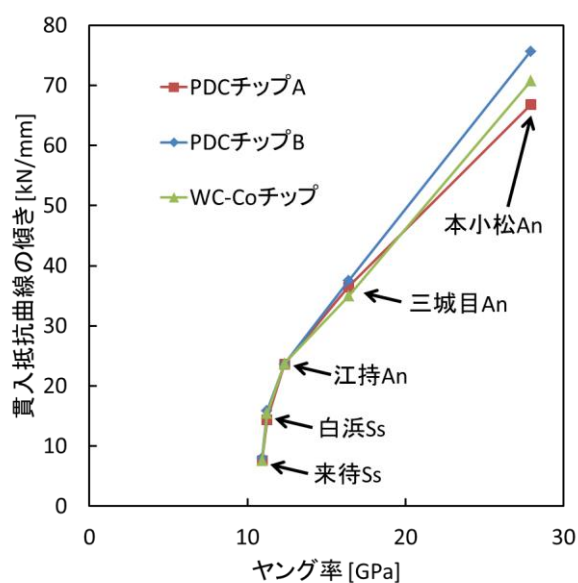


図-11 貫入抵抗曲線の傾きとヤング率の関係

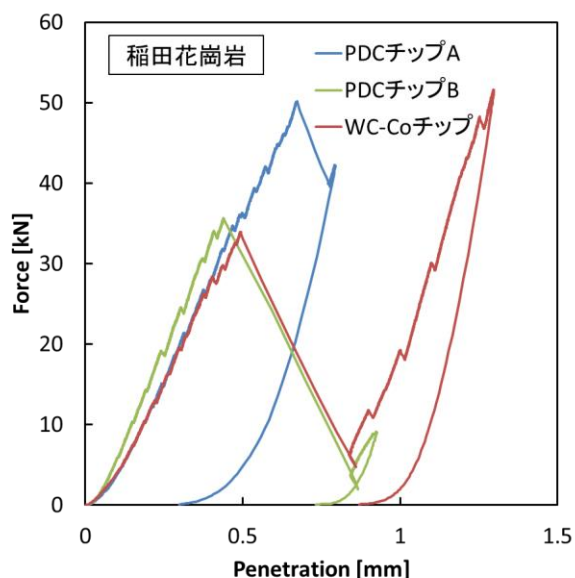


図-12 稲田花崗岩に対する貫入抵抗曲線

チップを貫入したときに得られる貫入抵抗曲線の一例を、図-12に示す。花崗岩に対するチップの貫入試験では、花崗岩のぜい性的な破壊により、貫入抵抗曲線はスムーズにならず、所々で急激な荷重の減少が見られる。そのため、前項のように貫入抵抗曲線の傾きを求め、定量的な比較をすることは難しい。この点は今後の検討課題と考えている。

4. まとめ

本研究では、PDCパーカッションビットAとB、および、WC-Coパーカッションビットを用いて硬質な花崗岩のパーカッション掘削試験を行い、PDCパーカッションビットはWC-Coパーカッションビットに比べて、掘削速度の低下が小さく、効率的な掘削が可能であると同時に、チップの摩耗が小さいため、耐久性にも優れることがわかった。また、単一のチップの岩石に対する貫入特性を調べるため、チップの静的貫入試験を行った。これにより、実験的に取得したPDCパーカッションビットの掘削速度とPDCチップの貫入特性との間に、一定の関係性を見出すことができた。但し、花崗岩に対しては、貫入抵抗曲線の傾きを定量的に求めることは難しく、チップの種類による貫入特性の比較については、今後の課題と考えている。

参考文献

- 1) 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*, 123(4,5), pp. 152-157, 2007.
- 2) 唐澤廣和, 鈴木宏治, 高橋幸司, *Journal of MMIJ*, 127(12), pp. 682-688, 2011.

謝辞: 三菱マテリアル株式会社 桜沢稚晃 氏ならびに松尾俊彦氏には、ビットの作製や分析などの面で多大なるご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

DRILLING PERFORMANCE OF PDC PERCUSSION BIT AND PENETRATION PROPERTY OF PDC TIP

Kuniyuki MIYAZAKI, Tetsuji OHNO, Hirokazu KARASAWA, Shinichi TAKAKURA and Eko AKHMADI

Percussion drilling test was conducted using PDC (polycrystalline diamond compact) percussion bit and Sori and Takine granite to evaluate the drilling performance. The results indicated that the PDC percussion bit was superior to the WC-Co (tungsten carbide-cobalt) percussion bit in terms of rate of penetration and durability. Static penetration test was conducted using PDC tip and 7 types of rock including sandstone, andesite and granite. The force-penetration curve depended on the type of rock and tip. The results of penetration test present is qualitatively consistent with the results of percussion drilling test.