

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01867

研究課題名（和文）ロータリーパーカッション掘削の機構解明と数値シミュレータの高精度化

研究課題名（英文）Mechanism elucidation of rotary percussive rock drilling and improvement of its numerical simulator with high accuracy

研究代表者

羽柴 公博 (Hashiba, Kimihiro)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：60456142

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、岩盤のロータリーパーカッション掘削の機構解明のため、ボタンビット用と1チップビット用の試験装置を新たに開発した。これらの装置による試験により、ロッド中の応力波伝播、連続打撃中のさく岩機の挙動やボタンビットによる岩盤の衝撃破壊、個々のボタンチップの貫入の機構を明らかにするとともに、その結果をもとに荷重-貫入量曲線のモデル化を行った。さらに、3次元数値シミュレーションによりビットの貫入過程を再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

岩盤のロータリーパーカッション掘削は、他の掘削機械には見られない高速かつ複雑な機構を持つため、機構の解明やモデルの構築は十分にはなされていなかった。本研究では、新たに開発した装置により、高速な連続打撃中の荷重-貫入量曲線を精度良く求めることに世界で初めて成功するとともに、個々のボタンチップの貫入の機構を明らかにした。これらの結果をもとに構築したモデルや数値シミュレーションは、今後のロータリーパーカッション掘削の高度化に大きく寄与する。

研究成果の概要（英文）：In this study, to clarify the mechanism of rotary percussive rock drilling, new test apparatuses were developed with a button bit and single button tips. The tests with these apparatuses revealed the stress wave propagation in rods, the behavior of a rock drill and the dynamic rock failure by the button bit during consecutive percussions, and the penetration of button tips into rock, which have led to the modeling of force-penetration curves of the bits. In addition, the penetration process of the bits into rock was realized by three-dimensional numerical simulation.

研究分野：地球・資源システム工学

キーワード：ロータリーパーカッション掘削 打撃穿孔 さく岩機 数値シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地下深部の探査や開発,科学的調査において,ボーリングによる速く正確で効率的な岩盤掘削技術が求められている.打撃と回転により岩盤を掘削するロータリーパーカッション掘削では,図1のように,さく岩機内部のピストンが油圧で往復運動し,シャンクロッドに1秒間あたり50回前後の打撃(パーカッション)が加えられる.この打撃によって応力波が発生し,ロッド中を高速に伝播していく(約5 km/s).応力波はロッドの連結部で減衰や反射をした後に先端のビットに到達し,ビットに植え込まれた多数の半球状のボタンチップが岩盤に貫入する.なお,1打撃ごとに岩盤の破壊していない部分にチップを貫入させるために,ロッドからビットまでを常に回転(ロータリー)させる.掘削中は,さく岩機から岩盤までの系全体が自励振動し,掘削速度や掘削効率,直進精度は投入する打撃エネルギーや推力だけでなく,系全体の振動特性,応力波の伝播特性,ボタンチップの形状や配置,岩盤の力学特性,掘削流体(フラッシング)の流速や排出効率などの影響を受ける.このように他の掘削機械には見られない高速かつ複雑な機構を持ち,岩盤工学と機械工学の多面的なアプローチが必要なため,機構の解明やモデルの構築は十分にはなされていない.

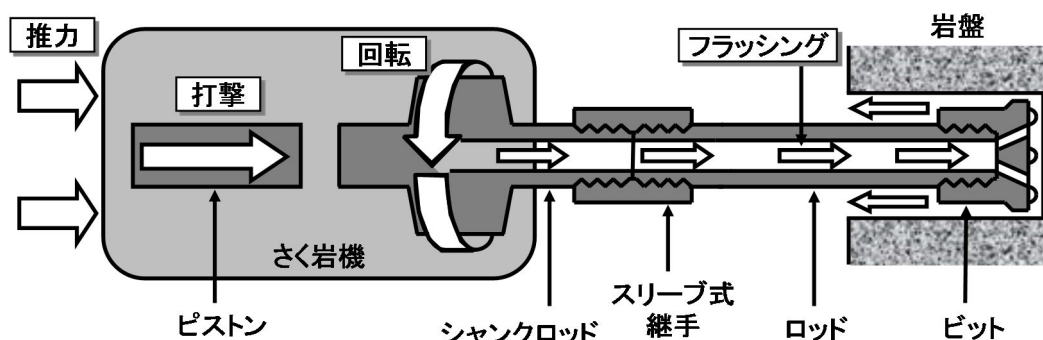


図1 ロータリーパーカッション掘削の模式図

### 2. 研究の目的

ロータリーパーカッション掘削の高度化においては「さく岩機本体の挙動」「応力波の高速伝播」「ビットによる岩盤の衝撃破壊」という三つの主要機構の性能向上と,それらの複合的な相互作用の把握が必要とされる.本研究では,研究開発が遅れていた「応力波の高速伝播」と「ビットによる岩盤の衝撃破壊」の機構解明とモデル化を通して,ロータリーパーカッション掘削の高度化を図った.

### 3. 研究の方法

(1) 「応力波の高速伝播機構」と「ビットによる岩盤の衝撃破壊機構」を解明するための新しい試験装置を,さく岩機メーカーの協力のもとで開発した.この装置は,ロータリーパーカッション掘削を行うためのさく岩機,さく岩機に推力を加えるための油圧装置とガイドシェル,複数のロッドとロッド継ぎ手,複数のボタンチップが植え込まれたビット(ボタンビット),岩石ブロック,および,それらを載せるための架台などで構成される.通常さく岩機では打撃と回転をロッドとビットに連続的に与えるが,これを打撃と回転をそれぞれ1回ごとに与えるように改造した.

(2) この試験装置を用いて,ボタンビットを岩石ブロックに連続的に高速で貫入させる試験(連続打撃試験)を,種々の試験条件のもとで実施した.その結果をもとに,ビット先端に加わる荷重とビットの岩石への貫入量の関係(荷重-貫入量曲線)をモデル化した.さらに,ボタンビットの岩石への一打撃試験も実施し,連続打撃試験の結果と比較することで,実際の穿孔過程の解明において重要な,荷重-貫入量曲線におよぼす回転の影響を明らかにした.

(3) 1つのボタンチップが植え込まれたビット(1チップビット)を用いて静的貫入試験と衝撃貫入試験を実施した.静的貫入試験においては,種々の直径の1チップビットを単独で貫入させた場合の荷重-貫入量曲線を取得するだけでなく,貫入によってできた孔に隣接させて貫入させることで,孔間での亀裂の発生やその荷重-貫入量曲線への影響についても調べた.衝撃貫入試験では,種々の直径の1チップビットを用いた試験装置を新たに製作し,荷重-貫入量曲線におよぼすチップ径の影響を明らかにした.

(4) ボタンビットの連続打撃試験や一打撃試験,1チップビットの衝撃貫入試験や静的貫入試験を再現するための数値シミュレーションについて検討した.

#### 4. 研究成果

(1) 本研究で開発した試験装置の模式図を図2に示す。この装置による試験結果を分析することで、ロッド中の応力波の伝播特性、継ぎ手を透過する際の減衰特性、反射波のエネルギーを吸収するダンパーの特性、さく岩機本体の挙動などを把握することが可能となった。さらに、連続打撃試験を行うことで、荷重 - 貫入量曲線やそのばらつき、穿孔速度におよぼす推力、ロッド本数、ダンパー圧などの影響を把握することが可能となった。

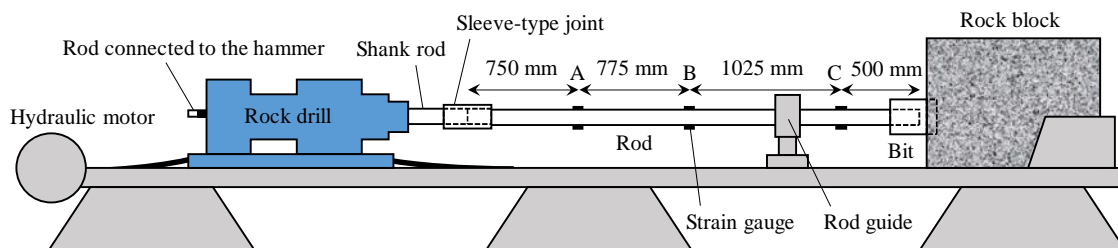


図2 開発した試験装置の模式図

(2) 開発した試験装置により、これまでに得られていない条件下での応力波の伝播特性や減衰特性に関する高精度なデータを取得することに成功した。また、歪ゲージによるロッド応力の測定において、さく岩機からの入射波とビット先端からの反射波が重ならないようにデータを取得することで、これまでよりも精度良く荷重 - 貫入量曲線を求めることができるようになった。図3には、連続打撃試験で求められた荷重 - 貫入量曲線を示す。なおここでは、1秒間に得られた34打撃分のうち、3打撃間隔で12打撃分の結果を順番に示した。高速な連続打撃中に、荷重 - 貫入量曲線がこのような精度良く得られたのは世界で初めてであった。荷重 - 貫入量曲線には小さな振動が見られたが、図中に赤で示したように、載荷過程と除荷過程は次式でモデル化することができた。ここで、 $F$ は荷重、 $u$ は貫入量、 $u_m$ と $u_f$ はそれぞれ貫入量の最大値と最終値である。なお、各図の左上の括弧内に最小二乗法によって求められた定数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ の値を示した。

$$\text{載荷過程： } F = au^b \quad (1)$$

$$\text{除荷過程： } F = au_m^b \left( \frac{u - u_f}{u_m - u_f} \right)^c \quad (2)$$

連続打撃試験と一打撃試験での荷重 - 貫入量曲線を比較したところ、ビットの岩石への接触度合い（着岩性）を表す $b$ の値が連続打撃試験の方が大きいことがわかった。このことから、実際の穿孔中は、ビットの貫入によってできた孔底の凹凸が回転によって剥ぎ取られていることが考えられた。

(3) 1チップビットの静的貫入試験においては、直径8 mm、12 mm、15 mmのそれぞれのボタンチップを、間隔を変えながら隣接して貫入させた。その結果から、亀裂が連結して貫入量が大きくなる最適な間隔を見出した。1チップビットの動的貫入試験においては、直径8 mm、10 mm、12 mm、14 mmのそれぞれのボタンチップを先端に植え込んだロッドを製作した。このロッドを、ボタンチップを下にした状態で岩石ブロックの上に立て、ロッドの反対側の端面をハンマーで打撃することでボタンチップを貫入させた。(2)と同様の方法で、ロッドに貼った歪ゲージによる測定結果から荷重 - 貫入量曲線を求め、その形状を明らかにするとともに、荷重 - 貫入量曲線におよぼすボタンチップの直径の影響を明らかにした。

(4) ビットの岩石への貫入挙動を再現するための数値シミュレーション手法としては、岩石の大変形や破壊を再現するのに適していると考えられた粒子法と個別要素法を用いた。いずれの手法においても、ビットと岩石を3次元でモデル化し、岩石の物性値は強度試験結果をもとに設定した。試験で取得することが困難なシミュレーションパラメータについては、適当な範囲内で変化させながら繰り返し計算を行って最適値を探った。その結果、ビットが岩石へ貫入していく過程や、その結果として得られる荷重 - 貫入量曲線を高い精度で再現することに成功した。

(5) 本研究で得られた試験結果と構築したシミュレーション手法、さらにはそれらの基礎となる理論的検討の結果をとりまとめた。これらの成果は専門雑誌や学会で発表した。

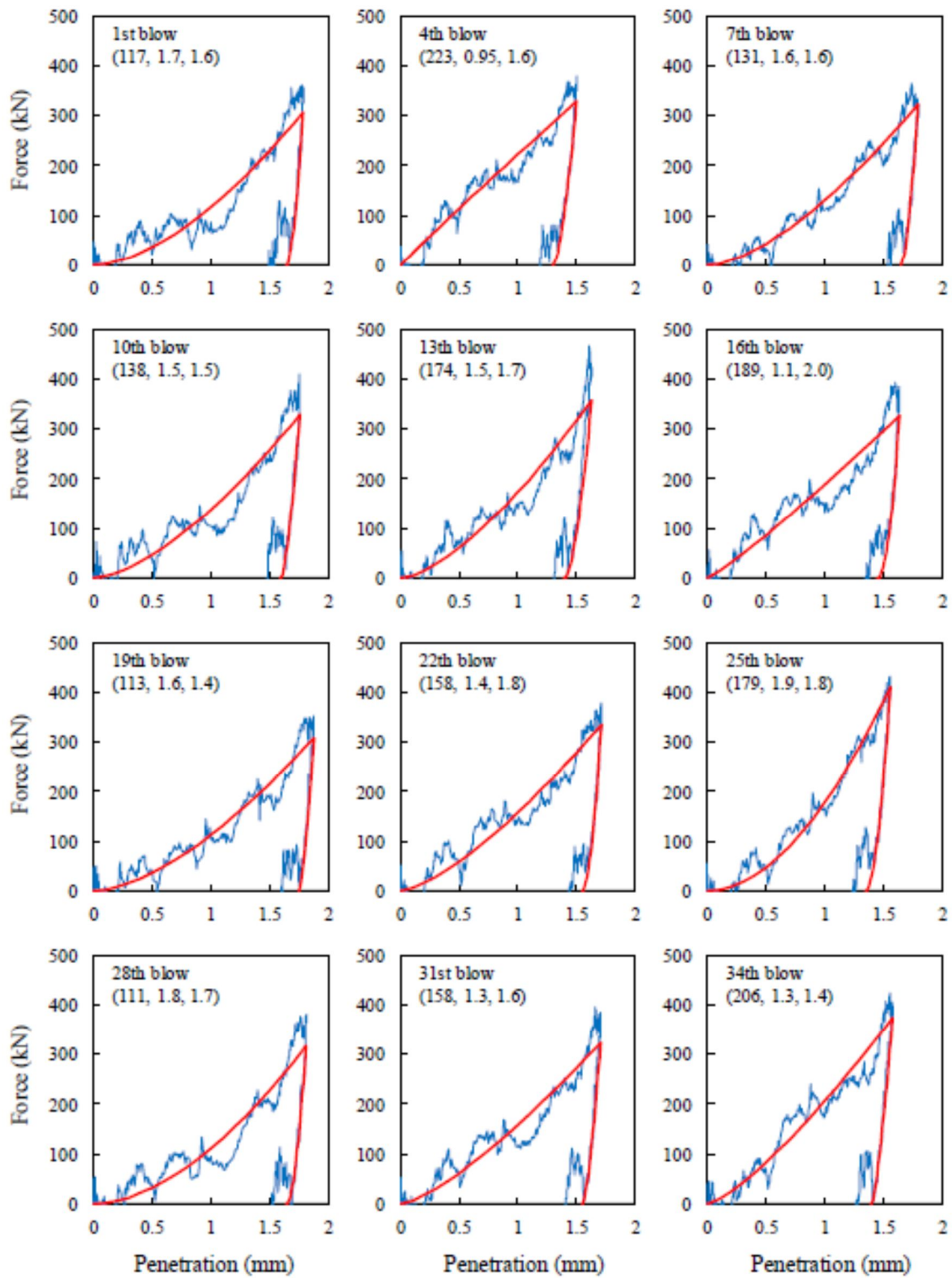


図3 連続打撃試験で得られた荷重 - 貫入量曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 羽柴公博, 福井勝則	4. 巻 72
2. 論文標題 ボタンチップの岩石への静的貫入特性に及ぼすチップ径の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 369 ~ 375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.72.369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hashiba K., Fukui K.	4. 巻 38
2. 論文標題 Review of theoretical, experimental, and numerical studies on rotary percussive rock drilling	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Mining, Reclamation and Environment	6. 最初と最後の頁 167 ~ 191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17480930.2023.2276572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 羽柴公博, 福井勝則	4. 巻 -
2. 論文標題 さく岩機用ビットの岩盤への貫入特性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of MMIJ	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 樋山太郎, 羽柴公博, 福井勝則, 松田年雄
2. 発表標題 打撃式さく岩機を用いたボタンビットの衝撃貫入試験に関する検討
3. 学会等名 資源・素材学会2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉原勇斗, 羽柴公博, 福井勝則, 松田年雄
2. 発表標題 油圧さく岩機を用いた打撃穿孔試験に関する検討
3. 学会等名 資源・素材学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 徐曉晟, 羽柴公博, 福井勝則
2. 発表標題 ボタンチップの岩石への貫入挙動の数値シミュレーション
3. 学会等名 資源・素材2023 (松山)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jiacheng Song, Kimihiro Hashiba, Katsunori Fukui
2. 発表標題 Edge chipping test with rock using a single button bit
3. 学会等名 資源・素材学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	福井 勝則  (Fukui Katsunori)  (70251361)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授   (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------