

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14521

研究課題名(和文) トップハンマードリリングにおける方向制御

研究課題名(英文) Directional control of top hammer drilling

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) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トップハンマードリリングにおけるビットの荷重と貫入量の関係をもデル化し、さく岩機本体、ピストン、ロッド、ロッド継手のモデルと統合することで、トップハンマードリリングの高精度シミュレータを構築した。このシミュレータにより、トップハンマードリリングにおける種々の穿孔条件の影響を明らかにした。さらに、トップハンマードリリングの方向制御において重要な、ビット先端のボタンチップの形状や配置の影響を把握するための室内試験法について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the relation between force and penetration of a bit during top hammer drilling was modeled, and then a high-precision simulator for top hammer drilling was constructed by combining the proposed model and the models for a drill body, piston, rods, and rod joints. The effects of various drilling conditions on the drilling process were clarified using this simulator. In addition, a laboratory test method for understanding the effects of shape and location of button tips on the bit was examined, which is significant for the directional control of top hammer drilling.

研究分野：地球・資源システム工学

キーワード：トップハンマードリリング 打撃穿孔 さく岩機 ボタンビット

1. 研究開始当初の背景

従来は困難であったシェール層からのガスやオイルの採取を可能とした技術革新として、傾斜掘り(コントロールボーリング)、水圧破碎、マイクロサイズミック(微弱地震による観測)がある。本研究では、このうちの傾斜掘りに着目した。油井やガス井の掘削ではロータリードリリング(回転穿孔)が行われるが、この方式では方向制御が比較的行いやすい。これまでに、傾斜偏距具、マッドモーター、ステアラブルモーター、ロータリーステアラブルシステムなどが開発され、方向制御技術が向上してきた。一方、坑道掘進やトンネル掘削ではパーカッシブドリリング(打撃穿孔)が広く利用されている。ロータリードリリングに比べて硬い岩盤に穿孔できる、エネルギー効率が良い、穿孔速度が速い、という特徴があるが、孔曲りが生じやすく、方向制御どころか、まっすぐに穿孔することすら困難な場合もあった。

研究代表者と研究分担者は、パーカッシブドリリングのうちの、さく岩機によるトップハンマードリリング(孔外で打撃エネルギーを与える方式)に関する研究を行ってきた。具体的には、さく岩機本体の挙動、ロッド中の応力波伝播、ビットの岩石への貫入特性などを、穿孔試験や数値シミュレーションにより明らかにしてきた。本研究では、これらの研究成果をさらに進展させ、これまでに実現していないトップハンマードリリングにおける方向制御について検討した。

2. 研究の目的

トップハンマードリリングで方向制御を行うには、さく岩機本体、ロッド、ロッド継手、ビットなどの開発、および、最適な穿孔条件の設定が必要である。本研究では、このうちの方向制御用ビットの開発とそのビットでの最適な穿孔条件の設定方法について検討した。具体的には、(1)貫入の数値シミュレーションによるチップ配列の検討、(2)トップハンマードリリングの数値シミュレーションによる方向制御方法の検討、(3)穿孔試験による検証、を実施した。ロータリードリリングでは、同一の孔中の任意の地点で、任意の回数だけ、方向を任意に変化させることができる。しかし、トップハンマードリリングでは、現状ではそこまでの高度な制御は難しい。本研究では、ある深度までまっすぐに穿孔した後にビットを交換し、それ以降は一定の方向に穿孔していくことを目標とした。

3. 研究の方法

(1)トップハンマードリリングのシミュレーションモデルをより実機に近いものとし、方向制御のシミュレーションができるようにするための検討を行った。まず、ビット先端の荷重と貫入量の関係(荷重-貫入量曲線)の精密なモデル化に取り組んだ。そのた

め、ボタンビットに打撃を加えて動的に岩石に貫入させる衝撃貫入試験の結果を整理し、種々の大きさのボタンビットで荷重-貫入量曲線を取得した。その際には、研究代表者と研究分担者が過去に開発した計算手法を適用することで、精密な荷重-貫入量曲線の取得を目指した。その結果をもとに、荷重-貫入量曲線をモデル化し、式中の定数の関係を定式化した。また、その荷重-貫入量曲線のモデルを、さく岩機本体、ピストン、ロッド、ビットのモデルと統合し、さく岩機の高精度シミュレータを構築した。

(2)構築したシミュレータにより、さく岩機本体の揺動、ピストンとロッドの衝突による応力波の発生、ロッドとビットでの応力波の伝播、ビットの岩石への貫入、の相互関係を明らかにするとともに、種々の条件下での穿孔過程について検討した。

(3)トップハンマードリリングの方向制御において重要な、ビット先端のボタンチップの形状や配置の影響を把握するための室内試験法について検討した。

4. 研究成果

(1)ビットの岩石への動的貫入をモデル化するため、花崗岩への衝撃貫入試験の結果を整理した。図1に示すように、実験装置はピストン、シャंकロッド、スリーブ式ロッド継手、ロッド、ビットで構成されており、すべて実機に搭載されているものと同じである。実験には超硬合金製ボタンチップが埋め込まれたボタンビットを使用した。実験ではピストンが内蔵された試験機本体に推力を与えてビットを着岩させた後、ピストンでシャंकロッドを打撃し、ビットを貫入させた。一回の実験が終了するごとに、掘り屑の除去、ねじの増し締め、ビットの回転を行った。実験はビットが3回転するまで、すなわち、ビット径によって異なるが約50回程度実施した。

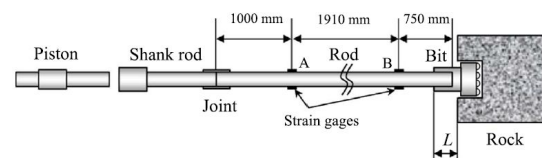


図1 衝撃貫入試験の概略図とボタンビットの写真。

穿孔過程の数値シミュレーションにおいては、ビットが岩石に貫入する際の荷重と貫

入量の関係（荷重 - 貫入量曲線）をモデル化する必要がある。衝撃貫入試験では、これまで、ロッドの2か所に塗付した歪ゲージで応力波を測定し、その結果から一次元波動方程式の逆解析的手法を用いて、貫入抵抗曲線を求める試みがなされてきた。しかしながら、ロッドの2か所での測定結果のわずかな違いや、逆解析でのビットの計算モデルと実機との違いなどの影響で、ビットに加わる荷重を精度良く求めることが困難であった。そこで、岩石ブロックを用いずに打撃だけを行う実験（空打ち試験）の結果と、ビットの精密なモデルによる空打ち試験のシミュレーション結果を用いて、貫入抵抗曲線を精度良く求める方法を、研究代表者と研究分担者が過去の研究で提案した。この方法では、衝撃貫入試験、空打ち試験、空打ち試験のシミュレーション、における応力波からビットに加わる荷重を求め（それぞれ F_1, F_2, F_3 とする）、荷重が小さいうちは $F_1 - F_2$ 、荷重が大きくなると $F_1 - F_3$ を計算した。この方法では、衝撃貫入試験と空打ち試験での、岩石ブロックの有無以外の計算誤差要因を除くことになり、貫入抵抗曲線の精度が飛躍的に向上した。

この方法を適用して得られた貫入抵抗曲線は、従来の数値シミュレーションでよく利用されてきた直線ではなく、図2に示すように载荷過程（貫入量と荷重が増加する過程）と除荷過程（両者が減少する過程）のいずれもが下に凸の曲線であることがわかった。そこで、ボタンビットの貫入抵抗曲線を表すモデルとして、载荷過程と除荷過程のそれぞれで荷重 F が貫入量 u の冪乗に比例する式を提案した。

$$\text{载荷過程: } F = au^b \quad (1)$$

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

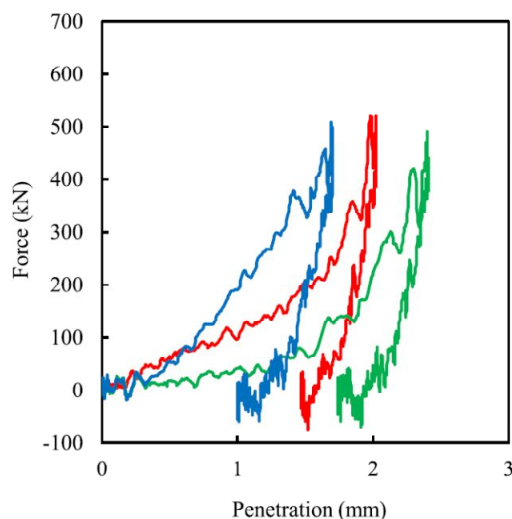


図2 ボタンビットの荷重 - 貫入量曲線。

ここで、 u_m は最大貫入量、 u_f は最終貫入量である。 a, b, c は定数であるが、貫入毎に変化した。そこで、図3から図5に示すように、これらの定数の関係や分布特性を明らかにした。

$$a = \frac{300}{b^2} \quad (3)$$

$$u_f = 1.1u_m - 0.5 \quad (4)$$

さらに、回転による一打撃ごとのビットと岩石の接触位置 u_b の変化も定式化した。

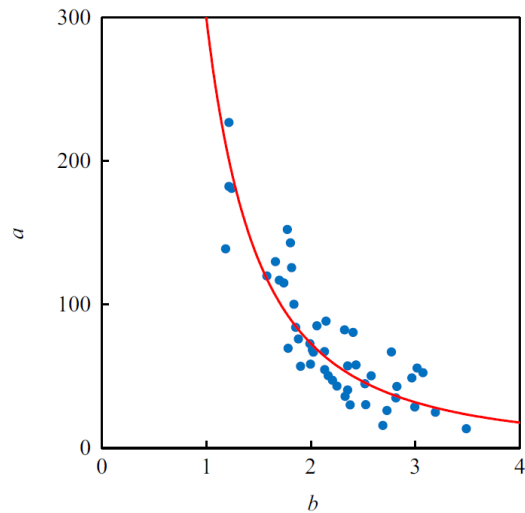


図3 式(1)の a と b の関係。図中の赤線は式(3)による計算結果。

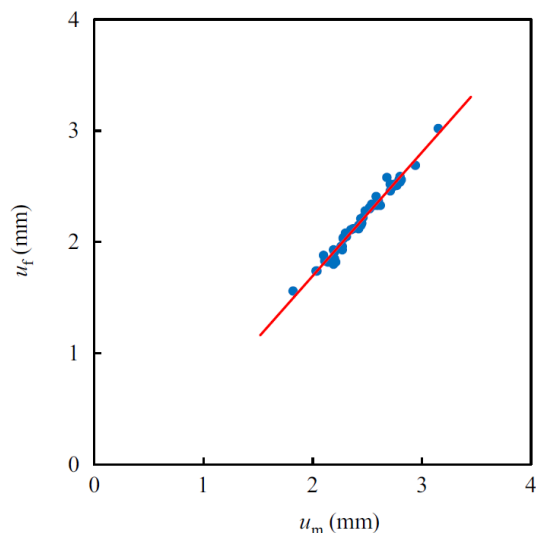


図4 式(2)の u_f と u_m の関係。図中の赤線は式(4)による計算結果。

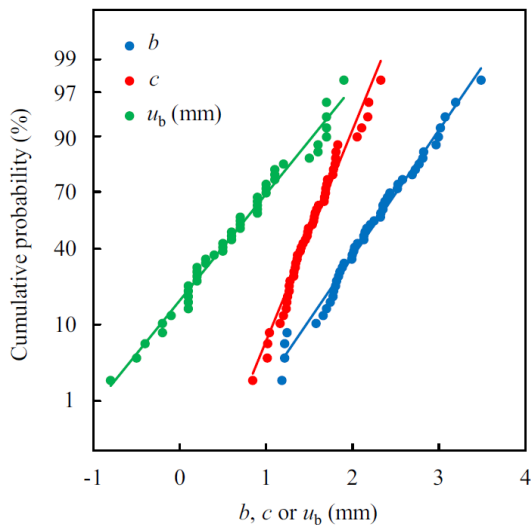


図5 正規確率紙に示した式(2)のbとcおよび回転による一打撃ごとのビットと岩石の接触位置 u_b

(2)本研究では、油圧シリンダーの前室を常時高压に保ち、後室を高低圧で交互に切り換える方式のさく岩機のモデル化を行った。この方式のさく岩機では、まず、後室が高压の状態、受圧面積の違いからピストンに前進方向の力が加わり、ピストンが前進する(加速前進)。ピストンがシャンクロッドを打撃するのとほぼ同時に油圧管路が切り換わり、後室が低圧になることでピストンが後退し始める。ピストンが後退していき(加速後退)、ある位置を過ぎると油圧管路が切り換わり、後室が高压になることでピストンに前進方向の力が加わる(減速後退)。ピストンは後死点に達した後に、前進に転じる(加速前進)。このように、ピストンが自分自身の動きを制御しながら往復運動を繰り返し、シャンクロッドを毎分 2000~4000 回打撃する。なお、油圧管路が切り換わる際の油圧の脈動を抑えたり、油量の不足を補ったりするため、さく岩機には高压側と低圧側にアキュムレーターが搭載されている。

このようなさく岩機の機構を、1D-CAE ソフトを用いて、油圧ポンプ、アキュムレーター、管路抵抗、切換バルブなどの要素を組み合わせることでモデル化した。なお、複雑な管路の圧力損失については、流体解析から求めた圧力と流量の関係(PQ 特性)を組み込んだ。さらに、さく岩機に戻ってきた反射波を吸収するとともに、ビットの着岩性を向上させるために推力を補う機構も併せ持つ油圧ダンパーシステムのモデルも組み込んだ。

このさく岩機本体のモデルと、過去に提案したロッド中の応力波の発生・伝播・減衰のモデル、および、(1)で述べたボタンビットの岩石への動的貫入のモデルを組み合わせ、さく岩機による穿孔過程の全体モデル(高精度シミュレータ)を構築した。さらに、図6に示すように、この高精度シミュレータ

が、対象とした機種で花崗岩を穿孔した場合の挙動を忠実に再現できることを確認した。

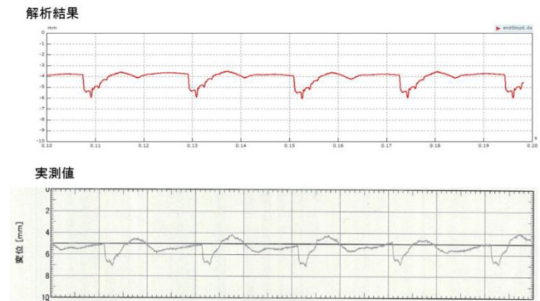


図6 シャンクロッドとさく岩機本体との相対変位(上図:解析結果,下図:実測値)

(3)トップハンマードリリングの方向制御において重要な、ビット先端のボタンチップの形状や配置の影響を把握するための室内試験法について検討した。その結果、1つのボタンチップをある程度の間隔をあけながら岩石表面に繰り返し貫入させ、その時の亀裂の発生や連結を調べることが重要であることがわかった。

(4)本研究では、トップハンマードリリングの方向制御につながる、ビット先端での荷重-貫入量曲線のモデル化と、さく岩機の高精度シミュレータの構築を行った。さらに、これまでほとんど検討されてこなかった、ビット先端のボタンチップの形状や配置の影響を把握するための室内試験法について検討した。本研究で得られたこれらの新たな知見は、トップハンマードリリングの方向制御につながる重要な成果といえる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

K. Hashiba, K. Fukui, Y. Z. Liang, M. Koizumi, T. Matsuda, Modeling of force-penetration curves for a button bit during impact penetration into rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 査読有, 93 巻, 2017, 210-214

DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.01.001

Kimihiko Hashiba, Masahiro Koizumi, Katsunori Fukui, Yingzong Liang, Eiji Hirano, Toshio Matsuda, High-precision simulator for hydraulic percussion rock drills, International Journal of the JSRM, 査読有, 13 巻, 2017, 1-2

DOI: 10.11187/ijjsrm.13.1_1

羽柴公博, 福井勝則, 小泉匡弘, 打撃式油圧さく岩機による穿孔過程, Journal of MMIJ, 査読有, 133 巻, 2017, 223-229

DOI: 10.2473/journalofmmij.133.223

[学会発表](計2件)

安カ川直史, 福井勝則, 羽柴公博, 平野栄司, 小泉匡弘, 油圧打撃式さく岩機によ

るさく孔過程のモデル化と数値計算，資源・素材 2016（盛岡），2016年9月13日～2016年9月15日，岩手大学（岩手県盛岡市）

K. Hashiba, K. Fukui, Y. Z. Liang, M. Koizumi, T. Matsuda, Numerical simulation of percussive rock drilling and its modification in bit penetration, 9th Asian Rock Mechanics Symposium, 2016年10月18日～2016年10月20日, The Stones Hotel（インドネシア共和国バリ州）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽柴 公博（HASHIBA, Kimihiro）
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：60456142

(2) 研究分担者

福井 勝則（FUKUI, Katsunori）
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：70251361