## 衝撃貫入試験におけるボタンビットの貫入特性

## 福井 勝則<sup>1\*</sup>·大久保 誠介<sup>1</sup>·小泉 匡弘<sup>2</sup> 塩田 敦<sup>2</sup>·松田 年雄<sup>2</sup>·福田 秀司<sup>2</sup>

#### <sup>1</sup>東京大学工学系研究科 システム創成学専攻(〒113-8656東京都文京区本郷7-3-1) <sup>2</sup>古河ロックドリル 吉井工場(〒370-2132 群馬県高崎市吉井町吉井1058) \*E-mail: fukui@sys.t.u-tokyo.ac.jp

衝撃貫入試験は、さく岩機やブレーカの挙動を検討する際に必要な基礎データを得るための試験として、 これまで多数の研究が行われている。しかしながら、原位置でのさく孔では岩盤特性の変化により貫入特 性が影響を受けるため、さく岩機に用いられる、ピストン、ビットやロッド形状が貫入特性に与える影響 を調べることは困難であった。そこで、ピストン、ビットやロッドを容易に交換できる、さく岩機とほぼ 同様の機能を持った試験装置を開発した。本研究では、新たに開発した装置に関して述べた後、ロッドに 作用する力から、ビットの岩盤への荷重-貫入量曲線を求める手法に関して検討した結果について述べる。

Key Words : Rock Drill, Force-Penetration Curve, Button Bit, Rod, Impact

### 1. はじめに

衝撃貫入試験は、さく岩機やブレーカの挙動を検討す る際に必要な基礎データを得るための試験として、これ まで多数の研究が行われてきた<sup>1)</sup>. しかしながらその多 くは、一文字やクロスビットに関してであり、現在では 主流となっているボタンビットに関する研究は比較的少 ない. 大久保ら<sup>2</sup>は, 1つのボタンチップによる衝撃およ び静的貫入特性を検討し、衝撃貫入試験の方が静的貫入 試験に比べ、貫入抵抗曲線(荷重-貫入量曲線)の傾き は20%ほど大きいが、その他の特性は両者に差があまり ないことを示した. 大久保ら<sup>3</sup>は, これを受けて実験が 困難な衝撃貫入試験の代わりに静的貫入試験を実施し、 ビット摩耗によるさく孔特性を検討した. 大久保ら<sup>4</sup>は, 亀裂の連結などの複雑な現象を伴うボタンチップの刃物 間隔の影響を調べた. 福井ら<sup>5</sup>は、工場内に設けられた 実験場で、ボタンビットを使用した長尺さく孔実験(連 続打撃実験)を実施し、その際の貫入抵抗曲線を求めた. このようにボタンビットの貫入特性に関する研究はいく つかあるものの、依然として知見は少なく、特にピスト ン、ビット、ロッド形状が貫入特性に及ぼす影響に関す る測定結果は不足しているのが現状である.

本論文では、1)打撃時にビットと岩盤の着岩状態を極 カー定にし、回転によるロッドのねじり応力の影響等を 排除すること、2)異なるピストンとシャンクロッドの組 合せにて容易に試験評価できること、を目的として開発 した、衝撃貫入試験機についてまず述べる.次に貫入抵 抗曲線を求めた結果について述べることにする.その際、 貫入抵抗曲線を推定する手法に関して注目して検討した.

#### 2. 衝撃貫入試験装置および試験方法

実験装置の概略図を図-1に示す.実験装置は、通常の さく岩機とほぼ同じ仕様で、ビットおよびロッドは交換 が可能である.図-1に示すように、ロッドにはシャンク ロッドの前方(歪ゲージA:シャンクロッドとの接合部 から1,000 mm)とビットの手前(歪ゲージB:ビット先 端から785 mm)の2個所(AB間は1,910 mm)に歪ゲー ジを貼り、衝撃貫入試験時のロッド歪を測定し、これか らロッド応力を換算した.なお、事前に静的荷重をロッ ドに加え、歪ゲージのゲージファクターの校正を行った. 歪の経時変化は記録計(日置電機製8826)によりサンプ リング周波数1 MHzで取り込んだ.

さく岩機ではビットを回転させながらさく孔を行う. そのため、実さく孔で貫入抵抗曲線を得るためには、福



図-1 衝撃貫入試験装置の概略図

井ら<sup>9</sup>のように歪ゲージと連結させた導線をロッドに数 十回程度巻きつけて、ロッド応力の測定を行う必要があ る.しかしながら、このような試験では導線が切断され やすいため、今回の衝撃貫入試験時では1打撃終了後、 ビットを手動で所定の角度(14打撃で1回転)に回転さ せることとした.

実験方法としては、次のように行った.

- 1) ピストンにより1打撃の衝撃貫入試験を行う
- 2) 岩石の掘屑を取り除く
- 3) ビット・ロッドを人力で増し締めを行う
- 4) ビットを所定の角度に回転させる
- 5) スラストシリンダによって推力を与える
- 6) 1)^

さく孔条件として、打撃圧に見合うようにスラスト用 シリンダの油圧を調整し、スラスト(推力)を2.5 kNと した. ピストンを駆動させる打撃圧は15 MPaとし、シャ ンクロッドに衝突する際のピストン速度は10.4 m/sであ った. ロッドは長さ3.66 mの丸ロッド(外径39 mm,内 径14.3 mm)で、ビットとのねじ部は呼び径38 mmの台形 ねじである. ボタンビット(呼び径64 mm)には12個の 超硬チップが埋め込まれており、内訳はフェイスチップ

(直径10 mm) が4個, ゲージチップ(直径11 mm) が8 個である. ビットとロッドの締め付けトルクは500 Nm とした.

試料岩石として稲田花崗岩を用い、衝撃貫入試験時に 岩石が動かないようにしっかりと固定した.また、あら かじめ予備的にさく孔を行い、ゲージチップが十分岩石 内に入ってから試験を実施した.試験数は同一条件で42 打撃である.

#### 3. 貫入抵抗曲線の推定方法

貫入抵抗曲線の推定方法については、まず図-1 に示 す歪ゲージBを通過する入射波pと反射波nからビットの 貫入抵抗曲線を求める方法(1点法)を述べるが、詳細 は文献<sup>2,0</sup>を参照されたい.

ロッドおよびビットを同じ長さの要素に分割し,各要素の平均インピーダンス(断面積×ヤング率/弾性波速度)をZ(i)とする.なお、ロッド歪のサンプリング間隔である 1 $\mu$ s間に弾性波が伝搬する距離を,要素長(5.08 mm)とした.各要素の境界での反射率R,透過率Tは次式で表される.

$$R_{p}(i) = \frac{Z(i+1) - Z(i)}{Z(i) + Z(i+1)}$$
(1a)

$$R_n(i) = \frac{Z(i) - Z(i+1)}{Z(i) + Z(i+1)}$$
(1b)

$$T_{p}(i) = \frac{2Z(i+1)}{Z(i) + Z(i+1)}$$
(1c)

$$T_n(i) = \frac{2Z(i)}{Z(i) + Z(i+1)}$$
 (1d)

時刻 t における要素 i での正方向(ビットへの入射) と負方向(ビットからの反射)の弾性波の大きさを力の 単位で表現し、それぞれ p(t, i)、n(t, i)とし、引張を正と する.時刻 t での p と n it、時刻  $t - \Delta t$  での p と n i tって次式で表すことができる.ただし、 $\Delta t$  i 1 要素を 伝搬する弾性波の所要時間である.

$$p(t,i+1) = T_p(i)p(t-\Delta t,i) + R_n(i)n(t-\Delta t,i+1)$$
(2a)

$$n(t,i) = R_p(i)p(t-\Delta t,i) + T_n(i)n(t-\Delta t,i+1)$$
(2b)

両式を変形すると次式となる.

$$p(t,i) = \frac{1}{T_n(i-1)} p(t-\Delta t, i-1) + \frac{R_n(i-1)}{T_n(i-1)} n(t,i-1)$$
(3a)

$$n(t,i) = -\frac{R_p(i-1)}{T_n(i-1)}p(t,i-1) + \frac{1}{T_n(i-1)}n(t+\Delta t,i-1) \quad (3b)$$

ビットの岩石への貫入抵抗曲線はビット最先端の位置 Lでの p, nの経時変化から次式で計算できる.

$$F(t) = -p(t - \Delta t, L) - n(t, L)$$
(4a)

$$u(t) = \frac{1}{Z(L)} \int_{0}^{t} \{-p(t - \Delta t, L) + n(t, L)\} dt$$
 (4b)

ただし, F(t) はビットによる荷重(圧縮を正), u(t) は ビットの岩盤への貫入量である.

歪ゲージはロッドの歪を測定するため、歪にロッドの ヤング率と断面積を掛けるとその位置での力が求まる. すなわち、歪ゲージは貼り付けた位置での力 p + nを測 定(入射波と反射波の混在)していることになるので、  $p \ge n$ が混在した場合には、 $p \ge n$ を区別することはで きない.

異なる 2 点での力からpとnを分離する方法(2 点法) が提案されており、その詳細は文献<sup>n</sup>を参照されたい. 図-1 のA、Bの2点の測定結果から、B点でのpとnに 分離は次のように行うこととなる.インピーダンスが一 定の区間では弾性波が減衰しないと仮定すると次式が成 り立つ<sup>n</sup>.

$$Zv_{B}(t) = -p_{B}(t) + n_{B}(t) = -p_{B}(t-2T) + n_{B}(t-2T) -A\sigma_{B}(t) - A\sigma_{B}(t-2T) + 2A\sigma_{A}(t-T)$$
(5)

ただし、*Z*、*A*、*T*、*v*<sub>B</sub>はそれぞれ、インピーダンス、断面積、AB間の弾性波到達時間、B点での変位速度である。 $\sigma_B(t) \geq \sigma_A(t)$ を測定値とし、t < 2Tの時(弾性波が未到達の時)の $-p_B(t-2T) + n_B(t-2T) = 0$ とすると、 $-p_B(t) + n_B(t)$ が順次求まる。 $p_B(t) + n_B(t) = A\sigma_B(t)$ と合わせると、B点での*p*と*n*が分離できる。

## 4. ビットを自由端とした打撃による検定

#### (1) 弾性波速度

ビットを自由端とした状態でピストンによる打撃(空 打)を行った際の,A点およびB点での応力の経時変化 を図-2に示す.図では、まずA点で正弦波状に圧縮応力 が生じ、約0.4 ms後にB点に応力が伝搬していることが わかる.これを正確に調べるため、時間をずらしてA点 とB点の弾性波の残差2乗和を求めた結果、最小となっ



図-4 ビットとロッド間をばねでモデル化した時のB点での応力

た時間差は0.376 msであった. AB間は1.910 mmである ので, 弾性波速度は5,080 m/sである.

図-2のB点のロッド応力のみ,時間を0.376 ms前にず らしたものを図-3に示す. 図では0.35 msまで、ほぼA、 Bの波形は一致しているが、若干の相違がみられる. こ れに関しては(3)で述べることとする. 0.35 ms以降ではA 点とB点の応力に差が見られるが、これはB点に反射波 が到達したためである.

#### (2) ビットとロッドのねじ部の影響

3点での応力 (MPa)

-100 -200 -300

0.3

0.4

0.5

0.6

ビットとロッドのモデル化を行い、3.で述べた1点法 により、A点での応力を入射波とした際のB点での応力 の計算結果を図-4に示す. 図では, 0.7 ms以降の反射波 が計算結果(緑色の"ばねなし")に比べ実際は16µs 程度遅れており、計算結果(黒色)はあまり一致してい ない.

上記のモデルではビットとロッドのねじ部の影響を考 慮していない. 福井ら<sup>5</sup>で指摘されているように、ねじ 部の剛性が小さいと弾性波に遅れが生じ、貫入抵抗曲線 に影響が現れる可能性がある. そこで、ビットとロッド の間(図-1の0)をばねでモデル化した計算を行うこと とした. ばね定数のみを変化させた計算結果も図-4に示 した.図で、ばね定数を2 GN/mとした赤色の結果では、 0.7 ms付近で緑色の"ばねなし"に比べ,時間遅れを表 現できているが、0.75 ms以降では"ばねなし"と大差が ない. ばね定数を200 MN/mとしたピンク色の結果では, 0.8 msから1.1 msまではある程度,表現しているが,0.73 ms付近の極値がかなり小さくなっており、1.1 ms以降で はばね定数の影響はほとんど見られない. 以上よりねじ 部をばねでモデル化しても時間遅れを表現することは困 難であった.

ねじ部ではおねじとめねじが接触している個所はほん の一部であり、ロッド先端とビット後端は図-1の0'で面 接触していることから、図-5の模式図に示すように、O' でビットにはロッドだけでなく、ビットのネジ部(図-1 の00) が分割要素として隣接していると考えた. この 場合の扱いはエネルギー保存則、接合面での変位速度が 同じであると仮定し、ネジ部の長さを17要素(86.4 mm





図-5ビットとロッドの分割モデルの概念図

1.2

1.3

図-72点法によるpとnを分離した時のB点での応力と変位速度

0.8

時間 (ms)

0.9

1

1.1

0.7

相当)として計算を行った. 図-6に計算結果を示すが, 若干の相違が見られるが, 図-4で見られた時間遅れを表 現できていることがわかった.しかしながら,これを用 いて,3.で示す方法で貫入抵抗曲線を求めることは境界 条件の設定(ねじ部の力の設定)などやや難点がある. そこで,ネジ部の質量が影響して時間遅れが生じている と考え,これをロッドに追加することで簡易的に表現で きるかどうかを検討した.図-6にはロッド長を17要素

(86.4 mm相当)分長くした場合の計算結果を示すが, 分割要素とは若干の相違がみられるものの,測定結果と の差は分割要素とさほど異ならないことがわかった.

以上の結果より、ロッド長を17要素(86.4 mm相当) 分長くしたモデルで貫入抵抗曲線を求めることとした.

#### (3) 2 点法による検討

前節では、A点の応力を入射波として、ビット先端で 自由端反射を行う際のB点の入射波と反射波の混在した 応力の検討を行った.本節では、2点法によって自由端 となったビット先端の応力(実際は0)を推定してみる ことにする.

式(5)により, B点での応力を $p \ge n$ に分離した結果を 図-7に示す. 図-7の縦軸は応力としたので,  $p \ge n$ は断 面積で割った値を,変位速度はヤング率/弾性波速度を 掛けた値を示した. 図では0.4 msに pが到達し,応力お よび変位速度が変化している. 図では、0.74 ms以降に現 れる,  $p \ge n$ の混在を分離できていることがわかるが, p $\ge n$ には、20 – 40 kHzの振動(FFT解析を行った結果, 264, 298, 33.7, 38.1 kHzにピーク)がみられる. 0.4 – 0.6 msの間, nには振幅15 MPaの振動が見られる. 打撃 していない時の雑音状況を調べたところ, 20 – 40 kHzの 雑音はみられておらず,雑音は1MPa以下であったこと から,この振動は雑音によるものではない. 図-4でも微

120 計算結果 80 40 荷重 (kN) 0 -40 -80 41点の移動平均 -120 0 0.5 1 1.5 2 時間 (ms)

図-8ビット荷重の計算結果と移動平均

妙にA点とB点の p がずれており、これが20-40 kHzの 振動の原因である. 20-40 kHz は13-26 cmの弾性波が通 過する時間であり、ピストンあるいはシャンクロッドの 形状の影響で、応力に振動が混在していると考えられる. これが伝搬する間に波動が3次元的になり、n に振動が 見られたと考えられる.

分離したpとnを用い,自由端打撃時のビット荷重の 経時変化を求めた結果を図-8に示す.pとnには20-40 kHzの振動が見られたことによって,ビット先端荷重に も零点を中心として50-100 kN程度の振動が見られてい る.そこで,簡易的に41点(25 kHzに相当)の移動平均 を取った結果を赤線で示したが,振動は40 kN以下に収 まることがわかる.荷重は式(4a)に示すようにpとnがそ のままの形で現れるために振動したが,貫入量はpとn の積分であるので,振動はみられていないことから,移 動平均を取る必要がないことがわかった.

以上の検討により貫入抵抗曲線は、ロッド長を17要素 分長くしたモデルを用い2点法によって求め、荷重のみ 41点の移動平均を取ることによって推定することとした.

#### 5. 貫入抵抗曲線

試験を行った42打撃のうち4打撃の貫入抵抗曲線を 図−9に示す.1打撃目は貫入抵抗曲線の傾きが最も小さ い事例で、12打撃目は傾きが最も大きい事例である.12 打撃目では荷重が作用し始めてからピーク荷重(440 kN)となるまで貫入抵抗曲線はほぼ直線であり、平均 的な傾き(ピーク荷重の30%と、ピーク荷重の割線勾 配)は350 kN/mmである.ピーク荷重を過ぎると、貫入 量の戻りはほとんどなく、荷重は急激に低下している. 荷重が15 kN付近から貫入量の戻りが大きくなり、最終



貫入量は0.97 mmであった. 1打撃目の貫入抵抗曲線はピ ーク荷重(310 kN)となるまでやや下に凸の傾向であり, 平均的な傾きは170 kN/mmと、12打撃目の半分程度であ る. 6打撃目と11打撃目は、1打撃目と12打撃目の中間の 事例として図-9に示したが、貫入抵抗曲線の傾きが大き くなると、ピーク荷重が増加し、最大貫入量および最終 貫入量が小さくなる傾向が見られる. 今回のさく孔では、 2.5 kNの推力によってボタンビットを岩石に押しつけて いるが、孔底は平らな面ではないため、すべてのボタン チップが岩石に接触しているとは限らない. そのため, 貫入抵抗曲線の傾きが小さくなることが考えられる. ま た、前打撃によって孔底に多数の亀裂が入るなどの損傷 を受けた場合に貫入抵抗曲線の傾きが小さくなることが 考えられる.両者を区別することは今回の測定では困難 であるが、両者の影響で各打撃時の貫入抵抗曲線の傾き が170-350 kN/mmの間で変動したと考えることができる. 福井ら<sup>5</sup>は、同じ呼び径の摩耗したボタンビットで貫入 抵抗曲線の傾きを求めており、200-600 kN/mmであった. 今回は新品のビットであることから、福井ら5より貫入 抵抗曲線の傾きが15-40%程度小さい結果となった.

## 6. まとめ

本研究では、ピストン、ビット、ロッド形状に対する 貫入特性の影響を調べるため、ピストン、ビット、ロッ ドを容易に交換が可能な衝撃貫入試験機を開発した.貫 入抵抗曲線を求める際、福井ら<sup>5</sup>では行わなかったビッ トを自由端とした打撃による検定を詳細に行った.その 結果、ビットのねじ部の質量の影響で弾性波の到達時間 に遅れが生じるが、これをロッドの要素として延長する ことによってほぼ時間遅れを解消できることを示した. 次に2点法により、42打撃の貫入抵抗曲線を求めた結果、 貫入抵抗曲線は170-350 kN/mmとなった. ピストン、ロ ッド、ビットの形状の影響に関しては今後の課題となっ たが、ほぼ試験方法に関しては確立したので、これらの 形状によって、貫入抵抗曲線の形状、エネルギー伝達率 (岩石の破砕エネルギー/打撃エネルギー) などの検討 を行っていくつもりである.

#### 参考文献

- 佐々木和郎、山門憲雄、塩原善一:岩石に対するビットの圧入に関する研究、日本鉱業会誌、74[846]、 pp.989-995, 1958.
- 大久保誠介,西松裕一,秋山政雄,辰巳哲:衝撃貫入 試験法の開発と試験結果,資源・素材学会誌, 108[No.2], pp.134-140, 1992.
- 大久保誠介,大田彰則,松田年雄,福井勝則,秋山 政雄:摩耗したさく岩機用ボタンビットによる静的貫 入試験,資源・素材学会誌,113[No.9], pp.663-668, 1997.
- 4) 大久保誠介,福井勝則,大田彰則:刃物間隔を考えた さく岩用ボタンチップの静的貫入試験,資源・素材学 会誌,115[No.9], pp.661-667, 1999.
- 5) 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ボタンビットの貫入特性, 資 源・素材学会誌, 124[No.12], pp.785-793, 2008.
- Lundberg, B.: Microcomputer simulation of stress wave energy transfer to rock in percussive drilling, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, 19(5), pp. 229-239, 1982.
- Karlsson, L. G., Lundberg, B. and Sundin, K. G.: Experimental study of a percussive process for rock fragmentation, *Int. J. Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abtsr.*, 26(1), pp.45-50, 1989.

## FORCE-PENETRATION CURVES WITH A BUTTON BIT IN THE PERCUSSIVE DRILLING

# Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO, Masahiro KOIZUMI, Atsushi SHIOTA, Toshio MATSUDA and Shuji FUKUDA

A force-penetration relationship is considered to be closely related to the deformation and fracture mechanism at the bit-rock interface. In this study, a testing machine in which a piston, a rod or a bit can be easily changed was developed for laboratory impact-penetration test simulating the in-situ percussive drilling. A series of percussive drilling tests with a button bit against Inada granite were carried out to examine and discuss the drilling performace. Stress waves were measured by two strain gauges, and then force-penetration curve of a button bit was calculated by the measured strain/stress wave.