

# 油圧式削岩機のダンピング圧変動を利用した 地山の強度推定に関する研究

塚本 耕治<sup>1</sup>・松田 年雄<sup>2</sup>・進士 正人<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

E-mail: koji.tsukamoto@okumuragumi.jp

<sup>2</sup>非会員 古河ロックドリル (株) 生産本部開発設計部 (〒370-2132 高崎市吉井町吉井1058)

E-mail: to-matsuda@furukawakk.co.jp

<sup>3</sup>正会員 山口大学教授 大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルの工事に用いられるドリルジャンボの油圧式削岩機には、地山からの反発力を油圧であるダンピング圧で吸収するダンパ装置が装備されている。地山の反発力が地山の硬軟の程度によって変化することから、ダンパ装置のダンピング圧には削孔位置の地山の圧縮強さなどの情報が含まれると考えられる。ダンピング圧を利用して削孔中の地山の圧縮強さを把握できれば支保パターンや補助工法の選定に活用できる。このようなことから、圧縮強さが既知である試験体を用いた削孔実験を行い、ダンピング圧の変動である脈動と試験体の圧縮強さとの関係について検討した。その結果、ダンピング圧の脈動振幅は圧縮強さと高い相関があり、地山の圧縮強さの推定に有効な指標であることを確認した。

**Key Words :** *hydraulic rock drill , elastic wave , damping pressure , pressure pulsation*

## 1. まえがき

山岳トンネルの工事に於いて、安全かつ合理的に施工するためには、切羽前方の地山性状を精度良く把握することが重要である。トンネル切羽前方調査法には、油圧式削岩機を用いてノンコア削孔を行い、削孔速度や削岩機の打撃圧、回転圧、フィード圧などの機械データから削孔位置の地山性状を予測する削孔検層法<sup>1)</sup>がある。この調査法では機械データの結果に掘削ずり(岩片)や削孔水などの目視データを補足して地山の状況を直接的に把握できる。

一方、削孔検層法の一般的な地山の評価指標である掘削体積比エネルギー(単位体積の掘削に要したエネルギー)<sup>2)</sup>は、同じ地山を削孔した場合でも油圧や削孔効率の変化による影響を受けること、コンピュータジャンボなど削岩機の高性能化により地山状態が変化した場合でも油圧が自動制御されて削孔速度の変化が小さくなる場合があり、地山の性状を精度良く把握することが困難な状況がある。削孔位置の地山の性状を精度良く把握するためには、圧縮強さや弾性波速度などの物性に関連付けて地山を評価することが重要である。

最近の油圧式削岩機には、反発力を油圧(ダンピング圧)で吸収するダンパ装置が装備されている<sup>3)</sup>。ダンピング圧には、地山からの反発力により脈動(脈を打つ様に圧力が周期的に変化する現象)が発生し、反発力が大きくなるほど脈動の振幅が大きくなる傾向がある。このようなことから、油圧式削岩機を利用して地山の圧縮強さを推定する調査法の開発を目的として圧縮強さが既知である試験体の削孔実験を行い、脈動振幅の大きさと圧縮強さの関係について検討を進めている<sup>3)</sup>。

## 2. 研究の位置づけ

油圧削岩機のダンピング圧に関する研究には、以下のものがある。

山下ら<sup>4)9)</sup>は、岩種、物性の異なる岩石の試験体を用いた削孔実験を行い、打撃圧が一定でフィード圧が変動する場合においてダンピング圧とフィード圧の比が硬質岩盤になるほど大きくなることを明らかにし、ダンピング圧とフィード圧の回帰直線の傾きを用いて地山性状を評価する手法を提案した。しかし、本研究で対象としてい

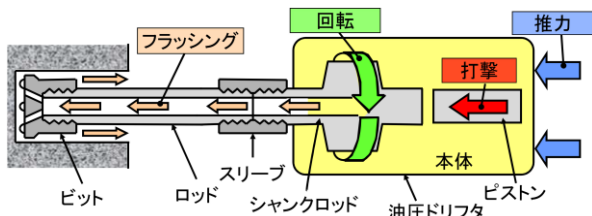


図-1 油圧式削岩機の削孔原理

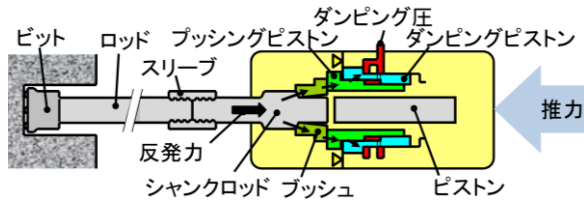


図-2 ダンパ機構（デュアルダンパ）

るFurukawa Rock Drill Co.社製油圧式削岩機（HD 210, HD 250など）では、油圧ドリフタ内のダンパ機構が異なり、地山の性状が変化してもダンピング圧が一定（ダンピング圧はフィード圧に比例して変化）で大きな変化が生じないことから、この手法を地山の評価に適用することが難しいと推察される<sup>3)</sup>。

福井ら<sup>4)</sup>は、長尺における削孔特性を明らかにするため、複数の稲田花崗岩ブロックを並べて長尺の削孔実験を行い、歪ゲージを貼ったロッドを用いてロッドを伝播する応力波（弾性波）の測定を行った。実験に使用した油圧式削岩機はHD210であり、ビットからの反射波によりダンピング圧がより高くなったことを指摘している。

塚本ら<sup>5)</sup>は、地山の反発力が反射波としてロッド内を伝播し、ダンパ装置内のダンピングピストンに作用してダンピング圧に圧力変動である脈動が発生することに着目した。圧縮強さが既知である試験体の削孔実験を行い、脈動の振幅と圧縮強さに高い相関があることを明らかにした。一方、試験体の圧縮強さの違いによるロッドを伝播する反射波やダンピング圧に生じる脈動の性状や変化などの基礎的な情報は明らかになっていない。

打撃圧、回転圧、フィード圧、ダンピング圧などの油圧は、削岩機から油圧ホースを経由してドリルジャンボの油圧を制御するメインバルブブロック付近に油圧センサを取り付けて計測される。そのため、ダンピング圧の脈動振幅は油圧ホースの径や長さの影響を受けるほか、油圧ドリフタの機種を変更した場合でも変化することが予想される。一方、ビット近くに位置するロッドに貼った歪ゲージの計測から求まるロッド応力には、掘削する地山の物性情報が含まれているはずであり、脈動振幅を用いて地山の圧縮強さを精度よく推定するためにはロッド応力とダンピング圧の脈動振幅の関係を把握することが重要である。つまり、油圧センサの取り付け位置のほ

か油圧ドリフタの機種を変更した場合には、同じ物性の試験体を削孔した場合のロッド応力の値を基準にしてダンピング圧の脈動振幅と圧縮強さの関係式を補正することにより削孔する地山の圧縮強さを精度良く予測することができる。

そこで、本研究では、ダンピング圧の脈動振幅に変化を与えるロッドを伝播する反射波の性状を明らかにするため、油圧式削岩機を用いてロッドの歪を計測する削孔実験を行い、削孔する地山の圧縮強さの違いによるロッド応力と脈動振幅の関係を明らかにする。また、ダンピング圧の脈動振幅の大きさと圧縮強さの関係を求め、脈動振幅を用いた地山の圧縮強さ推定法の適用性を検討する。

### 3. 油圧式削岩機の概要

#### (1) 油圧式削岩機の削孔原理

油圧式削岩機は、図-1に示すように、油圧ドリフタ、シャンクロッド、スリーブ、ロッド、ビットから構成される<sup>6)</sup>。油圧ドリフタ内のピストンは、油圧によりシリンダ内を前後に移動し、シャンクロッドを打撃する。打撃によりシャンクロッドに発生した応力波（弾性波）のほか、回転モータからの回転力（回転圧）と削岩機の推力（フィード圧）をスリーブ、ロッドを介してビットまで伝える。ビットは、打撃力、回転力、推力を地山に作用させて、地山を破碎し掘削する。このうち、打撃力が地山の破碎に寄与し、それ以外は補助的な役割を果たす。なお、ピストンはシャンクロッドを毎分2,800～4,500回打撃する。破碎した掘削ずりは、水などによるフラッシングにより破碎位置から取り除かれ、孔外に排出される。このフラッシングが十分でないと、孔内で二次破碎が発生し、掘削効率が低下すると同時にビットなどが早期に摩耗することになる。

#### (2) 油圧式削岩機のダンパ機構

油圧式削岩機のダンパ装置のうちデュアルダンパ<sup>8)</sup>の模式図を図-2に示す。デュアルダンパは、地山からの反発力を吸収するダンピングピストン、その内側に推力より若干小さい力でシャンクロッドを押すプッシングピストンの2つのピストンを配置している。通常の推力が不足した場合でもプッシングピストンが推力を補うことでビットの着岩性が向上することで削孔効率が向上する。また、地山の打撃によりビットに生じた反射波は、ロッド、シャンクロッド、プッシングピストンを介してダンピングピストンに伝わり、油圧であるダンピング圧により吸収される。その際に、ダンピング圧に脈動が生じる。

#### 4. 模擬試験体を用いた削孔実験

##### (1) 実験概要

実験は、セメント系固化材の種類や固化材の練り混ぜから削孔までの養生期間を変えることにより圧縮強さの異なる試験体を製作し、これを油圧式削岩機の打撃圧、回転圧、フィード圧、ダンピング圧の作動圧を変更して削孔する際の削孔速度や各油圧の機械データを計測した。なお、削孔実験は3回に分けて実施した。

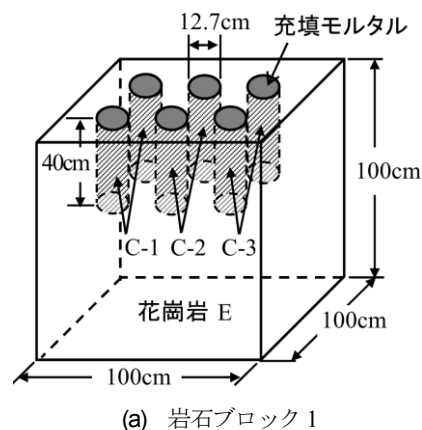
##### (2) 試験体の製作

試験体の製作には、稲田花崗岩のブロック（100 cm×100 cm×100 cm）を使用した。このうち、1回目の削孔実験に用いた岩石ブロック1では、油圧式削岩機にφ127 mmのビットを装着し、一面の6か所から深さ40 cmの削孔を行い、図-3(a)のように削孔した面を上にして削孔した空孔に急結モルタル（セメント系固化材）を充填して試験体を製作した。また、2回目の削孔実験の岩石ブロック2では、一面の7か所から深さ70 cmの削孔を行った後、図-3(b)のように削孔した空孔に圧縮強さの異なる3種類のモルタル（セメント系固化材）をそれぞれの充填厚さが20 cmになるよう3回に分けて充填し、最上部に厚さ10 cmのキャップ用モルタルを充填して試験体を製作した。3回目の削孔実験では、岩石ブロック3～岩石ブロック6の4個に一面の6か所から深さ60 cmの削孔を行い、図-3(c)のように岩石ブロックごと1種類のモルタルを厚さが50 cmになるように充填し最上部に厚さ10 cmのキャップ用モルタルを充填して4個の試験体を製作した。試験体の一軸圧縮強さを表-1に示す。一軸圧縮強さは、充填したモルタルと同じモルタルを用いて5本のテストピースを製作しておき、削孔実験の実施時間に合わせて一軸圧縮試験を行い、平均値を求めた。

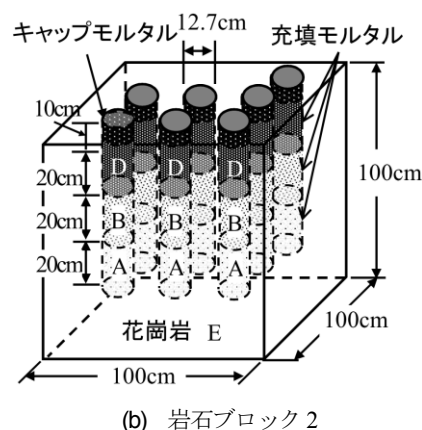
##### (3) 実験方法

削孔実験では、充填したモルタルの固化後、図-4に示すように花崗岩ブロックをφ127 mmのビットで削孔した姿勢（充填した面を鉛直方向）に戻した後、モルタル充填した試験体の孔をφ64 mmのビットを用いて80 cmの深さまで再削孔した。

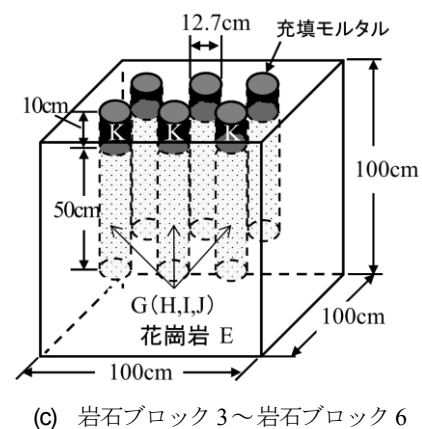
削孔実験の試験体種別と削岩機の作動圧条件を表-2に示す。1回目の岩石ブロック1を用いた削孔実験では、試験体の圧縮強さによるダンピング圧の変動を確認することを目的として、打撃圧15 MPa、ダンピング圧10 MPa、回転圧を5 MPa、8 MPaに設定した。それに対し、2回目の岩石ブロック2を用いた削孔実験では、試験体の圧縮



(a) 岩石ブロック 1



(b) 岩石ブロック 2



(c) 岩石ブロック 3～岩石ブロック 6

図-3 試験体の製作

表-1 試験体の一軸圧縮強さ

| 試験体種別 | 岩石ブロック | 養生期間 (hr) | 一軸圧縮強さ (MPa) | 使用材料            |
|-------|--------|-----------|--------------|-----------------|
| A     | 2      | 672       | 1.1          | 不分散性グラウト(type1) |
| B     | 2      | 672       | 10.9         | 不分散性グラウト(type2) |
| C-1   | 1      | 1         | 23.0         | 超早硬グラウト         |
| C-2   | 1      | 6         | 33.3         | 超早硬グラウト         |
| C-3   | 1      | 24        | 43.1         | 超早硬グラウト         |
| D     | 2      | 672       | 65.5         | 不分散性グラウト(type3) |
| E     | 1～6    | -         | 187.4        | 稲田花崗岩           |
| G     | 3      | 336       | 0.3          | 不分散性グラウト(type1) |
| H     | 4      | 336       | 6.6          | 不分散性グラウト(type2) |
| I     | 5      | 336       | 49.8         | 不分散性グラウト(type3) |
| J     | 6      | 336       | 72.0         | 不分散性グラウト(type4) |
| K     | 3～6    | 336       | 70.0         | 不分散性グラウト(type5) |

強さおよび作動圧の変化によるダンピング圧の変動を確認することを目的として回転圧を6 MPaに設定し、打撃圧を13～16 MPa、ダンピング圧を6～8.5 MPaに変化させた実験を実施した。また、3回目では、2回目とほぼ同じ作動圧条件で試験体の計測データ数を増やすため、圧縮強さの小さい試験体の厚さを50 cmにして試験体ごとの岩石ブロック3～岩石ブロック6を用いた削孔実験を行った。また、ロッドの歪を測定した。

実験に用いた油圧ドリフタの仕様を表-3に示す。岩石ブロック1、岩石ブロック2を用いた実験では油圧ドリフタHD 210を用い、岩石ブロック3～岩石ブロック6を用いた削孔実験では、HD 210よりも打撃性能が優れる油圧ドリフタHD 250を用いた。ドリルジャンボに搭載した油圧式削岩機で岩石ブロックの試験体を削孔する状況を図-5に示す。

#### (4) 計測装置と計測方法

削孔検層の専用計測装置<sup>9)</sup>の計測ブロック図を図-6に示す。油圧式削岩機の油圧回路に設置した油圧センサを用いて打撃圧、回転圧、ダンピング圧、フィード圧を計測する。また、フィード装置に流出入する油量を流量センサ（ギアメータ）により計測し、流量センサのパルス信号から削孔長を求める。計測は、流量センサの最大パルス数が約1,000パルス/秒であることから、計測のサンプリング周波数を5 kHzにした。計測を開始すると、各センサの信号をAD変換してバッファに取り込む。バッファの計測データをハードディスクに記録すると同時に、地山評価のデータに換算し、削孔深さ方向0.5 cm区間ごとの打撃圧、回転圧、フィード圧、ダンピング圧、削孔速度および掘削体積比エネルギーの平均値を計算し、削孔深さ軸上にプロットした。

岩石ブロック3～岩石ブロック6を用いたロッドの歪を計測する実験では、長さ3.70 mの六角中空ロッド（対辺35 mm、内径9.5 mm）を用いて福井ら<sup>7)</sup>と同様な方法を行った。ロッドの歪計測の位置を図-7に示す。計測位置は、ロッドとシャンクロッドの接合部から50 cmの位置に歪ゲージ1（測点1）、削孔時にセントライザと計測ケーブルが干渉しないように歪ゲージ1からビット側に1.7 m離れた位置に歪ゲージ2（測点2）の2か所である。なお、ロッドの曲げ応力を打ち消すため、1か所当り2枚の歪ゲージ（東京測器製FLA-2-11）を六角断面の対辺に貼った。削孔中はロッドが回転するため、事前に計測ケーブルを回転と逆方向に30回転ほどロッドに巻いておき、ロッドの回転で巻き戻されてさらに30回転ほどロッドに巻くまでの約25秒間（ロッド回転数：145 rpm）を計測した。追加した計測機器を表-4に示す。記録装置（HIOKI製MR8847）では、2測点のロッド歪と打撃圧、ダンピング

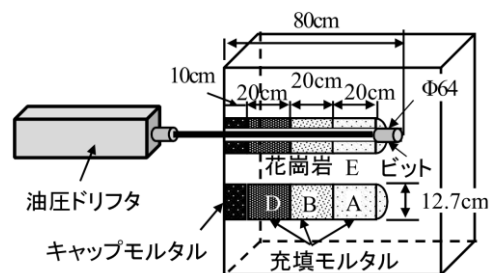


図-4 試験体の削孔方法（岩石ブロック2）

表-2 試験体種別と削岩機の作動圧条件

| ブロック | 実験ケース | 試験体種別      | 打撃圧 (MPa) | 回転圧 (MPa) | フィード圧 (MPa) | ダンピング圧 (MPa) |
|------|-------|------------|-----------|-----------|-------------|--------------|
| 1    | S1    | C-1, E     | 15.0      | 8.0       | 5.0         | 10.0         |
|      | S2    | C-2, E     | 15.0      | 5.0       | 8.0         | 10.0         |
|      | S3    | C-3, E     | 15.0      | 5.0       | 8.0         | 10.0         |
|      | S4    | C-1, E     | 15.0      | 5.0       | 6.0         | 10.0         |
|      | S5    | C-2, E     | 15.0      | 5.0       | 6.0         | 10.0         |
|      | S6    | C-3, E     | 15.0      | 5.0       | 6.0         | 10.0         |
| 2    | T1    | D, B, A, E | 13.0      | 6.0       | 5.0         | 8.0          |
|      | T2    | D, B, A, E | 14.5      | 6.0       | 4.0         | 6.0          |
|      | T3    | D, B, A, E | 14.5      | 6.0       | 5.0         | 8.0          |
|      | T4    | D, B, A, E | 14.5      | 6.0       | 6.0         | 8.5          |
|      | T5    | D, B, A, E | 16.0      | 6.0       | 4.0         | 6.0          |
|      | T6    | D, B, A, E | 16.0      | 6.0       | 5.0         | 8.0          |
|      | T7    | D, B, A, E | 16.0      | 6.0       | 6.0         | 8.5          |
| 3～6  | G*1   | K, G*, E   | 14.0      | 6.0       | 4.0         | 6.0          |
|      | G*2   | K, G*, E   | 14.0      | 6.0       | 5.0         | 7.5          |
|      | G*3   | K, G*, E   | 14.0      | 6.0       | 6.0         | 9.0          |
|      | G*4   | K, G*, E   | 16.0      | 6.0       | 4.0         | 6.0          |
|      | G*5   | K, G*, E   | 16.0      | 6.0       | 5.0         | 7.5          |
|      | G*6   | K, G*, E   | 16.0      | 6.0       | 6.0         | 9.0          |

\*ブロックが3の場合はG、4の場合はH、5の場合はI、6の場合はJとする

表-3 油圧ドリフタの主な仕様

| 型 式        | HD210                     | HD250                     |
|------------|---------------------------|---------------------------|
| 打撃圧 (最大値)  | 17.5 MPa                  | 23.0 MPa                  |
| 打撃速度 (最大値) | 61.7 Hz                   | 75.5 Hz                   |
| 回転圧 (最大値)  | 21.0 MPa                  | 21.0 MPa                  |
| 回転速度       | 0 ～ 250 min <sup>-1</sup> | 0 ～ 250 min <sup>-1</sup> |



図-5 試験体の削孔状況

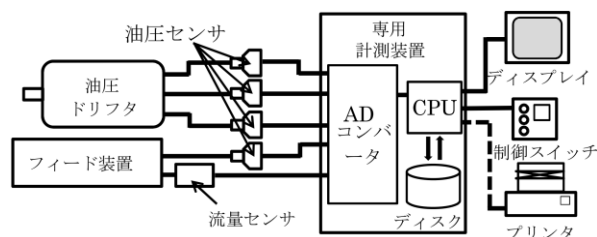


図-6 専用計測装置のブロック図

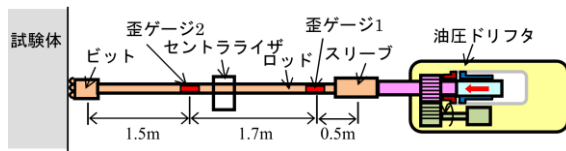


図-7 ロッドの歪計測位置

表-4 ロッド歪の計測機器

| 計測機器名       | 個数   | 主な仕様                             |                                  |
|-------------|------|----------------------------------|----------------------------------|
| 歪ゲージ        | 2/測点 | 型 式<br>ゲージ長                      | FLA-2-11(東京測器)<br>2mm            |
| 動ひずみ<br>アンプ | 2    | 型 式<br>応答周波数<br>最大出力             | DC96A(東京測器)<br>DC~200kHz<br>±10V |
| 記録装置        | 1    | 型 式<br>A/D分解能<br>最大サンプリング<br>周波数 | MR8847(HIOKI)<br>16bit<br>1MS/s  |

圧のデータと削孔検層の専用計測装置の計測データを同期させてサンプリング周波数1 MHzで記録した。

#### (5) ロッド応力の結果

岩石ブロック4で試験体の削孔順序がK, H, Eである実験ケースH5のデータを用いてロッド応力とダンピング圧の脈動の関係を検討した。試験体Kの削孔時におけるロッド応力、ダンピング圧、およびダンピング圧の脈動の計測波形を図-8に示す。計測した歪から応力に換算するヤング率は202 GPaである。引張応力が正として表示した。(d)の脈動はダンピング圧のデータからトレンド除去（データの平均値を差し引く）することにより求めた。ダンピング圧の脈動は、打撃と同じ周期で繰り返すことから、ここでは、打撃ごとに生じる脈動の最大値から最小値を差し引いた値を脈動振幅とした。ロッド応力とダンピング圧の脈動についてピストンの打撃から5ms間を拡大した図を図-9に示す。(a)測点1と(b)測点2のロッド応力図に弾性波速度が5090 m/sであることを考慮して応力波の走時線を図中に併記した。実線の走時線が油圧ドリフタ側からビット側に伝播する応力波の走時を示し、点線がビット側から油圧ドリフタ側に伝播する応力波の走時を示している。ピストンがシャंकロッドを打撃した際に発生した応力波がビットに入射する波（赤色）と試験体の打撃後ビットからの第1反射波（青色）を確認できる。また、ビットとシャंकロッドの間を繰り返し反射（第2反射波～第4反射波）しながら減衰していることがわかる。また、(c)の脈動波形では、第1反射波がダンピングピストンに到達した時点から圧力が徐々に低下する。ダンピングピストンに到達する反射波は、先に引張応力が作用するため推力を低下するように働き

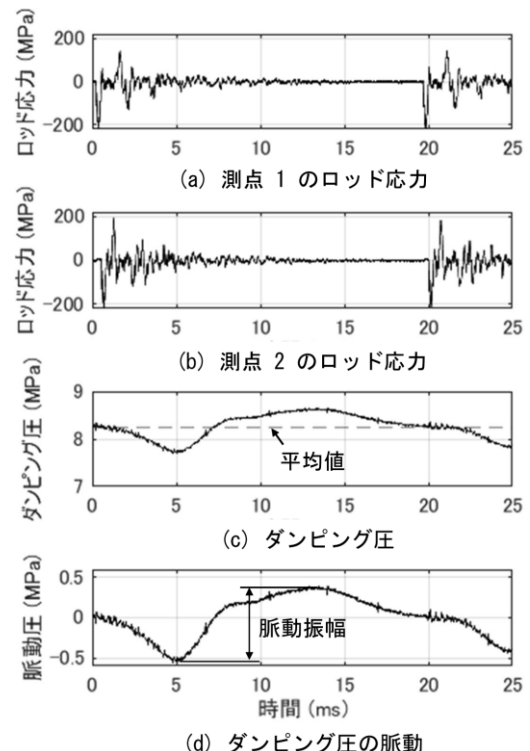


図-8 削孔中の計測波形例（実験ケースH5の試験体K）

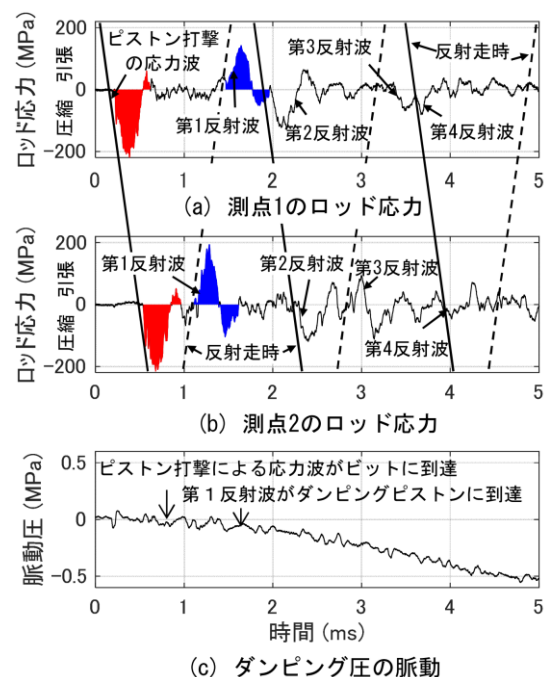


図-9 計測波形の拡大図（実験ケースH5の試験体K）

ダンピング圧の低下を生じさせ、続く圧縮応力がダンピング圧を上昇させたと推察される。ダンピング圧の脈動には、これら反射波が影響すると考えられ、特に着岩状態にある第1反射波の寄与が大きいと推測される。そこで、各試験体を削孔中に計測されたピストンの打撃による応力波、第1反射波、ダンピング圧の脈動波について比較した。

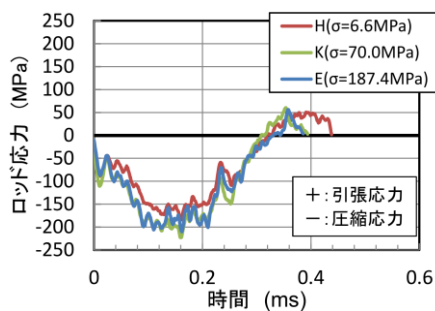


図-10 ビットへの入射波 (H5)

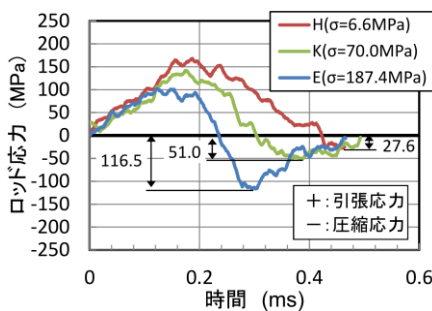


図-11 ビットからの第1反射波 (H5)

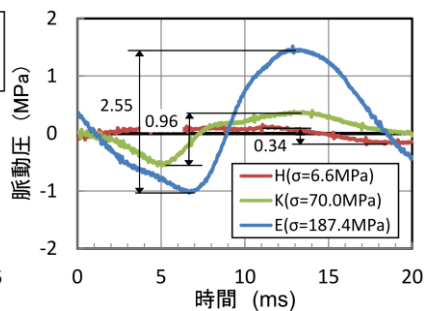


図-12 ダンピング圧の脈動波 (H5)

実験ケースH5で各試験体K, H, Eを削孔した際のピストンの打撃による応力波がビットに入射する波を比較した結果を図-10, ビットが試験体を打撃した後のビットからの第1反射波を比較した結果を図-11, さらに, ダンピング圧の脈動波を比較した結果を図-12に示す. ビットに入射する波には, 試験体による違いがあまり見られないのに対し, ビットが試験体を打撃した後の第1反射波には, 試験体の圧縮強さが大きい試験体ほど引張応力の最大値が小さくなり, 逆に圧縮応力の最大値が27.6 MPa, 51.0 MPa, 116.5 MPaと大きくなっている. また, 脈動の振幅は, 試験体の圧縮強さが大きい試験体ほど0.34 MPa, 0.96 MPa, 2.55 MPaと大きくなっている. この反射波の圧縮応力がダンピングピストンを打撃し, 脈動の振幅に大きく寄与していると考えられる. 削孔時間18秒間に確認された941打撃について求めた第1反射波の最大圧縮応力と脈動振幅の関係を図-13に示す. 試験体Eの花崗岩を削孔した場合の圧縮応力が50~200 MPaとばらつきが大きい, 最大圧縮応力と脈動振幅の間には相関関係が見られる. 花崗岩の削孔において最大圧縮応力にばらつきが見られたのは, 孔底での掘削面の凹凸により打撃時の試験体とビットの接触状態が様でなかったことが要因の一つと考えられる.

以上から, 削孔する試験体の圧縮強さが大きくなるほど反射波の圧縮応力が大きくなることで, ダンピング圧の脈動振幅が大きくなったと推測される.

#### (6) 削孔データの深さ分布例

削孔データから求めた打撃圧, 回転圧, フィード圧, ダンピング圧, 掘削体積比エネルギーおよびダンピング圧の脈動振幅の深さ分布の一例として, 実験ケースがT2の結果を図-14に示す. 図中には, 削孔したモルタル試験体D, B, Aと花崗岩試験体Eの試験体で区分した範囲を示している. (a)の打撃圧には試験体による変化が見られないが, (b)~(d)の回転圧, フィード圧, ダンピング圧の油圧には, 圧縮強さの低い試験体ほど圧力がやや低下する傾向を確認できる. (e)の削孔速度をもとに求める(f)の掘削体積比エネルギー, 後述する(g)のダンピ

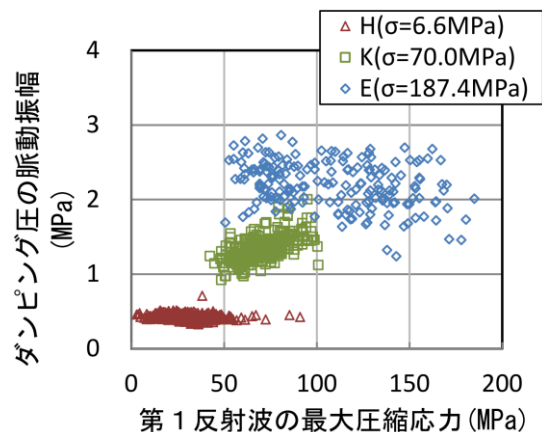


図-13 第1反射波の最大圧縮応力とダンピング圧の脈動振幅の関係 (実験ケース H5)

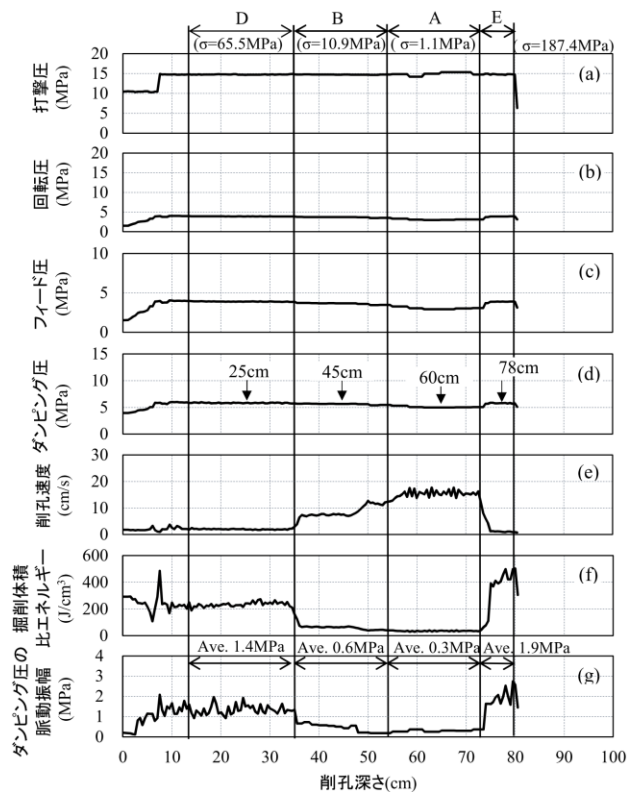


図-14 削孔データ深さ分布の一例 (実験ケース : T2)

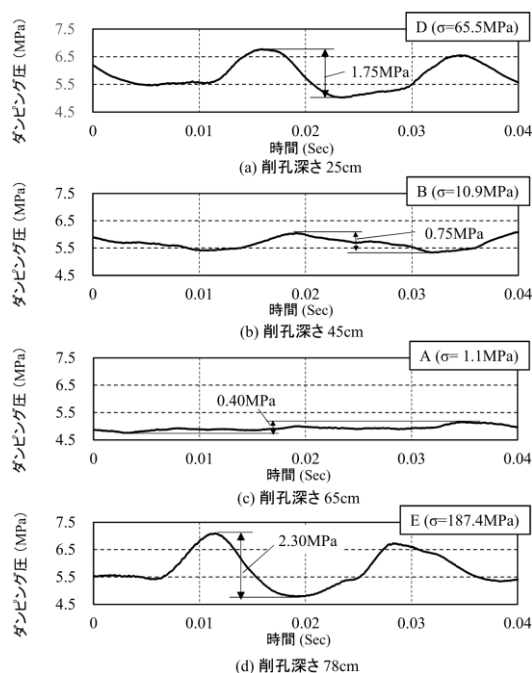


図-15 各削孔深さにおけるダンピング圧波形 (T2)

ング圧の脈動振幅は、圧縮強さが低い試験体ほど値が小さくなる傾向があり、(a)～(d)の作動圧の場合と比較して試験体の種別を容易に識別できる。

削孔する試験体がD, B, A, Eの位置である削孔深さが25 cm, 45 cm, 65 cm, 78 cmにおける時間区間0.04秒間のダンピング圧波形の一例を図-15 に示す。削孔深さ25 cmの硬岩に相当する試験体Dの脈動振幅は1.75 MPaであり、打撃の反発力によるダンピング圧の脈動波形を確認できる。試験体B内の削孔深さ45 cmでの脈動振幅は0.75 MPaであり、試験体Dの場合より小さくなる。さらに、土砂地山に相当する試験体Aの脈動振幅は、さらに0.40 MPaと小さくなり、打撃の反発力が小さくなっている。削孔位置が花崗岩である試験体Eでは、削孔深さ78 cmでのダンピング圧の脈動振幅は2.30 MPaと大きくなり、他の試験体と比較して最も大きな値を示す。図-14(g)は、削孔深さ方向に0.5 cm間隔ごとに上記と同様の手順により求めたダンピング圧の脈動振幅の分布である。この脈動振幅の結果を試験体範囲ごとの平均値を試験体D, B, A, Eの削孔した順に求めると、1.4 MPa, 0.6 MPa, 0.3 MPa, 1.9 MPaと変化しており、試験体の圧縮強さが小さい試験体になるほど、脈動振幅の平均値が小さくなった。試験体の強さが小さいほど試験体からの反発力が小さくなり、この反発力を油圧で吸収するダンパ装置のダンピング圧の変動が小さくなっている。

#### (7) ダンピング圧の脈動振幅による圧縮強さの評価

試験体範囲ごとの平均値から求めたダンピング圧の脈動振幅と圧縮強さの関係を図-16 に示す。また、図中に

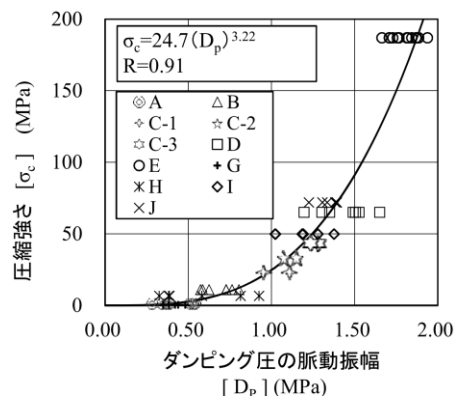


図-16 ダンピング圧の脈動振幅と圧縮強さの関係

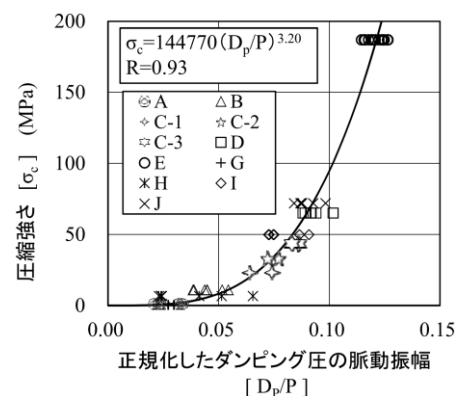


図-17 正規化したダンピング圧の脈動振幅と圧縮強さの関係

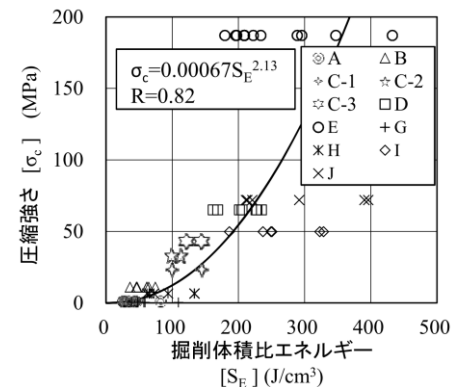


図-18 掘削体積比エネルギーと圧縮強さの関係

はべき乗回帰曲線の結果を示している。両者の間には、高い相関があり、ダンピング圧の脈動振幅を用いて圧縮強さを推定できることがわかる。打撃エネルギーと打撃圧は比例関係にあり、打撃エネルギーが大きくなると反発エネルギーが比例して大きくなり、脈動振幅も大きくなる。そこで、ダンピング圧の脈動振幅を打撃圧で除して正規化した値を圧縮強さの予測指標とした。圧縮強さと正規化したダンピング圧の脈動振幅の関係を図-17 に示す。また、圧縮強さと掘削体積比エネルギーの関係を図-18 に示す。正規化したダンピング圧の脈動振幅と圧縮強さの関係は、掘削体積比エネルギーの場合と比較し

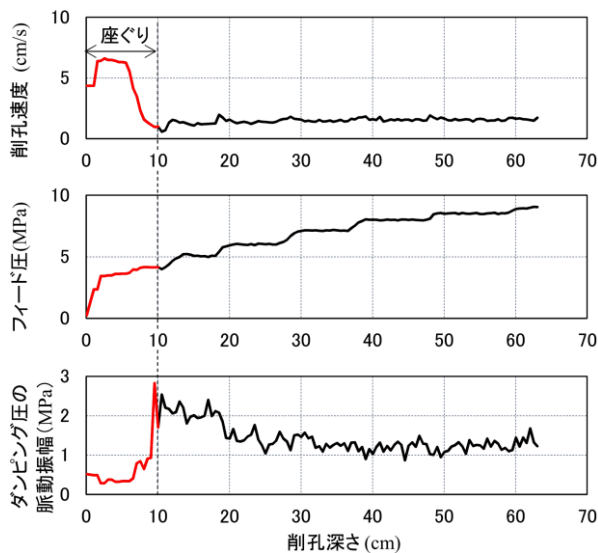


図-19 削孔速度・フィード圧・ダンピング圧の脈動振幅の削孔深さ分布(花崗岩)

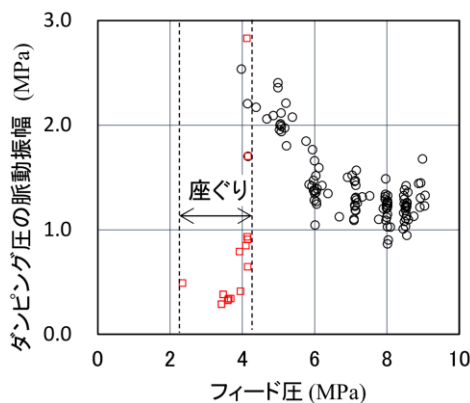


図-20 フィード圧とダンピング圧脈動振幅の関係(花崗岩)

てデータのばらつきが小さく、また、相関係数が 0.93 であり、掘削体積比エネルギーの 0.82 やダンピング圧の脈動振幅の 0.91 よりも大きく、圧縮強さと強い相関を示した。このことから、正規化したダンピング圧の脈動振幅は、従来の指標である掘削体積比エネルギーよりも精度よく試験体の圧縮強さを推定できる。

#### (8) フィード圧とダンピング圧の脈動振幅の関係

削岩機のフィード圧を上昇させると、ダンピング圧が比例して上昇することから脈動振幅も変化することが予想された。そこで、花崗岩ブロックの削孔時に削岩機のフィード圧を3.5 MPaから9.0 MPaまで段階的に上昇させる実験を行った。削孔速度、フィード圧、ダンピング圧の脈動振幅の削孔深さ方向の結果を図-19 に示す。削孔深さ10 cmまでは座ぐりの部分(赤色)で削孔速度が大きく、また、ダンピング圧の脈動振幅が0.5 MPaから2.8 MPaに急激に上昇する。フィード圧とダンピング圧の脈動振幅の関係で整理した結果を図-20 に示す。フィード

圧が4 MPa付近で脈動振幅が2.8 MPa付近まで急激に上昇する部分(赤色)は前述の座ぐりの部分であり、フィード圧が5 MPa付近まで上昇すると脈動振幅が2.2 MPaになる。さらに、フィード圧が6 MPa～9 MPaになると脈動振幅は0.85～1.7 MPaで変化するが、フィード圧の上昇により脈動振幅が大きくなる傾向は見られない。このことは、フィード圧が4 MPa以下では脈動振幅が大きく変化するため、脈動振幅による圧縮強さの推定が難しいこと、フィード圧が6 MPa以上であれば脈動振幅がフィード圧による影響が小さく、フィード圧による補正がなくても圧縮強さの推定が可能であることを示している。実際の岩盤を対象にした削孔では、フィード圧が6 MPa以上の場合が多く、ダンピング圧の脈動振幅を用いた地山の圧縮強さを推定する方法が適用できると考えている。

## 5. まとめ

圧縮強さが既知である試験体を用いた削孔実験を行い、ダンピング圧の変動である脈動と試験体の圧縮強さとの関係について検討した。以下の結果が得られた。

- (1) 試験体を打撃した際にビットから反射する応力波の圧縮応力とダンピング圧の脈動振幅の間には相関があり、ダンピング圧の脈動には、試験体の硬軟などによるビットからの応力波の変化が反映されている。
- (2) ダンピング圧の脈動振幅と試験体の圧縮強さの間には高い相関があり、ダンピング圧の脈動振幅を用いて圧縮強さを推定することが可能である。
- (3) フィード圧が6 MPa以上であれば、フィード圧がダンピング圧の脈動振幅に与える影響は小さい。

## 6. おわりに

ダンピング圧の脈動振幅は、圧縮強さとの相関が強く地山評価の指標として有効であること、さらに、フィード圧の影響を受けにくい点でも優位であることを確認した。今後、岩種の異なる岩石試験体や実際の岩盤を対象にした実験を行い、地山の圧縮強さの推定法の適用性について検証したい。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，pp.73-74，2009。
- 2) (一財)災害科学研究所トンネル調査研究会：トンネル技術者のための地盤調査と地山評価，pp.193-200，鹿島出版会，2017。

- 3) 塚本耕治, 小泉匡弘, 進士正人: 油圧式削岩機のダンピング圧力変動を利用した地山の圧縮強度予測, 材料, Vol.68, No.4, pp. 366-373, 2019.
- 4) 山下雅之, 石山宏二, 稲葉力, 早坂茂, 塚田純一: 油圧式削岩機のダンピング圧を利用した切羽前方探査法, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.6, pp.107-112, 1996.
- 5) 山下雅之, 石山宏二, 引間亮一, 稲葉力: 穿孔時のダンピング圧とフィード圧の比 ( $D'/F'$ ) を用いた岩盤評価の試み, 土木学会第 53 回年次学術講演概要集 III-A442, pp.840-841, 1998.
- 6) 山下雅之, 石山宏二, 木村哲, 明石健, 岡田隆治, 福井勝則: 穿孔探査法の TBM 掘削への適用, 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, Vol.11, pp.611-616, 2001.
- 7) 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, Vol.123, No.4\_5, pp.152-157, 2007.
- 8) 小泉匡弘, 福井勝則, 羽柴公博: さく岩機の技術的変遷, トンネルと地下, Vol.47, No.1, pp.39-43, 2007.
- 9) 塚本耕治, 今泉和俊: 高周波サンプリング削孔検層システムを用いたトンネル切羽前方調査, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, VI-409, pp.817-818, 2011.

(2019.8.9 受付)

## STUDY ON PREDICTION OF GROUND STRENGTH USING DAMPING PRESSURE PULSATION OF HYDRAULIC ROCK DRILL

Koji TSUKAMOTO, Toshio MATSUDA and Masato SHINJI

The hydraulic rock drill used for mountain tunnel construction is equipped with a damper device that cushions the repulsive force from the ground with hydraulic damping pressure. Since the repulsive force of the ground varies depending on the hardness of the ground, it is considered that the damping pressure of the damper device includes information such as the compressive strength of the ground at the drilling position. Therefore, drilling experiment was conducted using specimens with known compressive strength, and the relationship between the pulsation, which is fluctuation in damping pressure, and the compressive strength of the specimens were examined. As a result, we confirmed that the amplitude of pulsation had a high correlation with the compressive strength and was an effective index for predicting the compressive strength of the ground.