

削孔時のロッド応力波を用いた 地山の圧縮強度推定に関する基礎的研究

Basic Study on Estimation of Compressive Strength of the Ground Using Rod Stress Waves During Drilling

塚本 耕治*

要 旨

山岳トンネルにおいて、施工時の安全性向上や安定したトンネルの品質を確保するためには、地山状態に応じて適切な支保パターンを選定することが重要である。発破時の装薬孔やロックボルト孔の削孔データから地山の圧縮強度を把握できれば、支保パターンや補助工法の選定に活用できる。そこで、圧縮強度が既知である試験体を用いて油圧式削岩機による削孔実験を行い、削孔中にロッドを伝播する応力波と試験体の圧縮強度との関係について検討した。その結果、応力波のうち削岩機側に戻る反射波の正負の応力振幅から求まる係数は圧縮強度と高い相関があり、地山の圧縮強度の推定に有効な指標であることを確認した。

キーワード：削孔調査、ロッド応力、応力振幅比、圧縮強度

1. まえがき

山岳トンネルの工事では、施工中に行う切羽の観察調査や変位計測に基づいて事前調査から求めた地山等級を見直し、適切な支保パターンを選定する。観察調査では、切羽の地山状況を把握するため、写真撮影やスケッチ図の作成などの目視調査のほか、地山をハンマー打撃し、その反発や破碎の状況から地山の圧縮強度を推定する場合がある。さらに、地山の圧縮強度を詳細に調査するため採取した岩石片を用いた点載荷試験や岩盤に対してシュミットハンマー試験を実施する場合がある。しかし、これらの方法は、切羽近くでの試験となるため脆弱な地山での適用が安全面から制約される場合があるほか、点載荷試験では採取する岩石片の形状や大きさ、潜在する亀裂の有無などにより、またシュミットハンマー試験では試験位置の浮石の有無などにより計測データが大きくばらつく場合がある。このような地山条件でも、原位置において地山の圧縮強度をリアルタイムに把握できれば、支保パターンを選定するうえで有用である。

トンネル現場では、施工機械である油圧式削岩機に計測装置を取り付け、削孔時における削岩機の各種油圧や削孔速度などの削孔データを取得し、単位体積あたりの打撃エネルギー（以下、掘削体積比エネルギー）などの指標を用いて原位置岩盤を評価する方法がよく用いられている^{1)~3)}。また、掘削体積比エネルギーは、地山の

圧縮強度のべき乗に比例する可能性があると報告されている³⁾。しかし、掘削体積比エネルギーの計算に用いられる 1 打撃あたりのエネルギーは作動油圧や掘削ずり（掘削した岩石片）の排出状態によって変化しやすいうえ、地山条件によっても変化する。そのため、掘削体積比エネルギーの値から原位置での地山の圧縮強度を精度よく推定することは困難な状況にある。一方、削岩機による打撃力はビットを介して直接地山に作用することから、ロッドを伝播する応力波（弾性応力波、または弾性波）には、削孔位置の地山状態が反映されている。

これまでに室内実験でロッド応力を計測した事例はいくつか報告されているが、実際の削岩機を用いて地山を削孔しながらロッド応力を計測した事例は少ない⁴⁾。さらに、地山の圧縮強度に関連づけてロッド応力を評価した事例は見られない。そこで、本稿では圧縮強度が既知である試験体を用いた削孔実験を行い、ロッドを伝播する応力波と試験体の圧縮強度との関係から地山の圧縮強度を推定する方法について検討した。

2. 油圧式削岩機の概要

2.1 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⁵⁾。油圧ドリフタ内のピストンは、油圧によりシリ

* 技術研究所土木研究グループ

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である打撃力のほか、回転モータからの回転力と削岩機の推力はスリーブ、ロッドを介してビットまで伝わる。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。

2.2 削岩機の打撃によりロッドを伝播する応力波

削岩機の打撃による応力波の発生とロッドの伝播、地山の破碎機構³⁾の模式図を図-2に示す。図の(b)~(d)にはビット先端が地山に貫入する際のビット荷重(ビットから地山への荷重)と貫入深さの関係(以下、F-δ関係)を併記している。実際のF-δ関係は、載荷時、除荷時ともに直線ではなく曲線となるが、ここでは単純に直線で示した。油圧ドリフト内のピストンがシャンクロッドを打撃して衝撃力を与えると、打撃した部位に局所的な圧縮応力が発生する(図-2(a))。局所的な圧縮応力は波としてスリーブを介してロッドを伝播する。ロッドを伝播する応力波の伝播速度は5080m/sであり⁴⁾、ロッドが棒状であることから1次元波動として扱うことができる(図-2(b))。応力波はビットまで伝播して先端部の地山との境界で入射波となり、ビットに埋め込まれたチップから地山内に透過するほか、ビットと地山の音響インピーダンスの違いから境界で引張応力の反射波が発生し削岩機側に戻っていく。F-δ関係では、ビット荷重が増えるにつれて貫入深さも大きくなる載荷過程に入る(図-2(c))。応力波の入射が終了すると、ビットは地山の剛性によって撥ね返され、反射波は引張応力から圧縮応力に変化する。F-δ関係では、ビット荷重の減少につれて貫入量が減少する除荷過程に入り、最終貫入量となる。なお、図のハッチングの部分が生じた地山の破碎に消費されたエネルギーに相当する(図-2(d))。ここで、地山に押し付けられた状態にあるビットの応力波の挙動を図-3に示す。ビット側を弾性体1、地山側を弾性体2として2つの弾性体が平面で接した状態に置き換えて考えると、境界面(弾性体1と弾性体2の境界)に入射波が到達して反射波と透過波に分かれる挙動として捉えることができる。この入射波と反射波の関係は、式(1)の反射係数⁶⁾で表すことができる。

$$\alpha = \frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (1)$$

ここに、α：反射係数 (-1 ≤ α ≤ 1)

σ_I、σ_R：入射波の応力振幅、反射波の応力振幅
 I₁、ρ₁、c₁：弾性体1の音響インピーダンス、

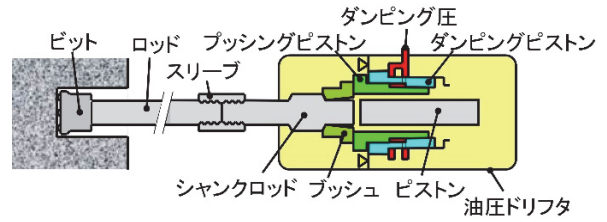


図-1 油圧式削岩機の構成

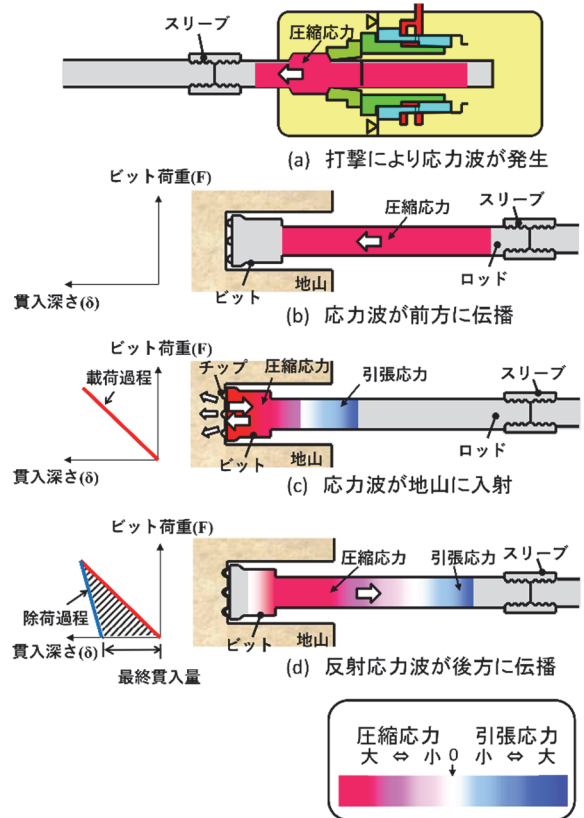
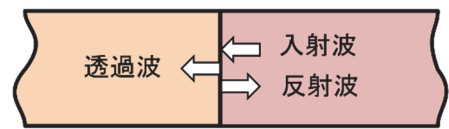


図-2 削孔時の打撃によるロッド応力波の伝播



地山：弾性体2(ρ₂, c₂) ビット：弾性体1(ρ₁, c₁)

図-3 境界面における応力波

密度、弾性波速度

I₂、ρ₂、c₂：弾性体2の音響インピーダンス、密度、弾性波速度

反射波は弾性体1と弾性体2の音響インピーダンスの大小関係によって符号が変わり、弾性体1から弾性体2への入射波が圧縮応力である場合には、相手の弾性体の音響インピーダンスが大きいと同符号の圧縮応力、小さいと異符号の引張応力となる。さらに、特別な場合として、弾性体1の境界が自由端の場合はI₂=0であり、α=

-1となる。一方、固定端の場合は $I_2 = \infty$ であり、 $\alpha = 1$ となる。実際の削孔場面を想定すると、ビットを地山に押し当てない状態で打撃する空打ちの場合には、 $\alpha = -1$ となるが、通常の地山を削孔する場合においてビットと地山の境界は固定端に成り得ないため、 $\alpha = 1$ とならない。以上から、ビットおよびロッド（弾性体 1）を伝播する反射波の振幅を把握し、反射係数を求めることができれば、式（1）を用いて地山（弾性体 2）の音響インピーダンスや圧縮強度を推定できると仮定し、検討を行った。

3. 模擬地山試験体を用いた削孔実験

3.1 実験概要

本実験では、まずセメント系固化材の種類を変えることにより圧縮強度の異なる地山を模擬した試験体を製作した。次に、これらの試験体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、削孔する際のロッド応力および削孔速度を計測した。

3.2 試験体の製作

試験体の製作には、4個の稲田花崗岩ブロック（100 cm×100 cm×100 cm）を使用した。岩石ブロックの削孔する面を上にし、φ127 mmのビットを装着した油圧クローラドリルを用いて一面の6か所から垂直方向に深さ60 cmの削孔を行った。続いて図-4のように岩石ブロックごと1種類の無収縮モルタルを厚さが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製作した。試験体の一軸圧縮強度を表-1に示す。一軸圧縮強度は、試験体ごとに充填したモルタルを用いて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、その平均値から求めた。なお、試験体Eは、試験体Dの岩石ブロックの花崗岩部分を新たに削孔する場合とした。

3.3 実験方法

削孔実験では、充填したモルタルの固化後、図-5のように充填を行った面が鉛直方向になるよう花崗岩ブロックを回転した後、モルタル充填した試験体の孔をφ64 mmのビットを用いて水平方向に60 cm程度の深さまで削孔した。削孔には、最も掘削性能が優れた油圧ドリフタ HD 250 を搭載したドリルジャンボ（古河ロックドリル製）を用いて行った。実験状況を写真-1に示す。削孔実験では、圧縮強度の異なる試験体を安定して削孔するため、打撃圧 16 MPa、フィード圧 6 MPa、ダンピング圧 9 MPa に設定した。

3.4 計測装置と計測方法

削孔実験の計測には、削岩機の油圧や削孔長などの削孔データを自動計測する削孔検層装置とロッド応力を計測する汎用の記録装置を用いた。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、フィード圧、ダンピング

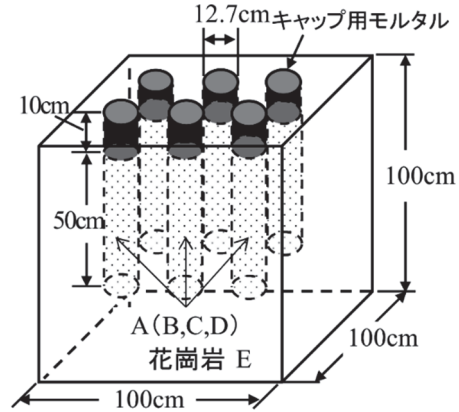


図-4 試験体の製作

表-1 試験体の一軸圧縮強度

試験体種別	岩石ブロック	養生期間 (hr)	一軸圧縮強度 f (MPa)	使用材料
A	1	336	0.3	無収縮モルタル(type1)
B	2	336	6.6	無収縮モルタル(type2)
C	3	336	49.8	無収縮モルタル(type3)
D	4	336	72.0	無収縮モルタル(type4)
E	4	-	187.4	稲田花崗岩

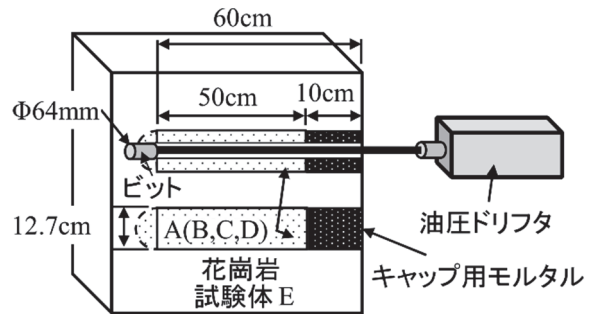


図-5 試験体の削孔方法



写真-1 試験体の削孔状況

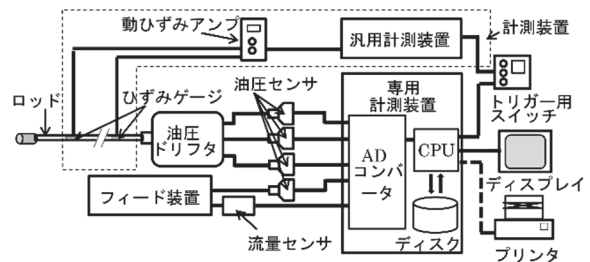


図-6 計測装置のブロック図

圧を計測する。また、ロッド応力の計測結果を削孔深さについて整理するため、削孔検層装置から出力される削孔長のデータを利用した。

岩石ブロック 1～岩石ブロック 4 を用いたロッドの応力を計測する実験では、長さ 370cm の六角中空ロッド（対辺 35 mm、内径 9.5 mm）を用いて福井ら⁴⁾と同様な方法で行った。ロッド応力の計測位置を図-7に、ロッド応力の計測に用いた計測機器のおもな仕様を表-2に示す。計測はロッドとシャンクロッドの接合部から 50 cm の位置に設置したひずみゲージ 1（測点 1）と、削孔時にセントラライザと計測ケーブルが干渉しないようにひずみゲージ 1 からビット側に 170cm 離れた位置に設置したひずみゲージ 2（測点 2）の 2 か所で行った。なお、ロッドの曲げ応力の影響を打ち消すため、1 か所あたり 2 枚のひずみゲージ（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かれるまでの約 25 秒間（ロッド回転数：145 rpm）を計測した。記録装置（HIOKI 製 MR8847）では、2 測点のロッド応力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（サンプリング時間間隔 10^{-6} 秒）で記録した。

3.5 ロッド応力と反射係数

試験体 B の削孔時におけるロッド応力の計測波形例を図-8に示す。計測したひずみからヤング率を 205.8 GPa として応力に換算し⁴⁾、引張応力を正として表示した。測点 1 および測点 2 について、打撃による応力波が確認できる 0~5ms の範囲（破線枠）の拡大図を図-9に示す。このうち、削岩機の打撃による応力波がロッドを伝播して測点 1 に到達した時間を基準にすると（図-9 (a)）、ロッドの弾性波速度が 5080m/s であることから、170cm 前方の位置にある測点 2 には、0.335ms 遅れて到達する（図-9 (b)）。測点 1 から反射が想定されるビット先端までの距離が 325cm、シャンクロッド端部までの距離が 49cm であることを考慮して、応力波が到達する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、破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。ピストンがシャンク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第 1 入射波（赤色）とビット先端から削岩機側に戻る第 1 反射波（青色）を確認できる。また、ビット先端とシャンクロッド端部の間を繰り返し反射しながら振幅が減衰していることがわかる。

次に、圧縮強度の違いによる第 1 入射波と第 1 反射波の応力波形の変化を確認するため、圧縮強度が大きく変化する 3 種類の試験体 B、D、E を対象に比較した。各試験体を削孔した際のビットに入射する第 1 入射波形を

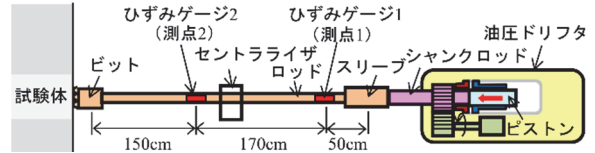
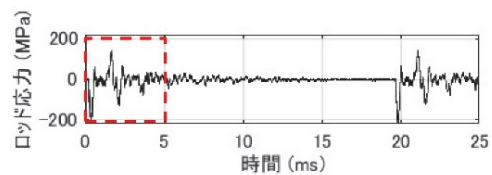


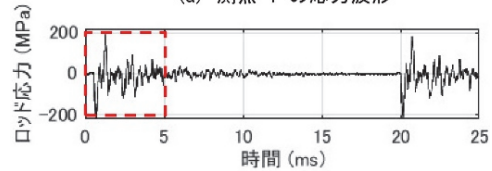
図-7 ロッド応力の計測位置

表-2 ロッド応力計測機器のおもな仕様

計測機器名	個数	おもな仕様	
ひずみゲージ	2×2測点	型式	FLA-2-11 (東京測器)
		ゲージ長	2 mm
動ひずみアンプ	2	型式	DC96A (東京測器)
		応答周波数	DC~200 kHz
		最大出力	±10 V
記録装置	1	型式	MR8847-03 (HIOKI)
		AD分解能	12 bit
		最大サンプリグ周波数	1 MHz

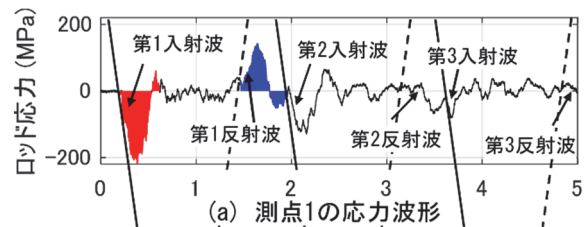


(a) 測点 1 の応力波形

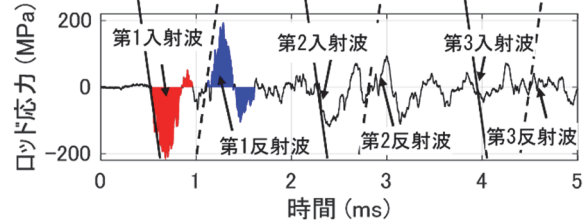


(b) 測点 2 の応力波形

図-8 削孔中のロッド応力波形例 (試験体B)



(a) 測点1の応力波形



(b) 測点2の応力波形

図-9 ロッド応力波形の拡大図 (試験体B)

比較した結果を図-10に示す。ビットに入射する応力波は、地山の破碎に寄与する圧縮応力が大きく、引張応力は小さい。また、試験体 B、D、E における入射波の圧縮応力の最大振幅は、それぞれ 184.9 MPa、222.8 MPa、210.0MPa と大きな差が見られないことからピストンの打撃力が概ね一定であったと推察できる。一方、ビットの応力波が試験体を破碎した後のビットから削岩機側に

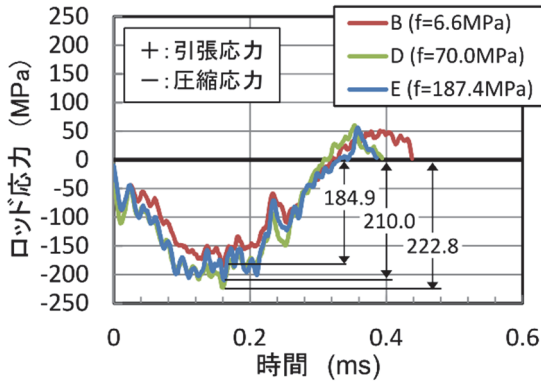


図-10 第1入射波形の比較 (測点1)

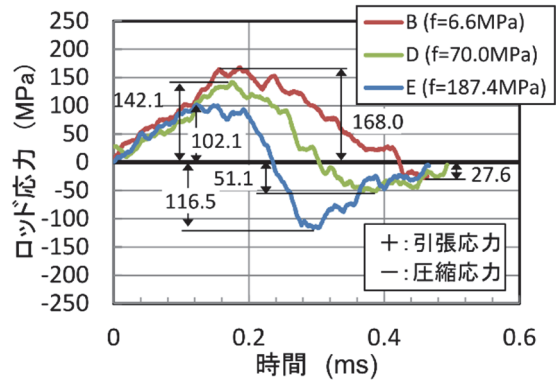


図-11 第1反射波形の比較 (測点1)

向かう第1反射波を比較した結果を図-11に示す。第1反射波では、圧縮強度が大きい試験体ほど引張応力の最大振幅が168.0 MPa、142.1 MPa、102.1 MPaと小さくなり、逆に圧縮応力の最大振幅が27.6 MPa、51.1 MPa、116.5 MPaと大きくなる。このことから、試験体の圧縮強度や剛性が大きくなるほどビットと試験体の音響インピーダンスの差が小さくなり引張応力が小さくなったこと、および応力波の入射が終了してビットに生じる反射波が圧縮応力になると、試験体の剛性が大きいほど試験体からの反発力が大きくなり反射波の圧縮応力が大きくなったと推察される。

入射波の主要な応力は圧縮応力であり、ロッドから音響インピーダンスの小さい試験体に入射することから反射波は引張応力となる。測点1のロッド応力波形から抽出したビット側に向かう応力波、および削岩機側に向かう応力波をビットと試験体の境界における入射波と反射波として反射係数を推定した。例えば、図-10の第1入射波形と図-11の第1反射波形の応力振幅を用いて試験体B、D、Eの反射係数を式(1)から求めると、-0.91、-0.64、-0.49となる。また、試験体を削孔する際に計測した複数の応力波形に適用し、求めた反射係数の平均値と応力波形数を表-3に示す。試験体Bの反射係数は-1.208で定義式の範囲外であったが、試験体A、C、D、Eの反射係数は-0.663、-0.621、-0.639、-0.299であった。圧縮強度が高い試験体ほど反射係数が大きくなると期待されたが、試験体が破砕されることもあり、試験体の圧縮強度と反射係数の相関は低いことがわかった。

4. 反射波の正負の応力振幅比と圧縮強度の関係

ロッド応力の結果では、試験体の圧縮強度が大きいほど反射波の引張応力は小さくなり、反射波の圧縮応力は大きくなった。そこで、図-12に示すように第1反射波の引張応力の最大振幅と圧縮応力の最大振幅を用いて反射波の正負の応力振幅比に基づく係数(以下、反射波の応力振幅比係数)を式(2)から求め、試験体の圧縮強度との関係を検討した。

表-3 各試験体における反射係数の平均値と応力波形数

試験体種別	一軸圧縮強度 f (MPa)	応力波形数	反射係数 α の平均値
A	0.3	207	-0.663
B	6.6	376	-1.208
C	49.8	944	-0.621
D	72.0	1266	-0.639
E	187.4	1823	-0.299

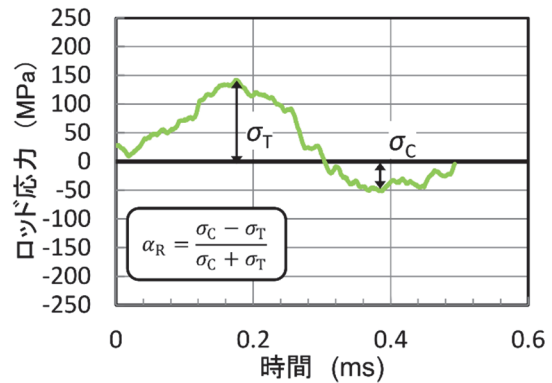


図-12 反射波の応力振幅比係数の算定法

$$\alpha_R = \frac{\sigma_C - \sigma_T}{\sigma_C + \sigma_T} \quad (2)$$

ここに、 α_R : 反射波の応力振幅比係数
 σ_C : 第1反射波の最大圧縮応力振幅
 σ_T : 第1反射波の最大引張応力振幅

反射波の応力振幅比係数においても、ビット先端が自由端の場合は $\sigma_C = 0$ と考えることができ、 $\alpha_R = -1$ となる。一方、固定端である場合は $\sigma_T = 0$ と考えることができ、 $\alpha_R = 1$ となる。よって、試験体の圧縮強度が大きくなると、係数の値が大きくなる。

各試験体を削孔した際に、ロッドの応力波から求めた反射波の応力振幅比係数の削孔深度分布を図-13に示す。図中には打撃ごとに求めた反射波の応力振幅比係数を○で示し、削孔深度方向の傾向を見るため、50個あたりの区間平均を赤線で示した。また、試験体の削孔区間における係数の平均値を併記した。なお、試験体の削

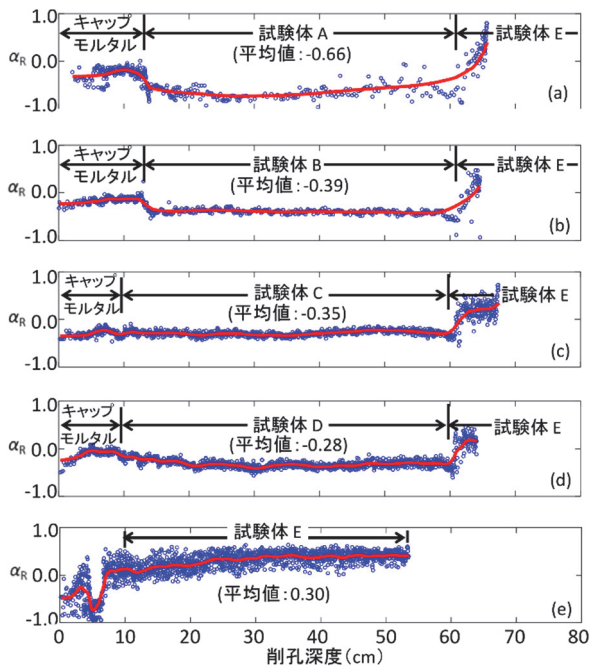


図-13 各試験体における反射波の応力振幅比係数 (α_R) の削孔深度分布

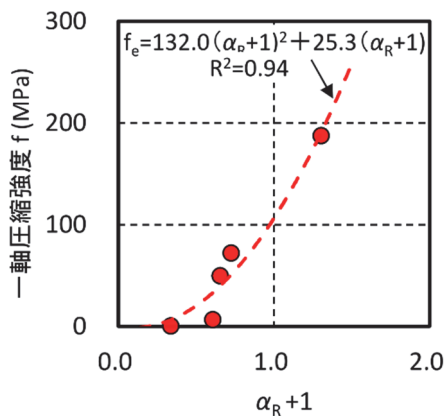


図-14 第1反射波の応力振幅比係数 (α_R) と一軸圧縮強度 (f) の関係

孔開始時のキャップ用モルタル部分は、作動油圧が低圧から急激に上昇する区間であるため、反射波の応力振幅比係数の評価から除外した。図より、試験体 A～試験体 E の反射波の応力振幅比係数の平均値は、 -0.66 、 -0.39 、 -0.35 、 -0.28 、 0.30 であり、圧縮強度が大きくなるほど反射波の応力振幅比係数が大きくなった。また、試験体 A～試験体 D から試験体 E の花崗岩に変化する位置（削孔深度が 60cm 付近）で反射波の応力振幅比係数が急激に大きくなった。

反射波の応力振幅比係数 (α_R) と試験体の一軸圧縮強度 (f) の関係を図-14 に示す。図は削岩機を空打ちした場合に $\alpha_R = -1$ 、 $f = 0$ となることから、この条件の結果が原点となるように横軸を $\alpha_R + 1$ として整理した。データ数は少ないが、両者の間には比較的高い相関が見られ

る。試験体からの反発力が反映される反射波の圧縮応力を考慮した指標（応力振幅比係数）を用いたことで、圧縮強度との相関が高くなったと推察される。関係式を 2 次の多項式近似により求めると、式 (3) となる。

$$f_e = 132.0 (\alpha_R + 1)^2 + 25.3 (\alpha_R + 1) \quad (3)$$

ここに、 f_e : 推定一軸圧縮強度 (MPa)

α_R : 反射波の応力振幅比係数

以上から、削孔時の反射波形の振幅から求めた反射波の応力振幅比係数を用いて地山の圧縮強度を推定できる。

5. まとめ

圧縮強度が既知である試験体を用いて削孔実験を行い、削岩機のロッドを伝播する応力波と圧縮強度との関係について検討した。その結果、提案した反射波の応力振幅比係数は、試験体の一軸圧縮強度との相関が高く、地山の圧縮強度を推定する際の有効な指標であることを確認した。ひずみゲージを貼付したロッドを事前に準備することで、トンネル切羽の地山が脆弱な場合であっても、本稿で示した方法によって地山の圧縮強度を把握することが可能である。

6. あとがき

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、地山の圧縮強度の推定式の精度向上を図り、その適用性について検証したい。

【参考文献】

- 1) 塚本耕治、今泉和俊、「削孔検層システムによるトンネル切羽前方の地山予測」、奥村組技術研究年報、No.38、2012
- 2) 松井 保ほか、「トンネル技術者のための地盤調査と地山評価」、鹿島出版会、pp.189-200、2017.1
- 3) 山下雅之、石山宏二、福井勝則、大久保誠介、「さく岩機のさく孔効率と岩盤特性についての検討」、第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.1-6、2012.1
- 4) 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 MMIIJ、Vol.123、pp.152-157、2007.5
- 5) 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、2016.1
- 6) 石川信隆、大野友則、別府万寿博、藤掛一典、「基礎からの衝撃工学」、森北出版、pp.127-161、2008.3