

自由断面掘削機の振動データを利用した地山評価法の開発

塚本耕治* 浜田 元* 蛭子清二*
 栗本雅裕* 寺田道直* 清水顕誠**

1. まえがき

トンネルは線状構造物であるため、地山全体にわたって詳細な地質構造を把握することは困難である。そのため、施工中に得られる計測データや切羽の観察記録などの情報を十分に活用し、地山状況の変化に対応させて必要な対策を実施することがトンネルを安全かつ経済的に施工する上で重要である。近年、掘削機械の高性能化のほか、住宅地や構造物近傍の施工による騒音や振動などの環境条件の制約もあり、自由断面掘削機を適用する機会が増加している。自由断面掘削機（ブーム掘削機）^{1),2)}は、機体前方のブーム先端に取り付けられた多数のビットを持つカッターヘッドを回転させながら岩盤表面に押付けて地山を掘削する掘削機である。

本研究では、このカッターヘッドの押付力やブーム振動などの地山に対する掘削機械の応答情報（機械データと呼ぶ）には切羽位置の地山物性が反映されているという観点から、機械データを利用して地山状態を客観的に評価する方法の開発を進めている³⁾。トンネル現場の自由断面掘削機に自動計測システムを搭載して機械データを収録した。計測した機械データのうち、ブーム振動の振幅値と日本道路公団が導入している切羽評価点⁴⁾を対比した結果、両者の間には高い相関関係があることを見出した。さらに、自由断面掘削機の機械データと岩石の圧縮強度との基礎的な関係を明らかにするため、モルタル試験体を用いた実機による掘削実験を実施した。

ここでは、このような地山評価法の開発の一環として進めている地山評価システムの概要、トンネル現場への適用結果および模型岩盤を用いた掘削実験の結果について述べる。

2. 地山評価システム

2.1 機械データによる地山評価

機械データを用いた地山評価法における情報の関連性を図-1に示す。この評価法には、次のような特徴がある。

- (i) 観察者の個人差が入らない客観的、定量的な地山評価を行える
- (ii) トンネル全長にわたる連続的な評価が可能である
- (iii) 掘削サイクルと競合することなく、リアルタイムな評価が可能である
- (iv) 実務経験者と同程度の精度で、地山評価ができる

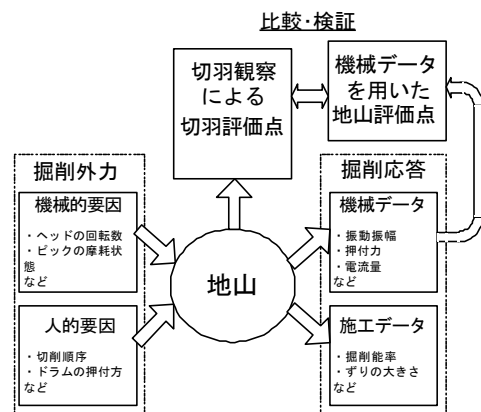


図-1 機械データを利用した地山評価

2.2 計測システム

計測システムの概要を図-2に示す。上下、左右方向のブーム振動を計測するため、ブームの上部および側部に加速度センサー(写真-1)を固定して防護カバーで覆った。カッターヘッドの押付力を計測するため、油圧配管に油圧センサー(写真-2)を取り付けた。制御・送信装置(写真-3)は各センサーから計測データを集め、一次処理したのち無線で送信する。後方に設置した受信・収録装置(写真-4)は、これを受信して

*技術研究所 **東京支社土木部

パソコン画面上に計測データを表示すると同時にメモリーカードに記録する。さらに、掘削終了時には地山評価点の算定を行い、結果をパソコン画面に表示する。また、2週間に1度の頻度で回収したメモリーカードのデータは、現場事務所において印刷出力される。

計測した機械データの処理フローを図-3に示す。掘削位置、切削モータの電圧および電流値、カッタヘッドの押付力の計測は1~10Hzでサンプリングを行い、ブーム振動の計測は1kHzでサンプリングを行った。信号変換部ではアナログ信号をAD変換し、演算処理部では1秒間ごとのデータを平均処理(振動データは振幅の絶対値を平均)して送信部の無線機から1回/秒の頻度で送信する。後方の受信装置では、これを受信して、事前に求めていた地山評価点と機械データの関係式からその位置の評価点を算出する。この関係式は、データの累積量を見て適宜更新される。

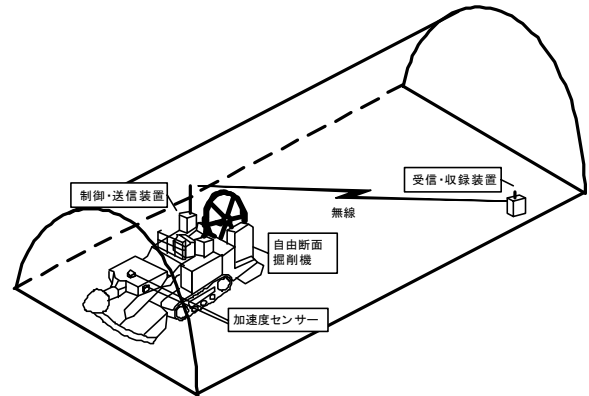


図-2 計測システムの概要

2.3 計測データの一次処理

受信・収録装置に保存された機械データには、地山を掘削していない時のデータも含まれている。そのため、掘削時の機械データを以下の方法で抽出した。

図-4(a)は一切羽分の切削モータ電流値の時刻歴を示す。地山を掘削していない時の電流値は120A(この値は掘削機で異なる)であり、地山を掘削するとモータに負荷が加わり、電流値は上昇する。このことから電流値が120A以上になる時の機械データを抽出して処理の対象とした。図-4(b)および図-4(c)は処理後の電流値、カッタヘッドの押付力の時刻歴、図-4(d)はサンプリング周波数1kHzで計測した加速度データから計算した1秒ごとの平均加速度振幅の時刻歴を示す。図-4(e)のブーム上下角の値から区分した押し込み掘削(カッタヘッドを前方に移動させて踏前を掘削する)の部分と払い掘削(ブームを左右に移動させてカッタヘッドの側面を地山に押し当てながら地山を掘削する)の部分を図中に矢印で示した。

押し込み掘削と払い掘削の区別は、現場観察の結果からブームの上下角が下向き5°より下方を掘削する場合は押し込み掘削、これより上方を掘削する場合は払い掘削とした。押し込み掘削は払い掘削の場合と比較して押付力が平均的に大きい、平均加速度振幅は逆に小さくなる。これは、押し込み掘削ではカッタヘッドの全周が地山に接触しているのに対して、払い掘削ではカッタヘッドの一部のみが地山と接するため、カッタ

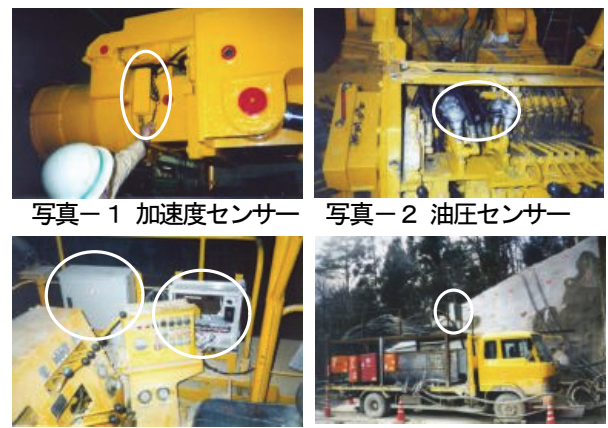


写真-1 加速度センサー

写真-2 油圧センサー

写真-3 制御・送信装置

写真-4 受信・収録装置

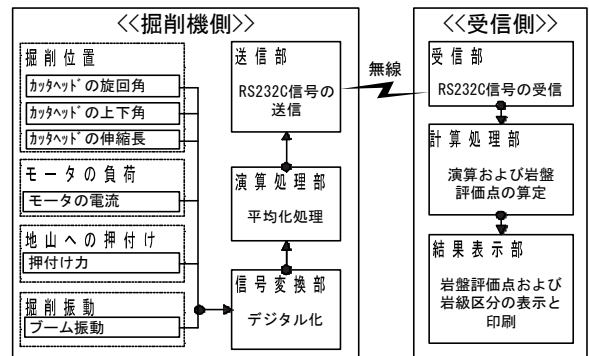


図-3 データ処理フロー

ヘッドに対する地山の拘束が弱くなる。このため、払い掘削ではブームの平均振幅値が大きくなったと考えられる。また、機種によるビットの配置や形状の違いや操作員によるカッタヘッドの地山への押付け方によってブームの振動の振幅値は大きく影響を受けると予想されたので、操作員による影響の少ない押し込み掘削時の機械データのみを分析の対象とした。

2.4 切羽評価点と切羽の機械データ

日本道路公団が導入している切羽評価点法⁴⁾では、切羽断面を天端中央部と左右両側部に3分割して、圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態、走向傾斜を主な観察項目としてそれぞれ評価した点数を加重平均（左肩部+天端部×2+右肩部）÷4する。評価点が高いほど地山状態は良好であると判断される。

切羽観察は通常1回/日の頻度で実施され、進行2～4サイクルの区間に対して1つの評価点が与えられる。この評価点と一進行分の機械データの代表値を対応させるために、相関分析を行うことにした。代表値は一次処理した一進行分の機械データから求めた計測項目ごとの平均値（一次処理した機械データの積分値を掘削時間で除した値）とした。

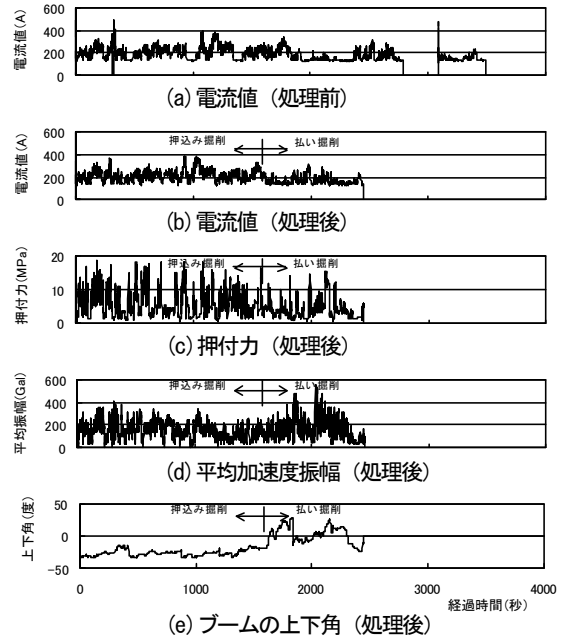


図-4 計測データの一次処理

3. 現場計測

3.1 適用トンネルと地質概要

山形自動車道の山家トンネル(延長 479m)、高原トンネル(延長 341m)、青野トンネル(延長 545m)の3本のトンネルが現場計測の対象である。高原トンネルおよび山家トンネルを掘削した RH-8J(日本鋳機製)と青野トンネルを掘削した S-200(三井三池製)の2種類の自由断面掘削機(表-1)に地山評価システムを搭載した。

地質は、新第三紀中新世の流紋岩質凝灰岩類と流紋岩が主体である。流紋岩の岩片自体は比較的硬質であるが、亀裂の発達している部分が比較的多い。熱水作用や風化作用を受けた凝灰岩類は、亀裂に粘土を挟んで脆弱である。

3.2 切羽評価点との比較

高原トンネルにおける切削モータの消費電力量と切羽評価点の距離分布を対比した結果を図-5に示す。両者の分布傾向は類似しているが、消費電力量は局部的な変動が大きい。これに対して、平均加速度振幅と切羽評価点の距離分布を対比した結果を図-6に示す。振幅と評価点の分布形は図-5の場合よりも類似した傾向を示している。また、相関分析の結果からも、ブーム振動の平均振幅は、消費電力量に比べて切羽評価点とより高い相関を示す。

同様に、青野トンネルと山家トンネルの平均加速度

表-1 掘削機のおもな仕様

掘削機	全長(m)	総重量(tf)	モータ出力(kW)
S-200	11.5	46	200
RH-8J	12.5	54	240

振幅と切羽評価点の距離分布を対比した結果を図-7、図-8に示す。両者は分布形が一致しない区間もあるが、全体的には同じ変動傾向を示している。

同じ掘削機(RH-8J)を用いた高原トンネルと山家トンネルの平均加速度振幅と切羽評価点の相関関係を図-9に示す。平均振幅と評価点の間には正の相関が見られる。すなわち、平均振幅が大きくなると地山状態は良いと判定されている。また、プロットの分布はトンネルごとに2つのグループ(○で囲む部分)に分かれて、平均振幅は山家トンネルの方が大きくなった。

一進行の掘削にかかった時間と平均加速度振幅の関係を図-10に示す。掘削時間と平均振幅には正の相関が見られる。プロットの分布は同様にトンネルごとに分かれて、掘削時間は山家トンネルの方が大きい。一般的に、岩石が硬く、亀裂の頻度が低くなるほど、掘削時間が長くなると考えられることから、平均振幅が大きいことは岩石強度が高く亀裂が少ない地山である可能性を示している。平均加速度振幅とそれと同じ切羽から採取した岩石の一軸圧縮強度(ポイントロード試験)の関係を図-11に示す。サンプル数は少ないが、山家トンネルの岩石強度は高原トンネルよりも

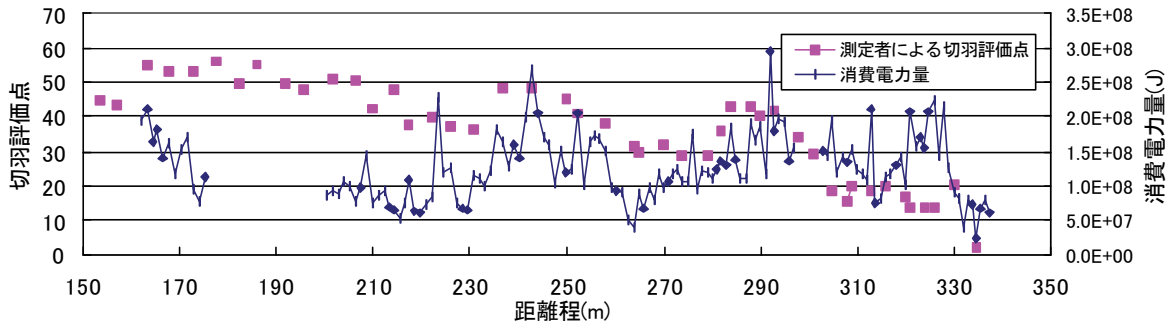


図-5 消費電力量と切羽評価点 (高原トンネル)

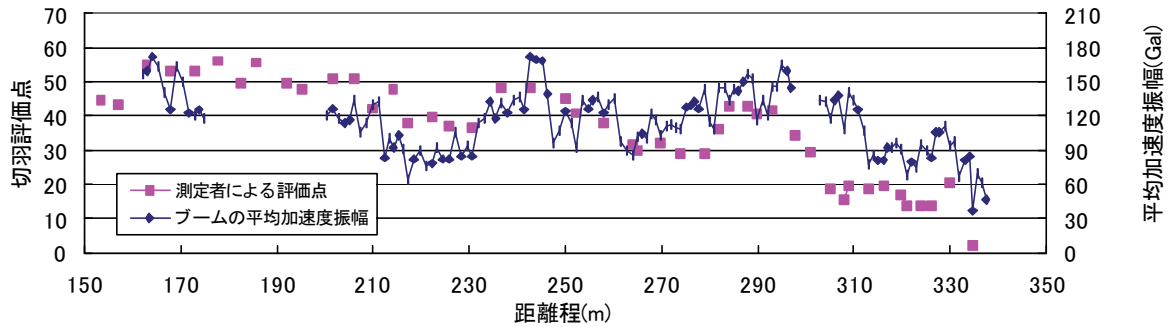


図-6 平均加速度振幅と切羽評価点 (高原トンネル)

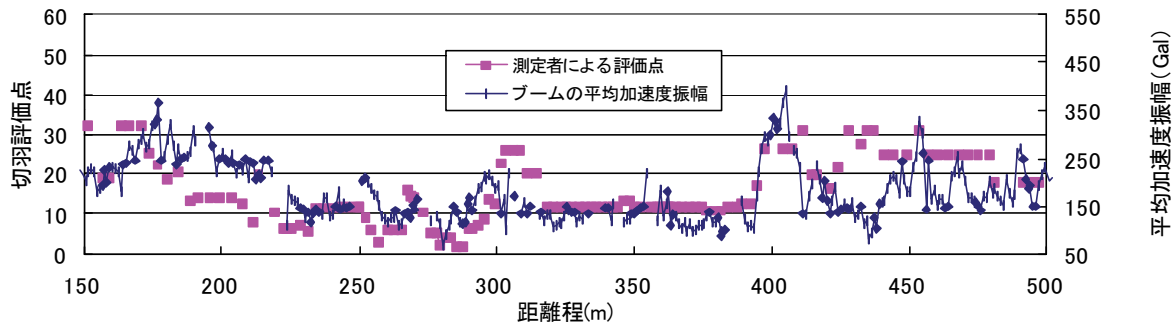


図-7 平均加速度振幅と切羽評価点 (青野トンネル)

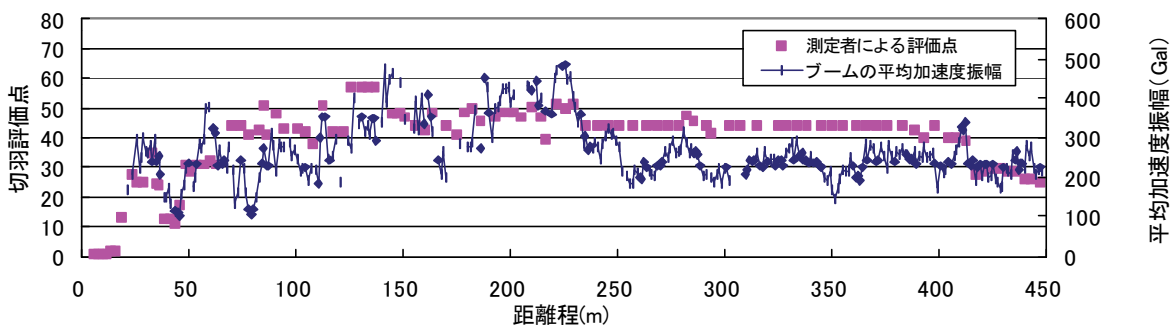


図-8 平均加速度振幅と切羽評価点 (山家トンネル)

相対的に高く、平均振幅との間に比例関係があることがわかる。同じ圧縮強度でも山家トンネルの平均振幅の方が大きいのは、亀裂の影響が反映された結果であると考えられる。

山家トンネルの岩石強度が高原トンネルより相対的

に大きいにも関わらず、切羽評価点に大きな差が見られなかったのは、山家トンネルでは亀裂に関する評価点が全体的に小さく、亀裂が地山に及ぼす影響をより大きく評価したからと考えられる。このように、2つのトンネルには評価の違いが見られ、切羽評価点に測

定上の個人差が入りやすいことは留意すべきである。
 この場合、ブーム振動の平均振幅を使えば客観的な地山評価が可能であることが示された。

4. 掘削実験

4.1 実験の概要

切羽評価点では圧縮強度の観察項目に対する配点が相対的に大きいことから、強度の異なるモルタル試験体を用いた掘削実験を行い、ブーム振動と強度の基礎的な相関関係について調べた。

試験体は図-12 に示す大きさ (2m×2m×1m) で設計強度が 10、30、60MPa である 3 体と設計強度が 60MPa で厚さ 9mm、幅 1.2m、奥行き 0.8m のスリットを鉛直方向に入れた 1 体の合計 4 体である。試験体の物性値を表-2 に示す。

実験では、図-13 のように H 鋼を介して PC 鋼棒で試験体を反力壁、および反力床に固定してブーム掘削機 S-65 (三井三池製、全長 11.3m、総重量 22tf、モータ出力 65kW) を用いて掘削した。掘削手順は押し込み掘削を 2 回に分けて行い、その後、払い掘削をそれぞれ左方向および右方向に 1 回ずつ行った。計測は 2.2 の計測システムを用いて行い、計測データは 2.3 の手順で処理した。

4.2 実験結果と考察

実験中の押付圧は常にリリース状態 (一定以上の圧力が作用しない状態) になり、カッタヘッドの押付力は 14.4kN で一定となった。切削モータの電流値は 1 秒ごとの平均値を、さらに 1 回の掘削分について平均化処理を行った。

図-14 は、単位掘削体積あたりの消費電力量と試験体の圧縮強度の関係である。圧縮強度が大きな場合に掘削速度が小さくなり、掘削時間が極端に長くなる。圧縮強度 60MPa の第 1 回押し込み掘削は掘削機械の能力を超えて岩盤を掘削する場合に相当し、通常の現場施工では現れない異常な機械データと見られる。各試験体の 1 回目の押し込み掘削における平均加速度振幅と圧縮強度の関係を図-15 に示す。圧縮強度が 10MPa から 30MPa と大きくなると平均振幅も大きくなるが、圧縮強度 60MPa を掘削する際の平均振幅は逆に小さくなる。この傾向は水平方向より鉛直方向の平均振幅の方がより明瞭に現れ、2 回目の押し込み掘削の場合も同様

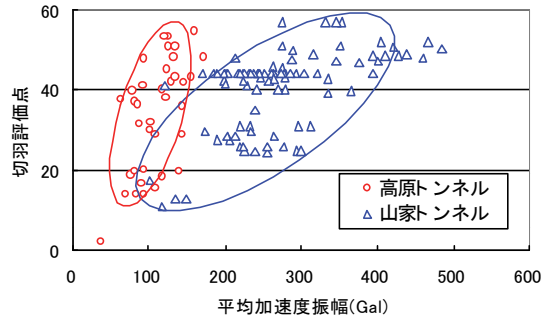


図-9 切羽評価点と平均加速度振幅の関係

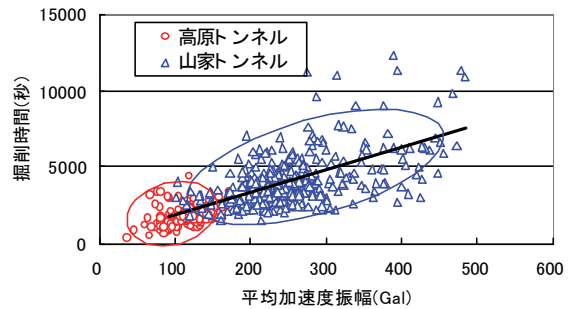


図-10 掘削時間と平均加速度振幅の関係

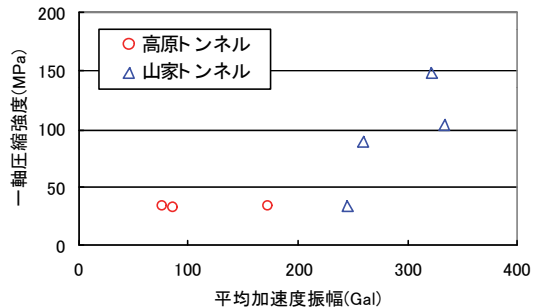


図-11 一軸圧縮強度 (ポイントロード試験) と平均加速度振幅の関係

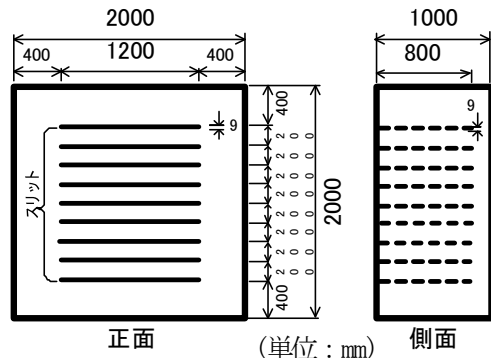


図-12 試験体の寸法 (スリットがある場合)

表-2 試験体の物性値

試験体番号	密度 γ_t (Mg/m ³)	一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	弾性係数 E (GPa)	弾性波速度 Vp (m/s)	スリット
試験体1 (10MPa)*	2.0	12.8	12.9	1529.6	なし
試験体2 (30MPa)*	2.1	38.5	20.4	1957.2	なし
試験体3 (60MPa)*	2.3	63.3	27.6	2102.1	なし
試験体4 (60MPa)*	2.3	63.3	27.6	2102.1	あり

* ()内は目標強度を示す

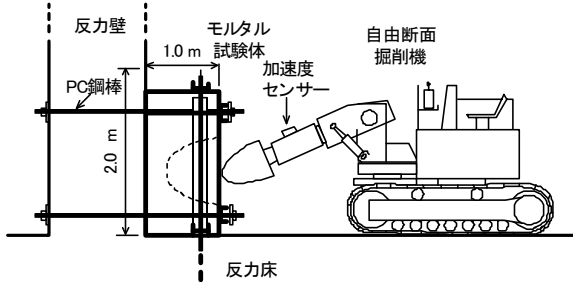


図-13 実験の配置図

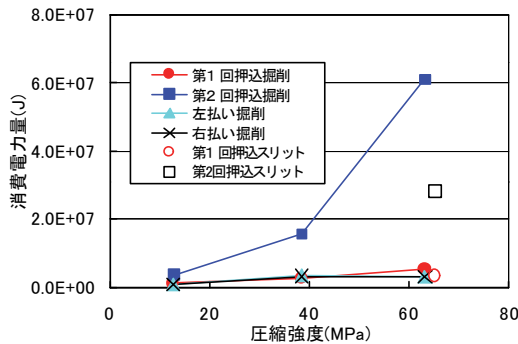


図-14 消費電力量と圧縮強度

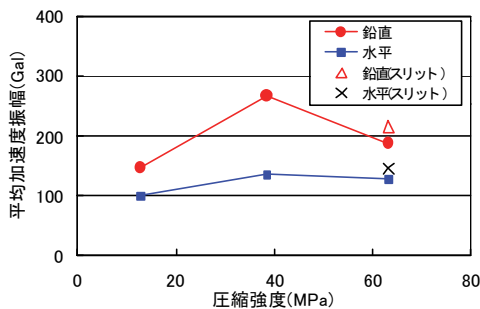


図-15 平均加速度振幅と圧縮強度

であった。通常、圧縮強度に対して掘削性能がある掘削機を用いて大きな押付力と切削力で掘削する場合には、圧縮強度が大きくなると平均振幅は大きくなる。

これは、切羽の岩盤が硬くなると、掘削機の振動が大きくなるという作業員のもつ感覚と一致している。一方、掘削機がもつ効率的な掘削の限界を超えるような圧縮強度が大きい場合は、強度に対して押付力や切削力が小さいため、ビットが地山に切込む深さを十分

に確保できず掘削効率が低下して平均振幅は小さくなる。60MPa の試験体の掘削がこの場合であり、掘削の進行に伴って切削モータの出力が掘削に消費されなくなる。ビットの切込み量が小さく電流値は減少するのに対して掘削時間は長くなり、結果として消費電力量が大きくなったと考えられる。

図-14 および図-15 にはスリットのある試験体の押し掘削の結果も同時に示す。スリットのない場合に比較して、平均振幅は1割程度増加するが、消費電力量は半減している。圧縮強度が大きくても試験体にスリットなどの不連続面が含まれていれば、ある程度の切込みが確保できて効率よく掘削できることがわかる。

以上のように、10MPa と 30MPa の試験体の場合には、圧縮強度と平均振幅に比例関係があること、また、スリットがあると平均振幅は少し大きくなり、掘削効率が向上することが示された。

5. あとがき

機械データは、地山状況の変化に応じた適切な支保パターンを選定する際の判断資料として役立てることができる。現場適用する場合には、初期のキャリブレーションの段階で平均加速度振幅と切羽評価点の関係式を求めておき、切羽評価点の施工実績からこの関係式を適宜更新するようにしている。今後、振動以外の機械データと組み合わせることで、精度を向上したいと考えている。

山口大学工学部の中川浩二教授には本研究を進めるにあたり、貴重な御助言と御指導をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 大久保誠介、「掘削機械」、資源と素材、Vol. 116、No. 3、pp. 224-232、2000. 3
- 2) 大山宏、「1500kg/cm²の壁は厚いか?」、建設機械、Vol. 37、No. 4、pp. 56-65、2001. 4
- 3) 塚本耕治ほか、「自由断面掘削機の機械データを用いた地山評価法の基礎的研究」、第 11 回岩の力学国内シンポジウム、2002. 2
- 4) 中田雅博ほか、「新しい切羽観察手法」、ハイウェイ技術、No. 9、pp. 41-49、1997.