

# ハンマードリルを用いた原位置岩盤強度測定器の開発 Development of an In-Situ Rock Strength Meter using a Hammer Drill

平野 享\*

Toru Hirano

山下 雅之\*\*

Masayuki Yamashita

引間 亮一\*

Ryoichi Hikima

石山 宏二\*\*

Koji Ishiyama

## 要 約

現場において簡単に効率よく岩石や岩盤の一軸圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) を測定できる測定器を開発した。この測定器は市販のハンマードリルを改造したもので、ハンマードリルが岩石や岩盤を穿孔するときの電流、電圧、ノミ下りなどをメモリーカードに記録する機能を備えている。また、この記録から  $\sigma_c$  への換算は、 $\sigma_c$  が既知の試験体を使い、 $\sigma_c$  と掘削体積比エネルギーとの関係式を予め作成してこれを参照する方法とした。開発したシステムは、測定後のデータ処理から  $\sigma_c$  算定までをパソコン上の表計算ソフトで終えることができる。また、測定器は、作業者一人で運搬と操作が可能で、手持ち式とすることで測定箇所への据付作業は不要であり、ハンドリングの良好なものとすることができた。本論文は、当該測定器の開発過程とその実施例について述べるもので、室内試験による測定原理の確認、測定器の考案製作、実岩盤等への適用結果について報告する。

## 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 測定原理の確認
- § 3. 原位置用測定器の開発

### § 1. はじめに

これまで、トンネルボーリングマシンや削岩機などの掘削機械を対象に、岩盤を掘削する際の地質に依存した掘削挙動を理解する一助として「掘削体積比エネルギー」という指標が提案されていた<sup>1)</sup>。「掘削体積比エネルギー」とは単位体積の岩盤を掘削するのに要したエネルギー ( $J \cdot m^{-3}$ ) (以下、SE と略す。) である。実際に SE を測定すると、岩盤を掘削するための正味エネルギーと、掘削方式、摩擦、振動などに起因する損失エネルギーとが合わさって計測される。このうち損失エネルギーの正確な評価は困難であるが、仮に、評価不能であったとしても、掘削機械の形式や運転方法を固定すれば、データ処理で掘削岩盤に依存する成分を分離することができる。実際に、現場における掘削機械の形式や運転方法をできるだけ揃えるなど整理して SE の変化を評価したところ、トンネル地山性状 (例えば一軸圧縮強度  $\sigma_c$  の変化) が推

定可能であったと報告されている<sup>2)</sup>。

この報告を受けて、掘削機械のある種の測定器として評価した SE から  $\sigma_c$  を推定可能であるならば、手持ち式回転ドリルで岩石を穿孔すれば、同じ原理でその岩石の  $\sigma_c$  が評価可能ではないかとの発想が生まれた。そこで実験が行われ、数種類のインタクトな岩石ブロックをハンマードリルを用いて穿孔し、穿孔時の SE と、同ブロックから作成したサンプルの  $\sigma_c$  とが比較された。その結果、SE と  $\sigma_c$  とに相関が認められ、 $\sigma_c$  の評価法としてハンマードリルが利用可能であると結論された<sup>3)4)</sup>。さらには、ハンマードリルが持運び容易なことを生かし、原位置試験への発展も考えられるものであったが、測定器の設計が課題となり、実際に製作するには至っていなかった。

一方、(独)日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構) では、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を行ってきた。ここでは、岩盤の長期的な挙動を評価できる岩盤力学モデルの構築が重要な研究課題となっている。当該モデル構築の根拠となる岩盤物性の取得は、例えば坑道掘削前のボーリングコアによる力学特性の評価、あるいはボーリング孔を用いた初期応力調査などに拠っていた。しかしながらボーリング孔の掘削にはコストがかかるので実施可能な数が限られる。ゆえにボーリング孔で得られた結果を代表値とする際は、岩盤の持っている不均一性による値のばらつきを程度を確認することが必要であり、岩盤物性を評価したい領域に

\* 技術研究所技術戦略グループ

\*\* 技術研究所土木技術グループ

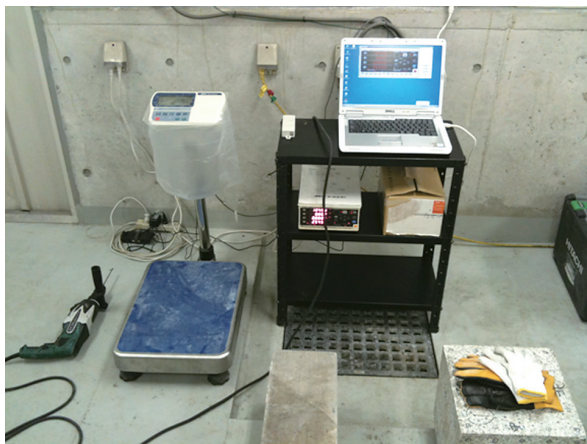
対し網羅的にデータが取得できる岩盤調査法の開発が求められていた。これに対し、本手法はハンマードリルを用いた簡易な穿孔だけで簡単に岩盤強度が得られることから、これを原位置へ転用することをテーマとする共同研究を原子力機構に提案した。提案では本手法を応用した原位置強度測定器の完成を目標とし、室内試験に留まっていたハンマードリルによる $\sigma_c$ 測定法を、原位置適用可能となるまで改良することを課題とした。以下、本測定器の開発の成果について報告する。

## §2. 測定原理の確認

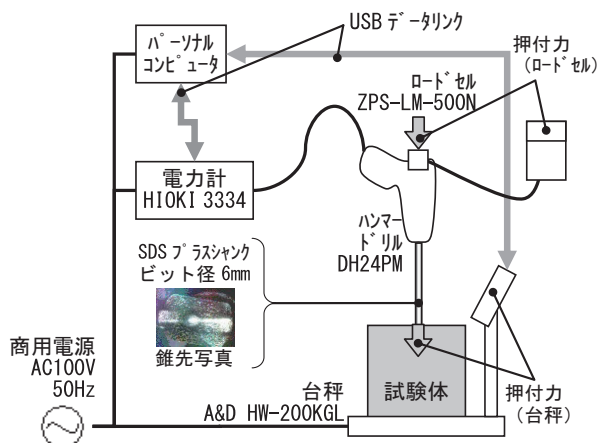
本測定器を開発する準備段階として、既存の室内試験の追試を行うことにした。その主目的は、開発前に、当該試験が第三者の手でも容易に再現できることを確認し、測定原理の安定性を把握することとした。再現性の確認であるので、実験条件は過去に報告された実験のものと同可能な限り同一としている。

### 2-1 室内実験の追試

実験装置を写真一と図一に示す。穿孔する試験体は、採石場で切出した約30cm角のブロックで、岩種は三城目安山岩、稲田花崗岩の二種類とし、およそ重量50~70kgのものである。実験は、これを最大秤量200kg



写真一 実験装置の外観



図一 実験装置の構成

の台秤に載せて、何も改造等を加えていない市販のハンマードリルでブロックの上面から穿孔するものである。穿孔後は、くり粉を清掃し、穿孔長をノギスで測定する。なお、台秤を用いることから、この実験装置では鉛直下向きの穿孔しかできない。また、ドリルビットは直径6mmのSDSプラスビットを用いた。

実験中は、ドリルに流れる電流、電圧をマルチファンクション式の電力計を用いてハンマードリルの電源プラグ位置で毎秒1~2回測定し、また、試験体を載せた台秤の指示値を毎秒3~4回の頻度で測定し、それぞれ時刻を付して時系列データとしてノートパソコンに保存した。ここで、時系列データをUSBリンクを用いてノートパソコンに転送するプログラムは、電流・電圧用と台秤用とで独立したものであり、1CPU上で並行動作させている。そのため、電流・電圧と台秤の指示値とで1秒以上の精度では同期させることができなかった。そのため、評価する際は1秒間の平均値を用いている。

ハンマードリルで得られるSEは、ドリルの消費電力 $W$  ( $W=J\cdot s^{-1}$ )と穿孔時間 $t$  (s)の積を穿孔体積 $v$  ( $m^3$ )で除した値で計算する。ハンマードリルは無負荷状態でも動作すれば電力を消費するので、これを $W_0$ とおき、正味の穿孔に要したSEは(1)式で求めるものとした。

$$SE = \frac{t(W - W_0)}{v} = \frac{t(W - W_0)}{\text{ビット径} \times \text{穿孔長}} \quad (1)$$

穿孔中のハンマードリルは単一のモーターを駆動源として「回転+打撃」動作を複合させている。また、モード切替機能により「回転+打撃」のほか「回転のみ」「打撃のみ」を動作形式として選択できる。しかし「回転+打撃」モードでない場合と花崗岩などの硬質岩石を穿孔できないこと、モード切替を行うと損失が変わり評価が複雑となることから、モードは「回転+打撃」に固定して測定した。

また、押付力が与えるSEへの影響を評価するため台秤の指示値を記録した。ドリルビットを穿孔対象に押付ける力に差があると、掘削速度が変化することは経験的に知られており、掘削速度が大きく変化すれば摩擦によるビットの発熱やくり粉の排出状況も大きく変わるので、結果として掘削効率が変化してSEに影響を与える可能性がある。

開発目標である坑道壁面での測定を考えると、試験体の背面に台秤を配置する方法で押付力は測定できない。ハンマードリル本体側に押付力の測定機能が必要と考えられる。押付力を検出する位置はハンドドリルのビット反力を直接受ける箇所（例えばビットを啜えて固定するチャックの位置）が望ましい。しかしそれにはハンマードリルの大改造が必要で市販品をベースとするメリットが小さくなってしまふ。そこで小改造ですむ検出位置を検討する目的で、室内実験では、ボタン状のロードセルをハンドドリルの表面に貼付けて実験を行った。結局、ロ

ードセルの貼付け位置は、操作者ががドリルに押付力を与える握りのビット軸線が妥当と考えられた。この位置であれば、押付けによるビットの曲げモーメント発生を小さくでき、操作者がハンドドリルのロードセル以外の部分に触れる必要がなく穿孔できる。

2-2 追試の結果

実験では、押付力の目標値を 6 kgf に設定し、操作者は、台秤の値ではなく、ハンマードリルの握りに貼付けたロードセルの値が 6 kgf となるよう手加減で調節を行った。

一方、図-2 は、台秤の値によるハンマードリルで穿孔開始したときの押付力の時間変化を示しており、8本の穿孔結果を重ねて表示している。図-2 から、押付力はドリル起動時から 3 秒以内に 6 kgf にほぼ一致し、さらに 6 kgf ± 1 kgf (網掛のゾーン) で安定していることがわかる。この台秤の記録が、ロードセルの値を見て 6 kgf に調節した操作と符合することから、操作者が握り部のロードセルを見て押付力を設定することは可能と判断した。

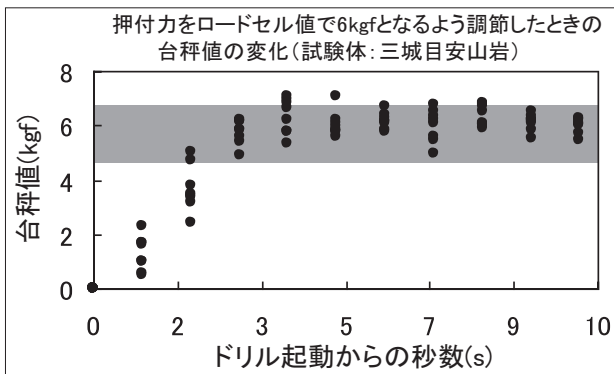


図-2 穿孔開始時の押付け力の様子

図-3 は、追試で確認したデータと、過去に報告された実験データとの一致性を、押付力の変化に対する SE の変化の関係において確認したものである。二種類の岩石についてデータを重ねて示すと、岩石の種類毎に近い値の SE を示すことが認められた。なお、ここまでの結果を得るのに、測定者は特段難しい操作を必要とせず、再現性あるデータを得ることができた。

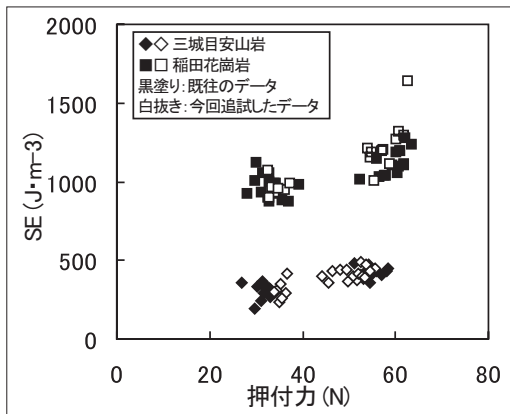


図-3 追試の結果

§ 3. 原位置用測定器の開発

本測定法の再現性、操作の簡便性が実証されたため、続いて原位置に適用可能な SE 測定器の開発に着手した。

3-1 原位置用測定器に必要な仕様

簡易に実施できる原位置用の著名な  $\sigma_c$  測定法の一つとしてシュミットハンマー<sup>5)</sup>がある。今回開発する測定器は、適用範囲がこのシュミットハンマーと重なることから、それに劣らないハンドリングの良さが必要と考えられ、要求事項を以下のとおり定めた。

1. 少人数（できれば一人）で搬入・測定できる
2. 測定操作が単純で簡単である
3. 原位置側に特別な準備や養生が要らない
4. 外部電源、冷却水など援助設備を必要としない
- また、前章で述べたように押付力のコントロールは測定上重要であることから、次も要求事項と考えた。
5. 押付力の測定構造の実現
6. 押付力によって変動する SE の評価方法

上記のうち 6. は、使用方法の課題であるので、前述の追試データを用いてその解決方法を検討することにした。

はじめに、押付力の影響を把握するため、追試で用いたのと同じ実験装置、試験体（稲田花崗岩）を用いて、ハンマードリルの押付力を広範囲に変化させた穿孔実験を行った。実験結果を図-4 に示す。図をみると、穿孔可能な最小の押付力の存在があることが推測される。また、押付力が 70 (N) 程度までの領域（以下、比例領域と呼ぶ。）では、ノミ下がりと穿孔の消費電力 ( $W-W_0$ ) が押付力に概ね比例して増加することが分かる。押付力が 70 (N) を超えてくると、ノミ下がりも消費電力も増加が頭打ちとなる領域が現れる（以下、安定領域と呼ぶ）。さらに押付力が 150 (N) を越えてくると、もはやドリルビットが異常に磨耗したり回転不能になったりするので、それ以上の押付力の設定は不可能となる。

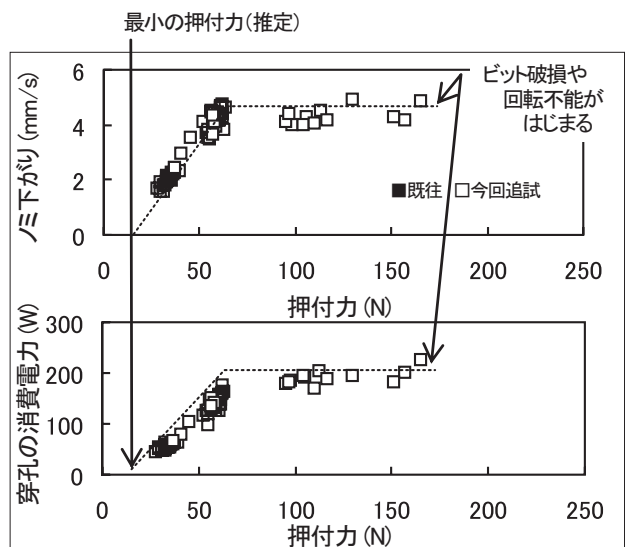


図-4 追試装置で測定した押付力の影響



SE を計算する(1)式において、穿孔の消費電力は分子、ノミ下がりりは分母に入力するパラメータなので、その変化量はSEに与える影響を互いに消去しあう組合せとなる。しかし、図-4の比例領域における押付力に対するSEの変化を、図-3を用いて確認すると、押付力の変化の影響は緩和されているものの、無視できるほど消去されるには至っていない。一方、安定領域では、これらパラメータは押付力が変化しても概ね一定であることから、仮にこの領域でSEを評価できれば、測定中の押付力の変動は無視できるものと考えられる。

以上のことから、安定領域で穿孔すれば、押付力の変動を考慮することなくSEが測定できるものと結論した。

3-2 原位置用測定器の製作

試作した原位置用測定器(図-5、写真-2)は、前節で示した要求事項1~5を満たすものとして以下の仕様とした。付した番号は同要求事項の番号に対応した、各々の解決手段である。

1. 測定部(重量8kg, 外寸460×300×100mm)  
バックパック(重量15kg, 外寸500×500×200mm)
2. 操作部は測定開始/終了と穿孔ボタンの二つだけ
3. 押付力計, ノミ下がり計をドリル本体に搭載  
手持ち操作による穿孔だけでデータ取得
4. DCバッテリー駆動, ドリルビット冷却不要
5. 本体と押付用の握りとの間にロードセル搭載

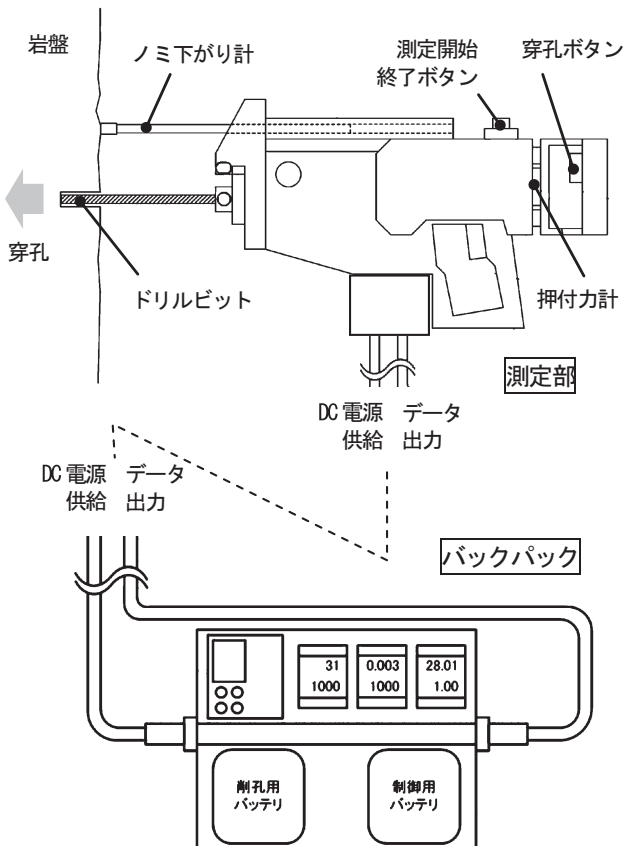


図-5 製作した原位置用測定器

3-3 原位置用測定器の現場テスト

試作した原位置用測定器のテストを実際の地下坑道において実施した。実施場所とした地下坑道は原子力機構により掘削された、瑞浪超深地層研究所の深度300(m)にあるボーリング横坑である。当該ボーリング横坑においては、岩盤露頭にアクセスできるよう側壁のほぼS.L.より下側と床面が素掘りの状態で露岩している(写真-3)。岩石の種類は土岐花崗岩であり、別途実施した一軸圧縮試験では $\sigma_c = 150 \sim 200$  (MPa)程度であった<sup>6)</sup>。

テストでは岩盤露頭に対して約1(m<sup>2</sup>)の領域を5地点選定し、水平方向に穿孔する3地点と鉛直下向きの2地点とした。各地点毎の穿孔数は少なくとも9点を確保し、孔毎に押付力を変えて穿孔し、データを収集した。ドリルビットは直径8mmのSDSプラスビットを用いた。

図-6は当該テストで測定したデータを用いて、原位置用測定器におけるハンマードリルの押付力の影響を見たものである。本図では穿孔方向が岩盤露頭に対して水平方向と鉛直下向きの場合を重ねて示しているが、鉛直下向きの場合は測定器の自重(約80N)以下の測定が、操作上困難であるのでその部分のデータはない。

本図において、前述の図-4と同じように比例領域と安定領域の抽出を試みると、比例領域は水平方向の場合のデータのみ認められ、押付力が約50(N)を超えたあたりから安定領域となることわかる(図中点線)。鉛直



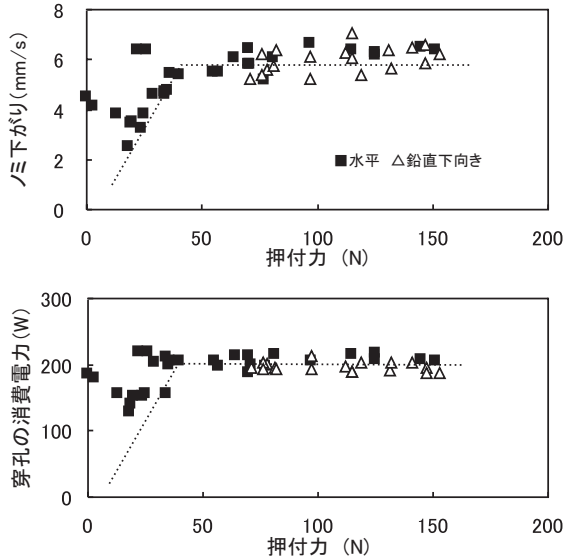
写真-2 測定器の外観



写真-3 テスト場所とした試験坑道の状況

下向き方向の場合の比例領域がどうなるかは、押付力の小さい領域にデータが無く不明であるが、安定領域においては、のみ下がりおよび消費電力とも穿孔方向による相違は特段認められない。

まとめると、本測定器を用いて原位置測定を行う場合、水平方向と鉛直下向き方向の両方に適用が可能であり、方向によるデータの相違は、少なくとも安定領域で小さく、この性質を利用すると二方向のデータを概ね同等に扱うことができる。また、測定時の押付力は、花崗岩では比例領域に隣接する安定領域といえる 70~100 (N) 程度とすればよいと考えられる。



図一六 原位置用測定器で測定した押付力の影響

3-4 原位置用測定器による岩盤強度との関係

前項のとおり、坑道内で本測定器を用いたデータ取得が可能なが確認され、また穿孔方向や押付力の相違に対する考え方が明確になったので、次は、本測定器における穿孔データと  $\sigma_c$  との関係について検討することにした。

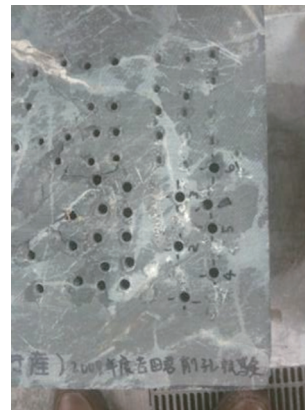
$\sigma_c$  が予め判明している様々な試験体(表一)を用意し、これらについて本測定器で穿孔データを得て(1)式により SE を計算し、SE と  $\sigma_c$  との比較を行なった。用意した試験体は、室内試験用に用意した岩石ブロック 4 種(三城目安山岩、稲田花崗岩、アメリカ花崗岩、いわき砂岩；写真一4)と、原位置用測定器のテスト場所とした瑞浪超深地層研究所の坑道内およびその周辺で採取された 5 地点のボーリングコア(土岐花崗岩 A, B, C, 200-1, 200-2；写真一6)、さらに、比較的低い強度を狙った人工的な石質材料として、コンクリート試験体 5 種とした。ドリルビットは直径 8 mm の SDS プラスビットを用いた。押付力は安定領域にあると考えられる 80(N)前後とした。

なお、コンクリート試験体は、生コン業者のプラントに穿孔試験体用の容器(写真一5)と標準試験体用の容器とを預け、様々な呼び強度について出荷の際の余剰分をそれぞれ詰めて頂いたものである。好意で頂くものな

ので、呼び強度を事前に指定することはしていない。よって、 $\sigma_c$  は作成した標準試験体を用いた一軸圧縮試験で得るものとした。

表一 用意した試験体一覧

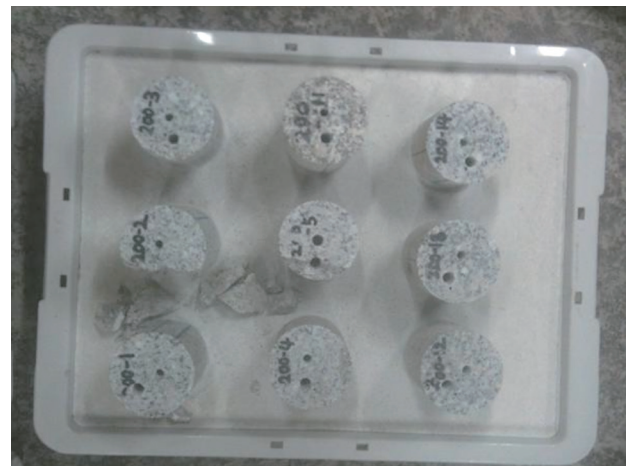
試験体の種類	試験体名	$\sigma_c$ (MPa)
三城目安山岩	同左	78.0
稲田花崗岩	同左	205
アメリカ花崗岩	同左	364
いわき砂岩	同左	524
土岐花崗岩	土岐 A	71.8
	土岐 B	131
	土岐 C	202
	土岐 200-1	136
	土岐 200-2	150
コンクリート	1	41.1
	2	40.3
	3	60.7
	4	67.0
	5	70.3



写真一四 岩石ブロック (いわき砂岩)



写真一五 コンクリート (試験体 1)



写真一六 ボーリングコア (土岐花崗岩)

図一七に SE と  $\sigma_c$  の関係を示す。図中の点線は多項式近似にて求めた実験式である。本図によると、 $\sigma_c$  が大きいほど SE も大きくなる関係が認められ、定性的に強度の高いものほど単位体積の穿孔に必要なエネルギーが大きいという、直感的に妥当な関係を示している。この実験式が、本測定器で  $\sigma_c$  を求めるための換算式となる。換算式の特徴をみると、 $\sigma_c$  が小さいほど、 $\sigma_c$  に対する SE の感度は低下し、強度ゼロ ( $\sigma_c=0$ ) においては、SE は



600 (J・m<sup>-3</sup>) 程度に収束することを示している。

換算式の特徴を理解するために、図-8を示す。図-8は、図-7における縦軸を  $SE/\sigma_c$  に代えて示したものである。ここで、 $SE$  と  $\sigma_c$  の次元は同じことから  $SE/\sigma_c$  は無次元である。 $SE/\sigma_c$  は単位体積を穿孔するエネルギーが強度あたりでどれだけ必要かを意味しており、穿孔効率の指標となることが知られている<sup>7)</sup>。図-8によれば、 $\sigma_c$  が 250 (MPa) よりも高い領域ではおよそ  $SE/\sigma_c = 3$  で安定しており、強度あたりでエネルギーが一定、すなわち本測定器による穿孔効率が変わっていないものと考えられる。一方  $\sigma_c$  が 250 (MPa) 以下の領域では、 $\sigma_c$  の低下により強度あたりのエネルギーが増加している。特に 100 (MPa) 以下となるとその増加は急激となり、 $\sigma_c = 0$  でエネルギーは無限大に発散するような関係を示している。すなわち、穿孔する対象の強度が低いほど、穿孔効率が悪くなる特性が認められる。

したがって、本測定器を  $\sigma_c$  が 100 (MPa) を下回るような対象に適用する際は、穿孔効率の低下を考慮した  $\sigma_c$  の評価が必要である。

#### §4. まとめ

現場において簡単に効率よく岩石や岩盤の一軸圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) を測定できる測定器を開発した。この測定器は市販の DC 駆動式ハンマードリルを改造したもので、ハンマードリルが岩石や岩盤を穿孔するときの消費電力、ノミ下り及び穿孔体積などをメモリーカードに記録する機能を備えている。測定操作においては、押付力としてその変動による測定結果への影響が少ないと考えられる安定領域の値を選ぶべきで、本測定器ではドリルビットに直径 8 mm の SDS プラスビットを用いた場合、花崗岩を対象として押付力 50~100 (N) が適切であった。また、測定された  $SE$  から  $\sigma_c$  への換算は実験で得られた換算式を用いて可能であることを示したが、強度が 100 (MPa) を下回るような場合、穿孔効率の低下を考慮した  $\sigma_c$  評価が必要であり、その方法については今後の課題として残された。

本測定器の適用限界や評価精度の把握、また、今回検討しなかった、穿孔対象の粒径や構造などに起因する不均質性、あるいは、岩盤を対象とした場合の割れ目の影響などは、今後、測定事例を積み増して明らかにすべき課題と考えられる。

**謝辞：**東京大学福井教授、並びに、同研究室の方々には、実験装置等を提供いただいたこと、開発に関する技術的なご指導を賜りましたことに対し、御礼申し上げます。本研究は(独)日本原子力研究開発機構との共同研究の一部として実施したものである。

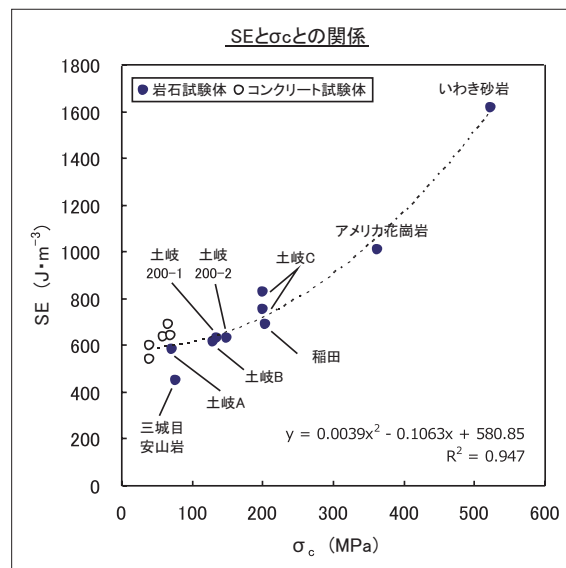


図-7 SE と  $\sigma_c$  との関係

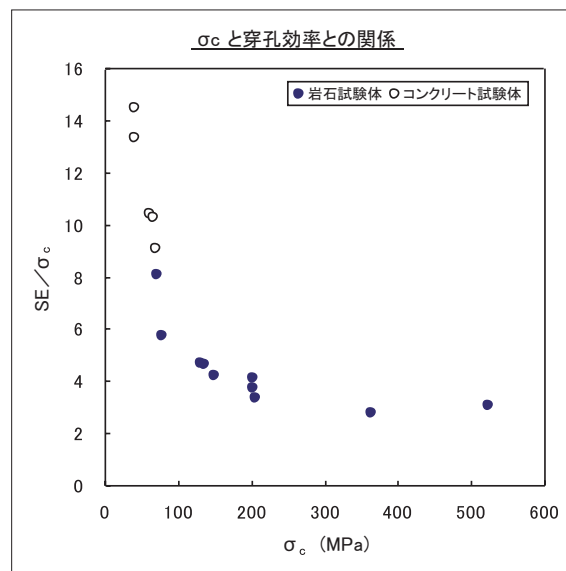


図-8  $SE/\sigma_c$  と  $\sigma_c$  との関係

#### 参考文献

- 1) 西松裕一：日本鉱業会合同秋季大会分科研究会資料 L-5, 1972.
- 2) 山下雅之, 福井勝則, 大久保誠介：資源と素材, Vol. 120, pp. 508-514, 2004
- 3) 吉田智章, 福井勝則, 大久保誠介：資源・素材学会春季大会講演要旨集 (A), pp. 89-90, 2010
- 4) 福井勝則, 大久保誠介, 羽柴公博, 平野享：資源・素材学会秋季大会講演要旨集 (A), pp. 171-174, 2011
- 5) 山口梅太郎, 西松裕一：岩石力学入門 (第3版), pp. 169-184, 1991
- 6) 平野享, 中間茂雄, 山田敦夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀：超深地層研究所計画 (岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1 号孔における岩盤力学調査, pp. 11, 2009
- 7) 山下雅之, 石山宏二, 福井勝則, 大久保誠介：第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号 1, pp. 1-6, 2012