大久保 誠 介¹ 西 松 裕 一²
秋 山 政 雄³ 辰 巳 哲⁴

[UDC 624. 121. 381]

Study on Impact Penetration Test of Rock

by Seisuke OKUBO¹, Yuichi NISHIMATSU¹, Masao AKIYAMA¹ and Tetsu TATSUMI²

1. Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

2. Nippon Steel Co., Ltd.

Impact penetration test is important to observe the behaviour of rock undergoing very rapid loading which can not be realized by a testing machine. A force-penetration relationship is considered to be closely related to performance of percussive rock fragmentation process.

A lot of experimental studies have been carried out and it was found that the slope of force-penetration curve in impact penetration test is steeper than that in static penetration test. However, qualitatively much difference exists from author to author.

A system of impact penetration test developed in this study comprises a hammer and a cylindrical bar with a bit at one end. Stress wave is measured by a pair of semi-conductor strain gauges, and penetration is calculated by the measured stress wave.

Nine rocks were tested and force-penetration curves in impact and static tests were obtained together with uniaxial compressive strength, indirect tensile strength, Young's modulus, Poison's ratio, rebound hardness by Schmidt hammer and Shore hardness. Good correlation was found between force-penetration curves in impact and static tests, and slope by impact test, K_d can be expressed by slope in static test, K_s as

$$K_d = 1.2 K_s.$$

The difference between K_d and K_s is not so much as expected, just 20%.

KEY WORDS: Rock, Rock Drill, Impact, Penetration Test

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であると共に、通常の試験機を使用した力学試験では実現できない載荷速度の速い領域での時間依存性挙動を調べるためにも重要であり、これまでに多数の研究が行われてきた。

佐々木らは、ビットゲージ20mmの一字ビットを用いて衝撃貫入試験と静的貫入試験を行った¹⁾²⁾。ビット先端から約30mmの場所に歪ゲージを貼り付けて貫入抵抗を測り、それよりさらに約30mmビット先端より離れた場所に環状電極を設け静電容量の変化より変位を求めた。その結果を見ると、一軸圧縮強度35MPaの伊豆下賀茂の砂岩では衝撃貫入抵抗（貫入量が同じ時）の方が静的貫入抵抗より大きく、114MPaの三井砂川の砂岩では衝撃と静的とではほぼ同じであり、190MPaの稲田花こう岩では静的貫

入抵抗の方が大きい。すなわち、実験範囲内では軟岩ほど衝撃貫入抵抗の方が相対的に大きくなっている。

Hustrulidらは、ビットゲージ1.5インチのビット (Sandvik Coromant, Winged bit) を用いて衝撃貫入試験と静的貫入試験を行った³⁾。貫入抵抗と変位の測定方法は、佐々木らと基本的には同じである。実験結果を見ると、静的貫入抵抗曲線（貫入抵抗-貫入量曲線）が比較的滑らかなのに対して、衝撃貫入抵抗曲線では貫入力が一旦低下した増加する箇所がかなりある。大理石と2種の花こう岩では、衝撃貫入抵抗の方が大きい。ただし、同一箇所でも何回も貫入試験を行うと、次第に静的と衝撃との差が小さくなる傾向がある。また、刃先角の影響については、従来のIndiana石灰岩の実験結果を収集し検討した結果、刃先角75°と90°の場合には静的と衝撃とで差がなく、刃先角120°では衝撃貫入抵抗が大きいとしている。

Goldsmithらはくさび型ビットと先端角が60°と90°の円錐形ビットを使用して実験を行った⁴⁾。この場合も貫入抵抗と変位の測定方法は、佐々木らと基本的には同じである。試料岩石は、頁岩、石灰岩、粘板岩である。衝撃の場合の方が貫入抵抗が大きく、衝撃貫入抵抗曲線が激しく変化するのに対し、静的貫入抵抗曲線は比較的滑らかであると報告している。これらはHustrulidらの結果と一致している。

* 1991年7月23日受付 10月23日受理 資源・素材学会平成2年度春季大会にて一部発表

1. 正会員 工博 東京大学助教授 工学部資源開発工学科

2. 正会員 工博 東京大学教授 工学部資源開発工学科

3. 正会員 東京大学助手 工学部資源開発工学科

4. 正会員 新日本製鉄(株)

キーワード: 岩石, さく岩機, 衝撃, 貫入試験

Rogersらは長さ44mmで直径が12.7mmの飛しょう体 (Projectile)を岩石面に衝突させる実験を行った⁵⁾。先端角60°の円錐、半球、平面と先端形状を変えている。貫入抵抗は歪ゲージを貼り付けて測定し、変位速度あるいは変位は初速と貫入抵抗の経時変化により計算によって求めている。岩石試料は一軸圧縮強度52MPaの砂岩、16MPaの頁岩1と7MPaの頁岩2である。貫入抵抗は衝撃の場合の方がかなり大きく、その傾向は一軸圧縮強度の最も小さい頁岩2で最も顕著であったと報告している。この点は佐々木らの結果と定性的に一致している。

Karlssonらは、先端角120°のくさび型ビットを用いてコンクリートの衝撃貫入試験を行った⁶⁾。この場合歪ゲージをロッドの2箇所に貼り付け、両測点での測定値の経時変化よりビット先端の貫入抵抗と貫入量を計算によって求めた。この方法では歪ゲージをビットに近付けて貼る必要がないため、ビットがさく孔中に深く入り込んでいる場合にも測定が可能である⁷⁾。貫入量あるいはビット先端の変位は、従来静電容量式の変位計などで測定していたが、取付け位置がビット先端から離れてしまう、耐久性がない、測定結果に位相の遅れが生じがちであるなど問題点がある。そこで、正確なサンプリング間隔で測定データを記録できるようになった最近の研究では、RogersやKarlssonのように歪ゲージによって弾性波を測定し、これを利用して貫入量を計算することが多い。

従来の実験結果では衝撃貫入抵抗の方が、静的貫入抵抗より大きい場合がほとんどである。しかしながら、実験結果の再現性は良いとはいえず、定量的な検討に必要な実験手法が確立されていないといえよう。また、最近さく岩機のビットに多く使用されているボタンチップの貫入抵抗についての実験結果が不足していることが目立つ。そこで本研究では、将来原位置での測定も可能な、できるだけ簡便で再現性のある実験方法の開発を試みた。9種の岩石試料について、公表されている実験結果の乏しいボタンチップを用いた衝撃貫入試験を行い静的貫入試験と比較検討した。

以下に使用した主たる記号を示す。記号はできる限り前報と同一とした⁸⁾。

記 号

- A : 断面積 [m²]
- ρ : 密度 [kg/m³]
- c : 弾性波速度 [m/s]
- E : ヤング率 [Pa]
- t : 時間 [s]
- ΔL : 要素長さ [m]
- Δt : 時間刻み [s], $\Delta t = \Delta L / c$
- s : 時間を Δt だけ進める演算子
- Z : インピーダンス [N·s/m], $Z = A\rho c = AE/c = A(E\rho)^{1/2}$

2. 実験装置

図1に実験装置の概略図を示す。鋼製の棒の下端に超硬合金 (WC-Co合金)のチップを圧入してある。超硬チップの先端は半径7mmの球面とした。棒と超硬チップの寸法、物性などを表1に示す。棒は長さ約1.4mで、その上端をハンマで叩く。使用したハンマの先端部は鋼性で八角形をしており対辺間0.037m、長さ0.103mであり、また柄は木製で長さ0.295mである。棒の中央に2枚の半導体歪ゲージ (共和電業KSP-2-E4)を貼り付けた。2枚使用したのは曲げの影響を除くためである。ゲージファクタが2の歪ゲージと、ゲージファクタが120の半導体歪ゲージを使用して予備実験を行ったところ、半導体歪ゲージの方が雑音が少なかったため、これを採用することにした。歪ゲージの出力を直流

増幅器 (共和電業CDV-230C)で増幅し、メモリー付きオシロスコープ (菊水COM7101)で $\Delta t = 1\mu s$ ごとに収録した。オシロスコープよりGP-IB回線で桌上計算機にデータを送り、データ整理はこの桌上計算機で行った。

衝撃貫入試験と合わせて、静的貫入試験も行った。静的貫入試験装置の概略を図2に示す。先端に超硬チップを埋め込んだ棒を、20t万能試験機に取付けて静的貫入試験を行った。先端の超硬チップは、衝撃貫入試験と同一形状のものを使用した。貫入抵抗はロードセルによって測定し、貫入量は棒の両側に取付けた歪ゲージ式変位計で測った。

今回使用した岩石試料は表2に示す、稲田花こう岩、秋芳大理石、和泉砂岩、本小松安山岩、三城目安山岩、山崎石 (安山岩)、伊西石、仙台石 (粘板岩)、村田玄武岩の9種であり、この内三城目安山岩と伊西石については2個、ほかの岩種では1個の岩石試料ブロックを用いた。また、粘板岩は方向性が顕著であったので、層理に直交な方向をZとして3方向を区別した。同表に示した一軸圧縮強度、圧裂引張強度などは、貫入試験に使用した岩石試料よりコアを採取し測定したものである。ヤング率は一軸圧縮強度の50%の点までの割線の傾きより求めた50%割線ヤング率であり、Schmidtハンマ反発値はN型Schmidtハンマを使用して測った。Shore硬度はC型Shore硬さ試験機を用いて測定したものである。

なお、岩石試料ブロックはいずれも質量が40kg以上とした。これは、衝撃貫入試験中の岩石試料ブロックの動きをある程度以下に抑えるためである。力Fが、時間tの間、質量mの試料ブロックに働いたとする。この間の資料片の変位は $0.5 \cdot F \cdot t^2 / m$ である。概算値として $F = 20,000N$, $t = 100\mu s$, $m = 40kg$ とすれば、

図1 衝撃貫入試験装置の概略図

表1 棒と超硬チップの寸法、物性

	ロッド	超硬チップ
直径 d (m)	0.0248	0.0140
断面積 A (m ²)	0.000483	0.000154
ヤング率 E (GPa)	202	590
密度 ρ (kg/m ³)	7,800	14,500
インピーダンス Z (kg/s)	19,200	14,200
音速 c (m/s)	5,090	6,380

図2 静的貫入試験装置の概略図

岩石試料ブロックの重心の変位は $2.5\mu\text{m}$ となる。ビット貫入量は $300\mu\text{m}$ 程度であるので、相対誤差はの場合1%以下と考えられる。

3. 基礎式と測定結果の整理

3.1 基礎式⁸⁾⁹⁾

図3のようにロッドを等しい長さ ΔL の区間に分割し、それぞれの区間のインピーダンスの区間平均を $Z(i)$ とする。各区間の境での反射率、透過率は次のように書ける。

$$R_p(i) = \{Z(i+1) - Z(i)\} / \{Z(i) + Z(i+1)\}$$

$$R_n(i) = -R_p(i)$$

$$T_p(i) = 2Z(i+1) / \{Z(i) + Z(i+1)\}$$

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

時刻 t における、要素 i での正方向と負方向に進む弾性波の大きさをそれぞれ $p(t, i)$ 、 $n(t, i)$ とする。 p と n として力の単位を持つ量を採用し、引張を正とする。時刻 t での p と n は、時刻 $(t - \Delta t)$ での p と n を用いて次のように書ける。

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

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

両式より次式を得る。

$$\begin{aligned} p(t, i) &= \frac{1}{T_n(i-1)} p(t - \Delta t, i-1) + \frac{R_n(i-1)}{T_n(i-1)} n(t, i-1) \\ &= \frac{a(i-1)}{s} p(t, i-1) + b(i-1) n(t, i-1) \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n(t, i) &= -\frac{R_p(i-1)}{T_n(i-1)} p(t, i-1) + \frac{1}{T_n(i-1)} n(t + \Delta t, i-1) \\ &= b(i-1) p(t, i-1) + a(i-1) \cdot s \cdot n(t, i-1) \quad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、

$$a(i) = 1/T_n(i)$$

$$b(i) = R_n(i)/T_n(i) = -R_p(i)/T_n(i)$$

であり、 s は時間を Δt だけ進める演算子である。(3)、(4)式を行列の形でまとめれば、次のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}_{t, i} &= \begin{pmatrix} p(t, i) \\ n(t, i) \end{pmatrix} = A_{i-1} \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}_{t, i-1} \\ &= A_{i-1} \cdot A_{i-2} \cdot A_{i-3} \cdot \dots\dots A_{i-k} \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}_{t, i-k} \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ただし、

表2 岩石の力学的性質

	一軸圧縮 強度 (MPa)	圧裂引張 強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン 比	Schmidt Hammer 反発値	Shore 硬度
稲田花こう岩	223.3	10.4	62.5	0.22	68.6	92.3
秋芳大理石	95.4	9.1	51.5	0.27	60.2	49.3
和泉砂岩	218.5	13.7	38.0	0.21	66.6	70.6
本小松安山岩	274.4	12.1	30.8	0.27	67.0	86.7
三城目安山岩A	72.4	5.2	10.1	0.20	—	49.1
三城目安山岩B	79.6	6.7	10.1	0.21	62.0	55.3
山崎石(安山岩)	271.4	16.6	31.5	0.28	64.8	80.3
伊西石A	147.6	10.4	44.4	0.21	65.2	74.1
伊西石B	261.9	16.7	83.3	0.23	67.6	74.7
仙台石X	227.3	18.0	53.8	0.29	66.8	66.6
仙台石Y	295.1	22.1	61.4	0.28	65.2	66.1
仙台石Z	237.4	13.4	45.9	0.29	65.6	65.0
村田玄武岩	278.7	20.4	40.6	0.24	67.4	77.0

図3 ロッドの分割の説明図

$$A_i = \begin{vmatrix} a(i)/s & b(i) \\ b(i) & a(i)s \end{vmatrix}$$

(5)式の左辺は、時刻 t における要素 i での p と n である。右辺は、要素 $(i-k)$ での時刻 $(t-k\Delta t)$ より $(t+k\Delta t)$ における p と n より決まる。すなわち、時刻 t における要素 i での値は、ほかの要素での一定時間の観測値より計算できる。

3.2 測定結果の整理

図4(a)に衝撃貫入試験用の棒の先端部、(b)にその計算モデルを示す。計算モデルの要素 L は超硬チップで、そのインピーダンス Z_t は表1に示した値を用いた。要素 $(L-1)$ は鋼製の棒に超硬チップの後端が埋め込まれている部分であり、インピーダンス Z_{rt} は鋼棒と超硬チップのインピーダンスの断面平均とした。要素 $(L-2)$ 以降は鋼製の棒で、そのインピーダンスは表1に示した値とした。計算モデルの1要素の長さとしては、 $\Delta t = 1\mu\text{s}$ の間に弾性波の進む距離を採用した。従って、要素 L の長さは 6.38mm 、要素 $(L-3)$ や $(L-4)$ などは 5.09mm である。鋼と超硬とで弾性波速度が異なるので、両者より成る要素 $(L-1)$ の扱いは不明な部分もあるが、この部分を弾性波がちょうど Δt で通過するとした。

図4 ロッド先端部の詳細図(a)と計算における要素分割(b)
図(a)中の寸法の単位はmm

以上の仮定のもとに、要素 L での時刻 t における p の値は、(5)式を用いて次のように表される。

$$p(t, L) = 0.9204 \cdot p(t - L\Delta t, 0) - 0.0506 \cdot p(t - k\Delta t + 2\Delta t, 0) + 0.2905 \cdot n(t + L\Delta t - \Delta t, 0) - 0.1603 \cdot n(t + L\Delta t - 3\Delta t, 0)$$

$p(t - L\Delta t, 0)$ とは、歪ゲージを貼り付けた要素0での、時刻 $t - L\Delta t$ における値である。式では、 p と n とが区別されているが、歪ゲージよりの出力では区別できないので、入射波と反射波が重なり合う場合にはこの式は適用できない。 $n(t, L)$ についても同様の式が成り立ち、要素 L つまり超硬チップでの p と n は、要素0での観測値から計算できる。貫入抵抗 F と貫入量 du は次式より計算できる。

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

$$du(t) = \{-p(t - \Delta t, L) + n(t, L)\} t / Z \quad \dots\dots\dots (6)$$

$F(t)$ の右辺の p と n に負号がついているのは、 p と n では引張を正としたのに対し、 F は超硬チップが岩石に押しつけられる場合を正としたためである。 $F(t)$ は、時刻 $(t - \Delta t)$ より t までの時間平均値である。 $du(t)$ は、超硬チップが岩石内部に貫入するのを正とした時刻 $(t - \Delta t)$ より t までの貫入量(変位)である。

```

1  P=.9204*DAT(i-L) -.0506*DAT(i-L+2)
2  P=.2905*DAT(i+L-1) -.1603*DAT(i+L-3)+P
3  P=.99*P
4  N=.2905*DAT(i-L+2) -.1603*DAT(i-L+4)
5  N=.9204*DAT(i+L+1) -.0506*DAT(i+L-1)+N
6  N=1.01*N
7  F=-N-P
8  U=U+(-P+N) t/Z
    
```

F と u を計算する部分をプログラム化してみると、上記のようになる。DATとは要素0での弾性波を力の単位に換算したものである。1, 2行は計算するのが面倒で間違えやすいので、各要素の諸元を入力すればプログラムコードが出力されるプログラムを別に作った。番号3の行で0.99を、番号6の行で1.01を掛けている。これは弾性波の減衰を考慮するためであり、要素0で観測された入射波は先端に達するまでに1%減衰するとして0.99を掛けた。同様に、反射波は観測点の要素0に達するまでに1%減衰するので1.01を掛けて補正したものを先端での値とした。なお、この1%という値は、ロッドを紐で釣り空打ちした時、先端での力 F の計算値が最も0に近くなるよう選んだ値である。

図5(a)に、歪ゲージの出力の経時変化の例を示す。これは稲田花こう岩を使用した時のものであり、縦軸は歪に断面積とヤング率を掛けて力の単位にしてある。この図より半導体歪ゲージを使用すれば、雑音の影響はほとんどないことがわかる。0.1msをや

や過ぎたあたりから0.3msあたりまで入射波が観察される。これは $p(t, 0)$ に当たる。0.4msのやや手前より $n(t, 0)$ に相当する反射波が観察される。入射波は圧縮波で反射波は引張波であるが、絶対値で比較すると入射波 $p(t, 0)$ が大きい。この差に相当する分だけビット先端で仕事をした、あるいはビット先端に力が加わったといえる。0.65msあたりより急激に下がるが、これは反射波がロッドの他端まで進行した後跳ね返って来たものである。従って、この実験結果で p と n とが分離して観察できるのは0.65msあたりまでである。図5(b), (c)に(6)式より計算した $F(t)$ と $u(t)$ を示した。横軸の時間は、超硬チップ先端に力が加わり始めた時を原点とした。力は加わり始めてから0.1msほどで最大となる。この間の力の増加速度は0.4GN/s、変位速度は4m/s程度である。 $F(t)$ は最大値を越えた後減少するが、減少速度の絶対値は増加速度より小さい。また、 $u(t)$ の減少の割合はより緩やかである。ほかの岩石試料についても以上で述べたことは定性的には当てはまる。

4. 実験結果

衝撃貫入試験は少なくとも同一条件で10回、静的貫入試験は5回行った。図6には、各岩石の貫入抵抗曲線より標準的なものを選んで示した。実線が衝撃貫入試験結果であり、破線は静的貫入試験結果である。また表3には貫入抵抗曲線の傾きなどをまとめている。静的試験は貫入抵抗が50kNとなるまで行った。他方、衝撃貫入試験での最大貫入抵抗は岩石ごとにかなり異なっているが、最大貫入量は0.3mm前後となっている。自由端では歪みの回復した後さらに慣性で同じだけ端面が移動するので、理論的な最大貫入量は、2(棒中の歪)・(歪んでいる部分の長さ)であり、同一の衝撃力をロッドに加えた場合には最大貫入量が大体同じになる。

図6(a)には稲田花こう岩の結果を示すが、この場合衝撃貫入抵抗曲線は弓なりとなりその最大貫入抵抗は約36kNに達する。衝撃貫入抵抗曲線は滑らかであり、再現性も良好であった。再現性については表3にA, B, Cの3段階に分けて表示した。Aとあるのは同一の条件下で行った時の貫入抵抗曲線がほとんど重なる場合であり、Bとあるのは貫入抵抗曲線の傾きが±20%までのばらつきがある場合であり、Cはそれ以上の場合である。静的貫入抵抗は衝撃のそれより若干小さ目となる。静的試験の再現性も衝撃試験の場合と同様に3段階に分けて表3に示しておいた。花こう岩の静的試験では、途中で小片が飛びその瞬間貫入抵抗が減少する場

表3 貫入試験結果

試験片寸法 $W \times D \times H$ (cm)	貫入特性曲線傾き 衝撃 静的 増加率 (kN/mm) (kN/mm) (%)			再現性 衝撃 静的	
稲田花こう岩	31×31×31	106	86	23	A B
秋芳大理石	30×40×30	68	45	51	A A
和泉砂岩	40×45×30	66	57	16	A A
本小松安山岩	30×45×30	69	63	9	A A
三城目 安山岩A	20×45×20	33	27	22	B B
三城目 安山岩B	20×45×20	28	21	31	B B
山崎石 (安山岩)	27×27×27	93	77	20	A A
伊西石A	30×30×30	105	78	35	C C
伊西石B	30×30×30	100	80	25	B B
仙台石X	24×30×34	78	63	24	B B
仙台石Y	34×24×30	83	69	28	B B
仙台石Z	30×34×24	76	65	16	B B
村田玄武岩	29×28×30	96	76	26	A B

図5 ロッド中の力 p , n (a), 貫入抵抗(b)および貫入量(c)の経時変化 稲田花こう岩を使用

図6 衝撃および静的貫入抵抗曲線 実線：衝撃貫入抵抗曲線，破線：静的貫入抵抗曲線

合があったので再現性はBとなった。衝撃貫入抵抗が最大となる
とき、従って貫入量が約0.3mmとなる時の貫入抵抗曲線の傾き
(貫入抵抗)/(貫入量)を表3に示した。花こう岩の場合衝撃と
静的貫入抵抗曲線の傾きは106kN/mmと86kN/mmとで、衝撃は
静的の1.2倍程度である。また、除荷時の抵抗曲線の傾きは載荷時
の2倍程度である。

図6(b)には秋芳大理石の結果を示す。衝撃貫入抵抗の最大値は
22kN程度で、抵抗曲線は滑らかであり再現性も良い。静的貫入
抵抗は約25kNで降伏してしまうが、降伏するまでの再現性は良
好であった。貫入量が0.3mmまでの抵抗曲線の傾きを比べると
衝撃は静的の約1.5倍となり花こう岩より増加率が大きい。衝撃試験
で、除荷時の傾きは載荷時の3~4倍でありこの点も花こう岩と
は異なる。

図6(c)と(d)に、和泉砂岩と本小松安山岩の結果を示す。両者の
貫入抵抗曲線は比較的似通っており、傾きも衝撃で65kN強で静
的では60kN前後である。両者の抵抗曲線は、静的、衝撃を通じて
滑らかで再現性は良好であった。

図6(e)と(f)に三城目安山岩の結果を示す。三城目安山岩AとB
とは購入時期が異なっており若干の相違がある。すなわち、ヤ
ング率とポアソン比は両者ほぼ同じであるが、一軸圧縮強度と圧
裂引張強度はBの方が少し大きい。今回検討した岩石の中では、
貫入抵抗曲線の傾きが最も小さく、衝撃の場合で30kN/mm程度で
あり花こう岩の約1/3である。そのため貫入量は0.3mm程度で花
こう岩とほぼ同じであるにもかかわらず、貫入抵抗は最大で10
kN程度にしかならない。この場合にはロッドのインピーダンス
に比べて岩石側のそれが小さくエネルギーが有効に岩石に伝わら
ないといえる。三城目安山岩では衝撃、静的試験結果とも再現性
はBとした。これは一つの岩石試料ブロックの圧入位置により結
果がかなり異なったためである。ただし、近接した位置での試験
結果は似通っており、測定誤差でなく岩石試料自体の位置・場所
による特性の変化によるものと思う。

図6(g)に山崎石の結果を示す。貫入抵抗曲線の傾向は花こう岩
の場合と似ている。再現性は衝撃・静的ともに極めて良好であ
った。

図6(h)と(i)に伊西石の結果を示す。表2に示した貫入抵抗曲線
の傾きでは、AとBとで似通った値となっているが、Aでは試料ブ
ロックにいくつかの割れ目が含まれており測定結果のばらつきが
大きかったので、割れ目の影響の少ないと思われる部分の値を示
した。割れ目の近傍での衝撃試験結果はかなり小さな貫入抵抗曲
線の傾きを与える。なおこの場合も、三城目安山岩と同様に近接
した位置での測定結果は似通っていた。

図6(j)と(k)に仙台石のX方向とZ方向の結果を示す。Y方向の
結果はX方向の結果と似ているため示さなかった。静的試験の場
合Z方向に、すなわち顕著な層理と直交する方向に貫入試験を行
った場合のみ貫入力40kN程度で降伏してしまうことが目につい
た。

図6(l)に村田玄武岩の結果を示す。貫入抵抗曲線の傾向は花こ
う岩と似ている。再現性は衝撃、静的とも良好であった。

5. 考 察

まず変位の測定方法について述べることにする。従来の研究の
いくつかでは、力と変位とを別々に測定している。この方法では
両者の位相を一致させるのがかなり困難と考える。特に変位は計
測器の取付けが難しいし、動的特性の良い変位計は少ない。今回
の衝撃貫入試験では歪みゲージの測定値から貫入抵抗、変位とも
計算によって求めた。この際に重要なことは測定結果の時間軸の

精度である。また、歪みゲージとして半導体式のものを採用した。
その結果外部よりの雑音は減少し、シールドなど特別な注意は不
要であった。今回の試験では断面積4.83cm²のロッド中を最大で50
kNの力が伝わるので応力は約100MPaとなる。この程度の応力
では半導体歪みゲージの劣化は見られず試験中にゲージの張り替
えは必要なかった。逆にロッド先端部で入射波と反射波とが重な
る部分ではこの2倍の200kNの応力が作用する可能性があり、か
なりの期間にわたって繰り返し使用する場合には大体限界に近い
条件で行ったものと思う。

表3をみると衝撃試験と静的試験結果の再現性の程度はほぼ一
致している。異なっているのは稲田花こう岩のみであり、これは
静的試験では時として岩石の小片が試験途中で飛びその際に貫入
抵抗が低下したためである。この現象はすべての試験で起きるわ
けでもなく、またその発生時点も一定していないため再現性が低
下する。衝撃試験と静的試験の再現性の程度が大体一致しており、
また先に述べたように再現性の良くない場合でも、ごく近傍での
測定結果は一致するので、試験結果のばらつきは岩石試験片の場
所ごとの特性の違いによってもたらされたものと考ええる。再現性
の最も良好であった山崎石では衝撃貫入抵抗曲線がほとんど重な
るほどであった。

今回の衝撃試験での貫入量は0.3mm前後であった。現在の油圧
さく岩機での作孔速度は花こう岩で毎分500~1,000mm程度で
あり、この時の打撃数を毎分2,000とすれば、一打撃当たり0.25~0.5
mmの作孔となる。実際のビットではすべてのチップが一様に関
与しているわけではなく、また作孔は最初の入射波のみでなく第二
波でもある程度行われるなど事情は複雑であるが、今回の衝撃試
験での貫入量は実際の場合と大幅には異なっておらず、作孔の数
値を行う際の基礎資料として使用できると考える。

できるだけ簡便に実験ができること、また場合によっては野外
での試験が可能であることを目的として、ロッドをハンマで叩く
方式を採用した。多少の慣れは必要であるが、観察された入射波
の再現性は悪くなかった。なお、理論的にはロッドの半分の長さ
で同一径の打撃棒で打撃すれば入射波と反射波とを分離して測定
できるはずであるが、予備実験として何種類かの打撃棒を用いて
検討した結果では、いずれも図5(a)に示すように、波形が矩形波
とはならず、波長が打撃棒の長さより相当長くなってしまった。
これは打撃棒とロッドの端面が瞬時に全面で接触しないためであ
り、端面の丸みなどが影響したためと考える。

なお、今回使用したロッドと超硬チップの組み合わせは、硬岩
を対象としたものであり、軟岩ではエネルギーの伝達効率が悪く
なる。この意味で、大体三城目安山岩が下限であり、これより貫
入抵抗曲線の傾きの小さいものは適用範囲外といえよう。ただし
これは試験法の限界ではなく、より細いロッドと小さな超硬チ
ップを使用しインピーダンスのマッチングを図れば良い。

動的試験より求めた貫入抵抗曲線の傾き K_d と表2に示した諸
量との相関係数を計算してみた。ポアソン比との間の相関係数は
0.22程度となった。一軸圧縮強度、圧裂引張強度、Schmidt ハ
ンマ反発値との間の相関係数はそれぞれ0.65, 0.57, 0.67で強い
相関があるとはいえない。ヤング率、Shore 硬度との相関関係
は若干良好で0.75と0.72であった。図7には静的試験より求めた
貫入抵抗曲線の傾き K_s との関係を示した。図中の直線の傾きは
下から順に1.0, 1.2, 1.4である。これよりわかるように秋芳大理
石以外は傾き1.0と1.4の直線の間に測定結果がはいる。実際に相
関係数を計算してみても0.98となり強い相関関係のあることがわ
かる。また最小二乗法で直線を当てはめてみると近似的に次式と
なる。

I: 稲田花こう岩, A: 秋芳大理石, Iz: 和泉砂岩
 H: 本小松安山岩, SA: 三城目安山岩 A, SB: 三城目安山岩 B
 Y: 山崎石, IA: 伊西石 A, IB: 伊西石 B
 SX, SY, SZ: 仙台石 X, Y, Z 方向, M: 村田玄武岩

図7 衝撃貫入曲線の傾き K_d と静的貫入曲線の傾き K_s

$$K_d = 1.2 K_s$$

この直線より大きく外れるのは秋芳大理石であり、この岩石においては貫入した後にできた窪みがきれいな球面をしており、その外縁が盛り上がっていた。ほかの岩石では主として岩石の小片が生じたとは異なっている。この場合、おそらく秋芳大理石では塑性流動が優勢であると思われる、この点で他の岩石と異なっている。

6. ま と め

本論文ではまず簡単な動的貫入試験方法の開発を行った。その結果を静的貫入試験結果と比較すると、貫入抵抗曲線の傾きが動的の方が20%ほど大きいことがわかった。秋芳大理石を除けば、この関係を用いて静的貫入試験結果より K_d を推定可能と思う。従来の結果では岩石によってかなり K_d と K_s の比が異なっているが、今回の結果では岩石ごとの差異は比較的小さかった。 K_d はさく岩機を初めとする衝撃により岩石を破壊する機械類の基礎データとして貴重であり、今後も岩石の種類を増してデータを蓄積する必要がある。また、次なる問題は複数のチップの埋め込まれたビットではどのような結果となるかを検討することであろう。

参 考 文 献

- 1) 佐々木和郎・山門憲雄・塩原善一: 日本鉱業会誌, 74 [846], 989~995, (1958)
- 2) 佐々木和郎・山門憲雄・戸辺雅行: 採鉱と保安, 7 [7], 1~9, (1961)
- 3) Hustrulid, W.A. and Fairhurst, C.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 8, 311~333 [Part 1], 335~356 [Part 2], (1971) および 9, 417~429 [Part 3], 431~449 [Part 4], (1972)
- 4) Goldsmith, W. and Wu, W.-Z.: Rock Mech., 13, 157~184, (1981)
- 5) Rogers, C.O. and Pang, S.-S.: Rock Mech. and Rock Engineering, 19, 235~260, (1986)
- 6) Karlsson, L.G., Lundberg, B.L. and Sundin, K.G.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26 [1], 45~50, (1989)
- 7) Carlsson, J., Sundin, K.G. and Lundberg, B.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27 [6], 553~558, (1990)
- 8) 大久保誠介・西松裕一: 資源・素材学会誌, 107 [No.4], 209~214, (1991)
- 9) Lundberg, B.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 229~239, (1982)