

## エコーチップ反発硬度試験の岩石材料への適用性

### An Application of Equotip Hardness Test to Rock Materials

吉田 昌登\*・川崎 了\*\*・谷本 親伯\*\*\*・舩屋 直\*\*\*\*

Masato YOSHIDA, Satoru KAWASAKI, Chikaosa TANIMOTO and Tadashi MASUYA

The Equotip Hardness Tester is developed to estimate the hardness of metallic materials. It was found that there were close correlations between the rebound parameters called "Ld values" and the dynamic deformation properties of rock specimens, but the influences of measurement conditions which affect to the Ld values are not cleared. On this background, we try to investigate some measurement conditions and correlations between the Ld values and mechanical properties of rock specimens, and the following results are obtained:

- 1) Some measurement conditions give influences to the Ld values, ie. thickness of samples.
- 2) There are close correlations between mechanical properties of rock specimens and the Ld values.
- 3) It is expected that the Equotip Hardness Test is useful to estimate the levels of weathering on rock samples.

#### 1. はじめに

金属材料の弾性的性質の把握を目的として開発された試験機の1つに、エコーチップ反発硬度試験機<sup>1)</sup>がある。筆者らは、この試験機を用いた岩石材料の物性評価手法の開発に関する研究を進めている。エコーチップ反発硬度試験機の特徴としては、対象とする材料が小さくても測定可能であることや、計測原理が単純でデジタル収録方式であるため短時間で多数の測定が可能であること、この試験機のインパクト装置部が小型で軽量であることから携帯性に優れていること、などがあげられる。本研究によりエコーチップ反発硬度試験機を用いた簡易式反発硬度試験による岩石材料の物性評価手法が新たに開発されれば、既存の岩盤構造物のもとより、石造文化財のような自然環境下において劣化の著しく進行した石造構造物の健全度に関する調査・試験についても、技術およびコストの両面において改善されることが期待される。

以上のような背景から、本報告では、(1)試験条件が測定値に与える影響、(2)新鮮な岩石材料を用いた基本特性調査、(3)人工的に風化させた岩石材料を用いた調査について、検討を実施した結果について述べる。

#### 2. 検討内容および考察

##### 2.1 試験条件が測定値に与える影響

エコーチップ反発硬度試験機の岩石材料への適用可能性についての検討として、比較的材料特性の捉えやすい供試体を用いた基礎的検討を行った。

\*学生会員 大阪大学大学院工学研究科

\*\*正会員 博(工) 大阪大学大学院工学研究科

\*\*\*正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科

\*\*\*\*ハイテック株式会社

まず、砂岩(一軸圧縮強度  $qu=48.0\text{MPa}$ )、および石膏( $qu=32.2\text{MPa}$ )で作成した円柱供試体(直径  $5\text{cm}\times$ 高さ  $10\text{cm}$ )を用いて、下敷材料の影響を受けずに測定を行うことのできる供試体の最小厚さについて調査した。本検討では、プラスチック製の机を下敷材料とした。測定方法としては、円柱供試体の上下端面のうち、一方の端面を岩石カッターで  $1\text{cm}$  切断するごとに耐水ペーパーで研磨を施し、供試体を実験室の机の上に静置させて研磨した端面についてそれぞれ 10 回の測定を行った。測定値の平均値、および標準偏差の変化をプロットしたものを図-1 に示す。吉田<sup>2)</sup>によると、下敷上に静置した場合の測定では、石膏および岩石材料で 1 割程度バラツキが生じることが示されている。そのため、測定値の 1 割程度を誤差の許容値とするとこの図より、厚さ  $3\text{cm}$  以上では岩種によらず概ね安定した値が得られるが、 $3\text{cm}$  以下になると下敷材料の影響のためか  $L_d$  値が低下する傾向を示すことがわかる。

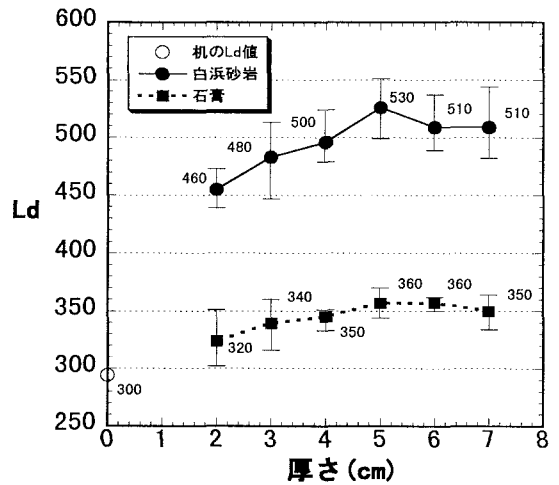


図-1  $L_d$  値と供試体厚さの関係

続いて、表面粗度の違いが  $L_d$  値に与える影響について調べた。はじめに、石膏で作成した円柱供試体を用いて、一方の端面について岩石カッターで  $1\text{cm}$  切断するごとに耐水ペーパーで研磨を施した場合と、40 番のサンドペーパーで凹凸をつけた場合について調べた。測定結果を図-2 に示す。これより、研磨した端面と凹凸をつけた端面の  $L_d$  値には明瞭な差異は見られず、石膏で作成した円柱供試体においてこの程度の凹凸は  $L_d$  値に影響を与えないことがわかる。さらに、6 種類の自然の岩石コアを用いた端面と側面の  $L_d$  値との比較結果を図-3 に示す。これより、不均質な多胡砂岩のデータを除けば端面の  $L_d$  値は側面の約  $1.0\sim 1.2$  倍程度であることがわかる。以上のことから、机上でも鉄製テストブロック上でも、岩石カッターで切断した面やボーリングコアの側面程度の凹凸であれば、測定上の影響はほとんどないといえる。

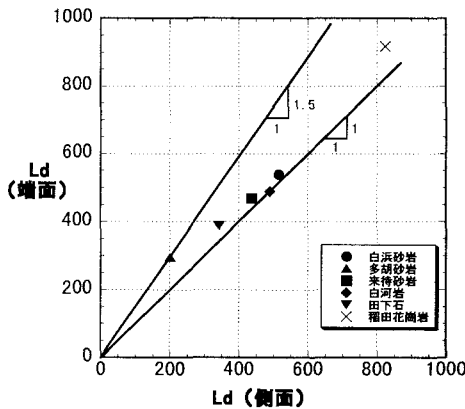


図-2 表面粗度の違いによる  $L_d$  値と厚さの関係

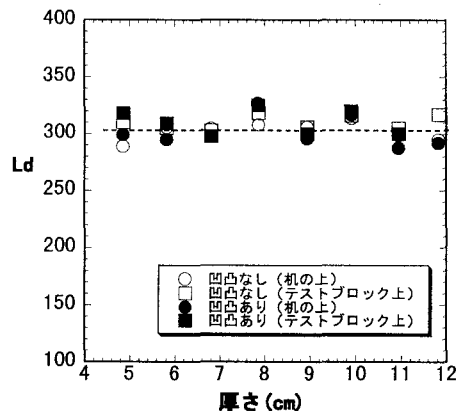


図-3 端面と側面の  $L_d$  値の関係

## 2.2 新鮮な岩石材料を用いた基本特性調査

前述した 6 種類の自然の岩石コアを供試体を用いて、 $L_d$  値と各種物理・力学指標との関係を調べた。各供試体の物性値は表-1 に示す通りである。その結果、得られた供試体の上下端面における  $L_d$  値の平均値と一軸圧縮強度  $qu(\text{MPa})$ 、および弾性係数  $E(\text{GPa})$  との関係を図-4、図-5 に示す。

表-1 岩石供試体の物性値

	白浜砂岩	多胡砂岩	来特砂岩	白河岩	田下石	稲田花崗岩
$\rho_t$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.31	2.11	2.14	2.11	1.87	2.62
$qu$ ( $\text{MPa}$ )	48.0	15.1	93.7	28.1	13.7	188.0
$E$ ( $\text{GPa}$ )	10.9	17.5	13.9	6.46	1.13	47.6

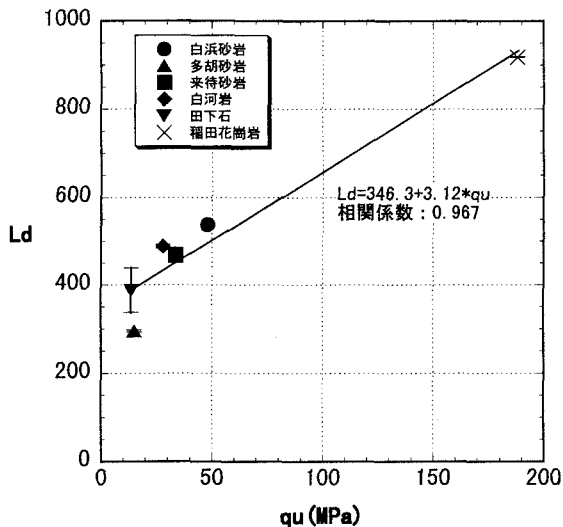


図-4 Ld 値と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係

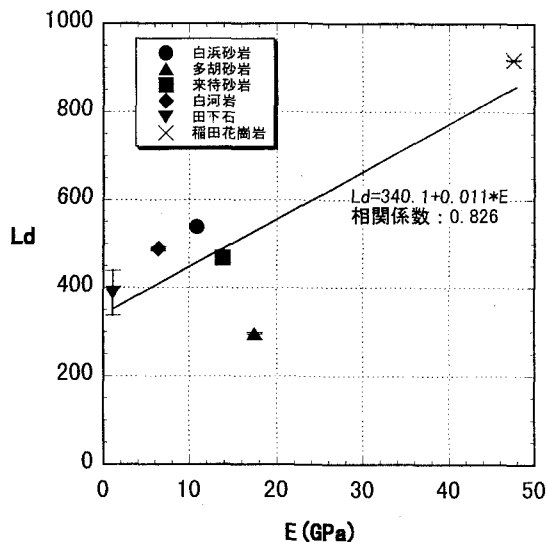


図-5 Ld 値と弾性係数  $E$  の関係

図-4 より、Ld 値と代表的な岩石の強度指標である一軸圧縮強度  $q_u$  との間には、良好な相関関係があることがわかる。また、図-5 より岩石の弾性的性質を表す弾性係数  $E$  とも比較的良好な相関関係があることがわかることから、Ld 値は材料の弾性的性質を示す指標として有効であることが示されている。

続いて、現場の岩石コアに対するエコーチップ反発硬度試験の適用性に関する検討を行った。今回供試体として用いたのは、和歌山県田辺市内で採掘した、砂岩 1 本、頁岩 11 本の計 12 本の岩石コア(直径 5cm×高さ 10cm)である。上下両端面におけるそれぞれ 1 回の測定値を平均した値と一軸圧縮強度  $q_u$ (MPa)との関係を図-6 に示す。これより、本検討に用いた現場の岩石コアにおいて、Ld 値と一軸圧縮強度  $q_u$  との間に比較的良好な相関関係があることがわかった。さらに、前述の 6 種類の岩石コア、田辺産の 12 本の岩石コア、およびその他 3 本の岩石コアのすべてについて、Ld 値と一軸圧縮強度  $q_u$  との関係を調査した。すべての岩石コア、およびそれらの中で砂岩と頁岩のみに着目して回帰直線を引いたものを図-7 に示す。これより、砂岩および頁岩のみに着目して得られた回帰直線が、すべてのデータを対象にした回帰直線とは若干異なる傾きを有しているようにも伺えるため、岩石の堆積方法などによって異なる傾向を示す可能性はあるものの、本検討に用いたすべての岩石コアについても、Ld 値と一軸圧縮強度  $q_u$  との間に良好な相関関係があることが確認できる。

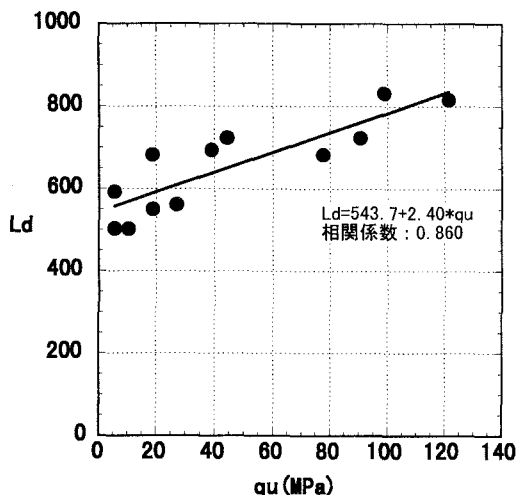


図-6 田辺産の岩石コアの Ld 値と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係

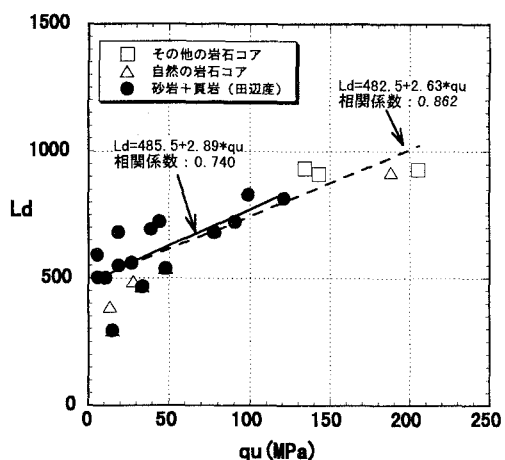


図-7 Ld 値と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係

### 2.3 人工的に風化を促進させた岩石材料を用いた調査

風化層へのエコーチップ反発硬度試験の適用性を調べる目的で、人工的に風化を促進させた岩石供試体を用いた検討を行った。今回の検討においては乾燥と湿潤の繰り返しを風化促進試験として採用し、包丁で整形しやすい珪藻泥岩を供試体とした。表-2に、その主な物性値を示す。

表-2 珪藻泥岩の物性値

自然含水比: $w_n=108(\%)$
湿潤状態含水比: $w_t=111\sim 120(\%)$
湿潤密度: $\rho_t=1.27\sim 1.32(\text{g}/\text{cm}^3)$
乾燥密度: $\rho_d=0.59\sim 0.60(\text{g}/\text{cm}^3)$

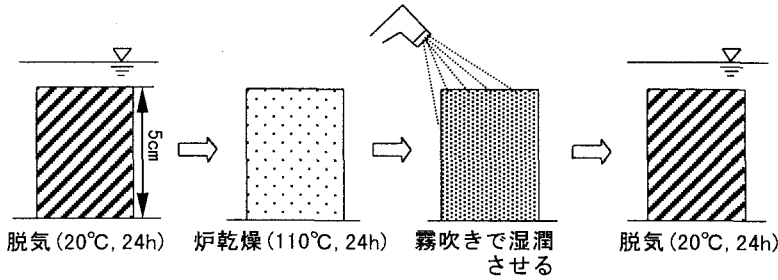


図-8 風化供試体の作成方法

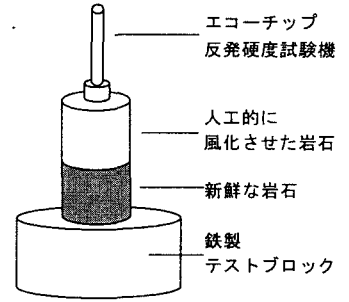


図-9 測定方法

人工風化供試体の作成方法は図-8に示す通りである。まず、直径5cm×高さ10cmの円柱供試体を用意する。それを高さ約5cmの2つの円柱供試体に切断後、両供試体ともに脱気水槽に入れて蒸留水中に浸させ24時間以上真空により脱気させる。次に、切断した供試体の一方のみを乾燥炉で24時間以上乾燥させる。その後、供試体を乾燥炉から取り出し、急激な吸水で供試体が破損するのを防ぐために霧吹き等で徐々に湿潤させた後、再び脱気水槽に入れて24時間以上真空により脱気させる。これらの作業内容を1サイクルとした。一方、はじめに切断したもう一方の供試体は、1度も乾湿の履歴を与えることなく真空により脱気させたままにしておく。脱気および炉乾燥後は、それぞれの供試体について質量(g)および超音波によるS波速度  $V_s(\text{m}/\text{sec})$  を測定する。各サイクル終了後、自然環境下における風化した岩石の状況を再現しながら風化層の厚さを調べる目的で、図-9に示すように風化供試体の上端面を約2~3mm切断するたびごとに脱気させた飽和供試体の上に重ね、その状態のまま鉄製テストブロック上に静置し、風化供試体上端面の  $L_d$  値を測定した。

サイクル数と湿潤密度  $\rho_t(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、S波速度  $V_s(\text{m}/\text{sec})$ 、 $L_d$  値との関係を図-10に示す。図中のサイクル数0のプロット点は、初期湿潤飽和状態（最初に炉乾燥させる前の状態）を表す。この図より、風化促進試験が1サイクル終了後、湿潤密度  $\rho_t$ 、超音波速度  $V_s$ 、および  $L_d$  値のすべての値が低下していることが確認できる。特に、S波速度  $V_s$  と  $L_d$  値に着目すると、Nishi et al<sup>2)</sup>の結論と同様に、 $V_s$  は1割程度の低下を示していること、およびそれに対応して  $L_d$  値も顕著に低下していることが確認できる。本検討では風化促進のサイクルを1回までしか行っていないが、今後サイクル数を増やしていくことで、岩石材料の非破壊強度把握に有用である  $V_s$  同様、 $L_d$  値も風化の程度を把握するのに有用な指標となり得るものと期待される。

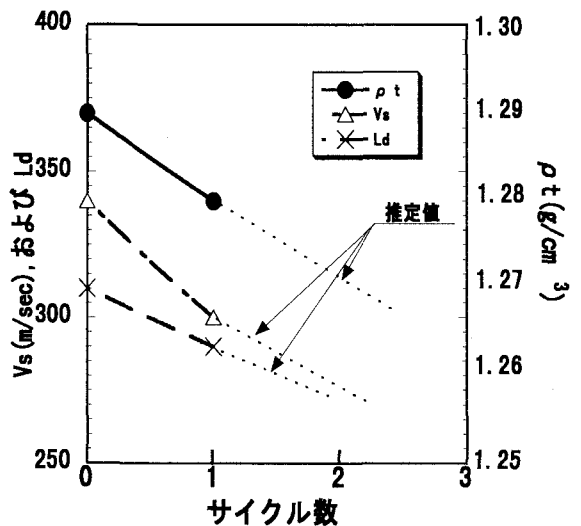


図-10  $\rho_t, V_s, L_d$  とサイクル数の関係

さらに、1サイクル終了後の風化供試体を2~3mm削るごとに脱気させておいた供試体の上に重ね、鉄製テスタブロック上で上端面について行った5回の測定値の平均値と、供試体厚さの変化との関係を図-11に示す。同図より、風化供試体の厚さを薄くしていく過程におけるLd値の変化は明確には確認できなかった。しかし、風化供試体の厚さを薄くしていくにつれて底板である湿潤供試体のLd値に近づいていくような傾向は伺える。今後は、Vsのより小さい人工供試体を作成し、風化供試体と未風化供試体のVs(またはLd)の値が大きく異なる条件下において、同様の検討を実施する予定である。

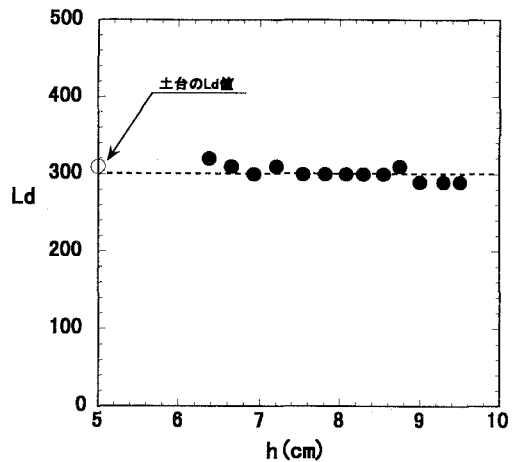


図-11 Ld値と供試体厚さの関係

### 3. まとめ

エコーチップ反発硬度試験の岩石材料への適用性に関する検討を行い、以下のことがわかった。

- 1) 本試験を下敷材料の影響を受けることなく行うためには、供試体の厚さは3cm以上あることが望ましい。
- 2) 岩石カッターの切断面、およびボーリングコアの側面程度の凹凸であれば、本試験機による測定上の影響はほとんどない。
- 3) Ld値と、一軸圧縮強度  $q_u$  および弾性係数  $E$  との間には、比較的良好な相関関係がある。
- 4) 本試験機を利用して、岩石材料の風化の程度を捉えることは十分可能であると期待される。

今後は、2.3における湿潤-炉乾燥試験により人工的に風化を促進させた岩石供試体を用いた検討のデータ数の追加、および弾性係数の変化が顕著に確認できる程度まで著しく風化を促進させた供試体を用いた検討、さらに、凍結-融解試験により風化を促進させた場合における検討等、自然環境下での岩石の風化層厚、および風化材料と未風化材料との物性値のコントラストの把握に関する定量的評価手法の提案に向けた研究を進めていく予定である。

なお、本研究を進めるにあたり、供試体の端面整形に関して基礎地盤コンサルタンツ株式会社岩盤工学センターの松村真一郎氏、および同センターの関係諸氏に、測定に際しては応用地質株式会社大阪支社の持田文弘氏、および同支社の関係諸氏にご協力頂いた。末筆ながらここに記して、感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 例えば、W.Verwaal& A.Mulder :Estimating Rock Strength with Equotip Hardness Tester ,Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr., Vol.30, No.6, pp.659-662, 1993.
- 2) 吉田昌登 :エコーチップ反発硬度試験の岩石材料への適用性 ,大阪大学工学部土木工学科平成10年度卒業研究., pp.4-5, 1999.
- 3) K.Nishi et al :Dynamic Properties of Weathered Sedimentary Soft Rocks ,Soils and Foundations., Vol.29, No.3, pp.67-82, 1989.
- 4) H.Maekawa& K.Miyakita :Effect of Repetition of Drying and Wetting on Mechanical Characteristics of a Diatomaceous Mudstone ,Soils and Foundations., Vol.31, No.2, pp.117-133, 1991.