

大谷石からなる風化岩盤の表面の強度に関する非破壊測定法： エコーチップ硬さ試験機と赤外線水分計を利用した例

Non-destructive Measurement of Rock-surface Strength of Weathered Oya Tuff:
An Application of Equotip Hardness Tester and Infrared Optical Moisture Meter

青木 久^{*}・佐々木 智也^{**}・松倉 公憲^{***}

Hisashi AOKI^{*}, Tomoya SASAKI^{**} and Yukinori MATSUKURA^{*}

1 はじめに

岩石強度は含水比の変化に依存する。したがって、野外岩盤の強度低下を正確に把握するためには、計測時の含水比を把握した上でなされることが望まれる。

従来、風化研究における岩石強度の野外測定には、主にシュミットロックハンマー（たとえば、鈴木ほか，1977; 松倉ほか，1983），針貫入試験器（たとえば，Suzuki and Hachinohe, 1995; Hachinohe *et al.*, 1999, 2002），土壌硬度計（たとえば，鈴木ほか，1977; Suzuki and Hachinohe, 1995; Yokota and Iwamatsu, 1999; Hachinohe *et al.*, 2002）が用いられてきた。最近，著者ら（青木・松倉，2004a, b）は野外の風化岩盤に適用可能な簡易反発強度試験法として，金属材料分野で開発されたエコーチップ硬さ試験機（Proceq, 1977）の有効性を示した。この試験機は，迅速に反発硬度を計測することが可能であり，従来の試験器と比べて測定範囲がきわめて広いという特徴がある。またその計測値は一軸圧縮強度と正の相

関を持ち，岩石強度の指標となることを示している。特に，打撃エネルギーがシュミットロックハンマーの約 200 分の 1 程度ときわめて弱いため，岩石表面はほとんど損傷を受けず，強度の小さな岩石や風化した岩石に対しても非破壊での計測が可能である。また現地岩盤での計測だけでなく，小さな供試体を用いた室内実験にも利用できるという利点がある。

野外における岩盤の含水比の計測法として，たばこの葉の水分管理を目的に開発された赤外線吸収式水分計（JT エンジニアリング（株）製，ハンディ型赤外線水分計 JE100，以下，赤外線水分計と呼ぶ）を利用した研究がある。Matsukura and Takahashi（1999）によれば，この赤外線水分計の原理は，水分に吸収されやすい近赤外光（吸収光）と水分の影響を受けにくい近赤外光（参照光）を交互に試料表面に照射し，それらの反射光量の比を計算して吸光度とするものである。吸光度が大きいほど水分量は高くなるという性質を利用して，含水比を求めるものである。この方法は，岩盤を構成する岩石の小片を切り出し，その

^{*} 筑波大学生命環境科学研究科大学院生（現：琉球大学大学院理工学研究科 COE 研究員）

^{**} 筑波大学第一学群自然学類（現：昭和パックス株式会社）

^{***} 筑波大学生命環境科学研究科

重量と乾燥させた重量の差から水分量を求める従来の方法と比較して、岩盤を破壊することなく、迅速に測定ができる、室内実験だけではなく、野外にも携帯できるという特徴を有する。以上のことから、エコーチップ硬さ試験機および赤外線水分計は、試料を破壊することなく迅速に測定できることに最大の特徴があり、両機器は、野外岩盤の風化による強度低下の正確な把握に関するきわめて有効な手段になり得ると考えられる。

そこで、本研究では、新第三紀鮮新世の大谷凝灰岩（以下、単に大谷石と呼ぶ）を対象に、これらの2つの機器を用いて、風化した大谷石からなる岩盤での現地計測、および大谷石供試体を用いた室内試験を行い、それらの結果をもとに、大谷石の風化による強度低下の定量的把握を試みた。

II 野外調査

栃木県宇都宮市の北西約8 kmの地点に位置する大谷町を中心として、東西約4 km、南北約6 kmにわたって新第三系中新統の流紋岩質溶結凝灰岩が分布している。この岩石は緑色凝灰岩（グリーンタフ）であり、「みそ」と呼ばれる暗緑～暗褐色のFeに富む特殊なモンモリロナイトの混入がみられることが特徴的である（たとえば、安藤・岡, 1967）。この岩石は通称大谷石と呼ばれ、日本を代表する石材の一つである。大谷石は、比較的空隙が多く軟岩であり容易に加工でき、さらに耐寒性、耐圧性、耐火性に優れていることから、建築・土木用石材として古くから利用されてきた。

大谷石が採取される大谷町地域内には、かつての採石場の面影を残した石切場跡が点在し、岩盤表面が風化している露頭が数多く見受けられる。本研究では、大谷町大谷寺にある採石場跡の露頭（大谷寺露頭と呼ぶ）、および大谷平和観音公園の敷地内にある露頭（観音露頭と呼ぶ）の2地点を調査地を選んだ（第1図）。露頭表面には、風化

によると思われる厚さ数 mm の薄い板状の浮き上がりや粒状の風化生成物が観察される。これらの風化物は、指でこすると簡単に剥離する。各地点においてエコーチップの反発値（ L 値）と赤外線水分計（計測値を X 値とする）の計測をそれぞれ行った。

エコーチップによる計測法は水平方向（横向き）に、同一の点を1回のみ打撃し、次々と移動させながら打撃する方法（以下、単打法と呼ぶ）と同一の点を連続打撃する方法（以下、連打法と呼ぶ）で行った。一地点の岩盤において、20回の連打および5点の単打によって計測した。また、みその部分を避け、できるだけ平坦な面を選んで測定を行った。連打法によって得られた反発値の中から最大（大きいものから）3個の平均値をとり L_{\max} とした。また単打法の場合には、得られた5個の値をそれぞれ平均した値をとり L_s とした。

赤外線水分計による計測は、エコーチップ試験を実施した箇所の周辺部において、5箇所で測定を行い、それらの平均値を X 値とした。

それらの測定結果は、第1表に示した。大谷寺



第1図 調査地域

第1表 大谷石の物理・力学的性質

岩石物性 (unit)	計測値
比重, G_s	2.46
乾燥密度, γ_d (gf/cm ³)	1.36
湿潤密度, γ_w (gf/cm ³)	1.73
間隙率, n (%)	44.7
最大含水比, w_{\max} (%)	26.9
一軸圧縮強度, S_c (kgf/cm ²)	
(乾燥) 実測値	83.3 ~ 151.3
平均値	114.7
(湿潤) 実測値	26.4 ~ 41.2
平均値	33.4

露頭では L_s 値が 250, L_{\max} が 576, X 値は 0.478 であった. また観音露頭では, L_s 値が 257, L_{\max} が 568, X 値は 0.451 であった.

III 大谷石の物理的・力学的性質

採取した岩石から作成した整形試料を用いて, その諸性質を調べた. まず岩石の物理的性質として真比重 G_s , 間隙率 n , 乾燥単位体積重量 γ_d , 湿潤単位体積重量 γ_w , 飽和含水比 w_{\max} の測定を行った. 測定結果は第2表にまとめた. 真比重 G_s はピクノメーターを用いて測定し, 2.46 の値が得られた. 乾燥単位体積重量と湿潤単位体積重量は供試体を 110℃で 72 時間炉乾燥させ, 蒸留水に 120 時間浸すことによりそれぞれ測定した. それらの値はそれぞれ 1.36 g/cm³, 1.73 g/cm³ であった. また飽和含水比は 26.9 % であり, そのときの X 値は 0.924 であった. 間隙率 n は真比重と乾燥単位体積重量の値から算出し, 44.7 % となった.

力学的性質として, 一軸圧縮強度 S_c を調べた. 強度試験には, 円柱状供試体 (高さ約 7.5 cm, 直径約 3.9 cm) を用い, 乾燥状態 (110℃, 72 時間で乾燥) および湿潤状態 (蒸留水に 120 時間浸す) の下でそれぞれ 10 個ずつ測定した. 試験は油圧式 20 t 耐圧試験機を用いた. 測定結果を第1表に示した. 乾燥状態での圧縮強度は, 最大値 151.3 kgf/cm², 最小値 83.3 kgf/cm², 平均値 114.7

第2表 野外における計測結果

	大谷寺露頭	観音露頭
エコーチップ		
平均値 L_s	250	257
最大値 L_{\max}	576	568
赤外線水分計		
吸光度値 X	0.478	0.451

kgf/cm² であった. 湿潤状態での圧縮強度は, 最大値 41.2 kgf/cm², 最小値 26.4 kgf/cm², 平均値 33.4 kgf/cm², であった. これらのことから, 乾燥から湿潤状態になり, 含水比が増加すると供試体の強度が大きく低下することがわかる.

IV 室内実験

1. 赤外線水分計による含水比の推定

赤外線水分計の特性やキャリブレーションについては, Matsukura and Takahashi (1999) に詳しい. それによれば, 水分計の原理は, 近赤外線を供試体に照射し, その反射光を受けて供試体の水分を測定するものである. 水分計で得られるのは吸光度 (X) の値であり, 岩石の飽和含水比をその吸光度の値で除した値を係数 (B) として, 岩石表面の含水比 (w) は次のような一次式で表すことができる:

$$w = BX \quad (1)$$

そこで, 本計測で得られた吸光度 (X) の値を, 式 (1) を用いて, 含水比 (w) に換算する. 室内試験の結果より, $w = 26.9$, $X = 0.924$ であることから, $B = 29.1$ を得る. したがって, 大谷石の含水比 (w) は吸光度 (X) の値から, 次式で求められる:

$$w = 29.1X \quad (2)$$

2. 岩石強度と赤外線水分計による含水比との関係

次に、水分状態が岩石強度に及ぼす影響、すなわちエコーチップと赤外線水分計を用いて、反発強度と含水比との関係について調べた。ここでは脱水過程における計測を行った。反発値の計測は、野外の調査と同様に、「みそ」の部分を選び、異なる箇所を5回打撃する単打法、同一の点を20回打撃する連打法により実施し、 L_s 、 L_{max} を求めた。

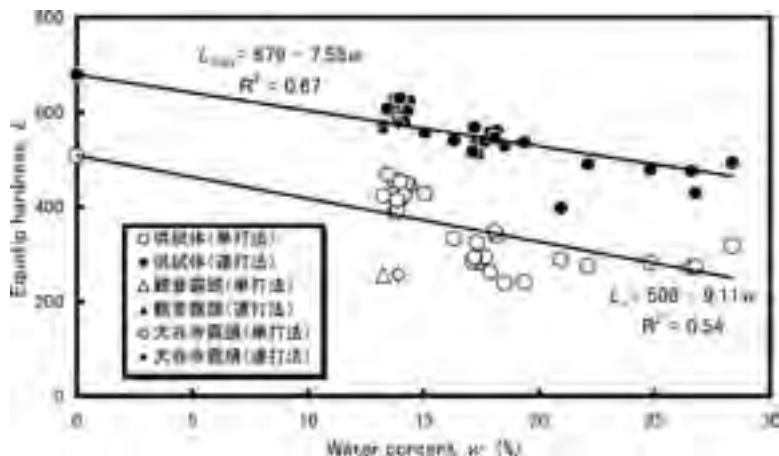
まず、高さ7.5 cm、直径3.9 cmの円柱供試体を温度110℃で72時間炉乾燥させ、乾燥重量と L 値を計測した。次に、供試体を120時間水に浸けておき、飽和重量を測定し、飽和含水比を求めた。脱水試験は、供試体を水中から取り出して、水分を軽く拭きとり、風乾状態で行った。適当な時間間隔で赤外線水分計とエコーチップ反発試験を行い、脱水過程における含水比と反発硬度を求めた。その際、水分計測は、供試体に印をつけて、できるだけ同じ箇所を測定するようにした。

試験開始直後は含水比の低下量が大きいので、計測は10分間隔で行い、その後含水比変化を確認しながら、計測間隔を長くしていった。試験は約150時間続け、含水比が13%とほぼ一定となっ

たときに終了とした。試験中の実験室の平均気温は22℃、平均湿度は42%とほぼ一定に保たれた。エコーチップ反発値(L 値)を縦軸に、含水比を横軸にとり、 L_s 、 L_{max} ごとにプロットした結果を第2図に示す。 L_s 値は、絶乾時(含水比が0%)に最大値508であり、含水比が20%以上になると、300前後の値をとる。また L_{max} 値は、絶乾時(含水比が0%)に最大値679であり、含水比が25%以上になると、およそ500まで値が小さくなることがわかる。全体的な傾向としては、 L_s 、 L_{max} はいずれも、含水比の増加に伴って、直線的に小さくなる傾向が認められる。このことは、湿潤状態の大谷石の圧縮強度が、乾燥状態のものに比べて小さいという試験結果と調和的である。そこで、岩石の L 値は含水比を用いて、次式で示されるものとする：

$$L = L_0 - bw \quad (3)$$

ここで、 L_0 は絶乾状態(含水比 $w = 0\%$)時の L 値、 b は比例定数である。単打法、連打法における L_0 値は、それぞれ508、679であるので、最小自乗法で近似すると L_s と L_{max} は、次式で表される：



第2図 エコーチップ反発値と含水比との関係

$$L_s = 508 - 9.11t \quad (4)$$

$$L_{\max} = 679 - 7.55t \quad (5)$$

V 考察およびまとめ

観音露頭と大谷露頭で得られた X 値はそれぞれ 0.451, 0.478 であるので, 式 (2) より, 含水比はそれぞれ 13.3 %, 13.9 % となる. これら 2 つのデータを第 2 図にプロットした. 含水比が 13.3 %, 13.9 % のときの供試体の L_{\max} を式 (4), (5) より求めると, それぞれ 579, 574 となり, 観音露頭と大谷露頭の L_{\max} 値は, 568, 576 であるので, 実験式から求められた値とほぼ等しい値をとる. 連打法で得られた L_{\max} 値は岩盤内部の影響を強く受けた値であることが知られている (青木・松倉, 2004a, b). このように新鮮な岩石供試体と露頭での L_{\max} 値がほぼ一致することは, 露頭岩盤の内部が新鮮な岩石で構成されていることを示唆する.

また L_s についても同様に, 観音露頭と大谷寺露頭における含水比, すなわち 13.3 %, 13.9 % のときの供試体の L_s を式 (4), (5) より求めると, それぞれ 387, 381 となり, 観音露頭と大谷寺露頭における L_s 値は, それぞれ 256, 250 であるので, 新鮮な供試体の値よりも 130 ほど小さい値をとっていることがわかる. これらの結果は, 露頭岩盤の表面が風化し, 強度が低下していることを示しており, 観察結果と一致する.

以上のことから以下の結論が得られる. 岩盤の風化に伴う岩石強度の低下量は, エコーチップ硬さ試験機と赤外線水分計を用いることにより非破壊で推定することができる.

謝辞

本研究の物性試験に用いた岩石は, 山南石材店のご厚意により入手したものである. 筑波大学大

学院生命環境科学研究科の小暮哲也氏には供試体の作成・整形や強度試験を手伝っていただいた. 以上の方々に心から御礼申し上げます. 本研究を行うに際し, 学術振興会・科学研究費・基盤研究 B (課題番号 16300292) および文部省・科学研究費・萌芽研究 (課題番号 14658126) (いずれも研究代表者・松倉公憲) を使用した.

文献

- 青木 久・松倉公憲 (2004a): エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察. 地形, **25**, 267-276.
- 青木 久・松倉公憲 (2004b): エコーチップ硬さ試験機による青島砂岩・表面風化層の強度の把握. 地形, **25**, 371-382.
- 安藤 武・岡 重文 (1967): 大谷石の地質と採掘に関連する破壊状況. 地質調査所月報, **18**, 1-37.
- 鈴木隆介・平野昌繁・高橋健一・谷津栄寿 (1977): 六甲山地における花崗岩類の風化過程と地形発達との相互作用. 中央大学理工学部紀要, **20**, 343-389.
- 松倉公憲・前門 晃・八田珠郎・谷津栄寿 (1983): 稲田型花崗岩の風化による諸性質の変化. 地形, **4**, 65-80.
- Hachinohe, S., Hiraki, N. and Suzuki, T. (1999): Rates of weathering and temporal changes in strength of bedrock of marine terraces in Boso Peninsula, Japan. *Engineering Geology*, **55**, 29-43.
- Hachinohe, S., Akiyama, T. and Suzuki, T. (2002): Changes in rock properties in soft sedimentary rocks due to weathering. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **23**, 287-307.
- Matsukura, Y. and Takahashi, K. (1999): A new

technique for rapid and nondestructive measurement of rock-surface moisture content: preliminary application to weathering studies of sandstone blocks. *Engineering Geology*, **55**, 113-120.

Proceq, S. A. (1977): *Equotip Operations Instructions*. 5th ed., Proceq S. A., Zurich, Switzerland.

Suzuki, T. and Hachinohe, S. (1995): Weathering rates of bedrock forming marine terraces

in Boso Peninsula. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **16**, 93-113.

Yokota, S. and Iwamatsu, A. (1999): Weathering distribution in a steep slope of soft pyroclastic rocks as an indicator of slope instability. *Engineering Geology*, **55**, 57-68.

(2005 年 5 月 31 日受付, 2005 年 8 月 1 日受理)