

連打法によるエコーチップ硬さ試験機の反発値と 微小窪みとの関係

Relationships between the Equotip Hardness and the Depth of Micro Depression
by the Repeated Impact Method

中家 渉^{*}・青木 久^{**}・早川 裕弐^{***}・松倉 公憲^{****}

Wataru NAKAIE^{*}, Hisashi AOKI^{**}, Yuichi S. HAYAKAWA^{***}
and Yukinori MATSUKURA^{****}

1 はじめに

エコーチップ硬さ試験機（以下、単にエコーチップと呼ぶ）とは、タングステンカーバイト製の球状テストチップ（インパクト装置D型では直径3 mm）が先端についたインパクトボディを、一定なバネの力で材料の表面に打ち付けて硬さの指標 L 値を求めるものである。エコーチップは金属材料の反発硬度の非破壊検査用として開発されたが、岩石・岩盤に対する有用性が報告され（たとえば、川崎ほか, 2000; 2002）、最近では石造文化財の風化・保存研究（たとえば、朽津, 2008）や、地形学的な研究（たとえば、Aoki and Matsukura, 2007a, 2007b）に用いられている。エコーチップの打撃エネルギーはSchmidtハンマーN型の約200分の1程度と小さく、計測対象範囲が広いことが大きな特徴である。

エコーチップの計測方法には、単打法と連打法とがある。単打法とは岩石表面の一つの点を1回のみ打撃し、その測点を次々と移動させる方法で

ある。一方の連打法は同一の点を連続打撃する方法である。従来の研究では単打法の計測例が多く、連打法の事例は少ない。しかも既存の研究においては、2種類の計測方法で得られたそれぞれ違った意味を持つ L 値が混同して扱われている例もある（たとえば、橋本ほか, 1998；大川ほか, 1999）。Aoki and Matsukura (2007a) では、この二つの試験方法をその目的によって使い分けることが提案されている。また彼らによれば、連打法によって計測される L 値は最初の打撃の値が最も小さく、打撃回数が増加するにつれて L 値は徐々に大きくなる傾向があり、最終的には一定の値に収束することが報告されている。このような特性は、ほとんどの岩石で共通してみられることから、連打法の収束値を硬さの指標として利用することを提案している。ただし、この連打法によって収束値が得られる要因についての議論はなされていない。

ところで、エコーチップで連打試験を行うと、試料表面に微小な窪みが形成されることが確認さ

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科大学院生

** 大東文化大学経営学部

*** 筑波大学大学院生命環境科学研究科（現：東京大学空間情報科学研究センター）

**** 筑波大学大学院生命環境科学研究科

れている (Aoki and Matsukura, 2008). この連打試験による微小な窪みと L 値との間には何らかの関係性のあることが推察される. そこで本研究では, エコーチップの連打試験後に形成される微小窪みの深さを計測し, L 値との関係を定量的に把握し, 連打法で得られる収束値の意味を明らかにすることを目的とする.

II 人工岩石を用いたエコーチップ反発値と微小窪み深さ

1. 試験材料

エコーチップ連打試験による L 値と窪み深さの計測には, 人工岩石を用いた. その理由は, この試料は作成の過程で強度のコントロールが可能であり, しかもエコーチップの打撃により形成される窪みの観察が容易なためである. 人工岩石は速乾性インスタントセメント (トーヨーマテラン株式会社製) を用いて作成した. このセメントは固化時間が約 30 分と早く, プラスチック製の型枠に流し込み, 15 cm × 7 cm × 5 cm のほぼ直方体の供試体を作成した. 加える蒸留水の量と混ぜ

る時間を変えることにより, 強度の違う供試体を 3 種類作成した. 作成した人工岩石の圧縮強度 S_c (Compressive Strength, 以下 S_c とする) は, 直径 1.95 cm, 高さ 4.0 ~ 4.5 cm の円柱供試体を各サンプル 6 本ずつ作成して, 一軸圧縮試験によって求めた. 強度の小さい方から順に, 人工岩石 1 ($S_c = 23.9$ MPa), 人工岩石 2 ($S_c = 25.4$ MPa), 人工岩石 3 ($S_c = 39.2$ MPa) と呼ぶ. また圧裂引張試験により引張強度を求めた. 脆性度 (Brittleness index) はいずれの試料も 8 ~ 9 程度であり, 自然岩石の脆性度 5 ~ 25 (Sunamura, 1992) の範囲内にある (Table 1).

2. 計測方法と手順

エコーチップ (Fig. 1a) の打撃先端部分であるチップの高さはおおよそ 400 μm となっている. すなわち打撃で形成される微小な窪みの深さは最大でも 400 μm と小さい (Fig. 1b). Fig. 1c は人工岩石 1 を 20 回連続打撃した後の, 岩石表面の様子である. チップの球状を反映して, 岩石表面がつぶされて円形の縁をもつ窪みが形成されている. 窪みの縁には, セメントがせり出している.

Table 1 Test samples and the results of L -value, D -value and UCS-value * after Aoki and Matsukura (2008)

	Limit rebound value L_{max}	Limit depth of micro depression D_{max} (μm)	Unconfined compressive strength S_c (Mpa)	Tensile strength S_t (Mpa)	Brittleness index S_c / S_t
Artificial rock 1	725	175	23.9	2.9	8.4
Artificial rock 2	735	146	25.4	2.8	8.9
Artificial rock 3	761	116	39.2	4.9	8.0
Brick 1	789	78	74.0	5.2	14.2
Brick 2	782	74	45.0	3.2	14.1
Brick 3	737	132	22.7	2.9	7.9
Brick 4	756	152	27.7	4.7	5.9
Brick 5	667	247	16.3	2.5	6.5
Gabbro (Tsukuba)	915	4	152.7*	—	—
Granite (Inada)	897	0	162.7*	—	—
Granite (Makabe)	923	0	175.1*	—	—
Sandstone (Choshi)	741	77	72.2*	—	—
Sandstone (Aoshima)	773	68	101.5*	—	—
Tuff (Shirakawa)	806	84	59.7*	—	—
Tuff (Oya)	691	162	15.5*	—	—
Limestone (Okinawa)	774	80	24.8*	—	—

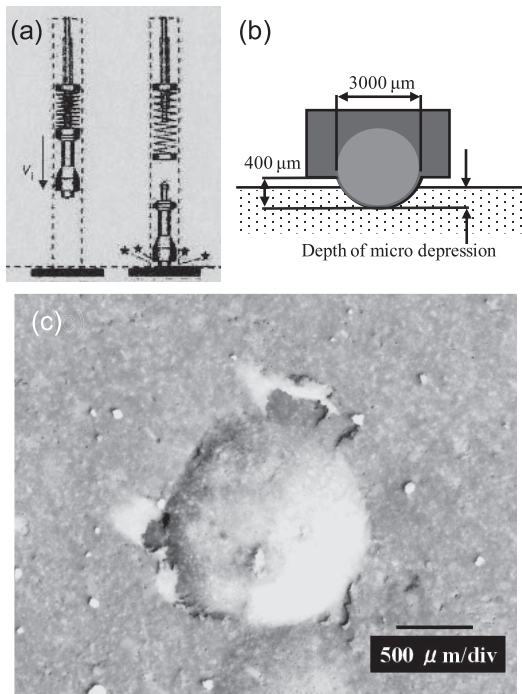


Fig. 1 (a) Schematic design of the Equotip impact (After Aoki and Matsukura, 2008) (b) Pattern diagram of micro depression (c) Closeup view of micro depression on the artificial rock surface after the impact by Equotip measurement

る部分も確認される。このように、エコーチップ試験による微小窪みは、岩石表面の圧縮と破壊によって形成されるものと推察される。このような微小窪み深さの計測には、デジタル変位計を取り付けたキーエンス社製のデジタルマイクロスコープ (VH5500) を用い、顕微鏡レンズの焦点距離を利用した。

連打試験による L 値と窪み深さのデータを取得するためには、各打撃の L 値と窪み深さを計測する必要がある。しかし、各打撃回数ごとの窪み深さ計測のためには、打撃点がずれることは許されない。ところが、測点 (打撃点) からインパクトデバイスを離し、再度、同じ測点に次の打撃を打ちおろすことは極めて難しい作業となる。そこで、各供試体について以下に詳しく述べるよう

に多数の測点を定め、それぞれの測点において 1 回、2 回、・・・、20 回の連続打撃を行った。

連打法の L 値と窪み深さに関する具体的な計測手順を以下に示す。

- (1) 自然乾燥状態の人工岩石の上面に対して、鉛直下向きに 1 回の打撃を行い、 L 値を計測する。
- (2) その打撃によって形成された窪みの深さを、デジタル変位計を取り付けたデジタルマイクロスコープにより $1 \mu\text{m}$ 単位で計測する。窪み深さは、窪みの中心付近で、それぞれ 3 回ずつ計測し、それらを平均した。
- (3) (1) で打撃した岩石上面の測点とは異なる位置 (各測点が 1 cm 以上離れるようにした) で、2 回の連打を行い、その 2 打目の L 値を計測し、デジタルマイクロスコープにより、窪み深さを計測する。

この手順で、打撃回数を一回ずつ増やして、20 回連打までの L 値と窪み深さを計測した。このような L 値と窪み深さの計測を各試料において 5 セットずつ行った。

3. 結果

3 種類の人工岩石の、連打試験の打撃回数の L 値と窪み深さの計測結果をそれぞれ Fig. 2 に示す。連打試験の n 打目の L 値と窪み深さをそれぞれ L_n, D_n と表すことにする。同一打撃の試験を 5 セットずつ行ったので、その平均値をプロットし、データのばらつきをバーで表した。人工岩石 1 の L 値の結果をみてみると、 L_1 は 397 をとり、 L_2 から L_5 まで急激に増加し、 L_6 以降、徐々に増加の程度が小さくなり、その後 14 打目 (L_{14}) 以降、ほぼ一定値 ($L = 711 \sim 730$; 最大値は $L = 730$) に収束している。次に、人工岩石 1 の窪み深さの結果をみてみる。 D_1 は $65 \mu\text{m}$ となり、 D_2 から D_5 まで急激に増加し、 D_6 以降、徐々に増加の程度が小さくなり、17 打目 (D_{17}) 以降は、 $171 \sim 176 \mu\text{m}$ とほぼ一定値 (最大値は $176 \mu\text{m}$)

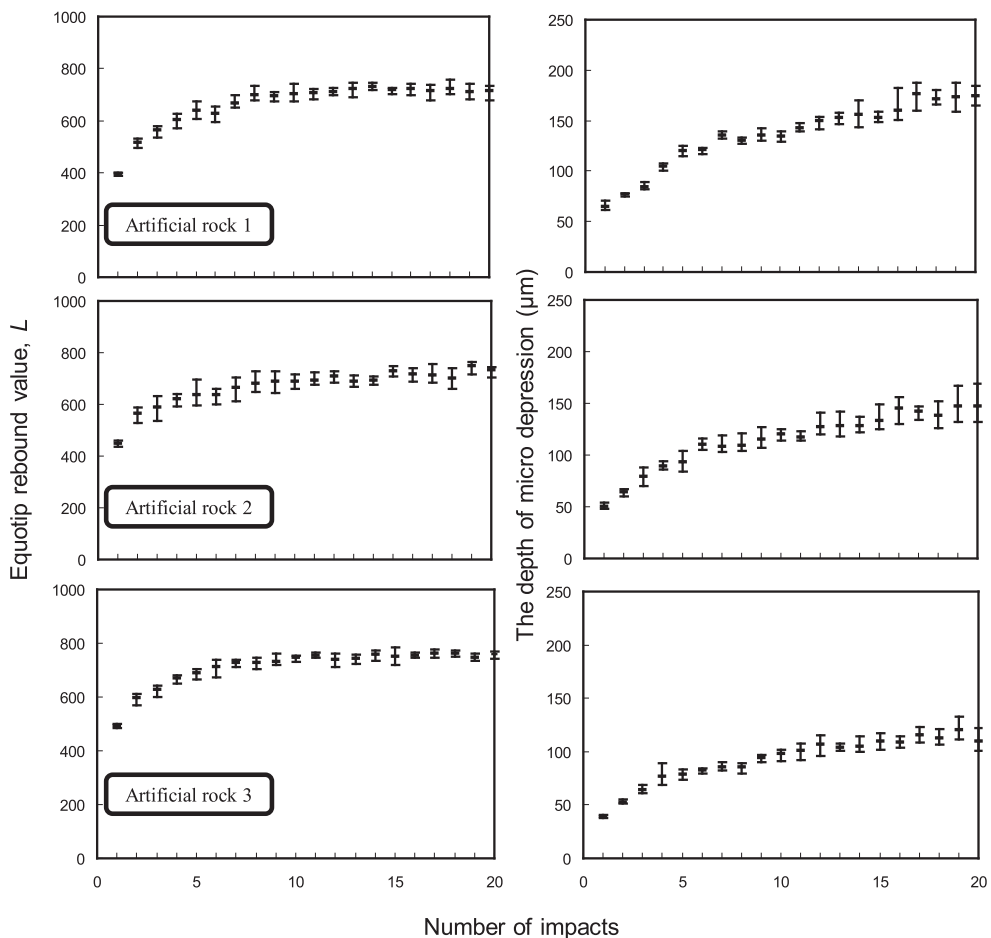


Fig. 2 Changes in Equotip rebound value (L) and the depth of micro depression with repeated impacts

に収束している。 L 値と窪み深さの打撃回数に応じた変化を比較してみると、両者は、打撃回数が増えるにつれ、増加する傾向をもち、最大値に向かって収束するという同様の傾向がみられる。この傾向は、人工岩石 2、3 についても同じである。すなわち連打法による L 値が収束する（最大値になる）ときには、窪み深さも最大に達しているといえる。

$L_1 \sim L_{20}$ の値（5 セットの平均値）の中から、大きい方から 3 つの値をとり、それらの平均値を L 値の最大値 L_{\max} とする。また同様に 1 ～ 20 回の打撃による窪み深さ（5 セットの平均値）の

大きい方から 3 つの平均を最大窪み深さ D_{\max} とする。人工岩石 1 の L_{\max} は 725 であり、 D_{\max} は $175 \mu\text{m}$ となる。また人工岩石 2、3 では、 L_{\max} は 735、761 であり、 D_{\max} は $146 \mu\text{m}$ 、 $116 \mu\text{m}$ となった。ちなみに各岩石の L_{20} の値と D_{20} の値は、人工岩石 1 の L_{20} は 713、 D_{20} は $174 \mu\text{m}$ 、人工岩石 2 の L_{20} は 731、 D_{20} は $147 \mu\text{m}$ 、人工岩石 3 の L_{20} は 758、 D_{20} は $110 \mu\text{m}$ であり、 L_{20} と L_{\max} 、 D_{20} と D_{\max} はほぼ同じである。

S_c の小さい人工岩石 1 では L 値が小さく、 S_c の大きい人工岩石 3 では L 値が大きく、 S_c と L 値には比例関係が成り立っている。一方、 S_c の

小さい人工岩石 1 では窪み深さは大きいのに対し、 S_c の大きい人工岩石 3 では窪み深さが小さく、 S_c と窪み深さには反比例の関係がみられる。

III エコーチップ反発値の収束値の意味 (岩種を増やした考察)

前章では、人工岩石を用いた連打法による L 値と窪み深さの結果より、 L 値が最大値に収束しているときに、窪み深さも最大値に達していることを明らかにした。また S_c の大きい岩石は L 値も大きく、逆に窪み深さは小さいという関係のあることが示唆された。そこで本章では、人工岩石の計測結果に加え、人工岩石よりも圧縮強度 (S_c) の大きいレンガや自然岩石の試料を加えて、 L 値と窪み深さおよび S_c と L 値との関係性をより詳細に検討する。

1. 試験材料と計測方法

人工岩石以外の計測に用いた試料はレンガ 5 種類と自然岩石 8 種類である。レンガは市販のブロック状のものを用い、日本製のレンガ 3 種類と、ドイツレンガ、ベトナムレンガを使用した。それぞれ便宜上レンガ 1、レンガ 2、レンガ 3、レンガ 4、レンガ 5 とした。自然岩石の内訳は、筑波山ハンレイ岩、花崗岩 2 種 (稲田花崗岩、真

壁花崗岩)、砂岩 2 種 (銚子砂岩、青島砂岩)、凝灰岩 2 種 (白河熔結凝灰岩、大谷凝灰岩)、沖縄石灰岩の 8 種類である。レンガの S_c は、直径 2.43 cm、高さ 5.0 ~ 5.8 cm の円柱供試体を各サンプル 7 本ずつ作成して、一軸圧縮試験によって求めた。それぞれの S_c については Table 1 にまとめた。レンガの S_c は 16.3 ~ 74 MPa であり、強度としては人工岩石と同じオーダーである。ただしレンガ 1 と 2 は人工岩石と比較して脆性度がかなり大きい。 S_c の最も大きい自然岩石は真壁花崗岩 ($S_c = 175.1$ MPa) であり、最も小さいものは大谷凝灰岩 ($S_c = 15.5$ MPa) である。大谷凝灰岩の S_c は人工岩石よりも小さく、沖縄石灰岩が人工岩石とほぼ同じ大きさの S_c をもっている。

同一点を 20 回連打して各打撃回の L 値を計測した。また 20 回連打後の窪み深さの値を人工岩石と同様の方法で計測した。人工岩石の場合と同様に、 $L_1 \sim L_{20}$ の値 (5 セットの平均値) の中から、大きい方から 3 つの値をとり、それらの平均値を L_{\max} とする。一方 D_{\max} は人工岩石の計測結果から D_{20} と D_{\max} にほとんど差がないことから、 D_{20} の値を採用した。計測した L_{\max} 、 D_{\max} 、 S_c の結果を Table 1 に示す。

2. 結果と考察

Fig. 3 にいくつかのレンガと岩石の連打試験の

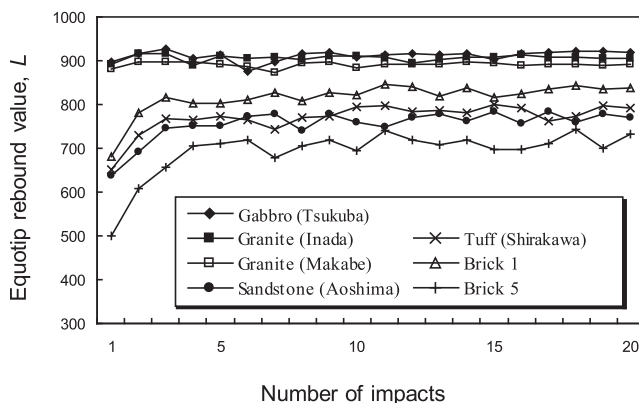


Fig. 3 Changes in Equotip rebound value (L) with repeated impacts

L 値の計測結果を示す。レンガや岩石試料においても、人工岩石で得られた傾向と同様に、エコーチップ連打試験で計測される L 値は、打撃回数初期の段階で打撃を重ねるにつれて徐々に大きくなり、その後一定値に収束する傾向がある。しかし、ハンレイ岩と花崗岩 2 種は、連打法による L 値は、初期値から最終値までほぼ一定値をとった。このような結果は Aoki and Matsukura (2008) でも報告されている。またこれらの岩石は、ほとんど窪みず、ハンレイ岩ではわずかな打撃痕が確認できたが ($D_{\max} = 4 \mu\text{m}$)、花崗岩においては打撃痕すら確認できず全く窪まなかった ($D_{\max} = 0$)。

これらの計測結果から人工岩石、レンガ、岩石試料について、 D_{\max} と L_{\max} 、 S_c との関係を見るために、 D_{\max} を縦軸に、横軸に L_{\max} と S_c をとりプロットした結果が Fig. 4 である。 L_{\max} や S_c が大きい岩石ほど D_{\max} が小さくなる傾向があり、どちらの関係も負の相関をもつことがわかる。また、先に述べたように S_c が 160 MPa 以上の花崗岩のような岩石ではほとんど窪まない ($D_{\max} \approx 0 \mu\text{m}$)。すなわち、 S_c が小さい岩石ほど、連打法による限界窪み深さが深くなる傾向があるといえる。エコーチップ試験は、材料表面に一定の打撃エネルギーで、球状チップを打ち付けることによ

り L 値を計測するが、その際に窪みが形成されることから、その窪み深さはエコーチップの打撃力と打撃に対する抵抗力となる材料の破壊強度、すなわち圧縮強度が大きく影響していると考えられる。従って最大窪み深さ D_{\max} は、やはり岩石の圧縮強度によって規定されていることになり、 D_{\max} と S_c が反比例の関係をもつことはこの推察に調和的である。一般に、材料表面の反発硬度は、材料の圧縮強度に依存すること (Hack *et al.*, 1993; Verwaal and Mulder, 1993; 橋本ほか, 1998; Meulenkamp and Grima, 1999; 大川ほか, 1999; 川崎ほか, 2000, 2002; Aoki and Matsukura, 2008) が報告されている。最大窪み深さ D_{\max} が岩石の S_c によって規定されているとすると、窪み深さと連動する L 値が S_c と密接な関係にあることは容易に推察される。

最後に L_{\max} と S_c の関係をみてみる。 S_c を縦軸に、横軸に L_{\max} をとりプロットした結果が Fig. 5 である。本試験結果は L_{\max} が大きくなるほど、 S_c は大きくなる傾向をもつことがわかる。このことは、先に述べたように L_{\max} と D_{\max} 、 D_{\max} と S_c の結果より、エコーチップ連打法で得られる最大値 L_{\max} は、岩石表面に形成される微小窪みの深さが最大に達したときの反発値であり、その最大窪み深さ D_{\max} は岩石個々の圧縮強度に依存

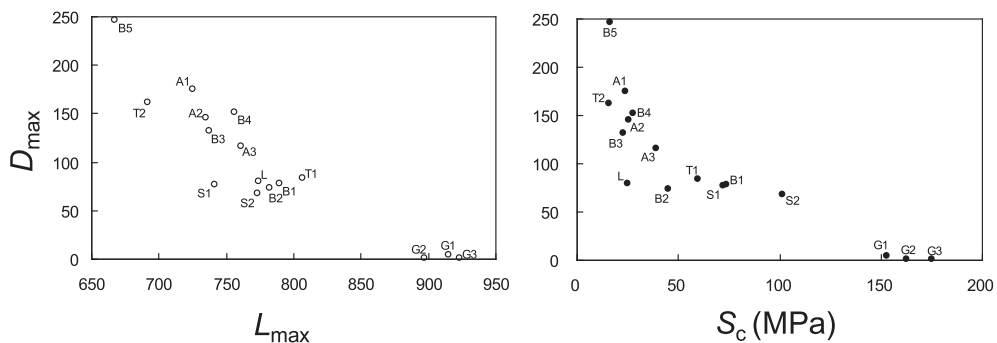


Fig. 4 Relationship between D_{\max} and L_{\max} , D_{\max} and S_c
A1-3: Artificial rock 1-3, B1-5: Brick 1-5, G1: Gabbro (Tsukuba), G2: Granite (Inada), G3: Granite (Makabe), S1: Sandstone (Choshi), S2: Sandstone (Aoshima), T1: Tuff (Shirakawa), T2: Tuff (Oya), L: Limestone (Okinawa)

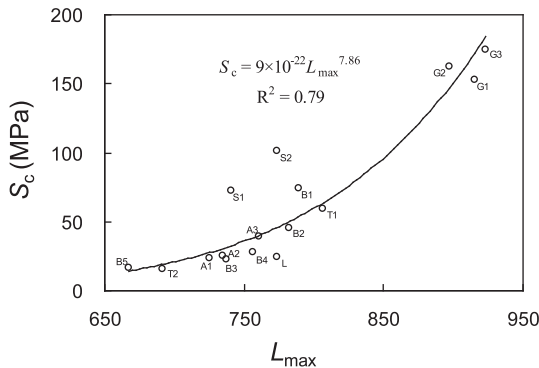


Fig. 5 Relationship between L_{\max} and S_c
 A1-3: Artificial rock 1-3, B1-5: Brick 1-5, G1: Gabbro (Tsukuba), G2: Granite (Inada), G3: Granite (Makabe), S1: Sandstone (Choshi), S2: Sandstone (Aoshima), T1: Tuff (Shirakawa), T2: Tuff (Oya), L: Limestone (Okinawa)

するという結果と調和的である。

これらのことから、エコーチップの連打法の最大値は、単打法の値と同様に、岩石の硬さの指標として有用であるといえよう。従来広く用いられている単打法に比べて、連打法の最大値 L_{\max} は、薄い風化層の影響やわずかな凹凸の影響を受けないなど、材料表面の影響を受けない値である可能性が報告されている (Aoki and Matsukura, 2007a; 2007b)。 L_{\max} の意味が明らかにされたことで、エコーチップ連打法の計測方法、計測目的が確立され、新しい研究手法の一つとして地形学分野への大いなる貢献が期待される。

IV まとめ

本研究では、エコーチップの連打法で得られる収束値 L_{\max} の意味を明らかにするために、セメントで作成した人工岩石やレンガ、および自然岩石を用いて、微小窪みの深さと反発値 (L 値) との関係性を調べた。その結果、岩石に対してエコーチップ試験を行うと、岩石表面には試験機先端のテストチップと同じ形状をもつ窪みが形成されることがわかり、 L_{\max} は窪み深さが最大に達した時

の反発値であることがわかった。また窪みの最大深さは岩石個々の圧縮強度に依存しており、 L_{\max} は岩石の圧縮強度と正の相関を持つことがわかった。

謝辞

本研究を行うに際し、日本学術振興会・科学研究費・基盤研究B (課題番号 19300305 研究代表者・松倉公憲) を使用した。

文献

- 大川哲志・大岡政雄・船戸明雄 (1999): 岩石試料への反発硬度試験機の適用性について. 第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 255-259.
- 川崎 了・谷本親伯・小泉和広・石川正基 (2002): エコーチップ硬さ試験機による岩石の力学特性推定の試み. 応用地質, **43**, 244-248.
- 川崎 了・吉田昌登・谷本親伯・舩屋 直 (2000): 簡易反発硬度試験による岩質材料の特性評価手法の開発: 試験条件の影響と基本特性に関する調査. 応用地質, **41**, 230-241.
- 朽津信明 (2008): カンボジア・タ・ネイ遺跡における蘚苔類の繁茂と砂岩の風化. 保存科学, **47**, 111-120.
- 橋本 徹・片川秀基・平野秀次・村上弘行 (1998): エコーチップ硬さ試験機による岩石材料の物性評価の試み. 第33回地盤工学研究発表会講演概要集, 1231-1232.
- Aoki, H. and Matsukura, Y. (2007a): A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equotip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, 1759-1769.

- Aoki, H. and Matsukura, Y. (2007b): Effects of rock strength and location heights on growth rates of tafoni-like depressions at sandstone blocks used for a masonry bridge pier in the coastal spray zone. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., **51**, Supplementary Issue **1**, 115-132.
- Aoki, H. and Matsukura, Y. (2008): Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **67**, 23-29.
- Hack, H. R. G. K., Hingira, J. and Verwaal, W. (1993): Determination of discontinuity wall strength by Equotip and ball rebound tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **30**, 151-155.
- Meulenkamp, F. and Grima, M. A. (1999): Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **36**, 29-39.
- Sunamura, T. (1992): *Geomorphology of Rocky Coasts*. John Wiley & Sons, Chichester, 302p.
- Verwaal, W. and Mulder, A. (1993): Estimating rock strength with the equotip hardness tester. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **30**, 659-662.
- (2009年5月29日受付, 2009年8月18日受理)