

風化岩を対象とした簡易反発硬度試験の適用性

An Application of the Equotip Hardness Test to Weathered Rocks

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. The purpose of this study is to develop the application methods of the tester not only to structures of civil engineering but also to the weathered stone cultural heritages. Up to today, it is found that there are close correlations between the rebound parameters called “L values” and the physical and mechanical properties of rocks, and the L values show influences of measurement conditions.

In this paper, it is presented that a series of laboratory tests is conducted to clear the relations between the L values and the layer thicknesses of man-made weathered rocks, and the following results are obtained:

- ① Where the thickness of weathered layer does not exceeded 1mm, the L values increase rapidly under the influence of the physical and mechanical properties of unweathered layer.
- ② It is expected that the thickness of weathered layer can be approximately estimated by using the L values obtained from the Equotip hardness test.

KeyWords : Equotip hardness tester , rebound hardness , weathered rock , unconfined compressive strength

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¹⁾がある。本試験機を用いた簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法が新たに開発されれば、ボーリングにより得られる岩石コア、既設の岩盤構造物のもとより、急激な環境の変化により劣化が著しく進行している石造文化財の健全度に関する調査・試験についても、技術・コストの両面において改善される期待が大きいものと考え、筆者らは、現在研究を進めている。既報告^{2,3)}では、対象とする供試体の試験条件(層厚、表面粗度など)が反発硬度値(以下L値とする)に与える影響に関する検討、および自然の岩石材料を対象に実施したL値と岩質材料の物理・力学指標との関係調査から、①L値は供試体の試験条件によりさまざまな影響を受けること②L値と各種物理・力学指標との間に正の相関関係があること、などについて報告した。そこで、本論文ではこれらをさらに発展させて、風化した岩石材料を模擬して作成した人工風化岩を対象に実施した風化層厚とL値との関係調査について述べる。

*学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

**正会員 博(工) 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

***正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

****ハイテック株式会社

2. 研究全体のフローおよび本論文の位置付け

図-1 に、筆者らが現在進めているエコーチップ反発硬度試験を用いた岩質材料の物性評価手法の開発に関する研究全体のフロー、および本論文の位置付けを示す。同図より、本論文で述べられている部分が研究全体でどのような位置付けにあるのか確認できる。前述したように、筆者らは本試験を岩石コアはもちろん、岩盤構造物や石造文化財にまで適用させることを念頭に置き研究を進めている。そのため、今後は割れ目を有する岩石材料を供試体に用いて、および割れ目がし値に与える影響評価などを実施し、最終的には簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の提案を目指すものである。

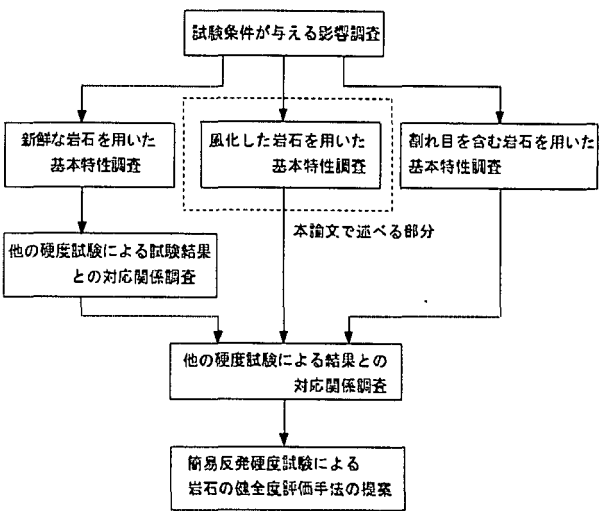


図-1 本論文の位置付け

3. 風化層厚の評価に関する検討の概要

既報告^{2),3)}では、し値がさまざまな試験条件の影響を受けることについて報告している。実際の岩盤ブロックおよび岩質材料の物性を適確に評価するうえで、このような各種試験条件による影響を定量的に評価することは重要かつ必要不可欠な課題である。筆者らは、岩盤ボーリングなどから得られる岩石コアだけではなく、例えば日本各地に広く分布する磨崖仏など、自然条件および地球環境の急激な変化により風化が著しく進行しているような石造文化財への本試験の適用性をも念頭に置いて研究を進めている。そこで、その前段階として、風化の進行している岩質材料に本試験を実施した場合の影響を把握しておくことが必要となる。その場合、岩盤表面に対しては非破壊的に試験が実施可能であり、かつサンプリングを行うことなく対象岩盤の物理・力学特性、さらには岩盤表面に分布する風化層の進行状況を簡便に評価・推定できることが望ましい。それでは、実際の原位置岩盤に本試験を適用する前段階として、以上のことを室内試験により考察するためにはどのようなモデルを考えると良いのだろうか？自然環境の変化などにより物理的影響を受けた原位置岩盤、あるいは採取されてから時間が経過した岩石コアに関しては、風化は岩盤表層から深部へ向かって進行していくことが知られている。千木良⁴⁾は、堆積性軟岩の風化のメカニズムについて言及し、岩石コアの表面から進行する風化層をその化学的性質から酸化帯、溶解帯と定義したうえで、それぞれのゾーンには境界となるフロントが存在することを指摘している。一方、大山⁵⁾は原位置の素掘りトンネルに対して針貫入試験を実施し、酸化帯の針貫入抵抗値がその下に存在する還元帯の0.1~0.5倍程度であったことを報告している。

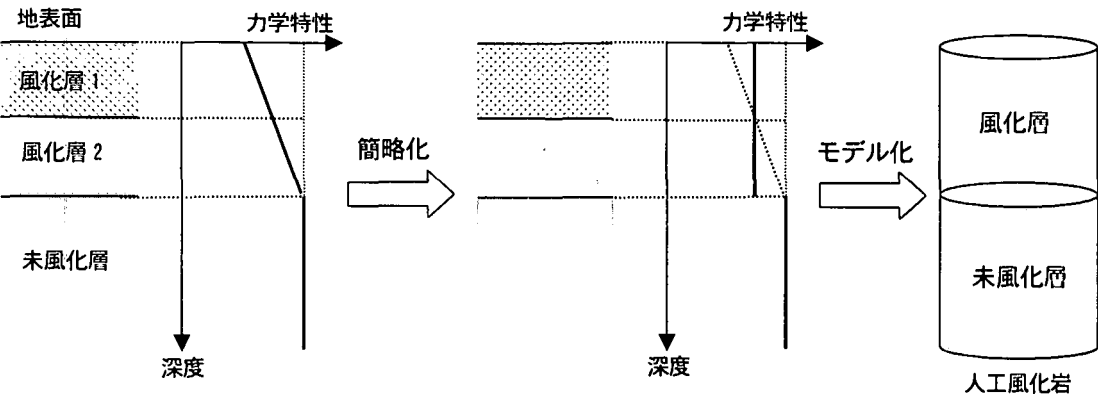


図-2 風化層厚の評価のための人工風化岩モデルの考え方

以上のことから、実際の岩石材料は割れ目が含まれていたり、塩類風化によって供試体表面が硬化している場合も考えられるが、本検討では主に岩石の風化作用のみに着目することとし、L 値による風化層の厚さの評価を目的として図-2 に示すような風化層と、風化の全く進行していない未風化層からなる単純モデルとして考え、石膏、水、カオリン粘土を配合して作成した人工風化岩を用いて実施した検討内容、およびその結果について述べる。試験手順の概略を図-3 に示す。

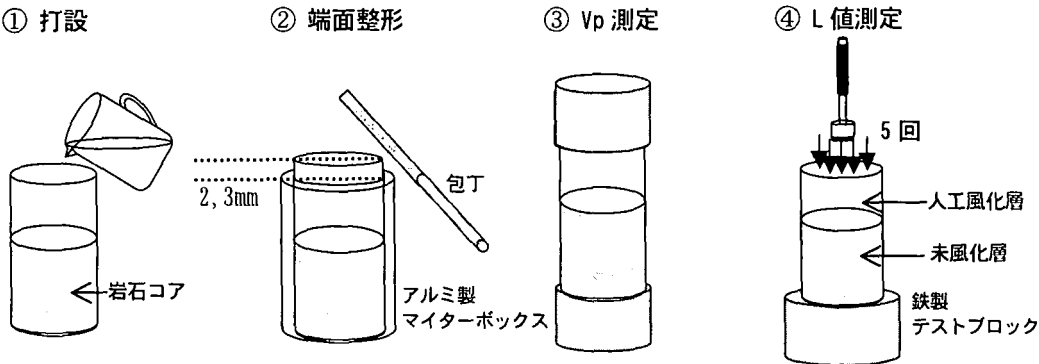


図-3 試験手順の概要

試験内容を簡単に説明すると、以下の通りである。

- (1) まず、石膏、水、カオリン粘土を配合したものを、土台となる岩石コア(直径 5cm×高さ 10cm、場合によっては高さ 12cm)上の型枠内に直に打設して人工風化層を作成する。(図-3 の①)
- (2) 人工風化層が硬化後、その供試体をアルミ製マイターボックスで挟み、上端面を 2～3mm 程度包丁で削り水平になるまで整形する。(図-3 の②)
- (3) 上端面の整形後、打設した人工風化層の均質性を調べる目的でパンジット(C.N.S.Electronics Ltd.社製)を用いて人工風化岩全体の P 波速度 V_p (m/sec)を測定し(図-3 の③)、エコーチップ反発硬度試験機に付属する鉄製テストブロック上に静置させ、上端面についてのみ本試験を 5 回実施する。(図-3 の④)

上記の手順を、人工風化層の端面整形が不可能になるまで繰り返す。また、一連の検討が終了した後、風化岩が割れ目を有する状況を想定し、風化層と未風化層の間が接着されていない条件下において同様の検討を実施した。本検討で使用した一連の石膏による人工風化層は、石膏(吉野石膏株式会社製、ニューハイストーン歯科用硬質石膏)と 18.0℃の水とカオリン粘土を重量配合比 1:0.5:0.1 のもとに配合して作成した。なお、本検討で土台(未風化層に相当)として用いた岩石供試体は、稲田花崗岩、白浜砂岩、および大谷石である。

4. 検討結果および考察

試験に供した供試体の物性値および実施した試験ケースを表-1、表-2 にそれぞれ示す。今回の検討における上下 2 つの層(風化層および未風化層)の L 値を、それぞれ L_1, L_2 としたとき、両者の強度比は前述の針貫入試験結果における強度比、および現時点で供試体が作成可能な試験条件により、 $L_1:L_2=1:2\sim1:5$ とした。なお、本検討では風化層には石膏のみを用いてその物性を一定にし、土台となる岩石コアの物性を変化させることとした。また、各ケースともそれぞれ 2 回ずつ試験を行い、すべてのケースにおいて良好な再現性があることを確認している。

表-1 供試体の物性値

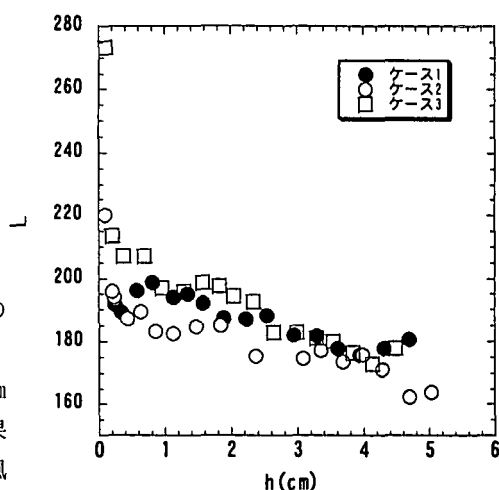
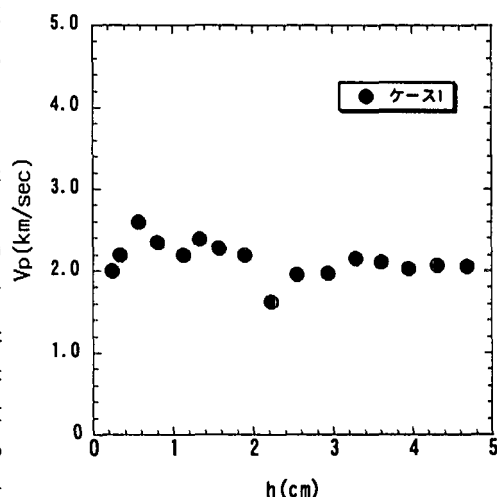
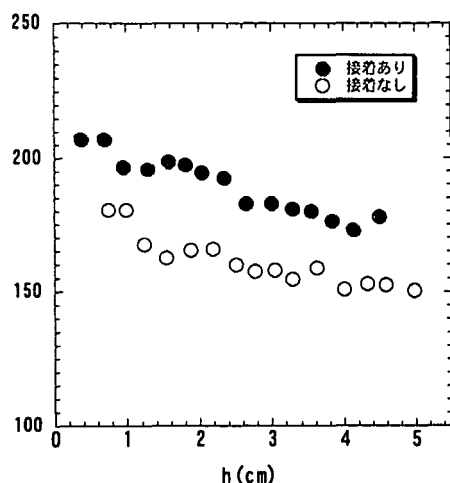
	ρ (g/cm ³)	q_u (MPa)	V_p (km/sec)	L
石膏	1.65	10.0	2.97	180
稲田花崗岩	2.62	188.0	5.05	900
白浜砂岩	2.31	48.0	3.14	541
大谷石	1.42	11.0	1.85	385

表-2 試験ケース

	人工風化層	岩石供試体	$L_1:L_2$
ケース 1	石膏	稲田花崗岩	1:5
ケース 2	石膏	白浜砂岩	1:3
ケース 3	石膏	大谷石	1:2

縦軸を L 値、横軸を人工風化層の厚さ h とし、各ケース 1 回分の試験結果のみプロットしたものを図-4 に示す。なお、図中の凡例●, ○, □ はそれぞれケース 1, 2, 3 の試験結果を示し、ケース 2, 3 の $h=2\text{mm}$ 以下のプロットについては補足のために後日別途実施した試験結果のデータを重ね書きして用いている。同図より、各ケースともに風化層の厚さ h がある値以下になる範囲においては、未風化層の影響は受けるものの、風化層の物性値を強く受けるためか、緩やかな左上がりの直線関係を示し、その影響範囲は既報告^{2),3)}における知見および同図の傾向から判断して、風化層の厚さ h が約 4cm 以下であるものと推定される。また特にケース 2, 3 に着目すると、また、ケース 2, 3 に着目すると、 $h=1\text{mm}$ 以下となるような範囲においては未風化層の影響を大きく反映させるためか L 値が急激に増加していることが確認できる。以上のことから、このように風化層と未風化層が接着される場合における L - h 関係は、未風化層の影響を全く受けない水平な直線の範囲、影響は受けるが風化層の物性を大きく反映する緩やかな左上がりの直線の範囲、さらに、厚さが 1mm 以下の未風化層の物性値を大きく反映させる急な左上がりの直線の範囲に大別でき、その厚さが 1mm 以下の範囲における L ~ h 関係および図中の切片 ($h=0$) は、最終的には未風化層となる岩石コア固有の L 値に漸近するものと想定される。次に、代表例としてケース 1 における、 P 波速度 $V_p(\text{m/sec})$ と風化層の厚さ $h(\text{cm})$ の関係を図-5 に示す。なお、同図中の各 h に対応する V_p としては、端面整形後の供試体全体の V_p を測定したものから未風化層にあたる岩石コアの、試験に供する前の V_p (稲田花崗岩では $V_p=5.05 \times 10^3 \text{m/sec}$) を差し引いて算出したものを採用した。 V_p を測定する主な目的は、石膏の均質性の確認であるが、同図からは本検討で人工風化層として用いた石膏が概ね均質に作成されていることがわかる。

さらに、風化層、未風化層の間に存在する境界の接着の有無が L 値に与える影響を調査する目的で、両層間を接着させずに実施した検討のうち、ケース 3 のみプロットしたものを図-6 に示す。同図より、上記 2 つの岩石材料と人工風化層を接着させた検討結果と比較すると、全体的に L 値が下方に平行移動しているのがわかる。よって、岩石材料および原位置岩盤や石造文化財の物性を L 値により評価する際にはこのような境界、すなわち割れ目や不連続面の影響が無視できず、その影響の度合いを定量的に把握する必要があるもの

図-4 人工風化岩の L 値と厚さ h の関係図-5 ケース 1 における人工風化岩の V_p と h の関係図-6 ケース 3 における風化層と未風化層間の接着の有無による L 値の違い

と考える。

最後に、 L 値による風化層厚の評価法について言及したい。今回検討に用いた人工風化岩は、風化層、未風化層の 2 層のみからなる最も単純なモデルであるために、その物性値の変化が急激であるが、実際には前述したとおり、一般的に風化層には酸化ゾーン、還元ゾーンなどが存在し、岩盤表層から深部へと徐々に風化が進行しているものと考えられる。このような状況を簡単な略式図として表現すれば、図-4 におけるケース 2,3 の凡例は図-7 のように 3 本の直線、すなわち、①未風化層の影響を全く受けない範囲における水平に近い直線、②未風化層の影響は受けるが風化層の物性値を概ね反映する範囲における緩やかな左上がりの直線、および③未風化層の物性値を大きく反映させる急な左上がりの直線、の 3 つに大別されるものと考えられる。また、図-4 より同様に、②から③に至る風化層の厚さ h 、および L - h 関係の傾きは、岩種および風化の程度によって異なるものと推定される。さらに、図-7 中における点線は、最終的には未風化層となる岩石供試体固有の L 値に近づくものと考えている。以上のことから、本検討におけるケース 2,3 のように、対象とする岩石材料の種類によっては、この直線関係を正確に把握することにより非破壊的に風化層の進行状況を概ね推定できるものとする。

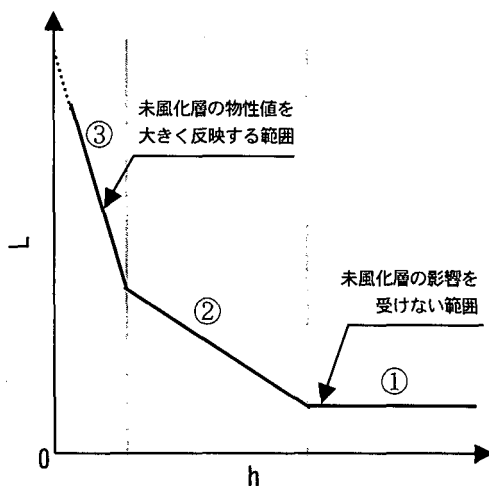


図-7 風化層厚 h と L 値の関係の概略図

5. まとめ

L 値による風化層の進行状況の推定法を検討する目的で、割れ目を有しない、風化層と未風化層を接着した人工風化岩を主に用いて検討を実施した。その結果、得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 風化層の厚さが 1mm 以下になると、 L 値は未風化層の物性の影響を強く受けて急激に増加する。
- (2) 風化層と未風化層間の接着の有無は、 L - h 関係に影響を与える。すなわち、風化層と未風化層を接着しない場合の L - h 関係は接着した場合のものと比較して下方に平行移動する。
- (3) L - h 関係を利用すれば、 L 値により h 、すなわち風化の進行状況を概ね推定できるものと期待される。

参考文献

- 1) 例えば、W.Verwaal&A.Mulder: Estimating Rock Strength with Equotip Hardness Tester, Int.J.RockMech.Min.Sci.&Geomech. Abstr., Vol.30, No.6, pp.659-662, 1993.
- 2) 吉田昌登・川崎 了・谷本親伯・舛屋 直: エコーチップ反発硬度試験の岩石材料への適用性, 第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.308-312, 2000.
- 3) 川崎 了・吉田昌登・谷本親伯・舛屋 直: 簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の開発—試験条件の影響と基本特性に関する調査—, 応用地質, 第 41 巻, 第 4 号, pp.230-241, 2000.
- 4) 千木良雅弘: 風化と崩壊—第 3 世代の応用地質—, 近未来社, pp.107-152, 1995.
- 5) 大山隆弘・千木良雅弘・大村直也・佐々木和裕・長岡 亨: 不飽和領域での堆積岩の化学的風化作用—泥岩トンネル坑壁の風化速度と微生物の影響—, 応用地質, 第 39 巻, 第 6 号, pp.511-523, 1999.