

岩石の風化度の数量的表示法について

斎藤 実, 横瀬広司, 青柳省吾, 山田宣良

ON THE NUMERICAL EXPRESSION OF THE DEGREE
OF ROCK WEATHERING

Minoru SAITO, Hiroji YOKOSE, Shogo AOYANAGI and Noriyoshi YAMADA

It is well-known fact that physical properties of rock change remarkably with the degree of weathering. Therefore, the degree of rock weathering is important to land reclamation, especially practical construction. In spite of above mentioned importance, traditionally the degree of weathering was mostly expressed empirically, and so in this paper we tried to express it more numerically for practical use.

Comparing the methods of Schmidt hammer, N value, Proctor needle, gamma ray and elastic wave with each other, following results are achieved.

1. When there are no economical restrictions, the method of elastic wave is superior than any other methods.
2. Schmidt hammer method is effective to relatively less weathered rock, therefore it seems more profitable to combine it with N value or Proctor needle method.
3. Gamma ray method can express well the degree of weathering through the density parameter of rock.

風化の程度によって岩石の物理的性質が著しく変化することはよく知られている。従って風化度は土地造成、特に施工上重要な問題である。それにもかかわらず風化度はこれまで主として経験的に表わされてきたので、本論文においてわれわれはこれをより数量的に表わし、実用に供しようとしてみた。

シュミットハンマー、N値、プロクターニードル、ガンマ線、弾性波による方法をそれぞれ比較した結果、次の結論に達した。

1. 経済的制約がなければ、弾性波による方法が最もすぐれている。
2. シュミットハンマー法は風化があまり進んでいない岩石に有効であるので、N値やプロクターニードルによる方法と組合せて用いるのが効果的である。
3. ガンマ線法は密度を通じて風化度をよく表わすことができる。

結 言

一般に岩石は風化の進行につれて軟岩状態から土の状態へと漸移し、その組織構造、鉱物組成、化学成分、密度、間ゲキ率、比重、粒度、力学的強度などに変化がみられる。そのために新鮮岩の場合には問題とならなかった地山の安定性が風化の進行に伴って施工上の制約事項となったり、逆に風化岩に対して機械掘削を行ってきたものが、新鮮岩に直面して工法の変更を余儀なくされたりすることは、われわれが日常しばしば目にするところである。一方岩石の土壌化の見地からは、新開地の土地利用法の決定上、母岩の風化の程度が問題となる。特に農耕地として利用する場合、岩石の風化度はほとんど決定的な要因ともなっている。しかしながら風化の概念は、これまでではしばしば経験的に論じられ、特に風化度の数量的表示については必ずしも満足のできる結論は得られていない。そこで筆者らは、

岩石中特に風化による物理・工学的性質の変化が著しい花崗岩の風化度を数量的に表示する方法について検討を加えた。

風化とその程度の判定について

風化とは、地殻の空気に接する部分が破碎と変質を受け、岩石から土壌へ変化する作用をさしている。風化作用としては物理的なものと化学的なものに区分されているが、一般的には両者が相伴って進行しているのが普通である。これらの要因については既に筆者の1人、齋藤によって紹介されているので⁽¹⁾ここでは省略する。風化度の判定については、現在土質工学会において一つの現地調査法が提唱されており⁽²⁾、それによると花崗岩の場合には長石が指で破碎しうるかという点、ハンマーで打撃を加えたときの振動の状況、薬品添加による長石の粘土化の判定などが調査の基準となるとされている。Ollier⁽³⁾は彼の著書の中で、自らの判定法および Melton の提案を紹介しているが、これらの判定法はいずれもハンマーの打撃による変化をもとにして風化度を得ている。筆者らは田中の提案⁽⁴⁾が最も現実をよく現わしているものと考え、それに若干の補足を加えて表-1のようにしたものが実用上有意義なものとして採用している。

表-1 岩石の風化度の分類

風化度	岩石の状態
A	未風化岩。ハンマーで打診すれば澄んだ音を出す。
B	開口した亀裂や節理はないが、部分的に多少変質している。ハンマーで打診すれば澄んだ音を出す。
C _H	石英を除いて変質しているが岩質は硬い。変色している。ハンマーで打診すれば少し濁った音を出し、割れ目にそって岩塊が剥脱することがある。
C _M	石英以外は軟質化し、岩質も多少柔らかくなっている。ハンマーで打診すればかなり濁った音を出し、割れ目にそって岩塊が剥脱することが多い。
C _L	全般に軟質化し、岩質も柔らかい。ハンマーで打診すれば濁った音を出し、割れ目にそって岩塊が剥脱する。
D ₁	全般に著しく軟質化し、岩質も著しく柔らかい。ハンマーで打診すれば著しく濁った音を出し、くずれ落ちる。
D ₂	さらに軟質化が進み、土として取扱われる。ハンマーで打診しても音はほとんど出ず、めり込むこともある。

この表は厳密に言えば破碎度を加味した岩質分類であるが、大局的には風化度とみてさしつかえないと思われる。

このように風化度の判定にはいくつかの方法があるが、これらはいずれもやや客観性に乏しいきらいがあり、あるいは専門的すらすらある。この点については数量的表示法の導入が客観点判定を可能にし、最も好ましいものと考えられる。

風化度の数量的表示法

風化度の数量的表示法は化学的方法と物理的方法とに大別できる。前者に属するものとして Goldich⁽⁵⁾は花崗片麻岩の風化について論じ、その中で風化が進むにつれてアルミナが多くなることを示している。また柏木⁽⁶⁾は花崗岩の風化について検討を加え、黒雲母の変質の度合から風化度を判定している。さらに山下⁽⁷⁾は黒雲母花崗岩の風化過程において造岩鉱物が粘土鉱物に変化することを示している。同時に山下は一面セン断試験を行ない、風化に伴って内

部摩擦角 ϕ は減少し、粘着力 C が増加すると述べ、いわゆる化学的方法と物理的方法とを結びつけて総合的に判定できることを示している。その他三野⁽⁸⁾は $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ を風化指数 f として化学的風化の尺度として用い、Ruxton⁽⁹⁾ は Al_2O_3 に対する SiO_2 のモル比が有効かつ簡便であるとしている。

これらの化学的方法に対して、物理的方法としては、大別して間ゲキ率もしくは密度を測定する基本的な方法と、貫入抵抗や弾性波速度を利用する工学的な方法とに分けられる。前者に属するものとして、渋谷⁽¹⁰⁾は風化の進行に伴い間ゲキ率が増加することを示し、これをもとにして風化度を定量的に表わせるとしている。また松尾ら⁽¹¹⁾はドライピット貫入量や弾性波伝播との関連性から、風化度の判定に間ゲキ率が有効であるとしている。さらに現在、一般に風化指数を表わすにはパラメータとして間ゲキ率が用いられており、たとえば Hamrol⁽¹²⁾ は $i_r = 100(P_2 - P_1)/P$ (ここで P_1 は乾燥重量、 P_2 は飽和重量) で、また竹中ら⁽¹³⁾は飽和含水比で、それぞれ風化指数を表わしている。松尾ら⁽¹⁴⁾による長石の比重をもとにしたマサ土の分類も同様な基本的方法であるものと理解できる。一方、後者(工学的な方法)については、 N 値や弾性波速度などが既に風化度を表わす指標として一部で利用されている。これについては後に詳述する。その他にも風化による岩石の質的变化に伴い粒子の水分吸着特性に変化が生じるという報告⁽¹⁵⁾など、二次的因子に関する検討結果も若干みられる。

これらの研究結果を総合的に考えてみると、岩石の風化度の数量的表示法が実用的に意義あるものとされるには、1. 現場において、2. 正確な値が得られ、3. 適用範囲が広い、4. 簡便な方法であることが必要と考えられる。以上の見地にもとづき、筆者らは主として以下の4方法について検討を加えた。

1. シュミットハンマーによる方法

既に論述したように、現在風化度の判定にはハンマーによる打撃効果が基準として採用されている。その意義を数量化の方向で拡大した場合、ハンマーの打撃に対する反撥硬度が数量的に得られるシュミットハンマーは、基本的には非常にすぐれた判定法であるといえる。しかしながら従来型のシュミットハンマーは、硬化後のセメントコンクリートの強度を判定するものであるため、これを風化岩に適用した場合には、風化度 $A \sim C_M$ 程度の比較的風化が進んでいない硬い岩石についてのみ可能であった。そこで筆者らは、スイス、PROCEQS A社のモルタル用 P型シュミットハンマーを採用することにより、この弊害を克服しようとした。対象は主として香川県下の風化花崗岩とし、昭和48年10月～49年1月にかけて11カ所につき、合計94点の測定を行なった。その結果は図-1に示すとおりである。

この図からわかるように、モルタル用 P型シュミットハンマーによれば、 $A \sim C_L$ の範囲である程度定量的に風化度をとらえることができ、風化度 D は圧縮強度がゼロのものであると規定すれば、ほとんどすべての風化帯にわたって数量的表示が可能となる。しかしながらこの型式のシュミットハンマーは、原則として対象物が鉛直面または水平面に限定され、任意の傾斜角に対しては測定上特別の工夫を要するのが欠点である。従ってこの点において改良の余地が残されてはいるが、比較的風化度の低いものに対しては従来型のシュミットハンマー(任意の角度が可能)も適用できるので、今後風化度を定量的に表わすため有力な手段となりうるものと考えられる。

2. 貫入試験による方法

貫入試験によって岩石の風化度を判定する方法は既に多くの研究者によって試みられており、例えば大八木⁽¹⁶⁾は等 N 値曲線によって広域にわたる風化度を地形的に究明するに至っている。国鉄などで採用している規準は N 値が軟マサで35以下、硬マサ35～150、風化軟岩150～500、風化岩500以上となっており、風化度としてはそれぞれ D_2 、 D_1 、 C 、 B に対比させて利用できよう。このように N 値を用いる方法はかなり普及をみており、その適用範囲も広いことから、貫入試験による方法としては最も有力なものと考えられる。欠点としては、風化度 $A \sim C$ に対しては N 値が100以上に達することで、その意味からは有利な適用範囲は $C_M \sim D$ ではないかと思える。また D のような風化度の高いものに対しては、より簡便なプロクターニードルによる貫入試験が、貫入応力を直読できるという点からみても有利であるので、貫入試験のみによって全体の風化度を得ようとする場合には N 値による表示が、また $A \sim C$ のような低い風化度を対象とする別の方法と組合せて利用できる場合や、マサ土のみを対象とする場合にはプロクターニードルによる方法が適当となろう。寺田⁽¹⁷⁾はプロクターニードルを用いて貫入抵抗圧力と一軸強度、単位体積重量、間ゲキ比との関係を求めている。それらの結果を総合して貫入抵抗圧力と風化度との関係を求めると、 $D_2 = 30\text{kg/cm}^2$ 以下、 $D_1 = 30 \sim 80\text{kg/cm}^2$ 、 $C_L = 80 \sim 150\text{kg/cm}^2$ となり、貫入抵抗圧力 150kg/cm^2 がこの方法の上限であることから、測定範囲は $C_L \sim D$ といえよう。全般的にみて貫入試験による方法は、1. で述べたシュミットハンマーよりも風化が進んでいるものに対して有利であり、厳密な適用にはこの両者の組合せが有力な手段となるものと考えられる。

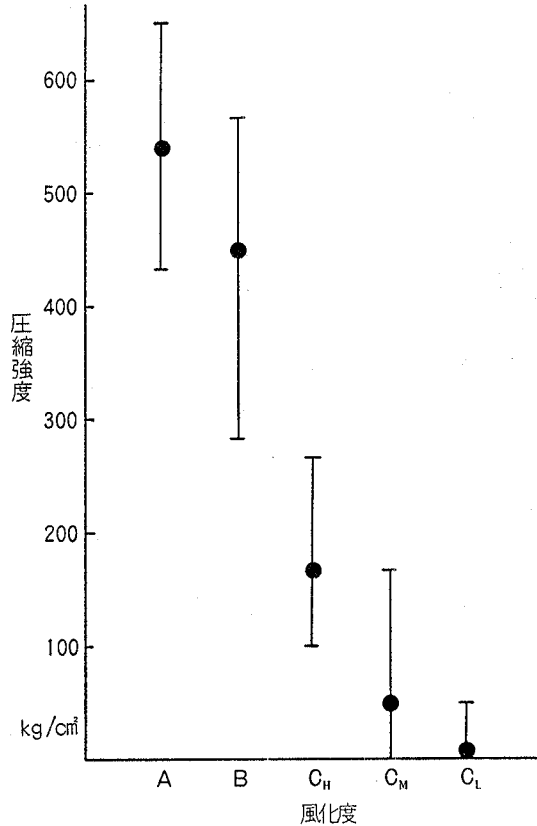


図-1 シュミットハンマーによる測定結果

3. 密度を測定する方法

既に論述したように、現在風化度を表わす指標として岩石の間ゲキ率が重要であることが認められつつある。また風化に伴い長石の比重が減少する事実も報告されており、これらを総合的に風化岩の密度としてとらえることは、岩石の風化度を数量的に表わす上で有効となろう。現場において岩石の密度を直接測定する方法は種々考えられるが、筆者らはまずガンマ線を利用した方法を試みた。ガンマ線のコンプトン散乱効果を利用して物質の密度を測定する方法は既に確立しており、ガンマ線密度計として市販されている。しかしながらこの計器は高価であり、しかも取扱上資格を必要とするので一般的であるとはいえない。そこで筆者らは島津 FPH-22型ガンマ線用シンチレーションサーベイメータと付属の標準線源を利用して岩石の密度を測定した。この方法によれば比較的安価ですみ、かつ線源が密封状態の ^{137}Cs 、 $100\mu\text{Ci}$ 以下であるので取扱に資格を要しない。この方法を模式的に示すと図-2のようになる。

この図からわかるように、線源 ^{137}Cs から発したガンマ線は岩石に当たって散乱し、一部がシンチレーションカウンターのプローブに戻る。その量は岩石の密度が大であるほど比例的に増加する傾向がある。ここでは主として昭和50年12月から51年6月にかけて香川県下の風化花崗岩16カ所を対象として測定した結果を図-3に示す。

この図において密度は湿潤状態のものとなっているので、風化が進むほど乾燥密度よりやや大きな値となっている可能性がある。図-3から明らかなように、風化度と密度とは散乱ガンマ線のカウント数を通じて対応しており、この方法が充分実用可能であることが示されている。しかしながら今回の試作では必ずしも密度測定最適設計ではなかったためか、やや分解能が低く、細部にわたる区分には困難が伴っているが、これは構造上の改良によって克服できるものと考えられる。また香川県下には、ペグマタイト、半花崗岩、花崗質砂岩の一部に強い自然放射能を含むものがあるが、それによる誤差は10%以内であり、分布も限られていることから、実用上はそれほど問題とはならない。この方法による測定の範囲は表層に限定されるが、たとえばガンマ線の代りに超音波を用いれば、周波数の大小や発振部と検出部との間隔を選定する自由度が高くなるので、ある程度の深層まで計測可能となるものと考えられる。

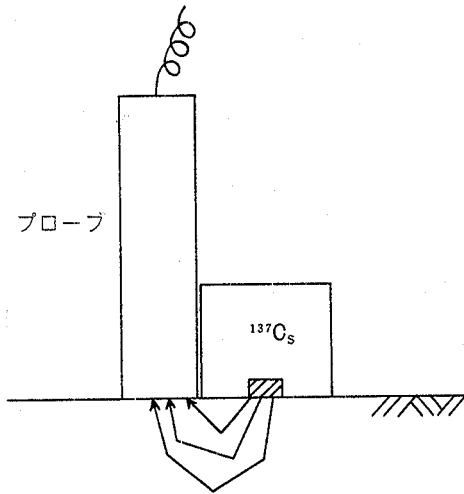


図-2 密度測定模式図

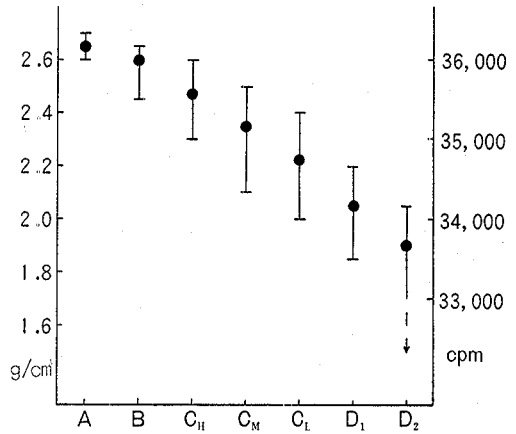


図-3 風化度と密度との関係

4. その他の方法

その他の方法として特筆されるのは弾性波による測定であり、既に岩体の風化度の判定法としてほぼ確立しているといつてよい。たとえば増田⁽¹⁸⁾によれば、風化度と伝播速度との関係は表-2のようにになっている。

表-2 風化度と弾性波速度との関係 (km/sec)

岩石名	風化度	横坑内速度	横坑間速度
輝緑凝灰岩	D, C _L	<2.0	<2.3
	C _M	2.0~3.0	2.3~3.3
	C _H	3.0~4.5	3.3~4.5
	B, A	>4.5	>4.5
粘板岩	D, C _L	<2.0	<2.3
	C _M	2.0~3.0	2.3~3.3
	C _H	3.0~4.0	3.3~4.0
	B, A	>4.0	>4.0
チャート	D, C _L	<2.0	<2.3
	C _M	2.0~3.0	2.3~3.3
	C _H	3.0~4.0	3.3~4.0
	B, A	>4.0	>4.0
花崗岩	D, C _L	<1.5	<1.8
	C _M	1.5~2.5	1.8~2.8
	C _H	2.5~4.0	2.8~4.0
	B, A	>4.0	>4.0
砂岩	D, C _L	<1.5	<1.8
	C _M	1.5~2.5	1.8~2.8
	C _H	2.5~3.5	2.8~3.8
	B, A	>3.5	>3.8

この方法は原理的にも明確であり、表層、深層を問わず一定の拡がりをもつマクロな値として結果が得られるのが

大きな利点である。しかしながら測定用の機器は高価であり、結果の解析もやや煩雑であるので、一般的な方法として普及するにはやや難点があるといえよう。従ってこのような制約のない条件の下では最もすぐれた方法ではないかと考える。

つぎに現場におけるセン断試験によって岩石の風化度を判定する方法が考えられる。筆者らは試験的にバーグラフによる現場セン断試験を香川県大川郡長尾町前山地区において実施したが、結果的にはやや信頼性に乏しいデータが得られたのとどまった。しかし前述のように風化の進行に伴ってセン断応力が質的に変化することはよく知られた事実であり、特に風化度 D に対しては現場セン断試験が有力なものとなりうるであろう。

この他にも粒度分析や比重測定結果、あるいはチクトソロピー、ダイレタンスーのような吸水による物理性の変化や、諸化学的測定法による風化度の数量的表示も有力な手段ではあるが、現場における簡便な測定法という意味では難点があるので省略する。

総合的考察

以上の結果を◎優、○良、△可として総合的にまとめてみると表-3のようになる。

表-3 各測定法の特徴

	シュミット ハンマー	N 値	プロクター ニードル	ガンマ線	弾性波
風化度の 測定範囲	○ (A~C _L)	○ (C _M ~D ₂)	△ (C _L ~D ₂)	◎ (A~D ₂)	◎ (A~D ₂)
対象の大きさ	△	○	△	○	◎
正 確 さ	○	○	○	○	◎
労 力	◎	△	○	◎	△
価 格	◎	○	◎	○	△
応 用 性	○	◎	○	○	◎

この表からわかるように、岩石の風化度を数量的に表わすことができる各測定法はそれぞれ特徴をもち、目的と現実の条件とを考慮して適宜選択してゆくのが最も合理的であろう。すなわち、経済的、時間的制約がなければ弾性波による方法が最適であるが、一般にはこれらの制約があるものと考えられるので、密度測定による方法、もしくはシュミットハンマーと貫入試験とを組合せた方法が実用的であろう。それによって従来主観的に、又は経験的に表わされることが多かった風化度を数量的に表わすことが可能となり、現場における風化度の変化に対しても臨機応変に対応できるものと考えられる。

あ と が き

本論文では岩石の風化度に関する数量的表示法について考究し、いくつかの進展をみる事ができた。今回は主として風化花崗岩を対象として基礎データを得るにとどまったので、今後はさらに各種測定機器の改良を行ない、種々の岩石について検討を加えるとともに、当初の目的である土木施工との関連性や土地利用への応用などについても考察をすすめてゆきたいと考えている。

謝 辞

データ作成に際して御協力戴いた、元本学農業地水工学研究室専攻生、小林一則氏に謝意を表する。

引用文献

- (1) 斎藤 実：風化現象とその進行の度合い，施工技術，5-4，25-31 (1972)。
- (2) 土質工学会：風化度の現地調査法，日本の特殊土，109 土質工学会 (1974)。
- (3) C. D. OLLIER, 松尾訳：風化—その理論と実態，177-178 ラテイス (1971)。
- (4) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門，28-36 山海堂 (1964)。
- (5) S. S. GOLDICH: A Study in Rock Weathering, *J. Geol.*, 46, 17-58 (1938)。
- (6) 柏木日出治：花崗岩の風化の研究 (予報)，広大地学研報2，319-342 (1963)。
- (7) 山下親平：黒雲母花崗岩の風化作用とその影響，愛媛大紀要第III部 (工学) 6-1, 129-136 (1968)。
- (8) 三野与吉：自然地理調査法，224 朝倉書店 (1968)。
- (9) B. P. RUXTON: Measures of the Degree of Chemical Weathering of Rocks, *J. Geol.* 76, 518-527 (1968)。
- (10) 渋谷長美：岩石の風化と孔隙率 (花崗岩について) 応用地質1-3, 12-18 (1965)。
- (11) 松尾新一郎, 西田一彦：花崗岩の真砂化とその物理的，工学的諸性質について，京大工教養研報 3, 63-68 (1966)。
- (12) A. HAMROL: A Quantitative Classification of the Weathering and Weatherability of rocks, Proc. 5th int. conf. S.M.F.E 11, 771-774 (1957)。
- (13) 竹中華之介, 渡辺興一：まさ土中の切取斜面，第22回土木学会年学講概要集 3-33 (1967)。
- (14) 松尾新一郎, 西田一彦：マサ粒子の物理，化学的性質について，第2回土質工学研発講集 1-6 (1967)。
- (15) 西田一彦, 佐々木清一：マサ土粒子の風化度と水分吸着特性，第9回土質工学研発会，57-60 (1974)。
- (16) 大八木規夫：花崗岩類地帯の崩壊と風化帯構造の関係，災地討論集，26-42 (1967)。
- (17) 寺田道直：工学的分野よりみた岩石の風化特性について，一特に分布の広い花コウ岩について，香川大学農学研究科修士論文，(1973)。
- (18) 増田秀夫：弾性波速度によるダム基礎岩盤の調査，発電水力，62, 19-26 (1963)。

(1976年9月30日 受理)