風化花コウ岩の破断面観察に基づく風化形式の 判定およびその表示方法

(The Identification of Weathering Patterns and their
Representation Methods Based on Observations
of Broken Surface on Decomposed Granites)

松 尾 新 一 郎* (Shin-ichiro Matsuo)
澤 孝 平** (Kouhei Sawa)

キーワード：火成岩／顕微鏡検査／鉱物／破壊／
引張り強さ／風化／マサ土／密度
IGC： F 2/F 3

1. ま え が き

西日本に広く分布するマサ土は、花コウ岩質岩石の風化残積土として、工学的性質についていろいろと研究され、その特性のいくつかが明らかにされてきている。マサ土の特性は、(1)多種多様の風化段階があること、(2)粒子が破碎しやすいこと、(3)降雨などの水に対する安定性が小さいことなどである。マサ土の工学的性質を考える場合、(1)母岩である花コウ岩質岩石の組成、および(2)風化の程度について考慮しなければならない。

本文は、花コウ岩が風化・変質してマサ土に至る過程において、風化現象がどのような形式で行なわれるか、そしてその量的な表示はどのようにすればよいかを研究したものである。

従来、風化の程度については、松尾・西田¹⁾が長石粒子の変質に着目して研究している。また、ルクストン(Ruxton)ら²⁾、斉藤³⁾は地質構成の観察から風化層を分類しているし、ゴールドエイヒ(Goldich)⁴⁾、山下⁵⁾は化学成分の分析により風化度を判定している。ステファン(Stephen)⁶⁾、菅野⁷⁾は風化により生じる粘土鉱物に着目して研究している。渋谷⁸⁾は風化花コウ岩の間ゲキ率を測定して風化度を表示した。さらに、現地において風化度を判定する手段として、弾性波探査などが行なわれている⁹⁾。

風化作用は、物理的風化と化学的風化に大別でき、両者が相互に関係しながら岩石を崩壊、分解させていく¹⁰⁾。

物理的風化の原因となるものは、地かく変動、凍結融解作用、温度変化などであり、圧力や熱が岩石を各鉱物粒子へ分離させる。化学的風化は、水やガスと岩石を構成している鉱物の間の化学的反応、すなわち加水分解、脱塩基作用、炭酸塩化作用などの形で進行する。石英、白雲母などが分解されにくく、長石、黒雲母が分解されやすい。

本研究に使用した試料は、比エイ山および六甲山から採取した風化花コウ岩である。まず、風化の程度を量的に表示するために、三つの指標について測定し、比較検討した。つぎに、引張り試験を行ない、風化度と強度の関係を明らかにした。さらに引張り破壊後の供試体の破断面を観察し、各鉱物粒子の面積比を求め、花コウ岩の風化によるマサ土への変化の過程を追求めた。

2. 試 料

試料は、山陽新幹線神戸トンネル内の東坑口から順次採取したもの(六甲試料)、および比エイ山の山中町付近の土砂採取場2か所から採取したもの(比エイ試料)であ

図-1 試料採取位置図

* 京都大学工学部土木工学科教授(京都市左京区吉田本町)

** " " 講師(")

・この論文に対するディスカッションは昭和48年10月1日までにご投稿下さい。

図-2 花コウ岩の風化層模式図

る(図-1 参照)。六甲試料は坑口から約 1 km (A 試料), 約 500 m (B 試料), 約 250 m (C 試料) 地点のもので, 坑口に近いほど長石の変質がみられ, 風化が進んでいると考えられる。比エイ試料は六甲試料に比してやや粗粒である。比エイ A 試料は土カブリ厚約 40 m の位置の岩石で比較的新鮮であり, B および C 試料は地表面に近い部分のもので, 雲母の周辺が酸化鉄で着色されている。

花コウ岩の風化層を模式的に示すと, ふつう図-2 のようである¹¹⁾。本研究に用いた試料は, 上記の層区分では ③軟岩に属する。六甲, 比エイ試料とも, A 試料は基盤岩に近い性質を有し, B, C 試料の順に風化土砂に近いものである。

3. 風化の量的表示と引張り試験

3.1 風化度の測定

従来, 岩石の風化の程度を表わすものとして, 単位体積重量¹²⁾や吸水率¹³⁾が使用されている。これらは, 風化の進行とともに岩石内に生じる間ゲキ率に影響される物理量である。さらに, コンクリートなどでは表面のかたさを測定するために, 鋼球で一定のエネルギーの打撃を表面に与え, その打撃によるくぼみの直径あるいは反発力により強さを判定している¹⁴⁾。風化度の指標として, ここでは以上の三つを測定し, 比較検討した。

まず, 引張り試験に使用する供試体を 48 時間水浸後, 表面水をふきとったいわゆる表面乾燥内部飽和の状態の重量 (W_s), およびその水中重量 (W_w) を求め, さらに 24 時間炉乾燥した後の重量 (W_0) より, 単位体積重量と吸水率を次式で求めた¹⁵⁾。

$$\text{単位体積重量 } (\gamma) = \frac{W_0}{W_s - W_w} \gamma_w$$

(γ_w は水の単位体積重量)

$$\text{吸水率 } (n_w) = \frac{W_s - W_0}{W_0} \times 100$$

一方, 反発係数は, 長さ 30 cm の糸に約 14 g の鋼球を付け, 振子とし, 鉛直と 30° をなす点から, 支持鉄板に固定した試料面に衝突させ, はね返ってくる角度

図-3 単位体積重量と吸水率の関係

図-4 反発係数と単位体積重量の関係

図-5 反発係数と吸水率の関係

(θ)を読みとり, 次式で求めた¹⁶⁾。

$$\text{反発係数 } (e) = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos 30^\circ}} = 2.732 \sqrt{1 - \cos \theta}$$

図-3 は単位体積重量と吸水率の関係を示した。単位体

積重量は 2.60 以下で、吸水率と直線関係にある。風化が進むにつれて、単位体積重量が減少し、吸水率が增大する。図-4、図-5 は反発係数と、単位体積重量および吸水率の関係を表わしている。

六甲試料は、単位体積重量、吸水率とも大きな変化を示しているが、反発係数の変化は少ない。一方、比エイ試料については逆に、反発係数の変化幅が大きく、単位体積重量、吸水率はあまり変化していない。これは両試料が、風化過程において受けた履歴の異なることに起因すると考えるが、詳しくは、破壊断面の観察結果に基づき次章で述べる。

単位体積重量と吸水率は、同様な傾向を示すものであるから、以下の風化度の指標としては、単位体積重量と反発係数を用いる。

3.2 風化度と引張り強さ

強度試験は、単純引張り試験と圧裂試験を行なった。まず単純引張り試験は、約 $10 \times 10 \times 30$ mm の大きさに成形した供試体を用いた。供試体の両側面に接着剤でナットを接着し、ボルトを取り付け、チェーンの先につけたクリップでボルトをはさむ。荷重はマリOTTびんから流出する水をチェーンの端につけた容器で受ける応力制御式である(図-6)。破壊強さは、供試体破断時の容器と水の重量を計量し、供試体断面積で除して求めた。

つぎに、引張り荷重載荷時のヒズミの変化を知るために圧裂試験¹⁷⁾を行なった。試料は径約 32 mm、高さ約 30mm の円柱供試体で、ヒズミの変化は、ヒズミゲージと静ヒズミ計で読みとった。

図-7 は、引張り強さと単位体積重量の関係を示したものである。図-8は引張り強さと反発係数の関係を表わしている。風化が進行して、単位体積重量、反発係数が減少するにつれて、引張り強さは低下している。松尾・西田¹⁸⁾は、以前に長石粒子の圧碎強さと風化度の関係を発表しているが、それと同様の関係にある。したがって、引張り強さも風化の指標と考えられる。しかも、六甲試料、比エイ試料両者について、同程度の変化幅を有し、前述の単位体積重量、吸水率や反発係数で表示した風化度を総合した指標である。

図-9 は、比エイ試料の応力-ヒズミ曲線を示している。風化の進んでいない試料Aは、応力の増加とともにヒズミが直線的に増加し、ヒズミの小さいところで破壊する。弾性的な性質を示し、弾性係数は $5 \sim 10 \times 10^5$ kg/cm² である。風化が進むにつれて、ヒズミの進行は顕著になり、試料Bでは、ほぼ 10^{-3} のヒズミで破壊している。試料Cになると、ヒズミは応力の小さいうちから急激に進行し、破壊時には 10^{-2} にも達することがある。弾性的な性質はほとんど失われている。

図-6 引張り試験装置

図-7 単位体積重量と引張り強さの関係

図-8 反発係数と引張り強さの関係

4. 破断面観察に基づく風化過程の考察

4.1 破壊断面の観察

前章で行なった引張り試験により得られた破壊断面を顕微鏡で観察した。まず、試料をフッ化水素10%溶液に

図-9 応力-ヒズミ曲線

図-10 破断面の観察スケッチ

約1分間浸し、水洗後亜硝酸コバルチナトリウム2%溶液に約2分間浸し、再び水洗して乾燥する。この操作により、長石は白色に着色され、やや透明で灰色の石英と見分けやすくなる¹⁹⁾。つぎに破壊断面上に、1mm 間隔に小穴をうがった透明フィルムをのせ、顕微鏡で観察しながら、破断面をスケッチする。破断面両面のスケッチを

(a)

(b)

写真-1 破断面の顕微鏡写真

重ねて、粒内破壊（石英—石英、長石—長石、雲母—雲母）と、粒界破壊（石英—長石、長石—雲母、雲母—石英）の6成分の面積比を求める²⁰⁾。肉眼で一個の粒子とみていたものは、実は粒子群であることが多く、石英粒子、長石粒子とみえるものは、石英粒子群、長石粒子群である。したがって、たとえば石英—石英の破壊は、石英粒子内破壊および石英粒子間破壊の両者を含み、これを石英粒内破壊と呼ぶ。一方、石英—長石の破壊のように、異種鉱物粒子間の破壊を粒界破壊

と呼ぶ。風化作用においては、雲母は長石と同じような性質を持つこと、および雲母の割合が少ないことから、ここでは雲母を長石に含めて考察する。したがって、破壊面の形態は、石英粒内破壊、長石粒内破壊、石英—長石粒界破壊の三つである。

写真-1は破断面の顕微鏡写真である。図-10には、スケッチによる石英、長石、雲母の分布を示した。図-10(a)、(b)を重ね合わせると、図-11のように、石英粒内破壊、長石粒内破壊および粒界破壊の区分が描ける。これらの面積を測定して、その比率を求めた。

4.2 風化と破壊形態

図-12 (a)、(b) は、風化度の指標として、単位体積重量と反発係数を用い、これらと粒界破壊との関係を示したものである。風化の進行に伴い粒界破壊が増大することがわかる。すなわち、風化作用により石英—長石の粒

図-11 破断面スケッチの重ね合わせ

(a) 単位体積重量と粒界破壊

(b) 反発係数と粒界破壊

図-12 風化度と粒界破壊の関係

子間にクラックが生じ、結合力が減少して、弱体化した粒子間に破壊が起こる。最弱リンク説²¹⁾、あるいは選択破壊²²⁾といわれるものである。

図-13 (a), (b) は、粒界破壊と粒内破壊との関係である。粒界破壊の増大に伴い、石英、長石とも粒内破壊が減少していることは、風化作用が、まず石英—長石の粒子間を弱体化させることを示すものである。一方、粒内破壊の減少は六甲試料、比エイ試料で異なっている。

図-14 (a), (b) は、単位体積重量と粒内破壊の関係を示している。図-15 (a), (b) は、反発係数と粒内破壊の関係である。これらの図によると、風化の進行に伴い、

(a) 石英粒内破壊と粒界破壊

(b) 長石粒内破壊と粒界破壊

図-13 粒界破壊と粒内破壊の関係

比エイ試料では長石粒内破壊が大きく減少し、石英粒内破壊はそれほど変化しない。一方、六甲試料では逆に石英粒内破壊の減少がいちじるしい。

粒内破壊の減少は、粒子が強固なため、破壊線が粒子内部を通らず、これを避けていることを意味する。すなわち、風化により粒子が劣化していないことを示す。

この意味から考察すると、比エイ試料の長石は風化作用によりほとんど変質していないが、石英粒子に風化作用の影響がみられる。また、六甲試料では長石粒子が変質し、石英粒子は強固であることがわかる。長石粒子は化学的な作用により変質するが、石英粒子は化学的に安定な鉱物である。一方、早瀬²³⁾の研究によると、熱、圧力などの物理的な作用は石英粒子に影響を与える。以上のことより、比エイ試料はおもに物理的風化を受けており、六甲試料は化学的な風化が優勢である。このことが、六甲山、比エイ山全体の花コウ岩の風化形式を意味するのではなく、六甲山にも物理的風化の優勢なものがあるし、比エイ山にも化学的風化の進んだものが存在す

(a) 石英粒内破壊と単位体積重量

(b) 長石粒内破壊と単位体積重量

図-14 単位体積重量と粒内破壊の関係

る。

風化の指標として用いた単位体積重量および反発係数を上記の風化形式から考えてみると、単位体積重量は六甲試料の風化をよく表わし、反発係数が比エイ試料の風化度を表示している。すなわち、化学的な風化は単位体積重量や吸水率で示すことができ、物理的な風化は反発係数が適当である。この両指標は、ともに粒子間および粒子内のクラックに関係する量であるが、前者は外部と連絡したクラックしか影響を持たないのに比し、後者は粒子内部に孤立した欠陥の影響も加味できるところに、上記の相違が生じるのであろう。

4.3 強度と破壊形態

図-16 (a)(b)(c) は、引張り強さと破壊形態の関係を示している。前述したように、強度も風化の指標と考えることができ、図-12, 14, 15 と同様な結果が現われている。強度発現の立場からは、六甲、比エイ両試料とも、石英—長石の粒子間の結合力が大きく影響し、さらに六甲試料では石英粒子、比エイ試料では長石粒子が破壊面に占める割合も関係している。

4.4 破壊形態からみた花コウ岩のマサ土化

(a) 石英粒内破壊と反発係数

(b) 長石粒内破壊と反発係数

図-15 反発係数と粒内破壊の関係

図-17 は、粒界破壊、石英粒内破壊、長石粒内破壊をまとめたものである。風化の進行に伴い、粒界が弱体化し粒界破壊が増大することは前述のとおりである。この変化により岩石から個々の粒子へ分離して、いわゆるマサ土が生じる。ところが、物理的風化が優勢な比エイ試料では石英内で破壊する割合が長石内より大きく、石英が細粒化していく。一方、化学的風化をおもに受けている六甲試料では、石英が細粒化することはあまりなく、長石粒子が変質して粘土化していく。

このように、物理的風化から得られるマサ土と、化学的風化から得られるマサ土では、組成的に性質が異なると考えられる。一般には、物理的風化の進んだマサ土でも、長年月のうちに化学的変質作用を受けるし、化学的風化の優勢なマサ土も、物理的崩壊作用を受ける。しかし、物理的風化の進んだマサ土の石英はもろくなっており、従来石英が風化に対して強い抵抗力を持っているとされていたことも、考え直す必要があろう。

図-16 引張り強さと破壊形態

5. 結 論

花コウ岩から風化してマサ土に至る途上の風化花コウ岩について、強度と破壊形態を研究し、風化現象について考察した結果を以下にまとめる。

(1) 花コウ岩の風化は、まず石英—長石の粒界が弱体化する。

(2) つぎに各粒子が影響を受けるが、おもに石英内に欠陥が生じるものと、長石の変質が優勢なものがあり、前者は物理的風化に起因し、後者は化学的風化によるものである。

(3) 風化度の指標として用いられている単位体積重量、吸水率は化学的な風化をおもに表わすもので、物理的風化を表示するものとしては、反発係数が適する。

(4) 風化花コウ岩の引張り強さは、総合的な風化の指標であり、おもに粒子間の結合力に依存する。

(5) 物理的風化により生じるマサ土は、石英粒子が弱体化し、細粒化していく。一方、化学的な風化が優勢なマサ土は、長石が変質して粘土化していく。

記 号 説 明

e = 反発係数
 n_w = 吸水率
 W_0 = 炉乾燥重量
 W_s = 表面乾燥内部飽和重量
 W_w = 水中重量
 γ = 単位体積重量
 γ_w = 水の単位体積重量
 θ = 反発角度

参 考 文 献

- 1) Matsuo, S. and Nishida, K. (1968): "Physical and chemical properties of decomposed granite soil grain," Soils and Foundations, Vol. 8, No. 4, pp. 10-20.
- 2) Ruxton, B.P. and Berry, L. (1957): "Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong," Bul. Geol. Soc. America, Vol. 68, pp. 1263-1291.
- 3) 斎藤 実 (1956): カコウ (花崗) 岩のマサ状風化, 「土と基礎」, Vol. 4, No. 3, pp. 32~33.
- 4) Goldich, S.S. (1938): "A study in rock weathering," Jour. Geol., Vol. 46, pp. 17-58.
- 5) 山下親平 (1968): 黒雲母花崗岩の風化作用とその影響, 「愛媛大学紀要第三部」, Vol. 6, No. 1, pp. 129~136.
- 6) Stephen, I. (1952): "A study of rock weathering with reference to the soils of the Malvern Hills," Jour. Soil Sci., Vol. 3, No. 2, pp. 219-236.
- 7) 菅野一郎・本荘吉男・有村玄洋 (1960): 花コウ岩に由来する赤黄色土中の黒雲母の風化, 「粘土科学の進歩」(2), pp. 217~228.
- 8) 渋谷長美 (1960): 岩石の風化と孔隙率 (花崗岩について), 「応用地質」, Vol. 1, No. 3, pp. 12~18.
- 9) マサ土研究委員会 (1972): マサ土の調査法, 土質工学会編「土質調査法」, pp. 695~713.
- 10) 松尾新一郎監訳 (1971): 風化—その理論と実態ラティス, pp. 6~62.
- 11) 前出 9)。

- 12) 前出 4).
- 13) 前出 8).
- 14) 岡田 清・明石外世樹・神山 一・児玉武三(1964):「土木材料学」, 国民科学社, pp. 250~253.
- 15) 山口梅太郎・西松裕一(1967):「岩石力学入門」, 東大出版会, pp. 15~18.
- 16) たとえば多田政忠(1960):「力学概説」, 学術図書, p. 152.
- 17) 西松裕一(1965): 岩石強度の標準試験法, 「日本鉱業学会誌」, Vol 81, No. 926, pp. 563~570.
- 18) 松尾新一郎・西田一彦(1967): マサ土粒子の物理・化学的性質について, 第2回土質工学研究発表会, pp. 1~6.
- 19) Noild, J.L. and Erickson, K.P. (1967): "Changes in K-feldspar straining method and adaptations for field use," The American Mineralogist, Vol. 52, p. 1575.
- 20) 松尾新一郎・澤 孝平(1969): マサ土の風化度と引張強度について, 「土木学会関西支部学術講演会概要」, p. III-6.
- 21) たとえば前出 15), p. 97.
- 22) 松尾新一郎・西田一彦(1968): マサ土のセメント安定処理効果について, 「京都大学工業教員養成所研究報告」Vol. 4, pp. 53~58.
- 23) 早瀬一 (1961): 真砂花崗岩の顕微鏡的特徴, マサ土研究委員会資料, pp. 1~3.

(原稿受付, 1972. 5. 16)