

花崗岩の風化に伴う微小割れ目の形成と間隙の発達について

(Examination on Microfracture of Weathered Granite)

楠	田	啓 ⁱ⁾	(Hiromu Kusuda)
西	山	孝 ⁱⁱ⁾	(Takashi Nishiyama)
西	田	一彦 ⁱⁱⁱ⁾	(Kazuhiko Nishida)

キーワード：花崗岩／間隙比／顕微鏡検査／残積土／風化／まさ土 (IGC : D3/F3)

1. はじめに

花崗岩の風化作用は著しく、時には地表下 15 m から 30 m におよぶ深層風化をすることが知られている。最近ではこの風化作用により形成された残積土を支持地盤としてさまざまな構造物が建設されるようになり、風化残積土の適切な評価法の確立が望まれている¹⁾。風化過程における物理的、化学的特性についてはこれまで種々の研究が試みられており、微小割れ目の形成、間隙の発達などについてはいくつかの研究があるが、花崗岩の風化産物の間隙構造に関する研究の最初は薄片試料による偏光顕微鏡観察によるものであろう¹⁾。これによると風化度に応じて種々の特異な組織を示すことが明らかにされている。また風化産物の電子顕微鏡による観察によると、風化の進んだ粒子には微細な間隙が多数発生していることが確認されている^{3),4)}。またこれらの間隙の大きさは 50 μm から 0.01 μm まで広く分布することが水銀ポロシメータによって明らかにされている⁵⁾。これらの間隙の大きさと分布は岩石の風化産物すなわち乱さない風化残積土の水理学的、力学的挙動と深い関係を持っていることが最近明らかにされつつある⁶⁾。さらに、締固めた供試体と乱さない供試体の水理、力学的性質の差もこの間隙分布の相違から説明されている。この意味で間隙構造を明らかにすることは工学的に重要な意味を持つ

ている。しかしこのような間隙の大きさや形、分布状態を視覚的かつ定量的に表現することは、従来技術的に困難な仕事であってその技術開発が望まれていた。そこで光学的な手法を用いて花崗岩の風化機構を観察し、次に画像処理により風化程度の定量ないし半定量的な評価を試みた。これまでの顕微鏡観察では微小割れ目や間隙の識別が必ずしも容易ではなかったもので、本研究ではあらかじめ蛍光剤を添加した樹脂を割れ目に充填させ、浸透した樹脂を蛍光させることによって微細な間隙を観察する蛍光法²⁾を用いた。この方法は輝度の差が大きい画像が得られるので、画像処理法にも適している。

2. 試料

2.1 供試試料

試料は六甲花崗岩体と生駒山系の交野市の花崗岩体から採取した。両岩体とも白亜紀に貫入した中粒～粗粒の花崗岩で、六甲花崗岩体では鶴甲地区で実施されたボーリングコアから 17 個を、生駒山系の交野市の花崗岩体ではコアパックサンプラーを用いて、気泡堀りにより乱さないように留意してとられたコアから 9 個を採取した⁷⁾。JIS に基づいて測定されたこれら試料の有効間隙率は表-1 に示すとおり 0.74～46.3 % である。

2.2 蛍光剤を添加した樹脂の充填

割れ目や間隙に充填する樹脂には蛍光剤を添加したメチルメタアクリレートを用い、比較的風化程度の小さい岩石に近い試料（有効間隙率 8 % 以下）と分解、変質の著しい土壌に近い試料（有効間隙率 28 % 以上）に分けて充填した。岩石に近い試料では、まず試料をメチルメタアクリレートの中に浸し、減圧を繰り返し十分に浸透させた後に、加熱、硬化させたものを切断、研磨した²⁾。土壌に近い試料ではメチルメタアクリレートに浸すと粒子がルーズになり、崩壊するので、あらかじめ試料表面をエポキシ樹脂で固定し、その後、常温で硬化す

i) 京都大学工学部資源工学教室 助手（京都市左京区吉田本町）

ii) 京都大学工学部 助教授

iii) 関西大学工学部 教授
(1991. 4. 15 原稿受付・討議期限 1993. 1. 1 要請があれば 1 か月の期限延長可能)

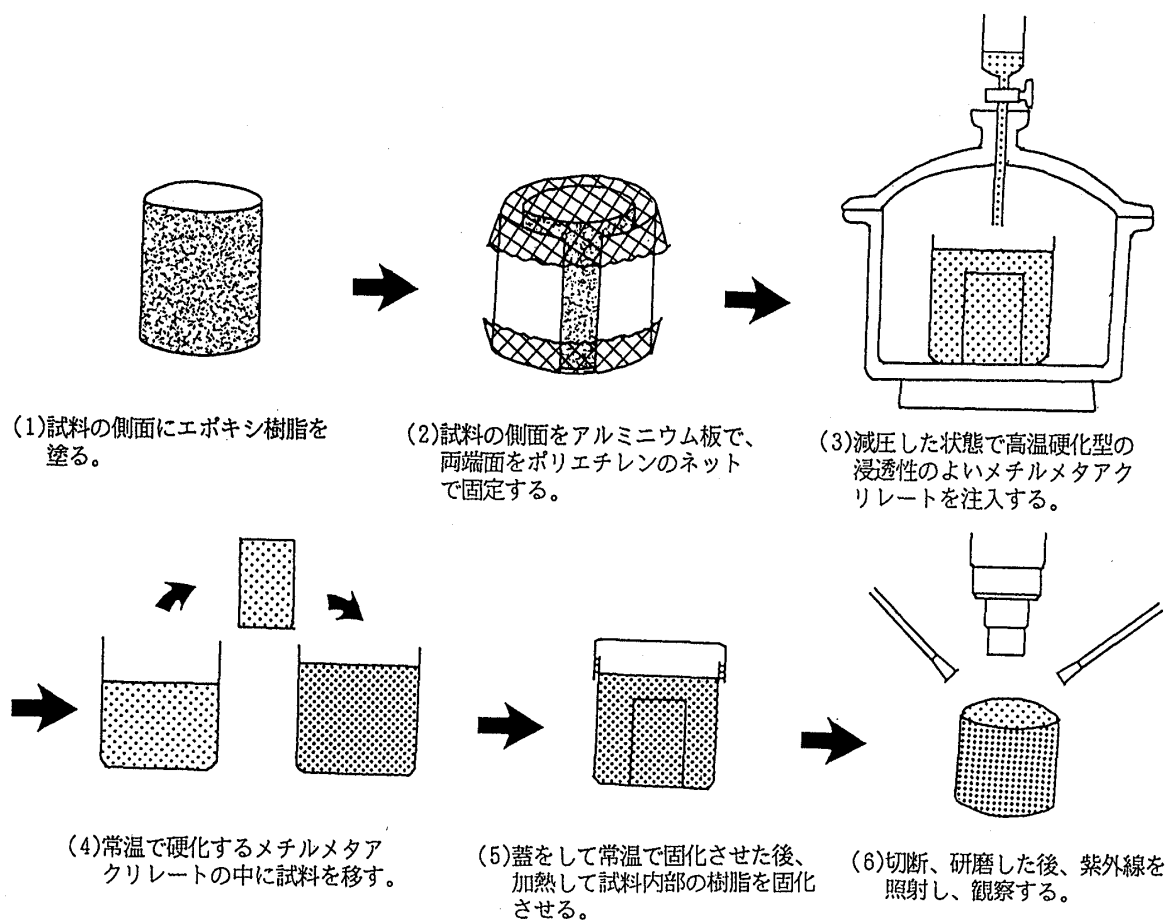


図-1 風化の著しい試料へのメチルメタアクリレートの充填方法

るように硬化剤を配合したメチルメタアクリレートを浸透させた。メチルメタアクリレートを常温で硬化させるようにすると、浸透性がやや劣り、硬化した樹脂も柔らかいという欠点はあるが、加熱したときに起こりがちな発泡による試料の乱れを防ぐことができる。後者の充填方法を例にとり、操作手順を示すと次の通りである（図-1）。

① 試料をカッターナイフによって注意深く切断する。

② 試料の側部にエポキシ樹脂を塗り、その上に薄いアルミニウム板をかぶせ、試料を圧迫しないようにアルミニウム板を固定する。

③ 試料の両端部をポリエチレンのネットで覆い、固定した後に、上端部の中心に直径約1 cmの穴を残してエポキシ樹脂を塗布し、固結する。

④ 試料をデシケータに入れ減圧した状態で、まず高温硬化型の浸透性のよいメチルメタアクリレートを3回に分けて試料中に注入し、減圧状態で12時間程度放置する。

⑤ 次に試料をすばやく常温で固結する樹脂の中に移

し、蓋をして固化させる。固化後、温度を上げ試料内部の樹脂を十分に固化させる。

⑥ ダイヤモンドカッターで試料を切断、研磨する。

このようにして作製された試料は、ほぼ原形を維持した状態で樹脂が浸透しており、かつ気泡握りにより採取されていることも考え合わせると、きわめて乱れの少ない試料といえる。

3. 実体顕微鏡または反射型顕微鏡による観察

すでに述べたような方法により作製された試料には、微細な間隙にも樹脂は十分浸透しており、可視光と紫外線の照射により微細構造の観察が可能となる。しかし紫外線により微細な間隙を観察するためには、普通の紫外線ランプでは発光量が少なく、高倍率の観察はできない。そのため光源には水銀ランプを用い、可視光をフィルターで除いた後に、2本の石英ライト・ガイドにより観察地点に集中的に強力な紫外線が照射できるようにした新しい紫外線照射装置を使用した。これまでのところ数 μm 程度の間隙まで観察可能である。

次に、この装置を用いて風化程度の異なる種々の花崗

岩を観察すると写真-1 のようになる。写真-1a, b はもっとも新鮮な試料（有効間隙率 0.74 %）を可視光（写真-1a）と紫外線照射（写真-1b）により観察したもの

で、微細な割れ目が観察される。石英粒子と長石粒子の境界にできた割れ目と、長石粒子内の割れ目がみられるが、全体的に微細で連続性が悪く、割れ目の幅も狭いも

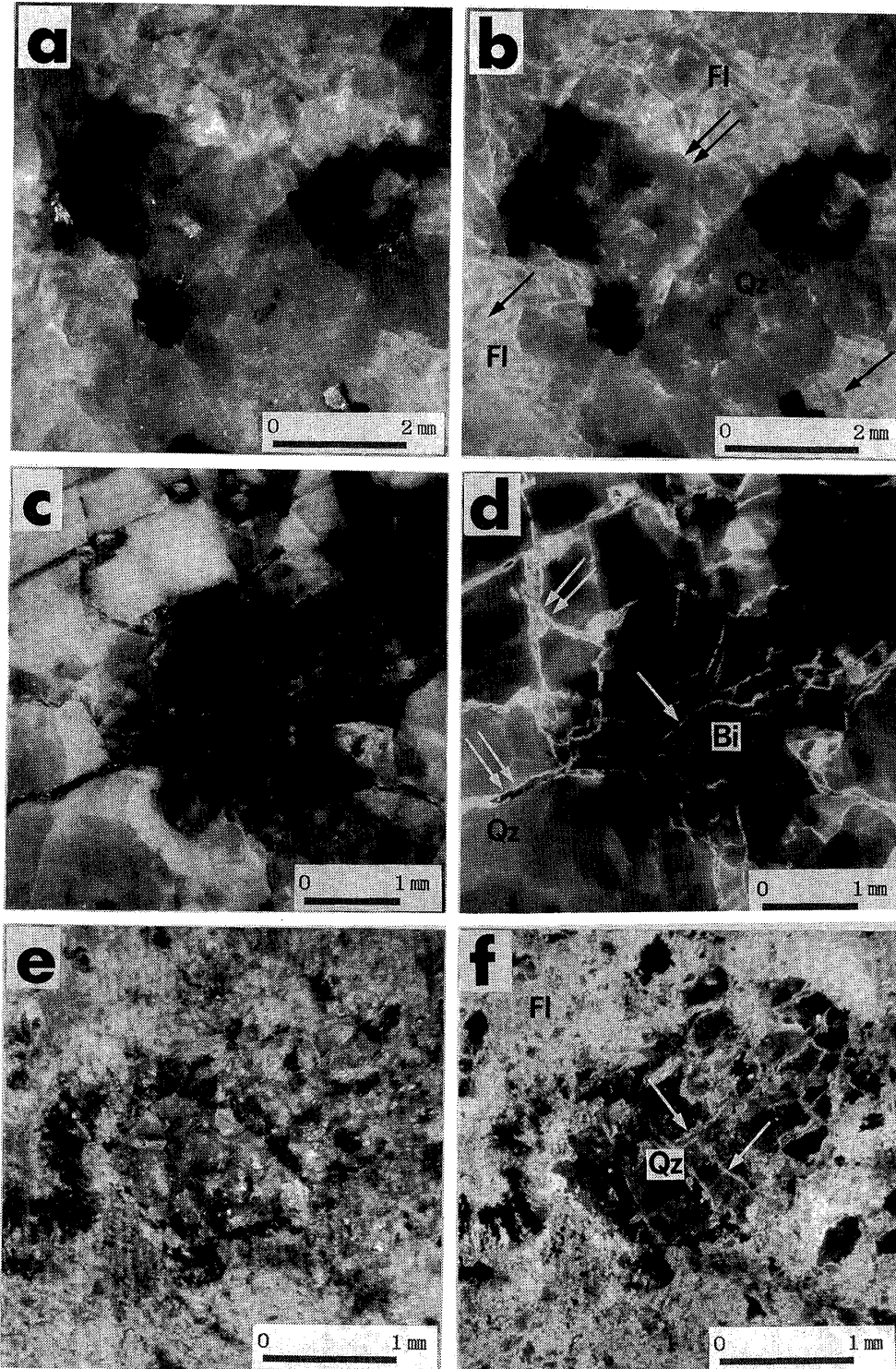


写真-1 蛍光剤を添加したメチルメタアクリレートを浸透させた風化程度の異なった花崗岩の観察

- a, b: 間隙率 0.7% の花崗岩, 石英 (Qz) と長石 (Fl) の粒子境界部の割れ目 (↑↑) と、長石粒子内の微細な割れ目 (↑) (a: 可視光, b: 紫外線)
- c, d: 間隙率 8% の花崗岩, 石英粒子 (Qz) 内の割れ目 (↑↑) と、黒雲母粒子 (Bi) 内の間隙 (↑) (c: 可視光, d: 紫外線)
- e, f: 間隙率 45% の花崗岩, 石英粒子 (Qz) 内に発達した間隙 (↑) (e: 可視光, f: 紫外線)

のが多いため不鮮明になっている。写真-1c, d では有効間隙率が8%に達した試料で、粒子境界の割れ目や石英粒子中の割れ目は幅を持ち、連続性がよくなり、各粒子の結合力が弱くなっていることがわかる。黒雲母の粒子内部にも間隙がみられるようになる。さらに風化が進行して有効間隙率が45%になると、長石はもはや原形をとどめないほど変形し、石英も粒子内の割れ目の幅が広がり、残存している部分も溶蝕が進み、小さな丸みをおびた粒子に変わっているのが観察される(写真-1e, f)。

4. 画像処理

割れ目の状況を定量的に把握するためには画像処理法はきわめて有効な方法である。そこで画像処理法により(1)割れ目の長さの計測、(2)鉱物粒子内の間隙率の測定、(3)鉱物粒子内の風化程度の測定を試みた。なお画像処理にはPIAS LA500に内装されている機能を活用した。

4.1 割れ目の抽出と長さの計測法

割れ目を抽出し、その長さを計測するために図-2aのような操作手順を採用した。まず線状の部分の輝度を強調するために、入力した画像について、ヒストグラムの平坦化処理により画像のコントラストを強調し、次にKirschオペレータ、フィルター処理を行う。その後しきい値処理、ノイズ除去により割れ目の部分のみを抽出する。さらに割れ目の長さ方向を鮮明にするために、Hilditchの方法により細線化処理し、割れ目の分布状態

を定量的に表示する方法として、一定面積内に存在するすべての割れ目についてそれぞれの長さを測定し、その合計を面積で割り、単位面積に存在する割れ目の長さを求めた。

4.2 鉱物粒子の風化程度の測定法

(i) 鉱物粒子内の間隙率

鉱物粒子内に存在する間隙率の測定は、まず目的とする鉱物粒子の中で処理する領域を設定し、次に 3×3 のラプラシアンオペレータで画像を強調した後、ノイズを除去するためにメディアンフィルターによってエッジを保存した平滑化処理を行う。さらに画像強調、エッジ保存平滑化処理の繰り返しによって、鉱物粒子内の間隙の部分とその他の部分との輝度の差をより明確にした画像を作成した。得られた画像に適当なしきい値により間隙の部分のみを抽出し、鉱物粒子内の間隙率を求めた(図-2b)。この測定法では、粒子内の間隙率はしきい値によって変動するので、あらかじめJISにより測定された間隙率の異なる5個の岩石試料を基準にしてしきい値を設定したが、試料による違いはほとんど認められなかった。なお、JISによる間隙率は体積率であり、画像処理により求められる間隙率は面積率である。

(ii) 風化程度の擬似カラー表示

風化作用をもっとも単純化すると、まず物理的作用によって割れ目が形成され、次にできた割れ目の部分から両側に漸次化学的風化作用が進行していくものと考えられている。したがって間隙には識別の比較的容易な割れ

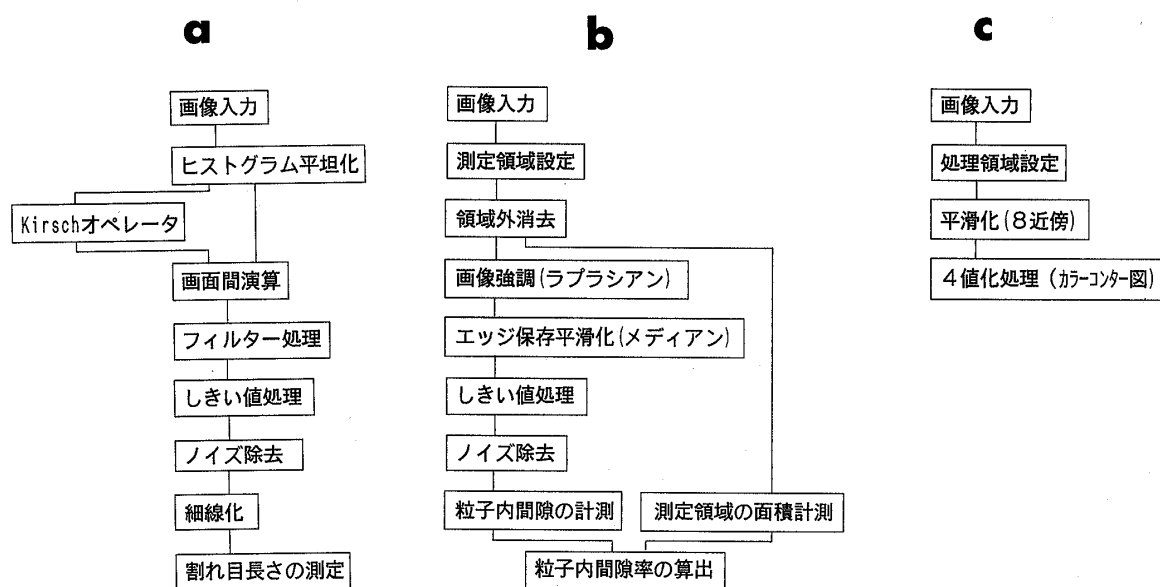


図-2 画像処理フロー

- (a) 割れ目の抽出と割れ目長さの計測法
 (b) 鉱物粒子内の間隙率の測定法
 (c) 風化程度のコンター図の作成法

目と、主に化学的な作用により風化帯から未風化帯へ漸移的に変化している部分とが複雑にからまって形成されているものと推察される。この漸移的な間隙には間隙の量に応じて樹脂が浸透しているものと思われ、浸透した樹脂の量は発光量、すなわち輝度の変化として現れていると思われる。そこで、入力した画像を平坦化处理して細かい部分の影響を除いた後に、輝度の擬似カラー表示を行った。さらに間隙の進行状況をより鮮明にするために図-2cのように4値化处理を行い、段階的に表示した。

5. 割れ目と間隙の観察結果と考察

5.1 割れ目の長さと同隙率

風化程度の異なる29試料を用いて花崗岩の風化現象の定量的把握を試みた。各試料の代表的なところを2ヶ所選び、4.1で述べた手順により単位面積当りに含まれる割れ目の長さを求めた。結果は表-1の通りで、割れ目の長さと同隙率により求められた有効間隙率との関係を図示すると図-3のようになる。割れ目の長さの進展は有効間隙率が6%まではよい相関関係を示しているが、6%を超えると有効間隙率に関係なく1mm²あたり4~6mm程度の割れ目が含まれた状態で落ち着いている。このことは画像処理の過程で長さを重視し、幅は無視していることから判断すれば、有効間隙率が6%を超えた試料では割れ目の長さは増加せずに幅が広くなることにより、有効間隙率が増えることを示唆しているものと思われる。

5.2 鉱物粒子内の間隙率の測定と風化程度の測定

一般に花崗岩の化学的風化が進行すると、長石類では炭酸化された水の水和作用により、粘土鉱物、珪酸、さらにカリウムあるいはナトリウム、カルシウムの炭酸塩に変わり、炭酸塩は溶液として取り除かれる。黒雲母では緑泥石、粘土鉱物が形成される。石英はもっとも化学的風化作用を受けにくい鉱物とされるが、漸次溶脱されていく。また化学的風化作用は結晶間の結合力を弱め、分解を進めるので、風化作用が進むと同隙が増加すると考えられている。そこで、これらの現象を明らかにするために画像処理法によって求められた長石、黒雲母、石英の粒子内間隙を観察した。結果は図-5のとおりで、さらにJISにより測定された岩石の有効間隙率との関係を検討したのが図-4である。長石は岩石の間隙率が小さいものでも他の鉱物種に比べると粒子内間隙は多く20%程度の値を示し、有効間隙率が大きくなるとさらに粒子内の間隙も増加するのが認められる。黒雲母は岩石の有効間隙率が30%までは粒子内間隙は10%程度で、大きな変化はみられないが、有効間隙率が30%を

表-1 試料の有効間隙率と画像処理結果

	試料	有効間隙率 (%)	割れ目長さ (mm/mm ²)	粒子内間隙率(%)		
				黒雲母	石英	長石
1	KT-1	0.77	1.0	0.1	2.4	12.4
2	KT-2	0.74	0.8	0.1	7.3	7.0
3	KT-3	3.89	2.7	1.5	12.6	19.3
4	TK-1	5.63	4.0	4.0	5.2	20.6
5	TK-2	7.97	4.0	8.0	5.1	34.4
6	TK-3	4.74	3.2	1.0	4.6	36.9
7	TK-4	7.01	4.1	3.1	6.1	29.8
8	TK-5	2.36	1.4	0.1	9.8	19.6
9	TK-6	3.09	2.5	2.3	7.6	35.9
10	TK-7	4.11	3.1	0.7	8.5	26.4
11	TK-8	4.90	3.1	3.2	6.3	19.7
12	TK-9	5.35	3.8	4.4	4.9	28.1
13	TK-10	4.77	3.1	2.2	10.3	18.7
14	TK-11	3.97	2.7	1.1	3.3	28.4
15	TK-12	5.83	3.6	4.1	9.4	35.2
16	TK-13	4.32	3.2	2.7	5.6	24.7
17	TK-14	3.70	3.3	0.9	7.2	22.4
18	TK-15	3.92	2.7	3.5	6.5	28.5
19	TK-16	3.61	2.4	4.0	13.5	28.3
20	TK-17	3.28	2.7	0.7	16.2	35.6
21	C 1-2	44.1	5.2	32.8	20.4	
22	C 2-4	46.3	5.6	42.1	18.8	
23	C 3-4	44.7	5.4	49.4	13.3	42.2
24	C 4-1	46.2	5.2	51.8	19.1	60.2
25	C 5-3	39.8	4.5	11.5	19.3	54.3
26	C 6-3	38.8	5.2	15.1	11.0	55.6
27	C 7-4	33.1	5.0	9.2	9.7	40.6
28	C 8-4	29.0	4.8	10.1	11.8	39.1
29	C 8-5	28.4	4.3	5.3	12.3	36.0

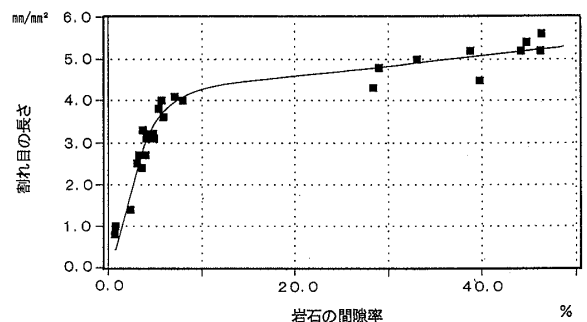


図-3 割れ目長さと同隙率との関係

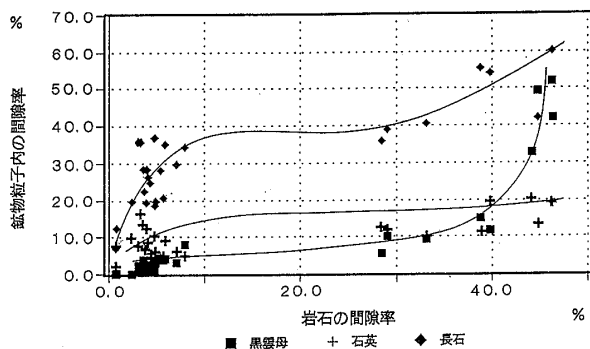


図-4 石英、黒雲母、長石における粒子内間隙率と岩石の間隙率との関係

超えると急激に増加し、有効間隙率 46 % の試料では画像処理により測定された粒子内間隙率が 50 % 以上の粒子も存在する。石英は粒子内間隙率が小さく、岩石全体の間隙率が 40 % を超えると増加してくるが、粒子内間隙率は小さく 15 % 程度である。

次に鉱物種による風化作用の進展状態をより詳しく検

討するために、鉱物種ごとに粒子内の間隙率を 4 段階に分けてコンター図を作成してみた。すなわち、図 5 は岩石の間隙率が異なる 3 試料についてそれぞれの試料に含まれる長石、黒雲母、石英の代表的な粒子の間隙の分布状態を 4 段階に区分し表示したものである。この図を見ると、まずいずれの鉱物種においても、割れ目から離れるに従い、漸次間隙が減少しており、長石の粒子では 2 方向の、黒雲母の粒子では 1 方向の微細な割れ目から風化が進展している状況がよくわかる。また風化の進展にともなって形成されたと思われる輝度の濃淡が移行する幅は長石ではもっとも広く、石英では狭くなっており、黒雲母は中間的である。これらの現象からもわかるように、蛍光法と画像処理法を組み合わせることによって風化状況が可視化され、より鮮明に把握することが可能となる。

6. 結 論

間隙率の異なる風化花崗岩 29 試料について蛍光法に

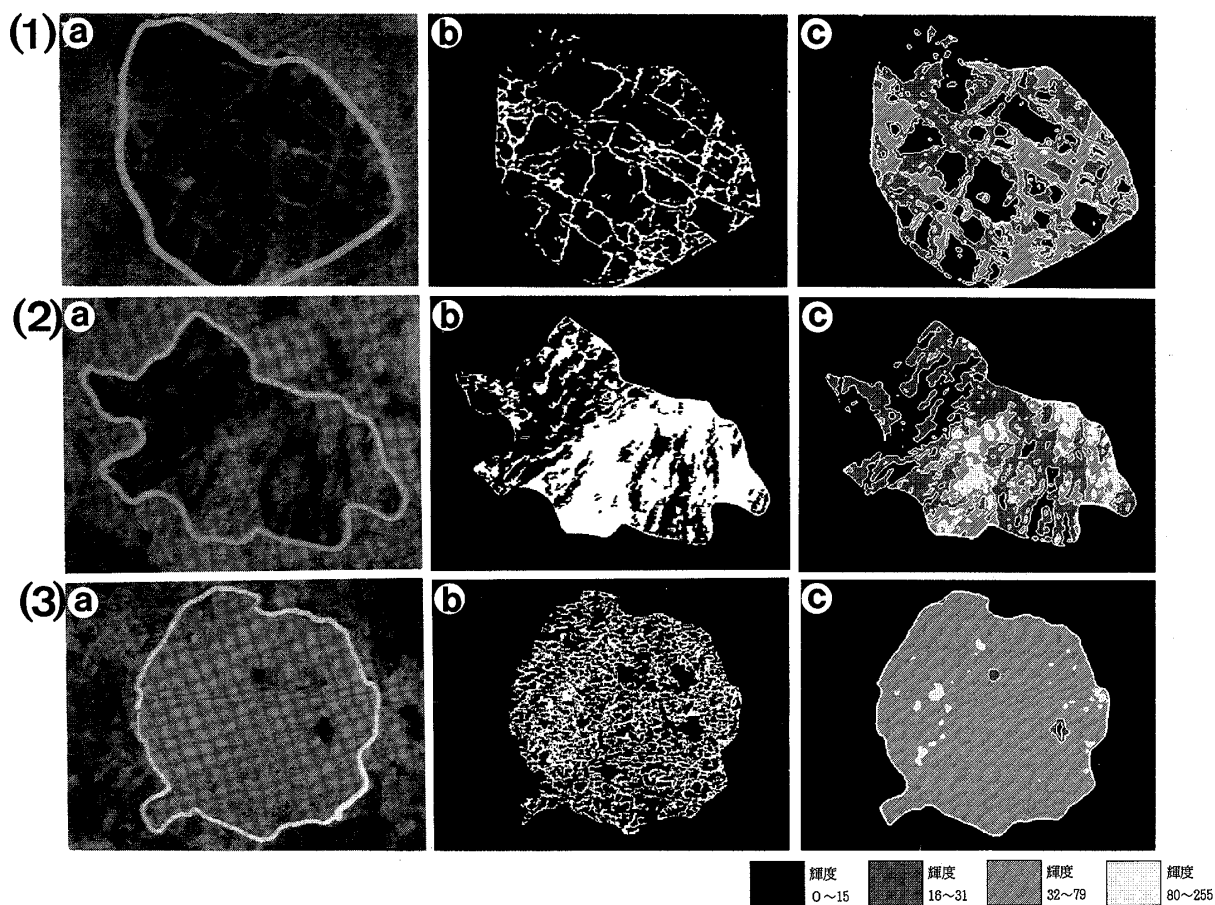


図-5 石英、黒雲母、長石の各鉱物粒子の画像処理結果

(1) 石英、(2) 黒雲母、(3) 長石

(a: 原画, b: 鉱物粒子内の間隙を抽出した画像, c: 風化程度のコンター図, 画像の濃淡は 0 (黒) ~ 255 (白) の 256 階調で表現)

よる観察ならびに画像処理によって次のようなことが明らかになった。

(1) 蛍光法により風化花崗岩を観察するため、風化程度の小さい試料と大きい試料に分けてメチルメタアクリレートを充填する方法を検討した。風化程度の小さい試料では従来の方法で問題はないが、風化の進んだ試料では崩壊を防ぐためにあらかじめエポキシ樹脂およびアルミニウム板で固定することによって間隙の測定に適した供試体を作ることができる。

(2) 花崗岩の風化に伴う微細な割れ目の形成を調べるために、割れ目の長さとして JIS により測定された有効間隙率を比較した。その結果、有効間隙率が 6% 程度までは一定面積の割れ目の長さとして有効間隙率との間により相関関係がみられたが、6% を超えると割れ目の長さが増加がみられず、有効間隙率の増大は割れ目の幅によるものと推察された。このことは水理、力学的性質を検討する上で重要なポイントと考えられる。

(3) 画像処理によって求められた長石、黒雲母、石英の鉱物粒子内間隙率と有効間隙率とを比較したところ、長石では風化の初期（有効間隙率の小さい試料）から間隙の発達が著しく、最終的には粒子内間隙率が 50% を超える粒子も認められる。一方石英はもっとも風化の進んだ状況でも粒子内間隙率は小さい。黒雲母は両者の中間的存在である。また割れ目からの風化の進行状況を観察すると、石英が浅く、長石がもっとも深くまで影響を受けていることが明らかになった。これらの事実は従来から考えられている説と一致するものであるが、蛍

光法と画像処理法を組み合わせることによって可視化され、より鮮明にとらえられるようになった。

謝 辞

本研究を行うに当たって、神戸大学工学部附属土地造成研究施設沖村孝先生からは試料の一部を提供していただいた。また東亜合成化学株式会社研究所藤本嘉明氏には、蛍光剤を添加したメチルメタアクリレートを調整、提供していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 西田一彦 (1986): 「風化残積土の工学的性質」, 鹿島出版会, pp. 1~189.
- 2) 西山 孝・楠田 啓・北川元紀 (1990): 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出, 「資源と素材」, 106, No. 10, pp. 573~579.
- 3) 楠田 啓・西山 孝・日下部吉彦・沖村 孝 (1988): 花崗閃緑岩中のカリ長石の風化について, 「土質工学会風化残積土に関するシンポジウム論文集」, pp. 85~88.
- 4) 嘉門雅史 (1986): 土質の立場からみたマサ土の風化, 文部省科研費報告書「マサ土地帯における土砂災害の予測と防止に関する研究」, pp. 32~33.
- 5) 西田一彦・青山千彰 (1979): 花こう岩風化層の間隙径分布と水分吸着特性について, 「応用地質」, Vol. 20, No. 1, pp. 3~12.
- 6) Nishida, K. (1987): "Physical and engineering properties of undisturbed specimen of decomposed granite soil", Proc. 8th. Asian Regional Conf. S. M. F. E., Vol. 2, pp. 196~198.
- 7) 土質工学会風化残積土の物理的性質研究委員会 (1988): サンプルングと採取試料の品質評価 (その 1), 「土質工学会風化残積土に関するシンポジウム論文集」, pp. 1~4.