

和泉層群の頁岩のスレーキング特性 とメカニズムに関する一考察

吉田幸信¹・高田修三²・横田公忠³・矢田部龍一⁴

¹正会員 工修 日本道路公団 四国支社高松技術事務所 (〒760-0065 香川県高松市朝日町4-1-3)

²正会員 工修 復建調査設計株式会社 道路・地域整備部 (〒732-0052 広島県広島市東区光町2-10-11)

³正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

⁴正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

岩石のスレーキングは、切土のり面の長期安定や盛土材として使用した場合の盛土の沈下問題を考えるうえなどで非常に重要な現象である。和泉層群に広く分布する頁岩もスレーキングを起こしやすい岩石として知られている。しかし、スレーキングの特性や機構は十分には解明されていない。そこで、頁岩のスレーキング特性を把握するために、乾湿繰返し試験を、また、スレーキングメカニズム解明のため、X線回折試験・電子顕微鏡写真撮影および水質分析を行った。その結果、頁岩のスレーキング特性を明らかにし、また、メカニズムとしては、長石・雲母の溶出および膠結物（非結晶物質）の溶出であることが明らかにした。

Key Words : slaking, Izumi group, shale, amorphous

1. はじめに

堆積軟岩に区分される頁岩では、乾湿の繰返しによる分解・崩壊の現象、いわゆるスレーキング現象が顕著に見られる。切土現場などによって、スレーキング現象により細粒化した頁岩をしばしば見かけることがある。一般に、『頁岩はスレーキングを起こしやすい。』『膨潤性頁岩は、施工上問題になりやすい。』ことなどはよく知られている。しかし、四国と和泉層群の頁岩のスレーキングメカニズムについての研究はあまりなされていない。そこで、本章では、和泉層群に分布する頁岩について、スレーキング試験（乾湿繰返し試験）と水分析およびX線回折試験による鉱物分析を行い、頁岩のスレーキング特性とメカニズムについて調べた。

2. 岩石のスレーキングと従来の研究例

(1) 岩石のスレーキング

岩石のスレーキングとは、『乾燥した粘土や泥岩の塊が降雨などの水分を吸収し、崩れて細粒化する現象

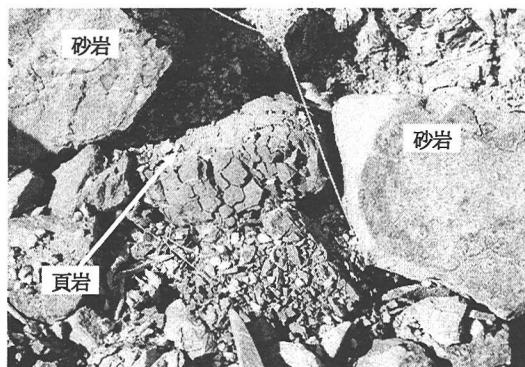


写真-1 現場でのスレーキング

である。水の浸入によって内部の間隙中の空気が圧縮され土粒子間に引張力として働くこと、土粒子が水を吸収し粒子間隔を広げ粒子間結合力が低下することが原因である』¹⁾と説明されている。

現場における頁岩のスレーキング現象の例を写真-1に示す。徳島県鳴門町の切土現場の頁岩である。このように、岩塊の状態を保ちつつ固結力を失った頁岩を、多数見かけることがある。この例でも明らかなよ

表-1 和泉層群のスレーキングに関する過去の研究例

著者	タイトル	年	目的	材料	試験項目	結果と考察
林田精郎 ⁷⁾	和泉層群（白亜紀）の硅化していない泥岩の風化についての二、三の研究	1977	・膨潤性の強い泥岩の物理的性質の把握	・和泉山脈 の頁岩	・乾湿繰り返し試験 (流水・風乾) ・X線回折試験	・乾湿の繰り返しによって泥岩が細粒化。 ・水分の移動による可溶性塩類の溶脱。 ・8つの内部ひずみが原因。
水口公徳 ⁸⁾	泥岩のスレーキングについて	1989	・スレーキング機構の把握	・松山市 の頁岩	・浸水崩壊度試験 ・X線回折試験 ・比重試験 ・液性・塑性限界試験 ・ボロキシメータによる空隙径分布の測定	・スレーキング性が著しいほど見掛けの比重が小さく、空隙率が大きい ・スレーキングの程度により空隙分布が異なる。
望月秋利 ⁹⁾ 片岡昌裕 阪口・理 寺下雅裕	暴風試験と乾湿繰り返し試験による頁岩の風化速度の検討	1994	・暴風試験に対する風化促進効果をパラメータ化 ・硫酸ナトリウムの風化促進効果	・大阪 ・和歌山 ・兵庫 の頁岩	・乾湿繰り返し試験 (清水・硫酸ナトリウム) ・暴風試験	・スレーキング率により風化の特性を定量的に把握することができる。 ・ Na_2SO_4 の清水に対する風化促進効果を、スレーキング率を介して指數関数で関連づけた。 ・清水・乾湿繰り返し試験の暴風試験に対する風化促進効果を、スレーキング率を介して指數関数で関連づけた。

うに、初期に大きな強度を持つ岩塊（一軸圧縮強度： $3.0 \sim 4.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ ²⁾でもスレーキングによって固結力を失い、強度低下を起こすということが、和泉層群の現場でもよく見られる。したがって、スレーキングは特に切土のり面の風化に対する安定性を検討する上で非常に重要である。当初の掘削時には極めて安定していた岩が、その後の日照や降雨による乾湿繰り返しによって泥状化し、すべりを発生する事もしばしばある。

(2) 従来の研究例

泥岩のスレーキング特性とメカニズムに関する研究は、主に第三紀層（グリーンタフ地域）の泥岩について行われている。それらの研究では、『第三紀の泥岩には、膨潤性粘土鉱物スメクタイトを含有しており、それらの膨潤圧によりスレーキングを引き起こす』³⁾と結論づけられているものが多い。

しかし、四国の和泉層群では、約50地点で採取した頁岩のX線回折試験の結果、スメクタイトや膨潤性クロサイト等の膨潤性粘土鉱物の含有は殆ど確認されなかつた。膨潤性粘土鉱物を含有していない理由として次のことが考えられる。第三紀層の泥岩にスメクタイトが多く含有される理由は、泥岩の生成過程において、グリーンタフ変動と呼ばれる火山活動が関係しているため、スメクタイト等が生成されやすい環境にあったからである^{4), 5)}。逆に、四国の和泉層群は、領家花崗岩類・領家变成帯の碎屑岩類が堆積したものであるため堆積盆⁶⁾と呼ばれており、堆積した当時の状態のまま存在すると考えられる。したがって、第三紀層の泥岩と和泉層群の頁岩は、おなじ泥岩でも全く違ったものと考えられ、スレーキング等の風化現象を議論する場合は違ったものとして考えるべきである。

和泉層群の頁岩のスレーキングに関する研究は、林田⁷⁾、水口⁸⁾、望月ら⁹⁾らが行っている。それぞれの研究を表-1にまとめて示す。これらの研究は、何れの場合も、スレーキング特性は説明されているが、メカニズムについての説明は、林田の研究くらいである。し

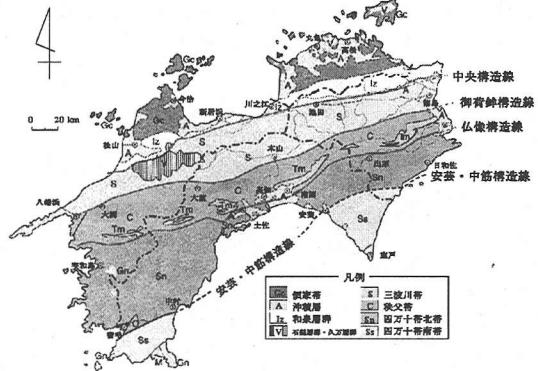


図-1 四国の地質分布

かし、未解明な点も多い。本研究では、スレーキング特性を把握するとともに、スレーキングメカニズムを解明する。

3. 試料および試験方法

岩石は、和泉層群（四国地方）の砂岩・頁岩を使用した。和泉層群は、図-1に示すように、近畿地方の紀伊半島から四国西部までの中央構造線北側に分布する白亜紀後期（約1億～6400万年前）の堆積岩である。四国では、中央構造線の北側に沿って阿讚山脈から高縄半島基部、さらに愛媛県長浜町沖の伊予灘に浮かぶ青島まで分布し、東西方向に細長く分布している。和泉層群は、主に砂岩と頁岩の互層からなり、数層の酸性凝灰岩層を挟んでいる。砂岩は新鮮な部分は灰緑色であるが、風化が進むと黄土色を呈し、容易に破碎することができる。頁岩は黒色から黒灰色を呈しているが、風化すると灰色から茶褐色となる。風化した頁岩はスレーキングを起こしやすく、貝殻状に割れる¹⁰⁾。

(1) 試料

試験対象とした岩石は、高速道路建設工事に伴う切

表-2 試料の物性値・含有鉱物

試料名	試料番号	母岩	真比重 ρ_s	湿潤単重 γ_t (g/cm ³)	乾燥単重 γ_d (g/cm ³)	初期隙比 e_0	初期隙率 n_0 (%)	初期含水比 w_0 (%)	限界吸水量 ^a w_f (%)	含有鉱物			
										石英	長石	雲母	緑泥石
三秋	①		2.69	1.82	1.80	0.49	27.8	1.4	9.6	○	○	○	△
	②		2.69	2.03	2.01	0.34	25.3	1.4	9.3	○	○	○	△
	③		2.69	1.96	1.94	0.38	27.8	1.4	8.8	○	○	○	×
引田西	①		2.62	1.79	1.73	0.51	33.8	3.7	50.8	○	△	○	×
	②		2.62	1.75	1.67	0.57	36.4	4.0	61.5	○	○	○	×
	③		2.62	1.75	1.70	0.54	35.0	3.3	35.6	○	○	○	×
関柱	①		2.72	1.56	1.50	0.43	30.1	1.5	3.9	◎	△	○	×
	②		2.72	1.87	1.84	0.48	32.2	2.9	11.7	◎	○	△	×
	③		2.72	1.79	1.73	0.58	36.6	4.0	29.9	○	○	○	×
板野IC西	①	頁岩	2.71	1.81	1.76	0.54	35.0	1.9	12.1	○	○	○	△
	②		2.71	1.69	1.62	0.67	40.1	4.4	79.5	○	○	○	×
	③		2.71	2.23	2.18	0.24	19.5	1.7	5.6	○	○	○	×
板野IC	①		2.70	1.93	1.89	0.43	30.2	3.9	48.3	○	○	○	×
	②		2.70	1.83	1.78	0.36	26.3	4.3	48.2	○	○	○	×
	③		2.70	1.89	1.86	0.45	31.0	3.4	41.5	○	○	○	×
池谷	①		2.72	1.94	1.89	0.44	30.6	7.7	10.3	○	○	○	×
	②		2.72	1.82	1.77	0.54	35.0	6.7	12.3	○	○	○	×
	③		2.72	1.92	1.88	0.45	30.8	4.1	7.7	○	◎	○	×
鳴門IC	①		2.68	1.81	1.75	0.53	34.6	3.9	28.0	○	◎	○	×
	②		2.68	1.76	1.70	0.58	36.5	3.7	27.5	○	○	○	△
	③		2.68	1.78	1.71	0.57	36.2	4.5	44.8	○	△	○	△
引田西(新)	①		2.56	2.05	2.00	0.14	12.3	2.2	4.2	○	○	△	-
	②		2.56	2.13	2.10	0.18	15.1	2.8	6.4	○	○	△	-
	③		2.56	2.02	1.97	0.17	14.2	3.0	6.4	○	○	×	-
引田西(旧)	①		2.55	2.04	1.99	0.16	13.5	1.8	4.4	◎	◎	△	-
	②		2.55	1.96	1.93	0.17	14.8	2.0	3.2	○	○	△	-
	③		2.55	1.98	1.94	0.16	13.9	1.7	3.6	○	○	△	-
引田IC	①		2.53	2.15	2.10	0.15	13.1	2.0	2.6	○	○	△	-
	②		2.53	2.23	2.17	0.17	14.2	1.6	2.7	○	○	×	-
	③		2.53	2.10	2.05	0.19	16.1	1.9	2.3	○	○	×	-
引田東	①		2.73	1.98	1.95	0.22	17.8	1.9	4.7	○	○	△	-
	②		2.73	2.02	1.97	0.18	15.4	1.7	4.4	○	○	△	-
	③		2.73	2.01	1.98	0.24	19.6	1.7	2.7	○	○	×	-

※限界吸水量…試験中に計測した吸水含水比の最大値

◎>○>△>×

土施工現場から採取した。表-2 に試料名称・物性値および含有鉱物を示す。試料採取地は、愛媛県伊豫市・香川県引田町・徳島県板野郡・徳島県鳴門市の 7ヶ所の頁岩で、一採取地ごとに 3 個ずつ試験を行ったため、合計 21 試料である。また、砂岩についても 4 種類の合計 12 試料の試験を行った。各種物性試験を行い、真比重（岩石の粉碎試料の比重）、湿潤単位体積重量、乾燥単位体積重量、初期隙隙比、初期隙率および初期含水比を測定した¹¹⁾。

真比重は 2.62~2.72 であり、頁岩のほうがやや高めである。三波川帯や御荷鉾帯の 3.00 前後と比較すると小さめではあるが、堆積岩では妥当な値¹²⁾と判断できる。湿潤単位体積重量は、1.69~2.23 g/cm³ であり全体的に砂岩の方がやや高めであるが、様々な値を示している。乾燥単位体積重量は、1.69~2.23 g/cm³ であり全体的に砂岩の方がやや高めであるが、様々な値を示している。乾燥単位体積重量は湿潤体積重量とさほど変わらない値を示す。その理由として、初期含水比が 1.37~7.67% と他の岩石のそれと比較して小さく、絶対乾燥状態の場合と質量の変動がないことが考えられる。

初期隙率は 19.4~40.1% と試料によって大きく異なっているが、頁岩の方が砂岩よりも間隙が大きい。初期隙率のわりに初期含水比が小さい試料については、サンプリング時および試験時に試料が乾燥しおり、すでに岩石の劣化が進みつつあったと予想される。

含有鉱物は X 線回折試験により同定した。頁岩の主要鉱物は、石英、長石、雲母であり、微量のクロライトが含有されている。砂岩の主要鉱物は、石英、長石であり、雲母を含有している試料もある。全体的にみて、特に変わった鉱物は同定されない。また、スレーキング現象を誘発する一つの原因として知られている膨潤性粘土鉱物であるスマクタイトの含有は何れの試料でも確認できない。含有鉱物については、定量分析は行っていないが、試験結果より、ピーク値の比率で含有比大（◎）、中（○）、小（△）、微小（×）で示している。なお、ピークが確認されない鉱物に関しては、（-）で示している。

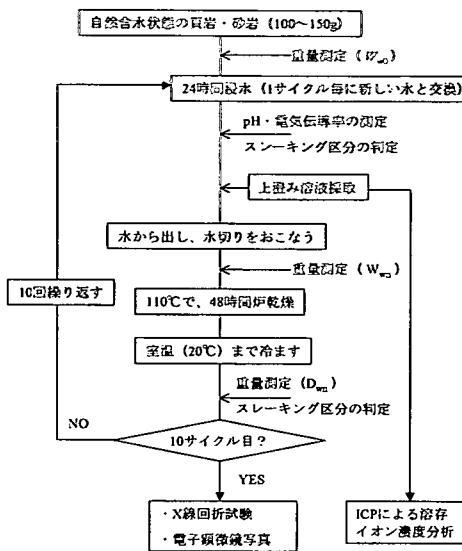
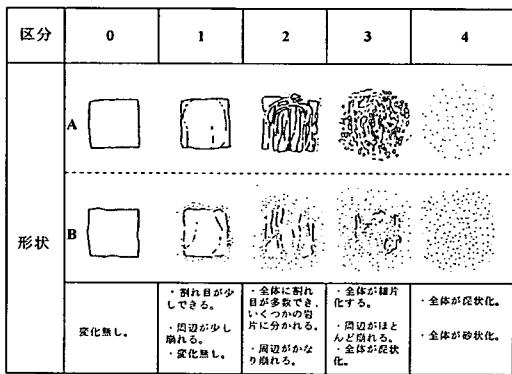


図-2 スレーキング試験の手順



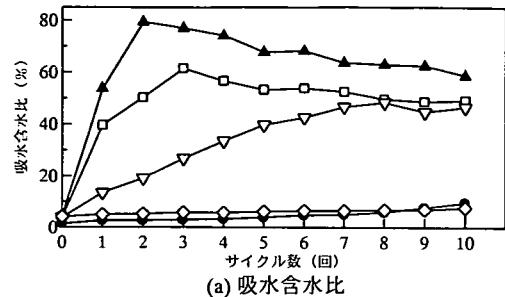
A: 裂縫によく見られるタイプ
B: めらか、シルト岩、凝灰岩にみられるタイプ

図-3 スレーキング区分の判定基準¹⁴⁾

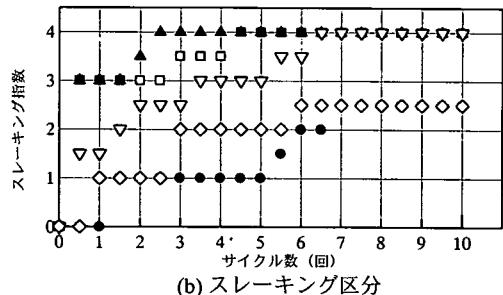
(2) 試験方法

スレーキング特性を把握するための試験は、日本道路公団の基準（KODAN 111）¹³⁾を参考に、乾湿繰返し試験を行った。スレーキング試験の手順を図-2に示した。ここでは詳細な説明は省略する。なお、道路公団の基準では、土砂状になった時点で終了する事になっているが、岩石の耐風化力の把握と風化促進のため、10サイクル行った。その間に、スレーキング区分の判定（土木学会の基準¹⁴⁾：図-3）・水溶液のpHおよび電気伝導率の測定・吸水含水比（浸水24時間後の含水比）の算出を行っている。また、試験前後においてX線回折試験および電子顕微鏡写真撮影を行い、試験終了後にICP発光分光分析装置（ICP-AES：パーキンエ

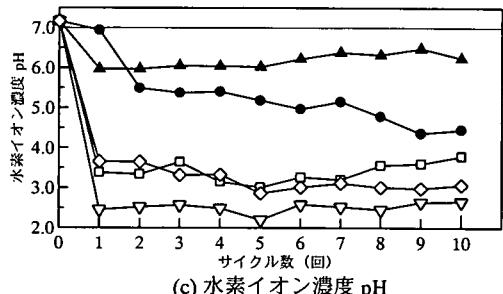
試料名	記号
三秋	① ●
引田西	② □
板野IC西	② ▲
板野IC	① ▽
池谷	③ ◇



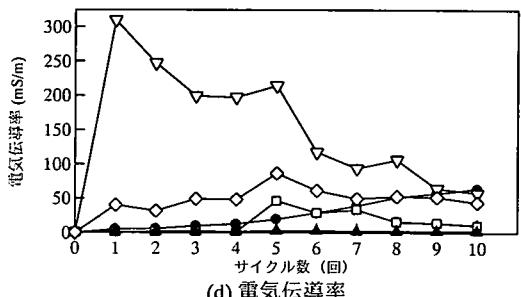
(a) 吸水含水比



(b) スレーキング区分



(c) 水素イオン濃度 pH



(d) 電気伝導率

図-4 スレーキング試験結果（頁岩）

ルマー Optrima3000) を使用し、溶出イオン濃度の分析を行った。これらの結果を基にスレーキング特性を把握し、頁岩のスレーキングメカニズムの検討を行った。

4. 頁岩のスレーキング特性

図-4 に頁岩の、図-5 に砂岩のスレーキング試験結果を示す。図は、(a) 吸水含水比・(b) スレーキング区分・(c) pH・(d) 電気伝導率とサイクル数の関係をそれぞれ示している。なお、図には、特徴的な試験結果を示したものも載せている。これらより、崩壊・非崩壊・崩壊スピード・水質の変動および崩壊形態は、試料によって異なることがわかる。また、砂岩はスレーキングを起こしにくく、頁岩はスレーキングを起こしやすいことがわかる。

図-6 に吸水含水比とスレーキング区分の関係を示す。スレーキング区分は、0→4 の順にスレーキングを起こしていることを意味していることから、スレーキングが進行するにつれ、吸水含水比が増加することがわかる。また、仲野¹⁵⁾は、『粘土粒子の表面に水分子が吸着し、その結果、放出された自由エネルギーが岩石を崩壊させる』としている。したがって、スレーキングは吸水含水比と密な関係にあると考えられる。図-7 に吸水含水比と初期隙率の関係を示す。これから、初期隙率がスレーキングに影響を与えていていることがわかる。特に、初期隙率の大きい試料は、40%以上の吸水含水比を示すのに対し、小さい試料は10%未満である。図-8 にサイクル数の関係を示す。図は、スレーキング区分が 3 および 4 と判定したサイクル数を示している。初期隙率の大きい試料は、早期に崩壊した試料である。このことから、初期隙率が初期のサイクルでのスレーキングに影響を与えていることがわかる。

以下に頁岩および砂岩のスレーキング特性を示す。

①乾湿の繰返しにより頁岩は崩壊したが、砂岩は10

サイクルでは崩壊しなかった。しかし、試料によっては、クラック等がみられたため、サイクル数を増やすことによって崩壊する可能性がある。

②頁岩のスレーキングが進行するにつれ吸水含水比が上昇した。

③浸水 24 時間後のイオン交換水の水質に変化が見られた。(pH の低下→酸性物質の溶出、電気伝導率の上昇→イオン交換水の総イオン数の増加→イオンの溶出)

④初期隙率が大きい試料はスレーキングを起こしやすい。

試料名	記号
引田西 (新) ③	○
引田西 (旧) ①	■
引田IC ③	△
引田東 ②	▼

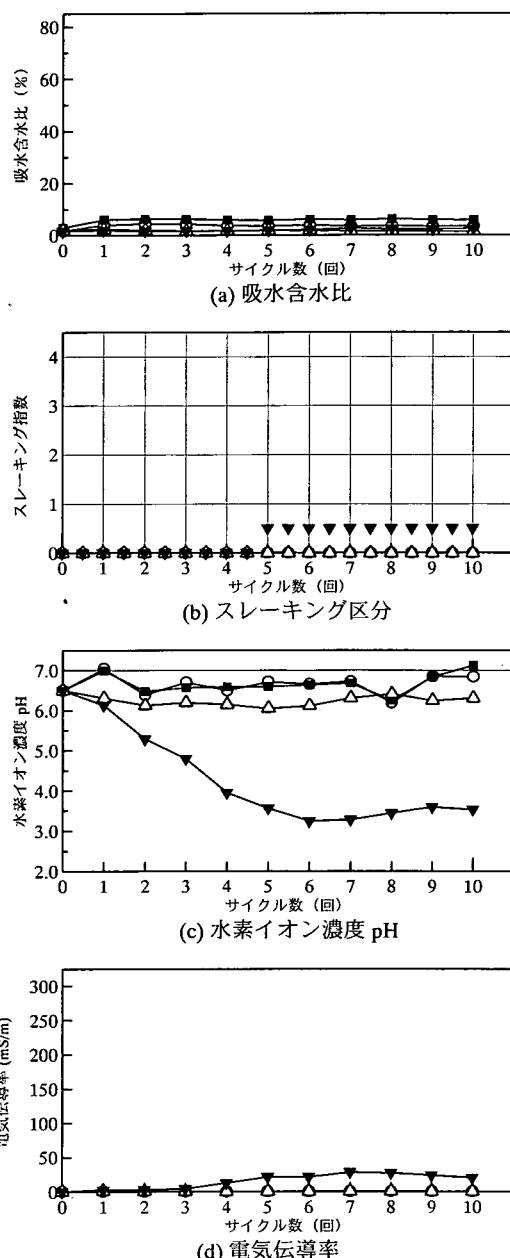


図-5 スレーキング試験結果（砂岩）

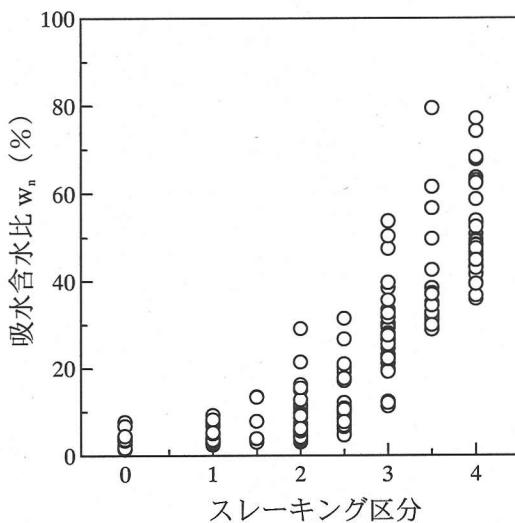


図-6 吸水含水比とスレーキング区分の関係

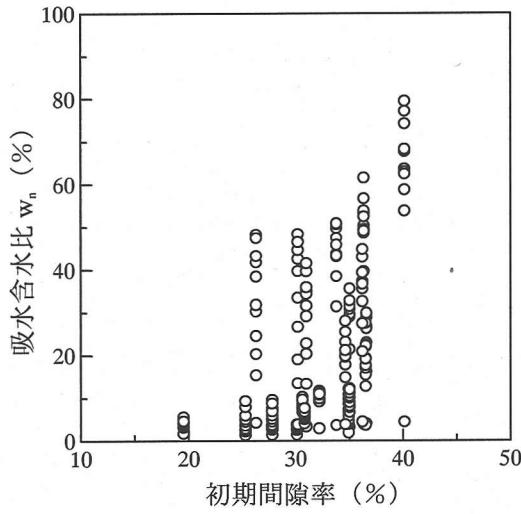


図-7 吸水含水比と初期隙率の関係

5. 頁岩のスレーキングメカニズムの化学的要因

頁岩のスレーキング特性は、前章の結果から把握できた。しかし、それらの結果だけでスレーキングメカニズムを語ることはできない。スレーキングの発生要因は、力学的考察と化学的考察の二通りで説明できる。力学的には、粒子同士の結合力よりも、外部からの引張力もしくは内部からの膨潤圧が大きい時にスレーキングが生じると説明できる。しかし、前章で示したように、試験後の pH が低い値を示したことと、電気伝導率が高い値を示したことから少なからず化学的要因によって崩壊したと考えられる。そこで、本章では、電子顕微鏡写真撮影、X 線回折試験および溶出イオン

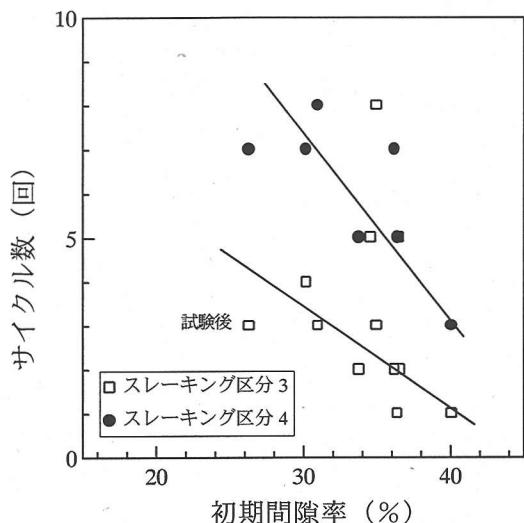


図-8 サイクル数と初期隙率の関係

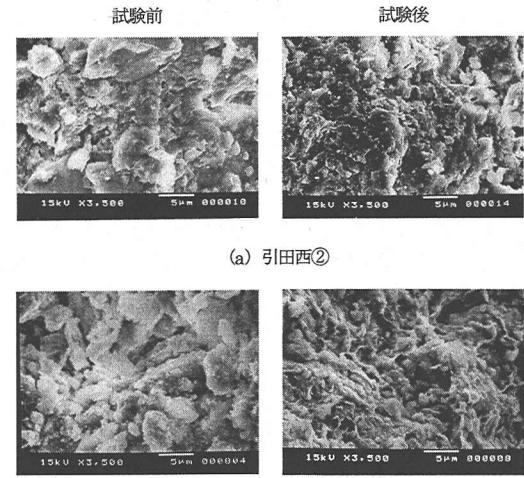


写真-2 試験前後の電子顕微鏡写真

分析を行い、スレーキングメカニズムを検討した。

(1) 電子顕微鏡写真撮影による粒子形状の変化

写真-2 に、試験前後の頁岩の電子顕微鏡写真を示す。倍率は 3500 倍であり、 $5\text{ }\mu\text{m}$ のスケールを写真の下に示している。定量的な評価は行っていないが、白い部分が粒子、黒い部分が空隙と考えられる。試験前の粒子は大きく、それぞれの粒子が繋がっていることが確認できる。逆に、試験後の粒子は、全体的に小さくなったように見える。また、空隙の数も増加しており、空隙が大きくなることが確認できる。このことから、粒子の細粒化には鉱物の変化と膠結物の溶出が考えられる。また、空隙の増加についても、膠結物の溶

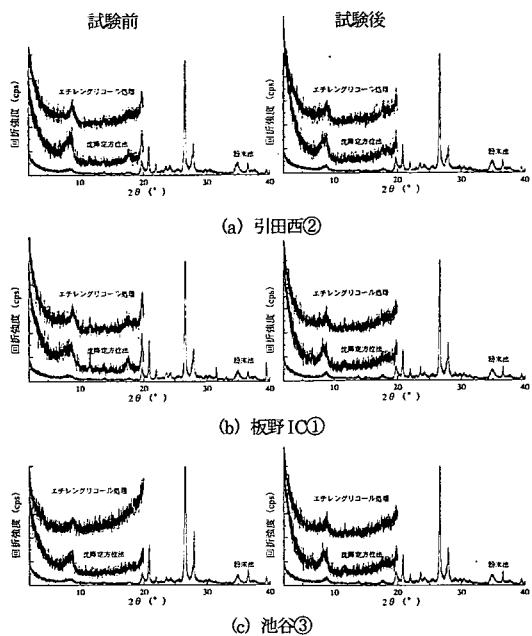


図-9 試験前後のX線回折試験結果

出が原因と考えられる。膠結物の溶出については、前章で、イオンの溶脱が推測できたことから、妥当なものと考えて良い。

(2) X線回折試験による含有鉱物の変化

先にも述べたが、第三紀の泥岩のスレーキングは膨潤性粘土鉱物が原因で発生することが多い。試験前(新鮮な状態)の頁岩には、膨潤性粘土鉱物は確認されないが、乾湿の繰返し(風化後)によって、鉱物の変化もしくは新たな鉱物が生成される可能性がある。また、それが原因によってスレーキングが発生するかもしれない。そこで、試験前後においてX線回折試験を行い、含有鉱物の変化を調べた。

図-9に試験前後のX線回折試験結果を示す。含有鉱物の変化は試験前後において全く見られない。また、膨潤性粘土鉱物の生成も確認されない。ここに示した3試料以外でも、同様の結果が得られた。このことから、スレーキングが含有鉱物の変化によって起こされたとは考えられない。

(3) 水分析による溶出イオン濃度の分析

前章のスレーキング試験結果から、酸性物質の溶出およびイオンの溶出が考えられる。また、電子顕微鏡写真から、膠結物の溶出が推測される。そこで、溶出している物質の成分を推定するために、ICPによる陽イオン分析を行った。図-10に溶出陽イオン濃度とサイクル数の関係を示す。調べたイオンは、 Al^{3+} (●)・ Mg^{2+} (▲)・ $\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$ (■)・ Ca^{2+} (○)・ Na^+ (△)・ K^+ (□)の6種類である。

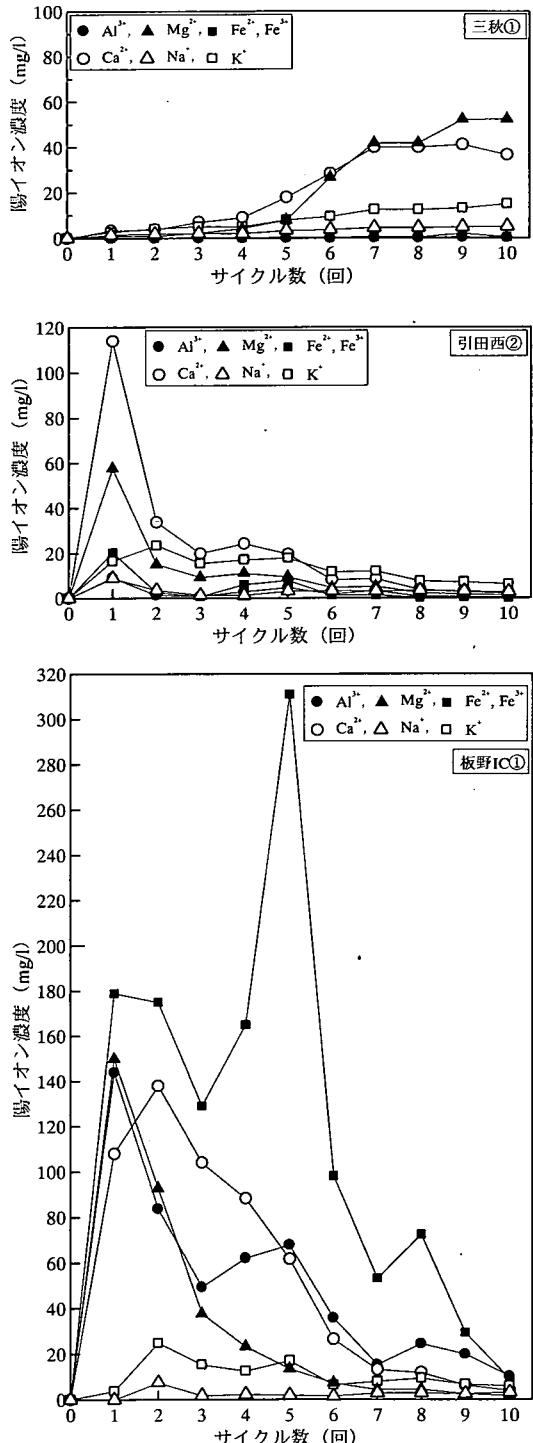


図-10 水分析結果

Mg^{2+} (▲)・ $\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$ (■)・ Ca^{2+} (○)・ Na^+ (△)・ K^+ (□)の6種類である。溶出しやすい(濃度が高い)イオンとして、 Mg^{2+} と Ca^{2+} が挙げられる。また、板野

表-3 溶出イオンと構成鉱物

陽イオン	物質名	鉱物
Ca ²⁺	斜長石 [plagioclase : (NaAlSi ₃ O ₈) _x (CaAl ₂ Si ₂ O ₈) _y]	長石
Mg ²⁺	イライト [illite : K(Si ₂ Al)(Al,Mg,Fe) _{4-x} O ₁₀ (OH) ₄]	雲母
Fe ^{2+,3+}	赤鉄鉱 [hematite : Fe ₂ O ₃] 針鉄鉱 [goethite : FeOOH] フェリハイドライ特 [ferrihydrite : 5Fe ₂ O ₃ · 9H ₂ O]	非晶質
Al ³⁺	ギブサイト [gibbsite : Al(OH) ₃] ベーマイト [boehmite : AlOOH]	

$$\text{長石相対含有量} = \frac{B}{B+A} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$\text{雲母相対含有量} = \frac{C}{C+A} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

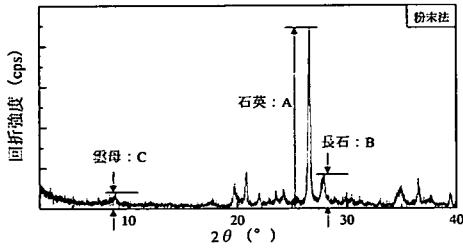


図-11 相対含有量の算出

IC の試料からは、Fe^{2+,3+}および Al³⁺の溶出も確認された。Na⁺および K⁺は、陽イオン濃度が 20mg/l 程度を示す試料もあるが、ほとんど溶出していないと考えて良い。また、これらの結果から、溶出イオン濃度の高い値を示した試料は、スレーキングを起こしていることがわかる。逆に、低い値を示した試料で、スレーキングを起こした試料については、初期隙率の大きさなどの初期物性値が原因と考えられる。

(4) 溶出イオンと含有鉱物

a) 溶出イオンから溶出鉱物の推定

溶出イオン分析から、Mg²⁺, Ca²⁺, Fe^{2+,3+}, Al³⁺が溶出しやすいことがわかった。これらの元素がスレーキング前の頁岩中で何を構成したのかを検討する必要がある。以下に、溶出イオンから含有鉱物を推定した。その結果を表-3 に示す。

造岩鉱物は、(斜長石 [Ca に富む (WPI=15~20)] → Na に富む (13)] → 正長石 (20) → 石英 (1)) の順に風化に対する抵抗性が強い [括弧内は、岩石の風化ボテンシャル指数 (WPI) : ライチエ¹⁶]。そのため、斜長石が最も風化の影響を受けやすく、試験前後で変化があると考えられる。イライトは堆積岩中の雲母粘土鉱物¹⁷である。これら二つの鉱物が試験前後で何らかの違いがあると考えられる。そこで、これらの鉱物の含有量を定量し、試験前後の変化を検討した。

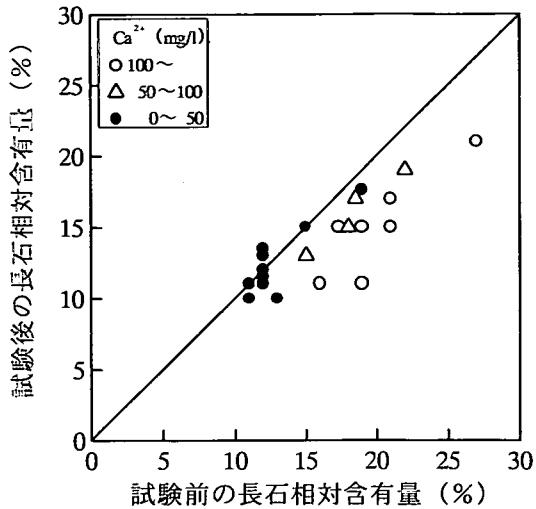


図-12 試験前後の長石相対含有量

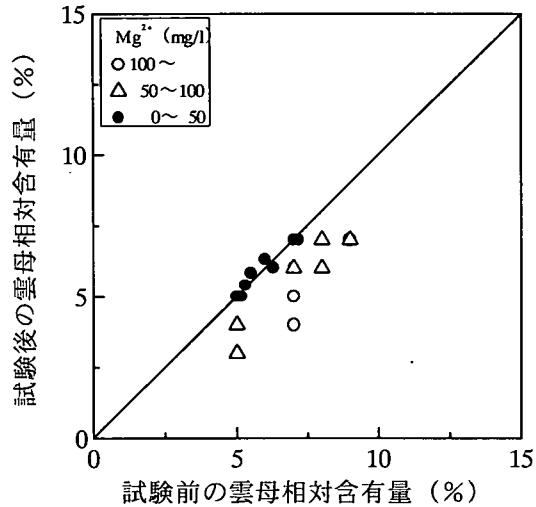


図-13 試験前後の雲母相対含有量

b) 鉱物含有量の変化とスレーキング

X線回折試験は、X線の反射角度とその強度によって含有鉱物を特定するための試験であり、鉱物の絶対的な含有量を求めるのは困難である。そこで、各鉱物の相対的含有量を求めた。相対含有量は、結晶の最強線のピーク値と $2\theta = 28^\circ$ 近辺 (長石のピーク値) および $2\theta = 8^\circ$ 近辺 (雲母のピーク値) の比で求めた。結晶のピーク値との比を求めた理由として次のことが考えられる。含有鉱物は、岩石などの強度・物性値・色・形状などに大きな影響を与えることはよく知られている。しかも、含有量の一番大きい鉱物の特徴が岩石に現れていると言っても過言ではない。しかも、和泉層群の頁岩は堆積岩であり、変成などはほとんど

受けておらず、全ての試料で最強線のピーク値は、石英であり、比較の対象となるからである。それぞれの算出法を 式(1) および 式(2) に示す(図-11 参照)。

図-12 に試験前後の長石相対含有量を、図-13 に試験前後の雲母相対含有量を示す。この図から、試験後に長石相対含有量が減少していること、 Ca^{2+} の溶出量が 100mg/l 以上の試料は減少量が大きいことがわかる。雲母相対含有量についても同様のことと言える。 Ca^{2+} の溶出量が 100mg/l という値は、御荷鉢緑色岩を炭酸に1ヶ月浸した時に溶出される数値に相当する。したがって、イオン交換水に浸し乾湿繰返しを行った頁岩は、風化が進行しており、長石および雲母を溶出し、スレーキングを起こしたと考えられる。

c) 非結晶物質と膠結物の溶出

次に、 $\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+}$ を溶出した鉱物について考える。表-3 に示すように、 $\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$ は赤鉄鉱・針鉄鉱・フェリハイドライトからの溶出であり、 Al^{3+} はギブサイト・ペーマイトからの溶出と推測した。これらの鉱物は、一般的には非結晶物質(以下、非晶質)と呼ばれるものである。

非晶質については、シラスや関東ロームに含まれるアロフェンおよびイモゴライトが知られている。その他にも、粘土鉱物の風化によって生成される非晶質、雲母などの層状けい酸塩鉱物の摩耗・堆積過程で形成されるものもある。前者は、Al や Fe の酸化物や水和酸化物である。これらは、結晶質として産出する事もあり、ギブサイト・ペーマイト・赤鉄鉱・針鉄鉱などの鉱物である¹⁸⁾。

X 線回折試験は、鉱物等の結晶化度が回折強度として現れるため、非晶質なものははっきりとしたピークが確認されない。しかし、非晶質の中で半結晶状態のものが確認できるときがある。それらは、① $6\sim 8^\circ$ 付近、② $10\sim 12^\circ$ 付近、③ $20\sim 25^\circ$ 付近、④ 36° 付近で確認される。これらの非晶質は、

- ① 雲母・長石などの一次鉱物の風化物で二次鉱物に変化するもの
- ② 一次鉱物の風化物でカオリナイトに変化するもの
- ③ シリカガラス (SiO_2)
- ④ Al や Fe の酸化物や水和酸化物

であり、今回は、①②④の非晶質について X 線回折試験結果から定量を行った。式(3)～(5) にそれぞれの算出法を示す。(図-14 参照)

上記の式から求めた非晶質の値を非晶質含有度とし、図-15 に試験前後非晶質含有度を示す。試験前後で確実に減少している非晶質が①である。これらは、雲母・長石の風化物であることから、先程述べた、イライト

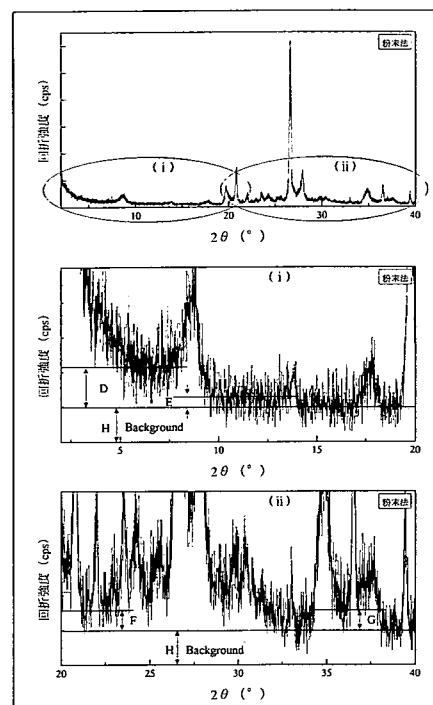


図-14 非晶質含有度の算出

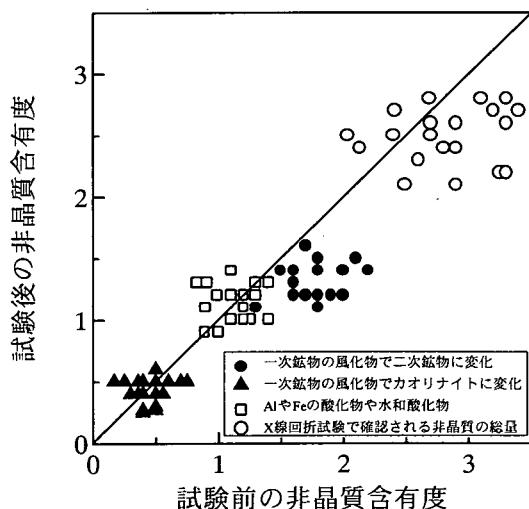


図-15 試験前後の非晶質含有度

$$\text{非晶質含有度} ① = \frac{D}{H} \quad (3)$$

$$\text{非晶質含有度} ② = \frac{E}{H} \quad (4)$$

$$\text{非晶質含有度} ④ = \frac{G}{H} \quad (5)$$

および斜長石の減少でスレーキングが発生したことを示している。また、④については、減少している試料

もあれば、増加している試料もある。減少している試料に関しては、 Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} として溶出したと言える。増加している試料に関しても、乾湿繰返しという風化作用によって 35° 近辺で確認される鉱物の結晶化度が低下し、非晶質が確認されやすくなったものと考えられる。X 線回折試験で確認される非晶質の総量は、減少している試料が多く、非晶質が溶出したものと考えて良い。また、堆積岩は膠結物によって結合されていることが知られているが、非晶質が膠結物と考えられる。

以上をまとめると、乾湿繰返しのスレーキング試験によって、斜長石およびイライトの相対含有量が減少したこと、粒子同士を結合していると考えられる膠結物は、赤鉄鉱・針鉄鉱・フェリハイドライ特・ギブサイト・ペーマイトなどであることがわかった。また、これらの鉱物が変化・溶出されたことによりスレーキングを誘発したと考えられる。

6. 結論

本論文では、切土のり面の安定性や盛土の沈下を検討する上で非常に重要な岩石のスレーキングについて、特性の把握とメカニズムの検討を行った。その結果、和泉層群の頁岩（以下、頁岩）のスレーキングについて以下に示すことが明らかになった。

- ・頁岩は、砂岩よりもスレーキングを起こしやすい。
- ・初期隙率が大きい岩石ほど早期に崩壊する。
- ・崩壊が進行するにつれ、吸水含水比が大きくなつた。
- ・浸水 24 時間後の水質に変化が見られた。（pH の低下、電気伝導率の上昇）
- ・X 線回折試験、電子顕微鏡写真、水質分析によって、膠結物の溶出、鉱物の溶出が明らかになった。その鉱物は、イライト・斜長石と考えられる。また、膠結物は、非晶質と考えられる。

7. おわりに

以上の結果から、頁岩のスレーキングメカニズムを把握することができた。しかし、水質分析に関しては、陽イオンしか分析していない。現在陰イオンについての分析中であるが、硫酸化物イオンの溶出が確認されている。これは、24 時間浸水後に pH が低下する原因と考えられる。このことから、陰イオンについても分析することにより確実にメカニズムを把握することができると考えられる。また、頁岩と互層をなす砂岩につ

いても、崩壊・非崩壊のメカニズムを解明することが今後の課題である。

また、崩壊・非崩壊のメカニズムを解明することにより、スレーキングを予防できると考えられる。そのため、試験結果を基にした、現場における予防工および対策工についての研究も行う必要があり、今後の課題とする。

謝辞：本研究を行うに際して試料採取に際しては、JH 四国支社徳島工事事務所や松山工事事務所の担当者にお世話になった。鉱物分析には愛媛大学地域共同研究センターの X 線分散型装置等を使用し、水質分析には愛媛大学機器分析センターの ICP 発光分光分析装置を使用した。また、科学研究費「基礎研究 C（代表、矢田部龍一）」の助成を受けた。なお、本研究の成果の一部は（財）高速道路技術センターの四国横断自動車道和泉層群の対策現地検討会による。以上、心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 地学団体研究会：新版地学事典、平凡社、p.659, 1996.
- 2) 稲田善紀：岩盤工学、森北出版、p.22, 1997.
- 3) 例えば、菅野孝美：掘削に伴う軟岩の膨潤劣化要因と劣化防止についての研究、愛媛大学学位論文、p.1, 1999.
- 4) 地学団体研究会：新版地学事典、平凡社、p.364, 1996.
- 5) 池尻勝俊、谷本喜一：神戸層群（第三紀）の地すべり粘土のせん断強度、第三紀層の斜面安定に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.117-124, 1993.
- 6) 西村年晴：四国西部の上部白亜系和泉層群の堆積盆解析、地質学雑誌、第 90 卷、第 3 号、pp.157-174, 1984.
- 7) 林田精郎：和泉層群（白亜紀）の硅化していない泥岩の風化についての二、三の研究、応用地質、18 卷 3 号、pp.37-42, 1977.
- 8) 水口公徳：泥岩のスレーキングについて、愛媛県建設研究所報、No.32, pp.75-84, 1989.
- 9) 望月秋利、片岡昌裕、阪口理、寺下雅裕：暴露試験と乾湿繰返し試験による頁岩の風化速度の検討、土質工学会論文報告集、Vol.34, No.4, pp.109-119, 1994.
- 10) 須鎌和巳、岩崎正夫、鈴木堯士：日本の地質 8、四国地方、共立出版株式会社、pp.1-50, 177-181, 1991.
- 11) 地盤工学会編：岩の調査と試験、地盤工学会、pp.371-387, 1989.
- 12) 川本桃万、吉中龍之進、日比野敏：岩盤力学、技報堂出版、p.75, 1985.
- 13) 地盤工学会編：岩の調査と試験、地盤工学会、pp.410-418, 1989.
- 14) 土木学会岩盤力学委員会：軟岩の調査・試験の指針（案）、土木学会、pp.64-81, 1991.

- 15) 仲野良紀：由比地すべり母岩の軟弱化と物性の変化（その2）－軟弱化に伴う物理性、力学性の変化と泥岩の結合力の本性について－、土と基礎、Vol.21、No.7、pp.3-8、1964。
- 16) Reiche, P : "Graphic representation of chemical weathering" , Journal of Sedimentary Petrology, Vol.13, No.1, pp.58-68, 1943.
- 17) 地学団体研究会：新版地学事典、平凡社、p.90, 1996.
- 18) 井上克弘：造岩・粘土鉱物、土の環境圈、フジテクノサイエンス、pp.39-44, 1997.

(2002.5.2受付)

SLAKING PROPERTIES OF SHALE ROCK IN THE IZUMI GROUP AND THE SLAKING MECHANISM

Yukinobu YOSHIDA, Shuzo TAKATA, Kinutada YOKOTA and Ryuichi YATABE

Slaking phenomenon lowers the strength of rocks in cut slopes. In Shikoku, the slaking phenomenon is quite prevalent, especially in the Izumi Group where shale rocks containing expansive clay minerals undergo slaking easily. X-ray diffraction tests, however, show no expansive minerals in the shale, which means the slaking of shale is not only due to the swelling of the expansive minerals. Lab tests such as x-ray diffraction tests, analysis of water properties, etc. revealed that the shale undergoes slaking easily because mica and feldspar in it undergo structural changes in presence of water and due to loss of cementation by amorphous minerals.