

軟岩の室内スレーキング試験に伴う細粒化の表現法

板橋一雄*・佐藤 健**・森 富雄***・
和田英孝****

軟岩は自然の乾湿繰り返しによって細粒化するため、そうした材料を利用する場合には、室内スレーキング試験が実施される。しかし、その試験方法や試験条件、特に結果の評価方法が確立されておらず、種々の提案がなされている。本研究では、軟岩のスレーキングに伴う細粒化の評価方法の適否を検討するために、採取した瑞浪泥岩の室内スレーキング試験を実施するとともに、文献調査によって得た結果を解析した。その結果、スレーキングに伴う沈下現象を確認し、種々の粒子破碎指標の適否を明らかにした。

Key Words: grain size distribution, laboratory test, soft rock, negative binomial distribution, slaking test

1. ま え が き

軟岩の中には、自然の乾湿繰り返しによって容易に細粒化するものがある。軟岩が泥土化して、材料変更を余儀なくされた例、建設後数年経過した軟岩盛土の強度低下の例^{1),2)}、軟岩材料を用いた宅地造成・道路盛土の長期沈下の例^{3),4)}など、種々の問題が誘発され、軟岩を利用する際に注意が喚起されている。

一方、健全な岩塊が入手困難な場合や軟岩地帯の掘削に伴う掘削ずりの処理、掘削斜面の風化などの問題のため、積極的に軟岩を利用しようとする研究⁵⁾、軟岩斜面の風化程度を評価する研究^{6),7)}、実際に盛土材として利用した報告⁸⁾も見られる。このような場合には、軟岩のスレーキング特性を把握することが必要になるが、そのための試験方法・試験条件などに関して、種々の提案がなされているのが現状である⁹⁾。さらに、スレーキング量の評価方法に関しても、各種の試験方法に対応して種々の提案がなされているが、スレーキングの原因究明のためにも、スレーキング量の適切な評価方法が不可欠と考えられる。しかし、スレーキング後の軟岩の粒度分布全体の変化を適切に評価した研究は数多くはない^{10),11)}。

著者らは、通称瑞浪泥岩を採取し種々の試験条件の下で室内スレーキング試験を実施している。その結果、乾湿時の吸水率変化がスレーキングに大きく影響すること、拘束圧の作用によりスレーキングしにくくなること、負の二項分布による評価が可能なことなどを明らかにしてきた¹⁰⁾。

しかし、試料が一種類の瑞浪泥岩に限られており、軟岩のスレーキングに伴う粒度変化の一般的な法則を確立したとは言えない。そこで、本研究では、前報と異なる場所で新たに瑞浪泥岩を採取し、初期粒度を3種類とし、最大100サイクル(200日)までのスレーキング試験を実施した。さらに、すでに報告されている種々の軟岩のスレーキング試験結果(12編)を収集し、前報¹⁰⁾に示したと同様の解析を行った。すなわち、一般の土質試験で求め易い粒度分布に基づいた種々の粒子破碎指標を用いて、各指標の変化傾向を求め、スレーキングに伴う粒度変化の一般的な法則を明らかにした。

2. 土質材料の粒子破碎指標

軟岩のスレーキング試験結果の表示方法は、a) 水浸・放置した岩片の目視観察によって4~5ランクに分ける方法(スレーキング指数¹²⁾、崩壊度ランク¹³⁾、b) 軟岩試料約3kgを用いて、9.50mmふるいの加積通過率で表示する方法(スレーキング率)¹⁴⁾、c) 軟岩試料400~600gを用いて、2.00mmふるいの加積残留率で表示する方法(耐スレーキング指数)¹⁵⁾、などが提案されている。a)の方法は、試験法・表示法が簡便であり、幅広い軟岩に対応できる柔軟な方法であるが、主観的な評価になり個人差の入る可能性が残されている。一方、b)、c)の方法では、客観的な数値によって表示できるが、同一のスレーキング率、耐スレーキング指数であっても、粒度分布の異なる場合が想定できる。

軟岩に限らず、種々の外力の作用によって粒子破碎する土質・岩質材料は多い。例えば、まき土は通常の締固めや圧縮応力の下で粒子破碎を生じる^{16),17)}。また、礫や砂でも高圧力が作用すると、粒子破碎現象が認められる¹⁸⁾。こうした研究の中で、粒子破碎する材料の破碎程度を評価する方法に対して、種々の提案がなされている^{19),20)}。それらは、1) 粒度分布の変化に基づくもの、2)

* 正会員 工博 名城大学助教授 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 名城大学大学院工学研究科博士課程

**** 正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ(株)

粒子表面積の変化に基づくもの、に大別される。前者には、粒径加積曲線上の1, 2点の移動量, Marsalの破碎率, 粒子破碎前後の粒径加積曲線で囲まれる面積などに着目したものが含まれる。スレーキング試験結果の表示方法b), c) は、粒径加積曲線上の1点の移動量を評価していることになる。

本研究においては、一般の土質試験で比較的容易に求められる粒径加積曲線（あるいは残留率分布）に着目した。粒子破碎指標として、①50%径, ②2mm通過率, ③均等係数, ④残留率差の絶対値の総和（Marsalの破碎率に相当する）, ⑤負の二項分布のパラメータ, の5つを取り上げ、各粒子破碎指標の変化傾向を明らかにした。

3. 室内スレーキング試験と解析方法

(1) 試料

岐阜県東濃地方に広く分布し、新第三紀中新世に堆積した通称瑞浪泥岩を試料に選んだ。採取現場は厚さ50cm程度の表土に覆われており、ほとんど風化を受けていない健全な泥岩であった。人力では掘削不可能であり、大型掘削機によって泥岩を破碎して試料とした。採取した泥岩の自然含水比は25.2%、乳鉢・乳棒ですりつぶした泥岩の土粒子密度は2.56 g/cm³、液性限界・塑性限界はそれぞれ57.6%、32.0%であった。実験供試体の初期粒度を統一するために、自然含水比のままの採取試料をJISふるいすべてを用いてふるい分け、初期粒度16.0～19.0 mm, 31.5～37.5 mm, 53.0～63.0 mmの3種類の均一粒度の試料を準備した。以下では、これらを初期粒径の小さい順にA試料, B試料, C試料として示す。

(2) 実験方法

室内スレーキング試験では、供試体の体積変化が測定でき、かつ、供試体への給水・排水が容易なることを考え、CBR試験用モールド（内径150 mm, 高さ175 mm, カラー高さ50 mm）を用いた。スレーキングによって細粒化した粒子がモールドから流出しないようにモールド底面にポーラスストーンとろ紙を敷き、泥岩粒子を高さが約160 mmとなるように手で敷き詰め、上部にろ紙とポーラスストーンを載せ、実験供試体とした。その結果、A試料では約300個、B試料では約60個、C試料では約16個の泥岩粒子を1供試体に詰めることができた。1供試体当たりの泥岩試料重量は2 445～3 146 gfとなっている。

スレーキングの進行に伴う粒子破碎指標の変化をとらえるために、上記の方法によってA試料では11供試体、B試料では30供試体、C試料では7供試体を作製した。供試体の重量は感量0.1 gfの電子台ばかりを、供試体高さは最小目盛り0.05 mmのノギスを用い、カラー上

表—1 作製した供試体の初期状態

試料名	供試体数	初期粒度 (mm)	初期湿潤単位体積重量 (gf/cm ³)		初期間隙比	
			最小値～最大値	平均値	最小値～最大値	平均値
A	11	16.0～19.0	0.975～1.040	0.998	2.08～2.29	2.21
B	30	31.5～37.5	0.890～1.000	0.949	2.21～2.60	2.38
C	7	53.0～63.0	0.904～1.000	0.937	2.21～2.55	2.42

端から上部ポーラス石の深さを3箇所測定して計算した。各供試体の初期湿潤単位体積重量の幅と平均値が表—1に示してある。なお、この表には供試体の初期含水比を25.2%、土粒子密度を2.56 g/cm³とした場合の初期間隙比の範囲と平均値も示してある。この表より、供試体の初期粒度が粗い割には、A, B, Cの各供試体とも単位体積重量の変動幅は少なく、同程度の供試体で作製できたものと考えられる。また、初期粒度が粗い供試体ほど、湿潤単位体積重量が小さく、間隙比が大きくなる傾向が明確に現れている。

室内スレーキング試験の条件は、日本道路公団の試験方法で採用されている、110°Cの炉乾燥24時間～水浸24時間を1サイクルとして採用した。ただし、水浸～炉乾燥の順序とした。その理由は、炉乾燥試料を用いて、各サイクル終了時点の正確な粒度分布を求めることを目的としたためである。なお、今回の瑞浪泥岩の初期飽和度は高く、最初の水浸ではほとんどスレーキングが進行していないことを目視観察で確認している。各水浸終了時点、炉乾燥終了時点において供試体重量と高さを測定した。なお、予備試験において、上部ポーラスストーンを外した状態で110°C、24時間の炉乾燥によって試料重量が一定になることを確認している。

所定のスレーキングサイクル（表—2のNo.12のスレーキング試験条件参照）が終了した段階で、供試体内の試料すべてを用いて粒度試験を実施した。粒度試験ではJISふるい（最大ふるい目125 mm, 最小ふるい目0.032 mmの49個のふるい）すべてを用いて、ロータップ型振とう機で一律5分間のふるい分けを行った。なお、予備試験を実施し、このふるい時間によってふるい残しのないことを確認している。

(3) 解析方法

a) 実験結果の解析方法

上述の粒度試験の結果からJISふるいすべての残留率ヒストグラムならびに粒径加積曲線を描くことができる。この粒径加積曲線から、10%径, 50%径, 60%径, 2mm通過率を読み取り、粒子破碎指標①～③を適用した。また、粒子破碎指標④では、粒子破碎前の粒度として初期の残留率ヒストグラムに統一して、スレーキング後の残留率差の絶対値の総和を求めている。

残留率ヒストグラムに負の二項分布（破碎指標⑤）を当てはめるために、前論文¹⁰⁾と同様の操作を粒径加積曲

表-2 解析した文献資料のスレーキング条件など

No.	文献番号	試料名	物理的性質	初期粒度(mm)	スレーキング試験条件	資料番号
1	30	頁岩(Ca)	表乾比重=2.49, 絶対乾比重=2.58 吸水率=3.4%	2.0~101.6 (分布粒度)	①水浸(20°C, 8時間)~炉乾燥(110°C, 16時間)2サイクル ②水中凍結~融解 10サイクル ③空気中凍結~融解 10サイクル ④水中暴露試験1カ月 ⑤空気中暴露試験1カ月	1-① 1-② 1-③ 1-④ 1-⑤
2	3	新第三紀泥玉層 (泥岩, 粘粉岩)	かさ比重=1.58, 吸水率=25.7% 自然含水比=25.3% 液性限界=54%, 塑性限界=27%	19.1~38.1 (均一粒度)	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 1, 2, 3 サイクル	2
3	22	中生代白亜紀 有馬層(頁岩)	比重=2.70, 自然含水比=9.47% 液性限界=31.8%, 塑性限界=19.6%	9.52~25.4 (均一粒度)	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 1, 2, 3, 4, 5 サイクル	3
4	8	第三紀深灰岩 質泥岩	自然含水比=38.9% 単位体積重量=1.77g/cm³	0.074~19.1 (分布粒度)	水浸(24時間)~炉乾燥(24時間) 3, 5 サイクル	4
5	23	三浦層群 逗子層泥岩	比重=2.70, 自然含水比=21.2% 吸水率=22.4% 液性限界=74.6%, 塑性限界=43.0%	-	水浸(24時間)~炉乾燥(110°C, 24時間) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 サイクル	5
6	24	新第三紀中新世 逗子泥岩	比重=2.66, 自然含水比=24.8% 吸水率=27.6% 液性限界=70.8%, 塑性限界=32.4%	25.4~38.1 (均一粒度)	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 1, 2, 5, 10 サイクル	6
7	25	神奈川県 の泥岩	自然含水比=15~25%	19.1~38.1 (均一粒度)	水浸(96時間)~炉乾燥(110°C, 72時間) 【載荷板5kg】 1, 2, 3, 7, 10, 20, 30, 40 サイクル	7
8	26	新第三紀泥岩 (神奈川県) 試料A	比重=2.45 自然含水比=22.5~24.2% 液性限界=63.8% 塑性限界=31.5%	最大長250mm 約3kg	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 サイクル 気乾燥(20°C)~水浸(20°C) 1, 2, 3 サイクル	8-① 8-③
		新第三紀泥岩 (神奈川県) 試料B	比重=2.53 自然含水比=20.5~21.3% 液性限界=65.2% 塑性限界=32.1%	最大長250mm 約3kg	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 サイクル 気乾燥(20°C)~水浸(20°C) 1, 2, 3 サイクル	8-② 8-④
9	27	新第三紀逗子層 (泥岩) 試料A	比重=2.64, 吸水率=21~28% 自然含水比=18~28% 湿潤密度=1.96~2.07g/cm³	19.1~38.1 (均一粒度)	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 2, 5, 10, 15 サイクル	9-①
		新第三紀逗子層 (泥岩) 試料B	比重=2.64, 吸水率=25~48% 自然含水比=24~45% 湿潤密度=1.71~1.93g/cm³	19.1~38.1 (均一粒度)	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 2, 5, 10, 15 サイクル	9-②
		新第三紀逗子層 (凝灰質泥岩) 試料C	比重=2.62, 吸水率=30~62% 自然含水比=30~60% 湿潤密度=1.63~1.87g/cm³	19.1~38.1 (均一粒度)	炉乾燥(110°C, 24時間)~水浸(常温, 24時間) 2, 5, 10, 15 サイクル	9-③
10	28	和泉層群の頁岩 (淡路島南部)	比重=2.73 吸水率=2.6~3.7%	約100mm	水浸(24時間)~炉乾燥(110°C, 24時間) 2, 4, 6, 8, 10 サイクル 暴露試験 7, 17, 35, 45, 59日	10-① 10-②
11	10 29	新第三紀層 (瑞浪泥岩)	比重=2.60 吸水率=45%	53.0~63.0	水浸(24時間)~炉乾燥(110°C, 24時間) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 サイクル	11-①
				9.50~19.0		暴露試験 3カ月, 1年
12		新第三紀層 (瑞浪泥岩)	土粒子密度=2.56 自然含水比=25.2% 液性限界=57.8% 塑性限界=32.0%	16.0~19.0 31.5~37.5 53.0~63.0	水浸(24時間)~炉乾燥(110°C, 24時間) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20 サイクル 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100 サイクル 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30 サイクル	A試料 B試料 C試料

線に行き、負の二項分布のパラメータを求めた。なお、最大粒径 D_{max} は、各試料の最大値とし、粒径の公比 λ は JIS のふるい目間隔にほぼ等しい $\sqrt{2}$ とした。

b) 文献から得られた粒径加積曲線の解析方法

本論文では、粒径加積曲線で示されたスレーキング試験結果を解析するが、一般には、土質工学会基準のふるいが用いられている。このふるい目間隔は対数軸上で不等間隔であるため、そのままの残留率ヒストグラムでは意味の薄いものになる。そこで、粒径加積曲線を滑らかな曲線で結んだ後、JIS のふるい目に対応する加積通過率を読み取り、相隣り合う加積通過率の差を残留率とした。そして、この残留率分布を実験結果と考え、上述した a) の方法を適用して種々の粒子破碎指標を求めた。

なお、本研究において解析した文献資料の試料名とその物理的性質、初期粒度、スレーキング試験条件を表-

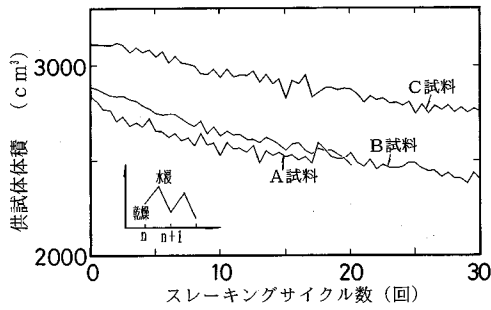
2 に示した。スレーキング試験に関しては、この他にも示唆に富んだ研究があるが、本研究では、粒径加積曲線に着目しているため、スレーキング試験後の試料の粒径加積曲線が明確に示されているもののみを選定した。スレーキングサイクルが多く、段階的に示されている No. 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 の結果に興味を持たれる。特に、スレーキング試験と自然条件下での暴露試験との比較が示されている No. 1, 10, 11 の結果は、スレーキング試験の位置付けを明確にする上で興味深い。

4. 実験結果ならびに文献調査結果の解析と考察

(1) 実験結果の解析と考察

a) 供試体体積、重量、単位体積重量の変化

図-1 には、3種類の初期粒度の代表的な供試体につ

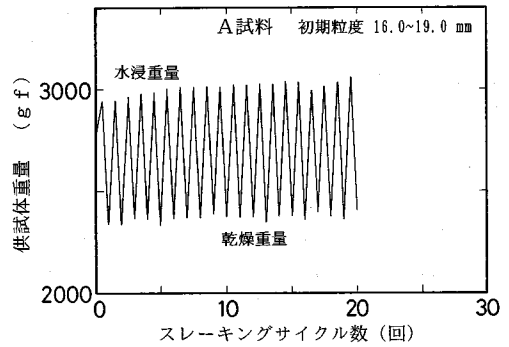


図一 スレーキングに伴う供試体体積の変化

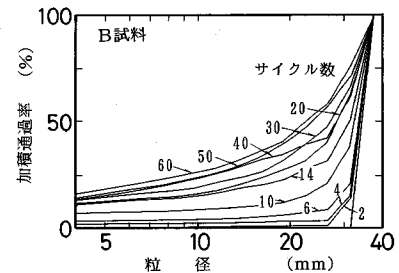
いて、供試体体積とスレーキングサイクル数との関係を示している。炉乾燥のたびに上部ポーラスストーンを外すので、供試体体積に多少のばらつきが認められる。全体的にはサイクル数とともに直線的あるいは多少下に凸の関係で、減少していく様子がわかる。多くの場合、水浸後の体積が増加し、炉乾燥後の体積が減少している。一般には、スレーキングによる粒子破砕は水浸時に生じると言われているので、この体積変化の現象は次のように考えられる。水浸時に粒子破砕が生じるが、粒子の相対的移動量は少なく、個々の泥岩粒子が吸水膨張することによって体積が増加する。そして、水槽から出し、炉乾燥することによって見かけの粘着力も無くなり、水浸時に細粒化した泥岩粒子が崩れ落ち、供試体下方の間隙を埋めていくために体積が減少していく。なお、試料Bでは100サイクルまで実施しているが、供試体体積の減少傾向が継続しており、泥岩を利用した盛土の長期沈下の原因の一つが、泥岩のスレーキングに伴う細粒化であることを示唆している。

図一は供試体重量とスレーキングサイクル数との関係の一例を示している。多少のばらつきは認められるが、乾燥後の重量はほぼ一定になっている。これは、粒子破砕が生じ細粒分が増加しても、24時間110°Cの炉乾燥で十分乾燥していることを示している。一方、水浸後の重量はスレーキングサイクル初期に増加傾向を示している。これは、初期段階の粒子破砕によって試料の表面積が急激に増加し、泥岩粒子の表面に付着する水量が増加したためと考えられる。ただし、スレーキングサイクル数が増すと、その効果の変化が少なくなり、ほぼ一定の重量となっている。したがって、スレーキングサイクル数が多い場合には、一定の水浸重量～乾燥重量の繰り返しとなっている。

スレーキングに伴う供試体の体積変化と重量変化のため、供試体の単位体積重量には、次のような変化が現れる。スレーキング初期には、サイクル数の増加とともに乾燥および湿潤単位体積重量ともに、一定の勾配で増加する。スレーキングサイクル数がさらに増すと、両単位体積重量とも増加傾向が鈍化し、わずかな増加傾向を示



図二 スレーキングに伴う供試体重量の変化



図三 スレーキングに伴う粒径加積曲線の変化

すが、ほぼ一定値の繰り返しとなる。

b) 粒径加積曲線の移動

スレーキング後の粒度分布を粒径加積曲線の形で、図一3に示してある。図が繁雑になるので、代表的な結果のみが示してある。他の文献に見られる泥岩のように数十サイクルでかなりの細粒化が進行するものとは異なり、粒径加積曲線の移動量は非常に少ない。60サイクル経過してもなお、初期粒度の最大粒径の粒子が残っており、粒径が小さくなるほど残留率が少なくなる粒度分布を示している。B試料では、100サイクルの繰り返しを行ったが、同様の傾向を示している。

スレーキングサイクル数の増加とともに、サイクル数の順番通りに粒径加積曲線が移動しているわけではないが、全体的な傾向として曲線が細粒側に移動していることがわかる。こうしたばらつきが現れる原因は、1供試体に含まれる泥岩粒子数が少ないため、個々の粒子のスレーキングの難易の相違が粒度分布に影響したためと考えられる。

(2) 実験結果と文献試料の解析結果との比較

図一4(a)～(d)には、スレーキングサイクル数の増加に伴う50%径(mm)、2mm通過率(%),均等係数,残留率差の絶対値の総和(%)の変化が示してある。なお、これらの図には、表一2の資料番号によって文献資料の解析結果も併せて示してある。

50%径(対数目盛り)は、スレーキングサイクル数とともに急激に減少する試料が多い。特に、資料番号

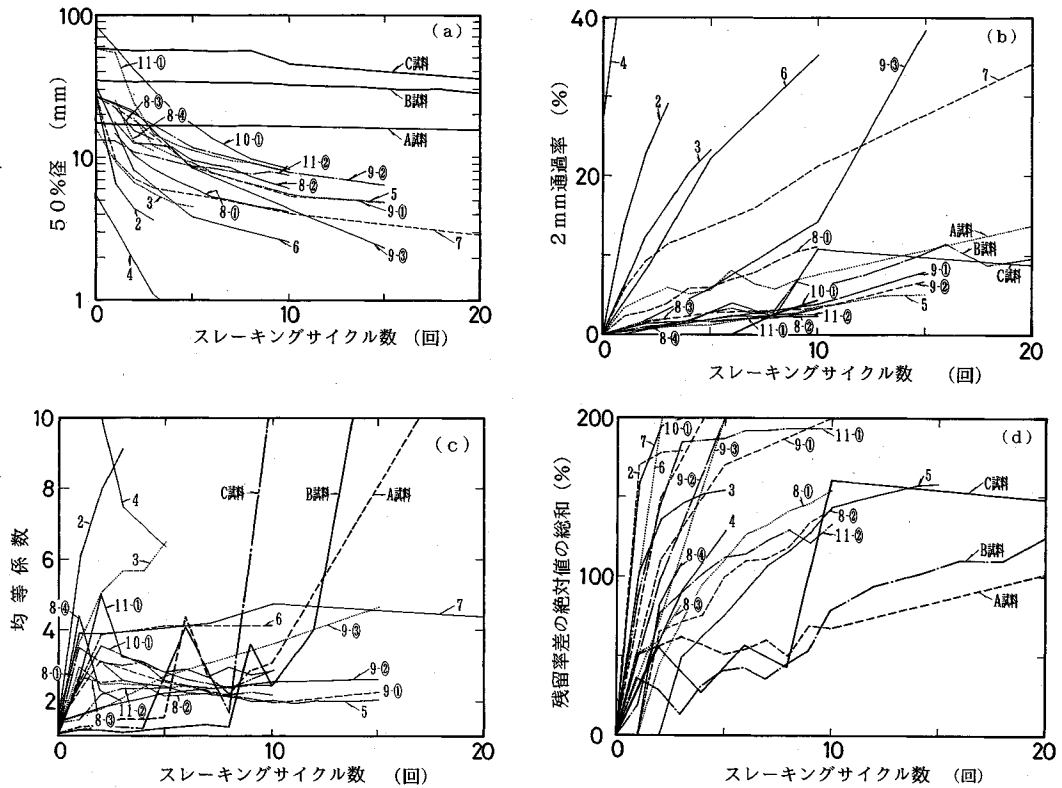


図-4 スレーキングに伴う各粒子破碎指標の変化

2, 3, 4, 6, 7, 8-①, 10-①, 11-①の試料はスレーキング初期に急激な減少を示している。その他の試料では、50%径の減少傾向が少ない。スレーキングに伴う50%径の減少に対して式(1)を仮定して回帰分析を実施すると、表-3の結果が得られる。

$$d_{50} = a_d \cdot (S_c)^{-b_d} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 d_{50} は50%径(mm)であり、 S_c はスレーキングサイクル数を示す。式(1)では $S_c=0$ において、 $d_{50}=0$ となる欠点があるが、相関係数は高く、式(1)の有効性が明らかとなる。なお、今回実験に供した瑞浪泥岩では、その他の軟岩と比較して50%径の低下量は非常に少なく(回帰係数 b_d が小さい)、特に初期粒度の最も小さなA試料では、ほとんど低下していない。

2mm通過率とサイクル数の関係は、大きく二つのグループに分けられる。一つは資料番号2, 3, 4, 6, 7, 9-③の試料に代表されるグループで、2mm通過率が急激に増加する試料である。これらは、試料の初期粒度の最小粒径が小さく、かつスレーキングし易い材料であると考えられる。その他のグループは、10サイクル経過しても2mm通過率が5%以下となっており、スレーキングしても、泥状にならない材料であることが予想される。スレーキングに伴う2mm通過率の増加に対して、式(2)を仮定した回帰分析を実施すると、表-3の結果

が得られる。

$$p_2 = a_p \cdot (S_c)^{b_p} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 p_2 は2mm通過率(%)である。式(2)では、 S_c が大きくなると、 p_2 が100%を越える欠点はあるものの、比較的相関係数が高く、2mm通過率を予測する関係式として、利用の可能性が残される。

均等係数とサイクル数の関係は、多くの試料では、2~3サイクルまでのスレーキング初期にわずかな増加あるいは増減を示し、その後は大きな変化を示していない。資料番号4の試料の均等係数のみが、スレーキングに伴い減少している。これは、初期粒度の分布幅が最も広い試料であり、10%径の減少よりも60%径の減少割合が大きかったことを示している。今回の実験試料の瑞浪泥岩では、8~10サイクル以上の均等係数が急激に増加し、大きな変動を示している。これは、このサイクルから10%径が急激に減少したためと考えられる。また、均等係数の大きな変動は、供試体内の個々の泥岩粒子の破碎の難易の影響が現れたものと考えられる。

残留率差の絶対値の総和は、スレーキングサイクル数とともに急激に増加する試料が多い。特に、資料番号2, 3, 6, 7, 9-①, 9-②, 9-③, 10-①, 11-①の試料では、残留率差の絶対値の総和はサイクル数の小さな内に、大きな値を示している。逆に、資料番号5, 8-①, 8-②,

表-3 50% 径ならびに 2mm 通過率とスレーキングサイクル数との回帰分析結果

資料番号	データ数	式 (1)			式 (2)		
		係数 a ₁	係数 a ₂	相関係数	係数 a ₁	係数 b ₁	相関係数
2	3	6.493	0.5335	-0.998	13.90	0.6940	0.989
3	5	9.183	0.4505	-0.999	6.328	0.8422	0.995
4	2	3.524	1.047	-1.000	39.33	0.5288	1.000
5	14	26.24	0.6539	-0.991	0.2565	1.124	0.982
6	3	12.91	0.7175	-0.995	4.407	0.9324	0.991
7	8	9.610	0.3939	-0.995	5.930	0.5603	0.987
8-①	10	15.12	0.5610	-0.999	2.077	0.7014	0.985
8-②	10	18.68	0.4329	-0.969	0.6179	0.6233	0.980
8-③	3	22.09	0.4709	-0.995	0.9419	0.7562	0.968
8-④	3	24.33	0.7565	-0.979	0.3982	0.8312	1.000
9-①	4	27.41	0.6745	-0.989	0.3038	1.168	0.985
9-②	4	29.85	0.5729	-1.000	0.9798	0.6457	0.954
9-③	4	45.13	1.056	-0.996	0.5991	1.463	0.991
10-①	5	83.72	1.010	-0.999	-	-	-
11-①	10	43.27	0.7809	-0.974	0.2009	1.293	0.970
11-②	10	12.91	0.2360	-0.994	0.3612	0.9297	0.954
A 試料	11	17.10	0.0142	-0.655	3.428	0.3749	0.894
B 試料	30	39.36	0.1120	-0.808	0.9541	0.6986	0.907
C 試料	7	67.11	0.1436	-0.761	0.9645	0.6622	0.769

11-②の試料では、10サイクル経過後でも130~150%程度であり、粒度分布の変化量は少なくなっている。スレーキング後の残留率分布が初期の残留率分布に重ならず、細粒側に完全に移動してしまえば、この値は最大値200%の一定値に達する。したがって、残留率差の絶対値の総和の大きな試料はスレーキング後の粒度分布が、初期粒度から大きく移動した試料ということになる。ただし、初期粒度が比較的狭い分布を示す場合には、わずかな粒度変化によって最大値になるであろうから、この値は初期粒度の影響を受け易いことが予想される。なお、初期粒度の不明な資料番号5ではサイクル数2回の際の粒度分布を、また、岩塊からスレーキング試験を実施している資料番号8ではサイクル数1回の際の粒度分布を初期粒度として採用した結果を示してある。今回実験に供した瑞浪泥岩の場合には、8サイクル程度までは60%以下となっている。その後徐々に増加し、20サイクル目では100~150%に達しているが、その他の試料と比較すると、初期粒度が狭いにもかかわらず小さく、この泥岩が細粒化しにくい試料であることがわかる。

(3) 負の二項分布による評価

a) 負の二項分布の適合性

分布の適合性の検定の結果、ほとんどの場合、負の二項分布にしたがうという仮説は棄却されない。ただし、初期粒度が均一な場合には、当然ではあるが、負の二項分布は適合しない。また、文献から得たデータの内、スレーキングが激しく生じ粒度分布が大きく移動する場合

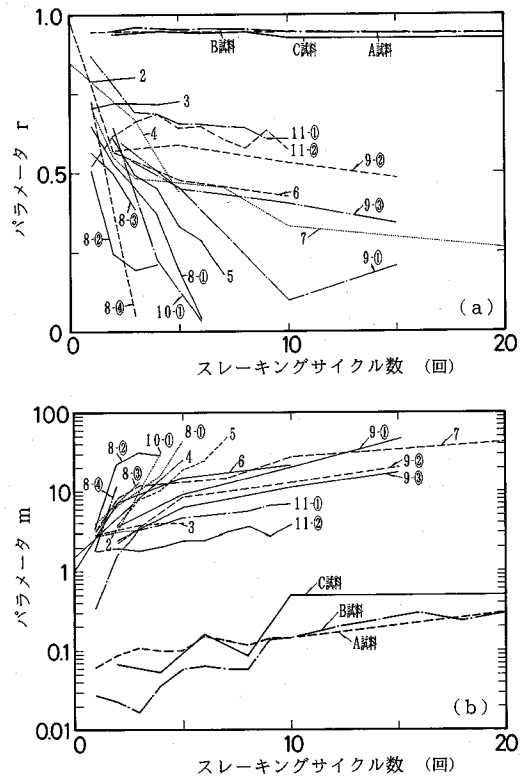


図-5 スレーキングに伴う負の二項分布パラメータの変化

には、分散 $\sigma^2 < \text{平均値 } \mu$ となり、 r が負となり、負の二項分布は適合しなくなる。

分布に関する理論からすれば、 $\mu < \sigma^2$ で負の二項分布、 $\mu = \sigma^2$ でポアソン分布、 $\sigma^2 < \mu$ で二項分布が当てはめられることが知られている²⁷⁾。したがって、スレーキングが激しく生じる場合には、その残留率分布は、負の二項分布→ポアソン分布→二項分布へと変化することが予測される。

b) 負の二項分布パラメータの変化法則

スレーキング後の粒度分布は、最大粒径 D_{max} とパラメータ r, m が与えられれば規定される。したがって、これらの値の変化法則が明らかになれば、スレーキングに伴う粒子破碎の将来予測が可能になる。さらに、パラメータ $m=1$ と置けば、軟岩の粒度を表現するためによく利用されている Talbot 式²⁸⁾ と同一となるため、負の二項分布の利用価値は高いと考えられる¹¹⁾。

図-5 (a), (b) には、スレーキングサイクルの増加に伴う負の二項分布のパラメータの変化が示してある。なお、パラメータ r は 0~1 の間の値をとるので普通目盛りで表現してある。また、今回解析したデータではパラメータ m はほぼ 0.01~400 の間の値を示している所以对数目盛りで表現してある。なお、最大粒径 D_{max} は各試料の初期粒度の最大値がとってある。また、

初期粒度が均一粒度の場合には、その分布には負の二項分布が適合しないため、スレーキング初期の結果を示すことができない。

多くの試料では、パラメータ r はスレーキングの進行とともに減少傾向を示すかあるいは一定値を示している。 r とスレーキングサイクル数 S_c の間に式 (3) で示される減少関係を仮定し、回帰分析を行った結果、表-4を得た。

$$r = a_r \cdot (S_c)^{b_r} \dots\dots\dots (3)$$

各試料によって、回帰係数 a_r , b_r の大きさは異なり、 $r > 1$ となる場合もあるが、すべての場合とも高い相関係数を示しており、式 (3) を仮定してもよいことがわかる。これらの図表より、 r が大きく減少するものは、資料番号 4, 5, 8-①, 8-②, 8-③, 8-④, 9-①, 10-①であり、 r がほぼ一定値をとるものは、資料番号 2, 3, 6, 7, 9-②, 9-③, 11-①, 11-②, A, B, C であることがわかる。特に、今回実験した瑞浪泥岩は、 r の値が最も大きく、スレーキングサイクルが多くなってもほぼ一定値を保っている。

一方、パラメータ m は、スレーキングの進行に伴い増加する傾向が認められる。ただし、粒子破砕の少ない瑞浪泥岩では、 m の値がその他の結果と比較して小さいことが特徴となっている。 m と S_c の間に指数的に増加する関係式 (4) を仮定して回帰分析を行った結果、表-4を得た。

$$m = a_m \cdot (S_c)^{b_m} \dots\dots\dots (4)$$

r と同様、試料によって回帰係数 a_m , b_m は異なるが、相関係数は高く、式 (4) を仮定してもよいことがわかる。

なお、その他の $r \sim S_c$, $m \sim S_c$ の関係式を用いて回帰分析を行っているが、全体的にみて式 (3), (4) を仮定した場合の相関係数が最も高くなっている。これらの関係式の成立を仮定すれば、スレーキング試験を実施していない、より高いサイクル数に対応するパラメータ r , m が予測でき、その場合の粒度分布が推定できることになる。

これらのパラメータ r , m は、粒径番号に関する平均値 μ と分散 σ^2 の両者によって計算される¹⁰⁾。したがって、上述した r や m の変化はスレーキングに伴う粒度分布の平均値と分散の変化を総合的に評価していることになり、粒径加積曲線の一点のみに着目した、50% 径や 2mm 通過率による評価よりも優れた方法と考えられる。

さらに、前報に示したように、パラメータ r と m の間には、初期粒度やスレーキング試験条件にほぼ依存しない特殊な関係が認められている。そこで、今回の実験結果ならびに文献資料の結果に対しても同様の整理を

表-4 パラメータ r , m とスレーキングサイクル数との回帰分析結果

試料番号	データ数	式 (3)			式 (4)		
		係数 a_r	係数 b_r	相関係数	係数 a_m	係数 b_m	相関係数
2	3	0.7887	0.0146	0.995	2.776	0.1651	0.995
3	5	0.7067	0.0147	0.817	2.834	0.2322	0.988
4	2	1.640	-0.8204	-1.000	0.6969	2.234	1.000
5	6	1.278	-0.8888	-0.934	0.9215	1.917	0.982
6	3	0.6388	-0.1786	-0.989	4.721	0.6815	0.993
7	8	0.6956	-0.2978	-0.980	4.288	0.7297	0.979
8-①	6	1.023	-1.1793	-0.775	1.883	2.073	0.886
8-②	4	0.4603	-0.6770	-0.932	4.480	1.623	0.923
8-③	3	0.5837	-0.8337	-0.938	3.724	1.061	0.987
8-④	3	0.9400	-2.2728	-0.902	1.446	3.933	0.970
9-①	4	1.000	-0.7178	-0.790	1.200	1.545	0.903
9-②	4	0.7347	-0.2790	-0.989	1.241	1.057	0.986
9-③	4	0.6264	-0.0786	-0.809	1.294	0.9628	0.999
10-①	3	4.686	-2.5760	-0.950	0.1522	4.151	0.987
11-①	10	0.8558	-0.1510	-0.980	0.5758	1.179	0.949
11-②	7	0.8505	-0.1644	-0.823	1.532	0.3232	0.853
A試料	11	0.9489	-0.0024	-0.656	0.0602	0.4277	0.912
B試料	30	0.9614	-0.0073	-0.828	0.0169	0.8583	0.923
C試料	7	0.9598	-0.0137	-0.814	0.0258	0.9340	0.851

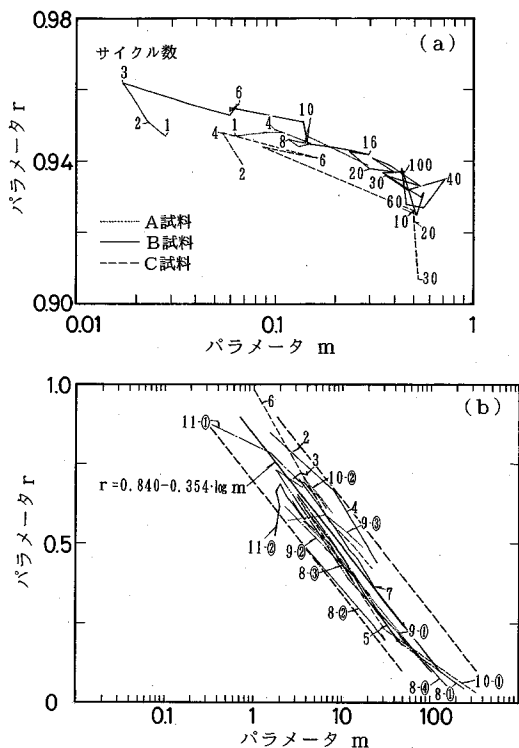
行った。図-6 (a), (b) に、負の二項分布のパラメータ r , m の関係を示した。(a) には、今回実験した瑞浪泥岩の場合、(b) には、文献データの解析結果をまとめて示してある。なお、 m は 4 桁以上の変化を示しているため、対数目盛りで示してある。前述したように、スレーキングの進行に伴い、 r は減少傾向 (あるいは一定)、 m は増加傾向があるため、多くの試料の結果では、図上で右下に移動する傾向が認められる。 r は 0.033 ~ 0.962、 m は 0.017 ~ 337.0 と幅広い範囲にあるにもかかわらず、ほとんどすべてのデータが狭い領域内にプロットされている。そこで、負の二項分布が適合する各スレーキング試験結果に対して、

$$r = a - b \cdot \log m \dots\dots\dots (5)$$

の関係式を仮定した場合の回帰係数 a , b ならびに相関係数を表-5 に示した。

今回実験した瑞浪泥岩では、スレーキングに伴う粒子破砕量が少ないため、 r の値はほぼ一定 (0.907 ~ 0.962) となっており、 m の増加量も少ない。係数 a は 0.918 ~ 0.928、係数 b は 0.020 ~ 0.024、相関係数 ρ は -0.935 ~ -0.983 となっており、特に係数 b が小さく、その他の文献データから離れた位置にプロットされている。

試料 B では、100 サイクルまでのスレーキングを行っているが、粒子破砕がほとんど進行しない 40 サイクル以降では、図上のプロット位置がほとんど変化せず、 $r = 0.925 \sim 0.937$, $m = 0.350 \sim 0.715$ の範囲内に入っている。この事実は、スレーキングに伴う粒度変化が少な



図—6 負の二項分布パラメータ r, m の関係

ければ、負の二項分布のパラメータは図上のある位置に収束することを意味している。したがって、この収束位置あるいは移動法則を知ることができれば、スレーキングに伴う粒度変化の将来予測が可能になると、期待できる。

図—6 (b) の文献データの解析結果の場合を見ると、スレーキングに伴う粒子破碎が大きいと、 r が大きく減少するとともに m が大きく増加するため、図上で右下に大きく移動する関係を示している。 r の値は 0~1 の範囲をとるので、こうした場合には、ゼロに漸近するような関係を示している。

式 (5) の関係式に対しては、すべての試料とも、相関係数は非常に高く、0.936 以上の値になっている。また、今回実験した瑞浪泥岩を除けば、係数 a は 0.717~0.972、係数 b は 0.233~0.424 の範囲の値をとっており、この直線関係を仮定することの有効性が認められる。なお、 r の値が 0.1 から 0.9 の間にあるすべてのデータから、以下に示すような平均的な関係式が認められる。

$$r = 0.840 - 0.354 \cdot \log m \dots\dots\dots (6)$$

試料 (第三紀の凝灰質泥岩, 逗子泥岩, 和泉層頁岩, 瑞浪泥岩) が異なるだけではなく、その初期粒度 (分布粒度と均一粒度), 仮定する最大粒径 ($D_{max} = 19.0 \sim 125$ mm), スレーキング試験条件 (乾燥時間, 乾燥温度, 乾湿の順序, サイクル数) などが大きく異なるにもかかわらず

表—5 負の二項分布パラメータ間の回帰分析結果

試料番号	データ数	係数 a	係数 b	相関係数	適用範囲
4	3	0.925	0.330	-0.985	0~5 サイクル
5	6	0.842	0.394	-0.999	2~7 "
6	4	0.972	0.424	-0.994	1~10 "
7	8	0.904	0.389	-0.999	1~40 "
8-①	5	0.859	0.404	-0.999	1~5 "
8-②	4	0.678	0.320	-0.999	1~4 "
8-③	3	0.782	0.351	-0.989	1~3 "
8-④	2	0.838	0.421	-1.000	1~2 "
9-①	4	0.765	0.331	-0.999	2~15 "
9-②	4	0.717	0.282	-0.998	2~15 "
9-③	3	0.777	0.233	-0.999	5~15 "
10-①	3	0.754	0.301	-0.976	2~6 "
10-②	3	0.901	0.344	-0.999	35~58 日
11-①	9	0.838	0.269	-0.995	2~10 サイクル
11-②	7	0.807	0.405	-0.990	4~10 "
A 試料	8	0.928	0.020	-0.939	4~20 "
B 試料	27	0.926	0.023	-0.936	4~100 "
C 試料	5	0.918	0.024	-0.983	4~20 "

ならず、こうした一般的な関係が得られることは、この関係式が軟岩のスレーキングに伴う粒子破碎の一般的なルールを示すものと考えられる。

さらに、データ数が少ないため明確ではないが、今回解析した 3 つの暴露試験の結果でも、 $r \sim \log m$ の直線関係が認められ、負の二項分布による評価法は、暴露試験とスレーキング試験の結果を比較する一つの指標になる可能性を示している。今後さらに暴露試験の結果が集積されれば、乾燥温度や乾燥時間等のスレーキング試験の条件の適否やスレーキング試験の位置づけなどを明確にできることが期待される。

なお、筆者らは、まさ土の一次元圧縮試験や締固め試験によっても、 $r \sim \log m$ の直線関係を得ており¹⁷⁾、この関係は軟岩のスレーキング試験のみならず、一般的な粒度変化の法則であることを実験的に確認している。

5. 結 論

本研究では、軟岩のスレーキングに伴う粒子破碎量の評価法の適否を検討するために、瑞浪泥岩の室内スレーキング試験を実施するとともに、スレーキングに関する文献資料を収集した。瑞浪泥岩の室内スレーキング試験では、初期粒度を 3 種類、最大 100 サイクルまで実施した。また、文献資料としては、12 編の中の 102 件のスレーキング試験結果の解析を実施した。

そして、一般的な土質試験で容易に求められる粒径加積曲線に着目し、粒子破碎評価法として、① 50% 径、② 2 mm 通過率、③ 均等係数、④ 残留率差の絶対値の総

和, ⑤負の二項分布のパラメータ, の5つの評価法を取り上げた。

室内スレーキング試験の結論ならびに試験結果の評価法の適否に関する結論を要約すれば, 以下ようになる。

(1) 瑞浪泥岩のスレーキングの進行に伴い, 供試体体積は減少, 水浸後の湿潤重量は増加, 乾燥後の乾燥重量はほぼ一定となった。このような変化のため, 供試体の単位体積重量は, 湿潤時, 乾燥時ともに増加傾向を示した。この結果は, 軟岩盛土の長期沈下の原因の一つがスレーキングであることを示唆している。

(2) 瑞浪泥岩やその他の軟岩のスレーキングの進行に伴って粒径加積曲線が細粒側に移動する様子が, 種々の粒子破碎指標の変化によって明らかになった。

(3) スレーキングが激しく生じる軟岩に対しては, 50% 径や2 mm 通過率などの値が大きく変化するため, 粒径加積曲線の内の一点の移動による評価も可能であることがわかった。そして, 50% 径 d_{50} や2 mm 通過率 p_2 が次式で表されることもわかった。

$$d_{50} = a_d \cdot (S_c)^{-b_d}$$

$$p_2 = a_p \cdot (S_c)^{b_p}$$

一方, 残留率差の絶対値の総和は, スレーキング初期に最大値に達するため, 不適切であることがわかった。

(4) スレーキングの生じにくい軟岩に対しては, 粒径加積曲線の移動量が少ないため, 50% 径や2 mm 通過率など粒径加積曲線内の一点による評価の難しいことがわかった。また, このような軟岩では, 残留率差の絶対値の総和による評価は可能であることがわかった。

(5) 均等係数は, 軟岩のスレーキングの進行に伴って一定の変化傾向が認められず, この評価法が不適当であることがわかった。

(6) カイ2乗適合度検定の結果, 軟岩のスレーキング後の残留率分布が, 負の二項分布にしたがうという仮説が棄却されない場合がほとんどであり, 負の二項分布による評価が適切であることが明らかになった。

(7) 軟岩のスレーキングの進行に伴い, 負の二項分布のパラメータ r は一定値を取るか, 減少する傾向を示した。また, パラメータ m はほとんどの場合増加傾向を示した。なお, 負の二項分布のパラメータ r, m とスレーキングサイクル数 S_c の間には次式の成立することが明らかになった。

$$r = a_r \cdot (S_c)^{b_r}, m = a_m \cdot (S_c)^{b_m}$$

(8) 負の二項分布のパラメータの間に, $r \sim \log m$ の直線関係が認められた。今回解析した多くのデータに対して, 次式のような平均的關係が得られた。

$$r = 0.840 - 0.354 \cdot \log m$$

試料の種類, 初期粒度, スレーキング条件などが異なるにもかかわらず, こうした一般的な關係が得られるこ

とは, この關係式が軟岩のスレーキングに伴う粒度変化の一般的ルールを示すものと考えられる。

今後, 軟岩の暴露試験の結果も集積し, 同様の解析を進め, 室内スレーキング試験結果とを比較し, 室内スレーキング試験の位置づけや試験条件の適否を明確に行きたい。また, 図—1に示すように室内スレーキング試験では, 試料の細粒化に伴い明確な沈下現象が確認されたが, 盛土地盤内で同様の現象が生じるのかは現在のところ不明である。そこで, 自然条件下での軟岩供試体の暴露試験を実施し, 供試体のスレーキング特性と沈下現象との関連性についても, 今後究明して行きたい。

なお, 試料採取ならびに実験・データ解析の実施に当たっては, (株) アイコの大山英治氏, 中村吉男氏, ならびに名城大学の学生諸君の協力を得た。記して, 謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 浅田秋江: 1978年宮城県沖地震による宅地造成地被害の土質工学的検討, 第15回土質工学研究発表会, pp.1333~1336, 1980.
- 2) 谷本喜一・野田 耕: 土質工学的諸問題とその対応 山地・丘陵地-土地造成, 土と基礎, Vol.36, No.11, pp.43~48, 1988.
- 3) 島 博保・今川史朗: スレーキング材料(ぜい弱岩)の圧縮沈下と対応策, 土と基礎, Vol.28, No.7, pp.45~52, 1980.
- 4) 望月秋利・三笠正人・川本祥史: 宅地造成地の浸水による沈下の検討例, 土と基礎, Vol.33, No.4, pp.25~32, 1985.
- 5) 山口晴幸・黒島一郎・福田 誠: スレーキングで破碎した泥岩の締固め特性, 土木学会論文集第418号/Ⅲ-13, pp.75~84, 1990.
- 6) 川村國夫・新明 繁・筒井弘之・竹内勝信: 第三紀堆積砂質シルト岩の風化特性, 土と基礎, Vol.39, No.6, pp.15~20, 1991.
- 7) 小宮康明・新城俊也: 島尻層泥岩における風化の進行とその工学的性質に及ぼす影響, 土と基礎, Vol.39, No.6, pp.21~27, 1991.
- 8) 赤津武雄・神崎 靖・高橋正久・岡部 博・中崎英彦・上田貴夫: フィルダムへの泥岩の適用性に関する検討と実施例-地域振興整備公団・神下防災調節池堤体工事-, 土と基礎, Vol.32, No.7, pp.15~20, 1984.
- 9) 山口晴幸・黒島一郎・福田 誠: スレーキング試験に関する考察, 新しい物理試験方法に関するシンポジウム論文集, 土質工学会, pp.141~148, 1992.
- 10) 佐藤 健・板橋一雄・河邑 眞: 乾湿繰返しによる泥岩の細粒化試験と結果の整理法, 土木学会論文集, No.487/Ⅲ-26, pp.69~77, 1994.
- 11) 福本武明: 土の粒度分布に関する検討, 土木学会論文集, No.475/Ⅲ-24, pp.11~18, 1993.
- 12) 土木学会岩盤力学委員会: 簡易スレーキング試験法(案), pp.41~44, 1980.
- 13) 日本国有鉄道: 岩石標準試験法(案), 水浸崩壊度試験,

- pp.92~93, 1983.
- 14) 日本道路公団：岩のスレーキング試験方法，岩の乾湿繰り返し試験方法，pp.105~110, 1985.
 - 15) 岩の力学連合会：ISRM 指針 (ISRM Suggested Methods), Vol.1, pp.21~24, 1982.
 - 16) Fukumoto, T. : A GRADING EQUATION FOR DECOMPOSED GRANITE SOIL, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.30, No.1, pp.27~34, 1990.
 - 17) 立石哲郎・板橋一雄・田口泰敏：粒度分布によるまさ土の粒子破碎の評価，名城大学理工学部研究報告第30号，pp.130~138, 1990.
 - 18) 三浦哲彦：杭先端付近における砂の粒子破碎と杭の支持機構，土と基礎，Vol. 32, No. 2, pp. 45~50, 1984.
 - 19) 福本武明：粒子破碎の程度を示す指標，土と基礎（技術手帳），Vol. 29, No. 12, pp. 64~65, 1981.
 - 20) 石井武美：粒子破碎の表示尺度のもつ物理的意義，土質工学会論文報告集，Vol. 29, No. 4, pp. 155~164, 1989.
 - 21) 片岡哲之・池見元直・安田正幸・栗城孝雄：ロック材の風化促進による粒径変化，第11回土質工学研究発表会，pp.917~920, 1976.
 - 22) 金丸正雄・中崎英彦・上田貴夫：ぜい弱岩盛土材のスレーキングによる沈下特性について，第17回土質工学研究発表会，pp.593~596, 1982.
 - 23) 谷口敬一郎・楠見晴重・名草俊比古・武田峰典：第三紀泥岩のスレーキング特性に関する一考察，第22回土質工学研究発表会，pp.963~964, 1987.
 - 24) 黒島一郎・福田誠：泥岩のスレーキング現象，土木学会第42回年次学術講演会第3部，pp.392~393, 1987.
 - 25) 佐藤 巖・赤石 勝・竹田敏彦・杉山太宏：泥岩のスレーキングと圧縮沈下特性，第23回土質工学研究発表会，pp.1137~1138, 1988.
 - 26) 山口晴幸・吉田廣太郎・黒島一郎・福田誠：泥岩のスレーキング特性，土木学会論文集第406号/Ⅲ-11, pp.17~26, 1989.
 - 27) 福岡秀基・小西 武・村沢 譲・名草俊比古・新津誠：還元層における凝灰質泥岩の劣化状況比較，第24回土質工学研究発表会，pp.1085~1086, 1989.
 - 28) 望月秋利・寺下雅裕・木下哲生・谷川和久・片岡昌裕：軟岩の風化とその評価，土木学会第45回年次学術講演会第3部，pp.480~481, 1990.
 - 29) 佐藤 健・中村吉男・大山英治・板橋一雄・永井康貴：泥岩の風化に関する室内実験とその考察，第26回土質工学研究発表会，pp.1125~1126, 1991.
 - 30) 片岡哲之・池見元直・安田正幸・栗城孝雄：ロック材料の風化促進による粒径変化，第11回土質工学研究発表会，pp.917~920, 1976.
 - 31) 竹内 啓・藤野和建：2項分布とポアソン分布，東京大学出版会，UP 応用数学選書2, 1981.
 - 32) 大根義男：盛立て材料としての岩塊の諸問題，土と基礎，Vol. 32, No. 7, pp. 3~8, 1984.

(1994.1.19 受付)

EVALUATION METHOD FOR THE DISINTEGRATION OF SOFT ROCKS BY SLAKING TEST

Kazuo ITABASHI, Takeshi SATO, Tomio MORI and Hidetaka WADA

Slaking test are performed to examine the disintegration of soft rocks which easily deteriorate by drying and wetting. For slaking test, some test methods, test conditions and evaluation methods of result are proposed. In this study, the Mizunami mudstones are used to slaking test and test results by another authors are analysed to investigate the methods for evaluate the disintegration of soft rocks. The results of this study are as follows: (1) settlement phenomena are confirmed by slaking of mudstone, (2) effective particle breakage indexes to evaluate a slaking of soft rocks are revealed, (3) a unique relation are recognized between two parameters (r , m) of a negative binomial distribution which correspond to grain size distribution after disintegration after slaking test.