

軟岩の暴露試験と室内スレーキング試験 による粒子破砕量の比較手法の提案

板橋一雄¹・佐藤 健²・森 富雄³・岩田 賢⁴

¹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)

²正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (岐阜市柳戸1-1)

³正会員 名城大学大学院理工学研究科博士課程 (名古屋市天白区塩釜口1-501)

⁴正会員 工修 中央開発 (株) (福岡市城南区鳥飼6-3-27)

軟岩の乾湿繰り返し試験の条件は試験の統一化や簡便さの観点から決められたものであるため、それが自然の乾燥・湿潤条件をどの程度反映しているかは明確にはされていない。その原因には軟岩の暴露試験がさほど実施されていないこと、室内試験と暴露試験の結果を比較する手法が提案されていないことが挙げられる。そこで、数種類の軟岩の室内スレーキング試験と暴露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、粒度分布の代表値(50%径, 2mm通過率)の移動量に基づく方法や粒度分布を負の二項分布で近似し、その移動法則に基づく方法を提案した。さらに、5種類の軟岩の室内スレーキングサイクル数と暴露日数との関係を明らかにした。

Key Words : grain size distribution, soft rock, slaking test, in-situ exposure test, negative binomial distribution

1. まえがき

従来は、自然条件の下で細粒化が激しく生じるような軟岩は、施工材料として利用されなかった。しかし、最近では、堅固な岩石質材料が入手困難になってきたことや軟岩の掘削しやすい有効利用などの理由により、スレーキングし易い軟岩も積極的に利用するようになってきた。こうした場合には、利用する軟岩の室内スレーキング試験が実施される。一般には、110℃の炉乾燥～水浸を繰り返して細粒化した試料の、ある粒径における加積通過率や加積残留率で評価される。このような室内試験における試験条件は、細粒化の有無のみを評価することと試験の統一化・簡便さの観点から決められたものであるため、自然の乾燥・湿潤条件をどの程度反映しているかは明確にされていない。

その原因には、大きな二つの事項が考えられる。その第一の原因は、自然条件下での軟岩の暴露試験がさほど実施されてこなかったことである。その点を解決するために、著者らは、軟岩の室内スレーキング試験や暴露試験の文献を収集・整理した。また、同一試料に対して、室内スレーキング試験と暴露試

験を実施し、炉乾燥・水浸の繰り返しに伴う粒子破砕指標の変化ならびに自然の乾燥・湿潤による粒子破砕指標の経時的変化を明らかにしてきた^{1)・2)}。

第二の原因は、暴露試験での乾湿繰り返し条件が明確でないために、室内スレーキング試験の結果と暴露試験の結果を比較する手法があまり提案されていないことである。すなわち、室内スレーキング試験がどの程度原位置の条件をシミュレートしているかは、まったく不明である。室内スレーキング試験の位置づけを明確にする意味でも、両試験結果の比較手法を確立することは、重要と考えられる。

そこで本論文では、数種類の軟岩を用いて、室内スレーキング試験と暴露試験を実施するとともに、それらの結果を粒度分布に基づいて比較する、二通りの手法を提案することを目的とした。

2. 従来の研究成果のまとめ

(1) 室内スレーキング試験

軟岩の室内スレーキング試験を実施し、その粒度分布の変化傾向を明確にした研究には、片岡ら³⁾、島ら⁴⁾、金丸ら⁵⁾、赤津ら⁶⁾、谷口ら⁷⁾、黒島ら⁸⁾、

佐藤ら⁹⁾, 山口ら¹⁰⁾, 福岡ら¹¹⁾, 望月ら^{12), 13)}, 佐藤ら¹⁴⁾の研究がある。著者らは, それらの成果を取りまとめ, 細粒化の指標とスレーキングサイクル数との関係を明確にしている¹⁾。

(2) 暴露試験

軟岩の室内スレーキング試験の実施例と比較すると, 暴露試験の実施例は少ないが, 片岡ら³⁾, 望月ら^{12), 13)}, 矢萩ら¹⁵⁾, 佐藤ら¹⁴⁾, 板橋ら²⁾によって行われている。それらの方法や結果を要約すると, 次のようになる。

片岡ら³⁾は, 初期粒度2~100mmの頁岩(C_n級)を気中状態ならびに水中状態で1カ月間の暴露試験を実施し, 暴露試験と室内スレーキング試験の両者の結果とも, 吸水率が大きいほど破碎率が大きくなることを示している。

望月ら^{12), 13)}は, 初期粒径約100mmの中生代和泉層群の頁岩を水の溜まらない容器に入れ, 約2カ月間の暴露試験を実施している。

矢萩ら¹⁵⁾は, 中生代名護累層の緑色片岩を用い, 7年間に及ぶ長期間で大規模な暴露試験を実施している。築造した盛土の暴露(盛立暴露試験), 各粒径毎の粒子の暴露(小規模暴露試験), 3~8kgの岩塊の暴露の3通りの暴露試験を実施し, 約6月から1年間隔で粒度分布を求め, Marsalの破碎率や質量損失率の経時的変化を明らかにしている。暴露試験結果より, 拘束圧がある程度ある場合や飽和度が常に100%に近い場合には, 劣化の進行が遅くなることを示している。

佐藤ら¹⁴⁾は, 瑞浪層から採取した泥岩を用い, 3カ月間と1年間の暴露試験を実施し, その破碎程度を種々の粒子破碎指標で評価している。また, 板橋ら²⁾は, 初期粒度31.5~37.5mmに調整した新第三紀受乞層の泥岩をCBRモールドに詰め, 最長約7カ月間の暴露試験を実施している。粒子破碎指標として, 50%径, 2mm通過率, 負の二項分布パラメータなどを取り上げ, それらの値の経時的変化を推定する関係式を提案している。

(3) 両者の比較に着目した研究

軟岩の室内スレーキング試験結果と自然の暴露試験結果や暴露条件との比較に着目した研究は, さらに少なく, 望月ら^{12), 13)}, 佐藤ら¹⁴⁾, 永津ら^{16), 17)}の研究のみである。

望月ら^{12), 13)}は, 和泉層群の頁岩を用いて, 室内スレーキング試験と暴露試験を実施している。3種

類の粒径に対応するスレーキング率を細粒化の指標とし, 降水量1mmあるいは2mm以上の降雨日数の増加とともにスレーキング率が増える傾向を示している。また, このスレーキング率を介して, 降雨日数と室内の乾湿繰り返し回数との対応関係を導く, 興味ある研究を行っている。

佐藤ら¹⁴⁾は, 瑞浪泥岩を用いて, 種々の条件下での室内スレーキング試験と前述のような暴露試験を実施している。粒子破碎指標として, 50%径, 2mm通過率, 残留率差の絶対値の総和, 負の二項分布パラメータなどを用い, 3カ月間と1年間の暴露日数と室内スレーキング試験の繰り返し回数との対応関係を示している。

永津ら^{16), 17)}は, 九州中部のロックフィルダム建設地点において, 現地環境調査を行っている。現地における外気温, 日射量, 降水量, 岩石温度の測定結果を基にして, 独自の降雨日数, 晴天日数を定め, 現地の乾湿繰り返しパターンを推定する手法を提案している。一方, 室内スレーキング試験結果と現地の乾湿繰り返しパターンに基づいた劣化量の予測方法も示し, 実用化に向けた努力が成されている。

3. 暴露試験と室内スレーキング試験結果の比較手法の提案

(1) 代表的な粒径や加積通過率に基づく方法

著者らは, 前述した室内スレーキング試験に関する文献の結果を整理し, スレーキングが激しく生じる場合には, 種々の粒子破碎指標の内, 50%径 d_{50} (mm)や2mm通過率 p_2 (%)などの粒径加積曲線上の一点の移動による評価が可能であり, 式(1),(2)で表現できることを示してきた¹⁾。

$$d_{50} = a_d \times (S_c)^{-b_d} \quad (1)$$

$$p_2 = a_p \times (S_c)^{b_p} \quad (2)$$

ここに, S_c は室内実験におけるスレーキングサイクル数, a_d, b_d, a_p, b_p は回帰係数である。

さらに, 前述した暴露試験の結果に対して, 暴露日数 T (日)との間にも同様の形式の関係式が成立することを示してきた²⁾。

$$d_{50} = a_d' \times (T)^{-b_d'} \quad (3)$$

$$p_2 = a_p' \times (T)^{b_p'} \quad (4)$$

ここに, a_d', b_d', a_p', b_p' は回帰係数である。

以上の結果より, 室内スレーキング試験と暴露試験によって同一の50%径や2mm通過率が得られる関係式を示すことができる。すなわち, 式(1)と(3)あるいは式(2)と(4)を連立させることにより,

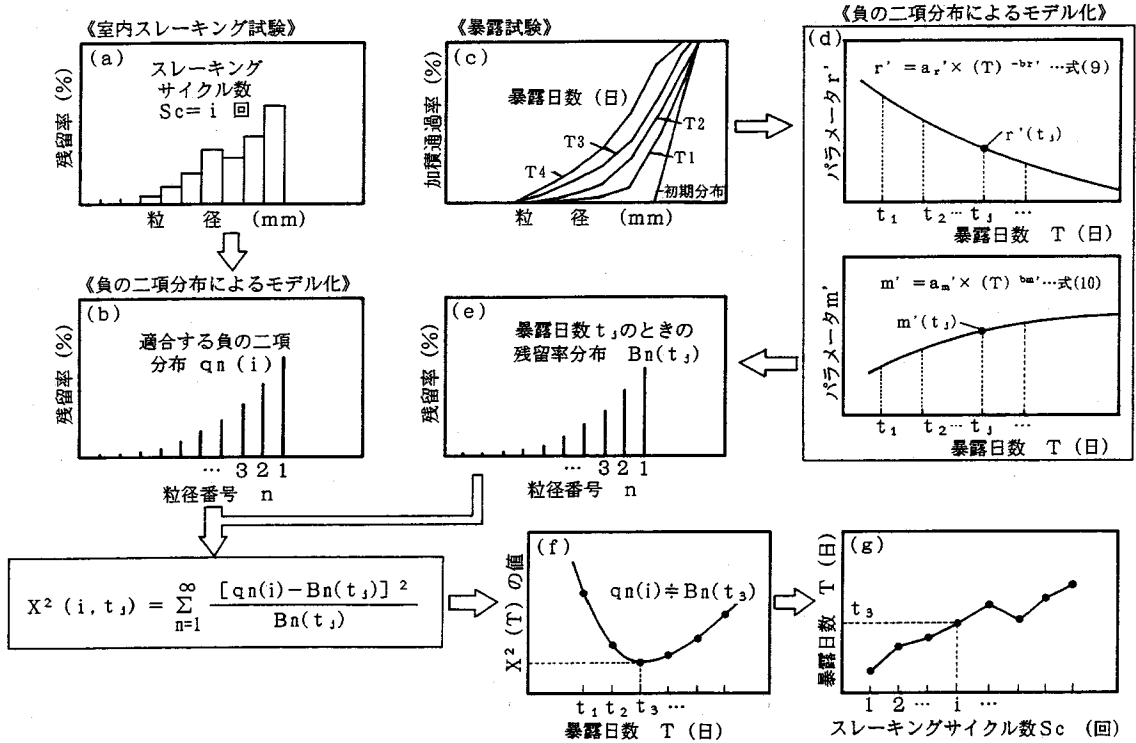


図-1 負の二項分布に基づく方法 (模式図)

50%径や2mm通過率に基づいた暴露日数 T (日) とスレーキングサイクル数 Sc (回) との関係が、式(5),(6)のように得られる。

50%径に着目した場合：

$$T = (a_d / a_d')^{-1/b_d'} \times (S_c)^{(b_d/b_d')} \quad (5)$$

2mm通過率に着目した場合：

$$T = (a_p / a_p')^{1/b_p'} \times (S_c)^{(b_p/b_p')} \quad (6)$$

なお、望月らが示した方法は、4.75, 9.5, 19mmの各ふるいの通過率 (試料最大粒径の約5, 10, 20%に相当し、これをスレーキング率と呼んでいる) に着目し、式(5), (6)と同様の形式で表現していることになる。ただし、暴露日数 T の代わりに降水量1mmあるいは2mm以上の降雨日数 N_R を用いている^{12), 13)}。

(2) 負の二項分布に基づく方法

さらに著者らは、軟岩の室内スレーキング試験ならびに暴露試験によって細粒化した後の粒径の残留率分布が負の二項分布で表現できることを示している。また、その分布パラメータ r , m がスレーキン

グサイクル数 Sc や暴露日数 T とともに一定の傾向で変化し、式(7)~(10)で多くの場合相関性が高く、比較的よく近似できることを示している^{11), 2)}。

室内スレーキング試験の場合：

$$r = a_r \times (S_c)^{-b_r} \quad (7)$$

$$m = a_m \times (S_c)^{b_m} \quad (8)$$

暴露試験の場合：

$$r' = a_{r'} \times (T)^{-b_{r'}} \quad (9)$$

$$m' = a_{m'} \times (T)^{b_{m'}} \quad (10)$$

ここに、 $a_r \sim b_m'$ などは回帰係数である。

なお、暴露試験については、永津らの提案のように、自然条件をモデル化して独自の乾燥・湿潤の基準に基づく方法¹⁸⁾や望月らの提案のようにある降水量以上の日数を考慮する方法^{12), 13)}が考えられる。現状では、降雨日および晴天日の基準ならびに基準とする降水量の物理的意味合いが不明確なこと、すなわち、降雨や晴天などの気象条件と供試体の湿潤・乾燥状態の関係が不明確なことが問題となる。しかしながら、数カ月から数年以上の期間を問題にするのであれば、降雨日数や降雨量の多少、乾湿繰り

表-1 5種類の軟岩の物理的性質など

軟岩名	受乞泥岩	稲積泥岩	布土泥岩	和泉頁岩	瑞浪泥岩
採取地点	北海道勇払郡	富山県水見市	愛知県常滑市	兵庫県淡路島南部	岐阜県瑞浪市
地層名	新第三紀中新世 中期受乞層	新第三紀鮮新世 前期 稲積泥岩層	新第三紀鮮新世前期 常滑層群布土累層	白亜紀 和泉層群	新第三紀中新世 瑞浪層群
暴露試験期間	平成5年7月23日 ～平成6年5月24日	平成6年5月24日 ～ 11月22日	平成6年9月23日 ～ 12月17日	平成元年11月 ～平成2年1月	平成元年12月 ～平成6年4月
自然含水比w (%)	21.8	30.1	26.7	2.03	50.2
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.48	2.65	2.69	2.75	2.58
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	-	1.881	1.965	2.44	1.65
間隙比 e	-	0.816	0.688	0.151	1.35
飽和度 Sr (%)	-	90.4	87.7	37.1	96.0
液性限界wL (%)	71.0	82.6	43.6	-	-
塑性限界wP (%)	44.3	37.9	30.3	-	-
塑性指数 IP	26.7	44.8	13.3	-	-

返し回数やその程度などが経過日数にほぼ比例すると考えられること、さらには、暴露期間や暴露条件、試料の異なる望月ら、矢萩ら、佐藤らの結果も式(9),(10)で表現できることなどを考慮して、本研究では、暴露日数T(日)そのものを用いている。

ところで、r, mは負の二項分布を表現する一組の分布パラメータであるから、50%径や2mm通過率のように、式(7)～(10)を連立して解くことはできない。そこで、室内スレーキング試験の粒度分布に最も合致する、暴露試験の粒度分布を求める方法として、図-1に示す方法を考えた。

室内スレーキング試験を行い、Sc=1,2,..., i, ...回の残留率分布が得られており、Sc=iの実測の残留率分布(同図a)に着目する。この実測分布を負の二項分布でモデル化した結果が分布q_n(i)である(同図b)。一方、同一試料の暴露試験結果(同図c)から、式(9),(10)が得られているとしよう(同図d)。いま、式(9),(10)から、任意の日数T=t_jに対応するパラメータr', m'が得られるので、暴露日数t_jのときの負の二項分布B_n(t_j)が与えられる(同図e)。そこで、両分布の相違する量を次式で計算する。

$$X^2(i, t_j) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(q_n(i) - B_n(t_j))^2}{B_n(t_j)} \quad (11)$$

ここに、Σは残留率分布の各コラムの和を意味する。この値は、式(9),(10)から予測される暴露日数t_jのときの負の二項分布とスレーキングサイクル数i回の残留率分布との相違の程度を表し、相違が激し

い程、大きな値を示すことになる。そこで、種々の暴露日数T=t₁, t₂, t₃...に対して同様の計算を行うと、同図(f)のようなX²の値と暴露日数Tとの関係が得られる。この図では、スレーキングサイクルSc=i回の残留率分布q_n(i)が暴露日数T=t₃(日)と仮定したときの負の二項分布B_n(t₃)に最も近いことを示している。室内スレーキング試験のその他のサイクル数の結果についても、同様の計算ができる。したがって、室内スレーキング試験でのモデル粒度分布が、暴露試験で予想される粒度分布と最も良く合致する場合のSc~T関係が得られることになる(同図g)。

上述の方法は、室内スレーキング試験の実測分布のモデルq_n(i)に対して示してあるが、実測の残留率分布に対しても、同様に行うことができる。

4. 提案する手法の検討

上述した室内スレーキング試験と暴露試験の結果を比較する手法を検討するために、参考文献1), 2)に示してある受乞泥岩、和泉頁岩、瑞浪泥岩の試験結果を用いて分析した。また、新たに、富山県水見市から採取した稲積泥岩、愛知県常滑市から採取した布土泥岩を用いて両試験を実施した。

試験方法などは、参考文献2)の受乞泥岩の場合と同様であるが、稲積泥岩の場合、室内スレーキング回数Scは1~6および10回、暴露期間は平成6年5月24日~11月22日の間であり暴露日数Tは5,19,40,59,97,136,182日となった。また、布土泥

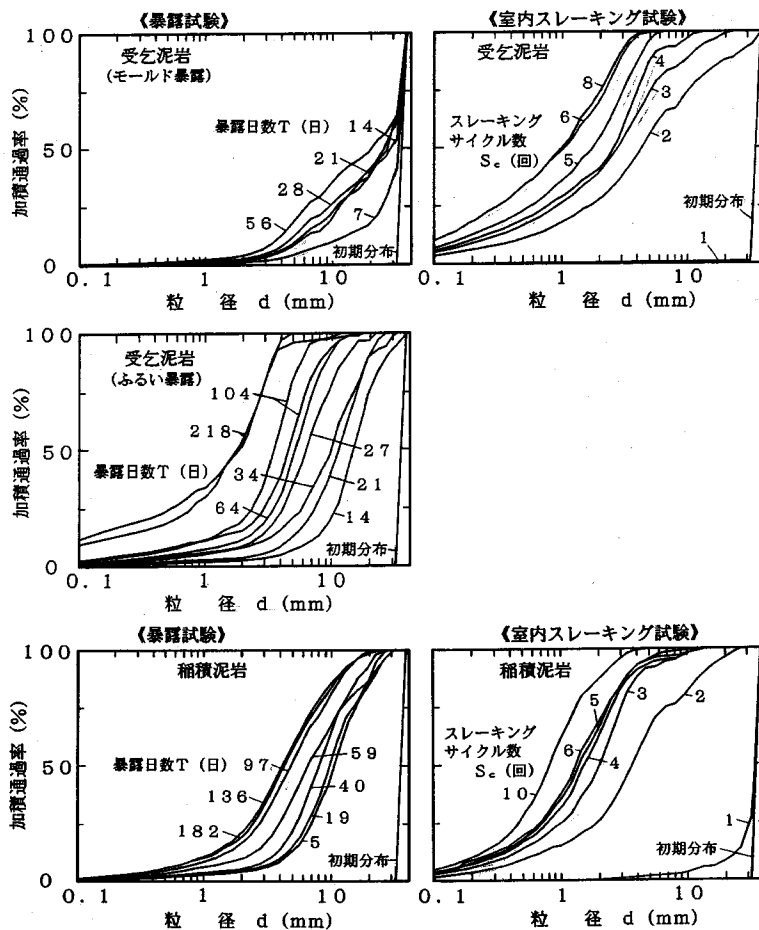


図-2 (a) 解析した粒径加積曲線

岩では、 $S_c = 1 \sim 10$ 回、暴露期間は平成6年9月23日～12月17日の間の $T = 3, 17, 39, 85$ 日となった。

したがって、本論文で取り扱う軟岩は、受乞泥岩、稲積泥岩、布土泥岩、和泉頁岩（望月ら）、瑞浪泥岩（佐藤ら）の5種類である。これらの5種類の軟岩の採取地点、地層名、暴露期間、物理的性質を表-1に示してある。なお、受乞泥岩では、亀裂が多く供試体の成形が困難であったため、試料の湿潤密度が測定できなかった。

図-2 (a), (b)には、室内スレーキング試験および暴露試験の結果の粒径加積曲線を示してある。なお、受乞泥岩については、文献2)のCBR試験用モールドによる暴露試験結果である、A, B, Cシリーズの結果にはばらつきが認められるが、ほぼ同様の

傾向を示している。そこで、これらの解析に当たっては、それらのデータを一組にまとめた（以下では、この結果を受乞泥岩モールド暴露と記す）。また、この泥岩のふるい上での暴露試験結果であるDシリーズの結果は、細粒化の進行速度が前者と大きく異なるので別個に取り扱った（以下では、この結果を受乞泥岩ふるい暴露と記す）。

なお、ここで取り扱う暴露試験の結果は、ほぼ均一の初期粒度のCBR試験用モールドあるいはふるい容器を用いた供試体であるので、ここで得られる $S_c \sim T$ 関係は、比較的地盤表層部の細粒化状況を再現しているものと考えられる。さらに、地盤深部の環境条件に応じた暴露試験や締固め後の粒度を考慮した暴露試験などを実施すれば、ここに提案する手法を用いることにより、そのような条件下での

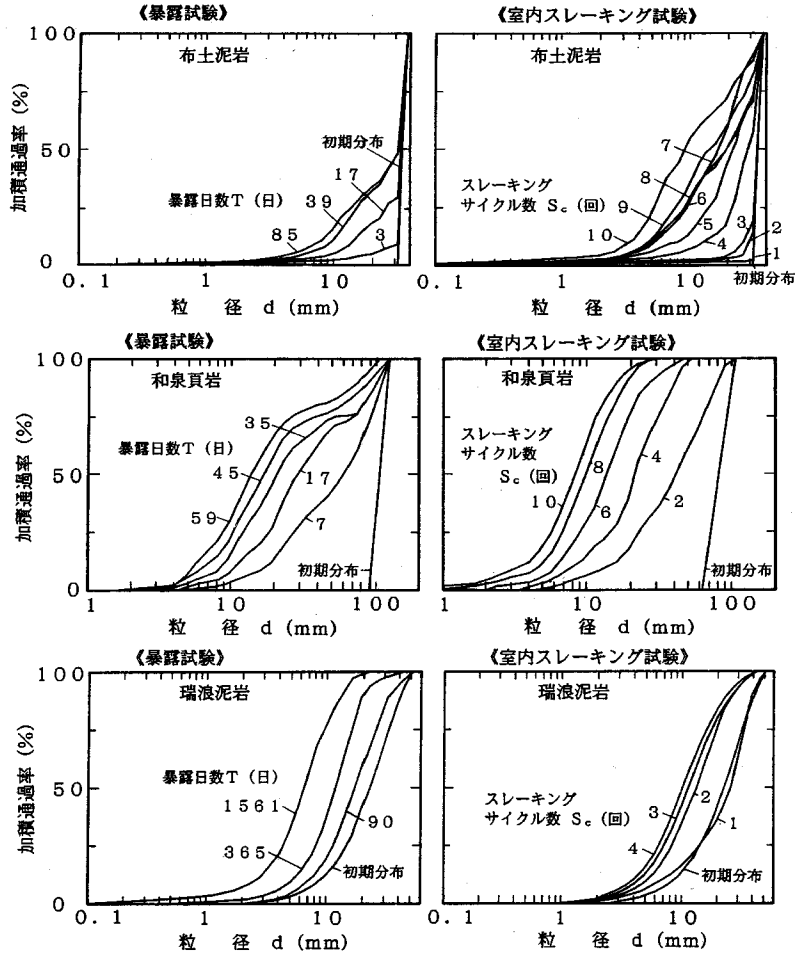


図-2 (b) 解析した粒径加積曲線

表-2 50%径と2mm通過率の回帰分析結果

回帰係数		軟岩名					
		受乞泥岩	稲積泥岩	布土泥岩	和泉頁岩	瑞浪泥岩	
室内スレーキング	a_r	0.942	0.915	0.983	4.686	0.668	
	b_r	0.260	0.441	0.090	2.576	0.311	
	データ数	14	8	11	3	4	
	相関係数	-0.899	-0.945	-0.928	-0.950	-0.900	
	a_m	1.939	2.377	0.010	0.152	2.435	
	b_m	1.125	1.367	2.330	4.151	1.210	
データ数	12	6	11	3	4		
相関係数	0.838	0.954	0.970	0.987	0.924		
暴露試験	a_r'	モット暴露 0.875	ふるい暴露 0.753	0.676	0.944	0.847	0.539
	b_r'	0.00767	0.0365	0.00053	0.0190	0.0728	0.0338
	データ数	17	9	7	4	5	3
	相関係数	-0.661	-0.359	-0.0144	-0.886	-0.807	-0.442
	a_m'	0.272	0.745	2.465	0.023	0.578	1.832
	b_m'	0.352	0.514	0.175	0.716	0.596	0.301
データ数	17	9	7	4	5	3	
相関係数	0.850	0.843	0.798	0.972	0.957	0.929	

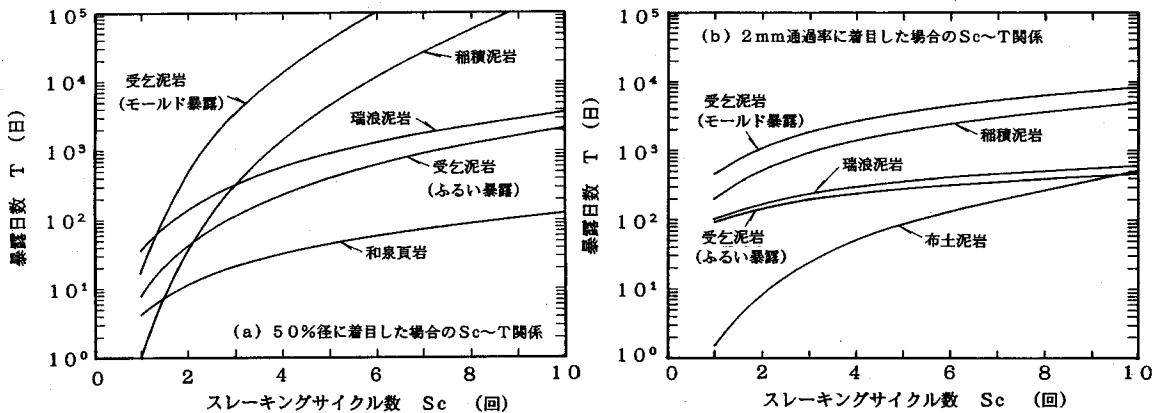


図-3 暴露日数とサイクル数との関係 (50%径と2mm通過率に基づく場合)

Sc~T関係を得ることができると考えている。一般的には、地盤表層部が最も環境変化の激しい場所と考えられるから、ここで得られる結果は、最も短い暴露日数を与えることが予想される。

(1) 50%径と2mm通過率に基づく方法の検討

上記の各軟岩について、式(1)~(4)の回帰係数と相関係数を、表-2にまとめて示した。これらの係数を基にして、式(5),(6)を図示すると、図-3が得られる。同図(a)は50%径に着目した場合、同図(b)は2mm通過率に着目した場合である。布土泥岩では、暴露期間中に50%径があまり低下しない(係数 $b_{a'}$ がゼロに近い)ために、図上に表せない。和泉頁岩では、初期粒度が大きく、2mm通過率の増加量の小さいことが原因となって、2mm通過率に関する回帰式が得られていないため、示すことができない。

これらの図より、Scの増加とともにTが増加する傾向が明らかとなる。しかしながら、同一の試料であっても、50%径に着目した場合と2mm通過率に着目した場合とで、異なるSc~T関係の得られることがわかる。ここに得られた結果の一般的な傾向として、Scが2~4サイクル以下の場合には、 d_{50} から予測される暴露日数の方が p_2 から予測される値よりも小さくなっている。それ以上のサイクル数になると、逆の傾向が現れている。

同図(a)では、受乞泥岩(モールド暴露)と稲積泥岩のみが、暴露日数の大きな増加傾向を示している。これは室内スレーキング試験によって、 d_{50} が大きく減少する割には、暴露試験において d_{50} がさほど減少しないために、大きな暴露日数を予測す

ることになっている。また、軟岩の種類によってもSc~T関係が大きく異なっている。例えば、日本道路公団試験法で決められている5サイクルに着目すると、暴露日数は和泉頁岩の46日から受乞泥岩の41,800日となっており、900倍以上の相違になっている。

スレーキングサイクルが3回以上であれば、暴露日数が大きくなるのは、受乞泥岩(モールド暴露)、稲積泥岩、瑞浪泥岩、受乞泥岩(ふるい暴露)、布土泥岩、和泉頁岩の順序となっている。ただし、このSc~T関係は、各軟岩の室内スレーキング試験と暴露試験による粒度変化の比較から求めたものであるため(すなわち、基準とする室内スレーキング結果が軟岩によって異なるので)、暴露試験において大きく粒度変化する軟岩が必ずしも小さな暴露日数を示すわけではないことに注意が必要である。

一方、受乞泥岩については、モールドに詰めた供試体の暴露試験とふるい上での暴露試験を実施しているため、同一の室内スレーキング試験結果と比較することによって、暴露供試体の相違による結果の違いが明らかになる。すなわち、ふるい暴露の方が粒度変化が激しく生じるため、同一のスレーキングサイクル数に対して、一、二桁小さな暴露日数を予測することになっている。

(2) 負の二項分布に基づく方法の検討

上記の各軟岩について、式(7)~(10)の回帰係数と相関係数を、表-3にまとめて示した。また、受乞泥岩(ふるい暴露)について、図-1の模式図に示した計算結果を、図-4に示した。図から明らかのように、各室内スレーキング試験結果に対して、

表-3 負の二項分布パラメータの回帰分析結果

回帰係数		軟岩名					
		受乞泥岩	稻積泥岩	布土泥岩	和泉頁岩	瑞浪泥岩	
室内スレーキング	a_d	20.86	20.08	46.42	83.72	24.04	
	b_d	1.695	1.545	0.492	1.010	0.688	
	データ数	14	11	11	5	4	
	相関係数	-0.928	-0.949	-0.836	-0.999	-0.975	
	a_p	19.18	19.85	0.655	-	0.451	
	b_p	0.696	0.721	0.709	-	0.771	
データ数	12	9	11	-	4		
相関係数	0.902	0.940	0.946	-	0.954		
暴露試験	a_d'	56.50	88.62	19.88	34.99	214.0	81.88
	b_d'	0.350	0.697	0.298	0.023	0.670	0.342
	データ数	17	9	7	4	5	3
	相関係数	-0.866	-0.966	-0.939	-0.943	-0.996	-0.993
	a_p'	0.621	0.196	1.255	0.582	0.014	0.004
	b_p'	0.558	1.014	0.521	0.282	0.766	1.018
データ数	17	9	7	4	3	2	
相関係数	0.870	0.977	0.911	0.984	0.855	1.000	

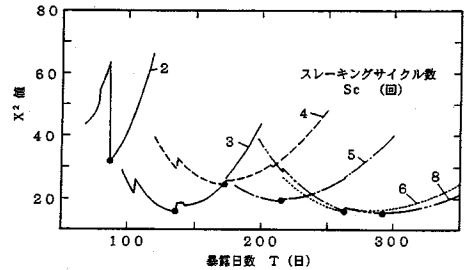


図-4 X^2 値と暴露日数との関係

X^2 値が最小となる暴露日数の存在することがわかる。なお、一つのスレーキングサイクル数の X^2 値～暴露日数 T の関係において X^2 値が急変する原因は、比較する残留率分布 $q_n(i)$, $B_n(t_i)$ のコラム数が変わるためである。また、スレーキングサイクル数が少ない段階で粒度変化がわずかしか生じない場合には、比較すべき粒度分布 $q_n(i)$ と $B_n(t_i)$ の位置が大きく異なってしまうことが原因となって、最小となる X^2 値の大きくなる場合が2, 3例あった。その他の軟岩の場合もほぼ同様の関係を示している。また、そのパラメータが式(7)～(10)で表される理論分布との比較を行っても、図-4と同様の関係が得られた。

そこで、各スレーキング回数 S_c と、 X^2 値が最小となる暴露日数 T との関係を示すと、図-5が得られる。同図(a)は室内スレーキング試験結果の実測残留率分布に基づいた場合である。室内試験結果のある位置を記号で示し、それぞれを直線で結んで示してある。実測の粒度分布が、サイクル数とともに細粒側に移動しない場合がわずかにあるので、 S_c とともに T が増加しない場合も数箇所に見られる。また、 S_c が小さい場合に、関係が示されていないのは、計算される最小の X^2 値が大きくなった場合である。なお、受乞泥岩では、2シリーズの室内スレーキング試験を実施しているので、 T の範囲をハッチングで示してある。

この関係は、軟岩の種類により異なる関係を示しているが、全体的傾向は、 S_c とともに T が増加している。暴露日数が大きく予測される順序は、受乞

泥岩、稻積泥岩、瑞浪泥岩、布土泥岩、和泉頁岩となっている。例えば、5サイクルの暴露日数を見ると、和泉頁岩の53日から受乞泥岩と稻積泥岩の2,200日となっており、約40倍の相違が現れている。ただし、瑞浪泥岩の1サイクルと稻積泥岩の2サイクルの場合を除けば、この $S_c \sim T$ 関係が図上でほぼ同じ勾配を示していることは、興味深い。

同図(b)は、実測残留率のモデル分布 $q_n(i)$ に関する回帰式(7),(8)に基づいた $S_c \sim T$ 関係を示している。この場合には、図(a)と異なり、任意回数の室内スレーキング試験に対して暴露日数 T が得られるので、なめらかな曲線で示してある。回帰式の近似の程度が高いため、これらの曲線は、実測値に近い関係を示している。

なお、受乞泥岩のモールド暴露とふるい暴露の結果を比較すると、細粒化の激しく生じるふるい暴露の方が一桁小さな暴露日数を予測することになっている。

5. 提案する手法と望月らの方法との比較

(1) 提案する手法の比較と考察

以上の結果より、50%径や2mm通過率などの粒径加積曲線上の一点による評価では、同一の軟岩であっても、50%径の減少傾向や2mm通過率の増加傾向が室内スレーキング試験と暴露試験とで異なるため、式(5),(6)で得られる $S_c \sim T$ 関係が大きく異なってくる。したがって、原位置において問題となる粒度の対象が、粒度の平均値であるのか、細粒分

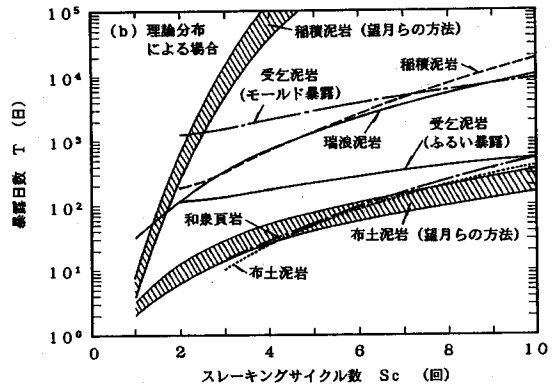
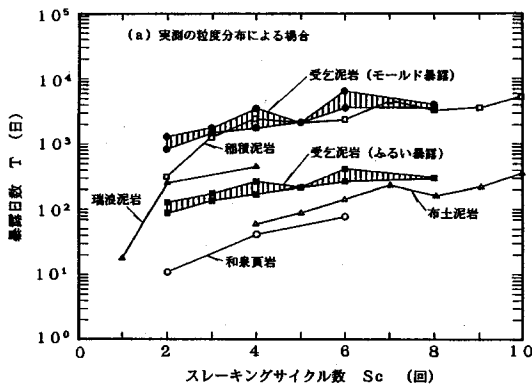


図-5 暴露日数とサイクル数との関係 (負の二項分布に基づく方法)

の増加量であるのかを明確にして、両式を区別して利用する必要のあることがわかる。一方、負の二項分布に基づく方法は、残留率分布の平均と分散の両者を考慮しているので、残留率の分布形全体の移動を反映している。

図-3と図-5を比較することにより、5種類の軟岩について、暴露日数の3通りの予測方法の特徴がわかる。すなわち、負の二項分布に基づく方法の結果は、すべての軟岩とも、2mm通過率に基づく方法とほぼ同じ関係を示している。一方、50%径に基づく方法との関係では、軟岩により異なり、受乞泥岩と稲積泥岩の場合には大きく異なる関係を示し、和泉頁岩と瑞浪泥岩の場合にはほぼ同様の関係を示している。

こうした相違の現れる主原因は、各軟岩のスレーキングに伴う細粒化挙動の相違、気象条件の変化を暴露日数のみで表現していることなどが考えられる。今後、種々の自然軟岩や人工軟岩の供試体を用いた異なる気象条件下での暴露試験を実施するとともに、軟岩の物理的性質、岩種・岩級などとの関係さらには各手法の適用性・限界性を明確にする必要がある。

(2) 望月らの方法との比較と考察

布土泥岩と稲積泥岩について、望月らが提案した方法に基づいて整理した結果を、図-6に示してある。この図の横軸には、日降水量2mm以上の降雨日数 N_{R2} (日)が取ってある。また、これらの試料の最大粒径は37.5mmであるので、そのほぼ5, 10, 20%に相当する粒径の2, 4, 8mmの加積通過率に着目している。なお、横軸の括弧内の数値は各降雨

日数に対する実日数 T (日)を示している。この暴露期間では多くの場合、4~6日に一度の降雨となっていることがわかる。これらの泥岩についても、望月らが示している式(12)の関係が認められる。その回帰分析の結果が図中に示してある。

$$Sc = a_R \cdot N_{R2}^{b_R} \quad (12)$$

ただし、望月らの試料の係数 a_R は0.92~1.03の範囲、係数 b_R は0.63~0.83の範囲を示しているが、布土泥岩と稲積泥岩では、この範囲から外れた値を示している。なお、日降水量が4mm, 8mm以上の日数を取った場合の整理も行ったが、係数 a_R はほとんど変わらず、係数 b_R がわずかに大きくなるのみで、ほぼ同様の回帰式が得られている。

図-6に示した関係式に基づけば、室内スレーキングサイクル数 Sc に対応する N_{R2} が求められる。また、両泥岩の暴露期間中の降雨パターンから実日数 T は N_{R2} を4~6倍すれば得られることがわかっていて、そこで、その関係を求めた結果が、図-5(b)のハッチングの領域で示してある。

望月らの結果と著者らが提案する結果とを比較すると、布土泥岩の場合には、比較的類似した $Sc \sim T$ 関係になっていることは興味深い。一方、稲積泥岩の場合には、まったく異なる $Sc \sim T$ 関係を示し、望月らの方法で求めた暴露日数は大きな増加傾向を示している。

こうした相違が現れた原因は、図-2の粒径加積曲線(暴露試験と室内スレーキング試験)の比較ならびに図-6の $Sc \sim N_{R2}$ 関係から推定することができる。

布土泥岩の場合には、粒径2mmの加積通過率が、室内スレーキング試験と暴露試験の結果において、

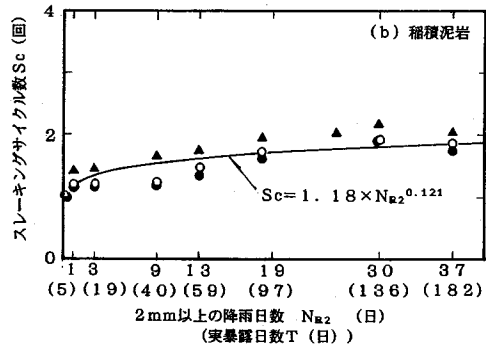
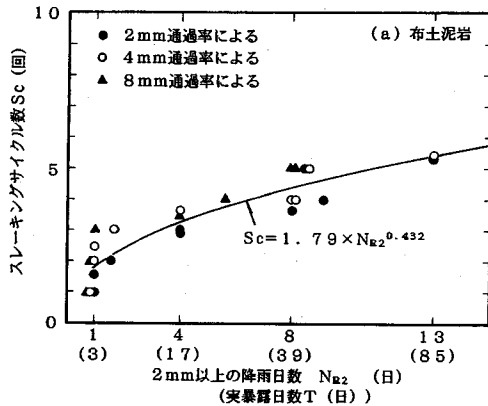


図-6 サイクル数と降雨日数との関係(望月らの方法)

ほぼ同程度に増加している。そのため、 N_{R2} の増加に対して S_c の増加も比較的明確に現れており、5 サイクル程度までは、実測値がプロットされている(図-6(a))。その結果、室内スレーキング試験と暴露試験の比較はデータの内挿的な比較が主となり、著者らと望月らの方法ではほぼ同様の結果が得られたものと考えられる。したがって、このようなデータの場合には、暴露期間の代表値に実日数を取っても、降雨日数を取ってもよいことがわかる。

一方、稲積泥岩の場合には、室内スレーキング試験による粒径 2mm の加積通過率は 3 サイクルまでに急増する。しかし、暴露試験では 59 日経過しても、室内スレーキング試験の結果と比較するとさほど大きくはなっていない。そのため、 N_{R2} に対して S_c の値は 1~2 サイクルの間にしかプロットされていない(図6-(b))。なお、以上のことは受圧泥岩についても同様である。その結果、 S_c が 2 サイクル以上ではデータの外挿的な推定になってしまうため、予測方法の相違によって、 $S_c \sim T$ 関係が大きく異なってくるものと考えられる。すなわち、室内スレーキング試験による細粒化の程度が激しい割には、暴露試験の期間が短すぎるのが主原因であり、さらに、長期間の暴露試験を実施すれば、布土泥岩のような内挿的な比較になり、一致した傾向が求められるものと予測される。

しかしながら、実際の軟岩を対象とした施工計画段階においては、それ程長期間の暴露試験を実施することは不可能に近い。したがって、稲積泥岩に見られるような、予測結果の相違は重要な問題と考えられる。また、室内スレーキング試験のサイクル数や暴露試験の期間などは、軟岩試料のスレーキング特性に依存するので、種々の軟岩を用いた今後の究

明が必要である。

6. あとがき

本研究では、軟岩の室内スレーキング試験の位置付けを明確にすることを目的として、同一の軟岩に対して室内スレーキング試験と暴露試験を実施した。また、過去の文献データも整理し、両試験法の結果の比較手法の提案を行った。

本研究で得られた結論を要約すれば、以下のようになる。

- (1) 暴露試験ならびに室内スレーキング試験において、同程度の粒度変化を示す軟岩については、50% 径や 2mm 通過率に着目して、室内スレーキングサイクル数 S_c と暴露日数 T との対応関係を明確にすることができた。その $S_c \sim T$ 関係は、軟岩の種類によって異なるだけではなく、着目する指標によっても異なるので、現場における粒度変化の対象(平均粒径の減少、細粒分の増加)を考慮する必要がある。
- (2) 細粒化に伴う粒度変化に対して、負の二項分布を当てはめ、暴露試験と室内スレーキング試験の結果を比較する手法を提案した。さらに、その手法を 5 種類の軟岩に適用して、各軟岩の $S_c \sim T$ 関係を明らかにした。
- (3) 上記(2)の手法による $S_c \sim T$ 関係と望月らの手法による結果を比較し、その特徴を明らかにした。すなわち、室内スレーキング試験と暴露試験とで、ほぼ同程度の細粒化を示す軟岩の場合には、 $S_c \sim T$ 関係は内挿的な予測が主となるため、両手法でほぼ同様の関係が得られた。その逆の場合には、ここに提案する手法に基づく

S c ~ T 関係は外挿的な予測となるため、両予測手法で異なる結果を得た。この点に関しては、今後の研究が必要である。

なお、試料採取や実験・データ解析に当たっては、(株)ガイアートクマガイの山本正樹氏、内藤充則氏、東邦ガス(株)の丹羽知紀氏、不動建設(株)の中角功氏、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) 板橋一雄, 佐藤健, 森富雄, 和田英孝: 軟岩の室内スレーキング試験に伴う細粒化の表現法, 土木学会論文集, No.505/ III -29, pp.181-190,1994.
- 2) 板橋一雄, 佐藤健, 森富雄, 岩田賢: 軟岩の暴露試験と細粒化の表現法, 土木学会論文集, No.523/ III -32, pp.19-29,1995.
- 3) 片岡哲之, 池見元宣, 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.
- 4) 島博保, 今川史郎: 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.
- 5) 金丸正雄, 中崎英彦, 上田貴夫: ぜい弱岩盛土材料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.
- 6) 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.

- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 福岡秀基, 小西武, 村沢謙, 名草俊比古, 新津誠: 返り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.
- 12) 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.
- 13) 望月秋利, 片岡昌裕, 坂口理, 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.
- 14) 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整理法, 土木学会論文集 No.487 / III -26, pp.69-77,1994.
- 15) 矢萩賢仁, 豊田光雄, 中村昭: 岩石質材料の原位暴露試験, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.611-615,1993.
- 16) 永津忠治, 鶴田正治, 深池正樹: ロックフィルダム用岩石質材料の劣化環境モデル化について, 土木学会第49回年次学術講演会第3部, pp.668-669,1994.
- 17) 永津忠治, 鶴田正治, 深池正樹: ロックフィルダム用岩石質材料の室内試験による耐久性評価について, 土木学会第49回年次学術講演会第3部, pp.670-671, 1994.

(1995. 5. 12 受付)

A SUGGESTION FOR THE COMPARISON METHODS OF AN AMOUNT OF THE PARTICLE BREAKAGE BY THE IN-SITU EXPOSURE AND LABOLATORY SLAKING TESTS OF A SOFT ROCK

Kazuo ITABASHI, Takeshi SATO, Tomio MORI and Masaru IWATA

Because the test conditions about the laboratory slaking test of a soft rock are decided by a standpoint of the unification and/or the simplicity, it is not clear whether these test conditions in the laboratory reflect the climate condition. Then the laboratory slaking and in-situ exposure tests used to 3 soft rocks are carried out, and 2 test results in another paper are analyzed in this study. The authors suggested two comparison methods of these test results. One is based on the representative value of the grain size distributions. The other is based on the transfer rule about the parameter of a negative binomial distribution. To apply these suggested methods to the test results of 5 soft rocks, the relation between the slaking cycles in the laboratory and the exposure time in climate are cleared.