

# 軟岩の暴露試験と細粒化の表現法

板橋一雄<sup>1</sup>・佐藤 健<sup>2</sup>・森 富雄<sup>3</sup>・岩田 賢<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

<sup>3</sup>正会員 名城大学大学院理工学研究科 博士課程

<sup>4</sup>学生員 名城大学大学院理工学研究科 修士課程

軟岩は自然の乾湿繰返しによって細粒化することが知られている。しかしながら、自然の暴露条件下での細粒化過程のルールは明確にされているとは言い難い。それは、細粒化の評価方法が種々あることや、軟岩の暴露試験がさほど実施されていないことが主原因と考えられる。そこで、著者が提案する軟岩の粒子破碎指標の適否を検討するために、種々の条件下での暴露試験を実施するとともに、文献資料の分析を行った。その結果、暴露試験に伴う種々の粒子破碎指標の経時的变化が明らかになった。また、試料や試験条件が異なるにもかかわらず、負の二項分布のパラメータ間に特異な関係が認められた。

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

## 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軟岩は施工材料として利用されてこなかった。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ため、自然の乾湿繰返しによって細粒化する岩石材料も施工材料として積極的に利用するようになってきた<sup>1)・2)</sup>。こうした場合には、細粒化の有無やその程度を検討するために、一般的には室内スレーキング試験が実施される。その試験方法や評価方法には、種々の提案がなされている。一般には、水浸放置した試料を目視観察して崩壊度をランク分けする方法<sup>3)・4)</sup>、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残留率や加積通過率で評価する方法<sup>5)・6)</sup>などが採用されている。後者の方法では、軟岩のスレーキングを促進させるために、一般に110℃1日の炉乾燥が行われる。こうした室内試験条件は、試験の統一化・簡便さの観点から決められたもので、自然の乾湿条件を反映しているかは明確にされてはいない。

その原因は、従来は軟岩の細粒化の発生の有無のみに主眼が置かれてきたこと、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、暴露試験と室内スレーキング試験の比較がさほど行わ

れてこなかったことなどが挙げられる。さらに、暴露試験では、試料に乾湿を生じさせる外的要因のコントロールができないため、試料の各時点の乾燥・湿潤の状態が異なり、気象条件と試料の状態変化との関係が明確にされてこなかったことも原因の一つと考えられる。

そこで本研究では、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最終目的として、今までに行われた暴露試験の文献を収集し、その結果を再整理した。また、新たに4組の暴露試験(最長218日の暴露)を実施し、軟岩供試体のスレーキング特性を明らかにした。その際の細粒化の程度を表現する方法に、著者が前報<sup>7)</sup>で示した粒径加積曲線に基づく種々の方法を適用し、粒子破碎指標の経時変化も明らかにした。

## 2. 従来の暴露試験と粒子破碎指標

### (1) 従来の暴露試験に関する研究

自然条件の下で軟岩の暴露試験を実施し、その細粒化の程度を粒径加積曲線で表現した報告例はさほど多くはない。

片岡ら<sup>8)</sup>は金網製容器に入れた頁岩(C<sub>H</sub>級)を、気中状態ならびに水中状態で1カ月間電力中央研究

表-1 供試体の初期状態

シリーズ	供試体数	初期湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )		初期間隙比	
		最大値~最小値	平均値	最小値~最大値	平均値
A	5	0.888~0.919	0.922	2.078~2.400	2.279
B	7	0.874~0.946	0.911	2.192~2.357	2.319
C	3	0.942~0.962	0.953	2.160~2.206	2.169

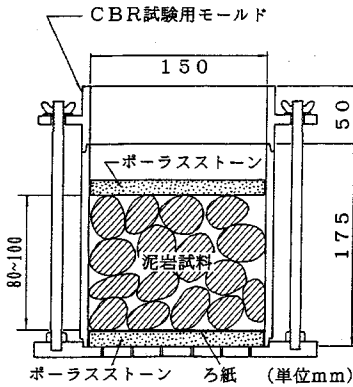


図-1 暴露試験用CBR供試体

所の屋上に放置する暴露試験を実施し、粒径加積曲線の変化を求めている。初期の粒度分布は2~101.6 mmであり、気中で暴露した方が細粒化の激しいことを示している。また、試験前後の残留率差の絶対値の総和を破砕率と定義し、吸水率との関係を示している。

望月ら<sup>9)</sup>は、淡路島の和泉層群から採取した頁岩を、水の溜らない容器に置き、暴露試験を実施している。初期の粒径は約100mmであり、平成元年11月から平成2年1月の間の59日間の暴露を行い、暴露日数7,17,35,45,59日の5段階の粒度分布を求めている。あるふるいの通過質量百分率をスレーキング率と定義し、降雨日数との関係を示している。また、望月らは、同一試料に対して室内スレーキング試験を実施し、室内の乾湿線返し回数と降雨日数との対応関係を求めるという、興味ある研究を行っている。

矢萩ら<sup>10)</sup>は、中世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。暴露試験では、粒度調整した片岩材料で築造した盛土の暴露（盛立暴露試験と呼んでいる）、各粒径毎の粒子の暴露、3~8kgの岩塊の暴露を行っている。そして、盛立暴露試験では、ほぼ半年~1年間隔で粒度分布を求め、Marsalの破砕率が低下する経時変化を示している。

佐藤ら<sup>11)</sup>は、岐阜県瑞浪市から採取した通称瑞浪泥岩を用い、バットに岩塊を載せ、岐阜大学の屋上に放置する暴露試験を実施し、3カ月と1年後の粒度を求めている。また、種々の条件下の室内スレーキング試験を実施しており、各種の粒子破碎指標に基づいて、暴露試験との対応関係を示している。

その他、軟岩の暴露に関連する研究として、自然斜面の風化程度を評価する研究<sup>12), 13)</sup>、や化学的な風化メカニズムの調査・研究<sup>14)</sup>など、種々の貴重な研究がなされている。

## (2) スレーキングに伴う粒子破碎指標の変化

著者らの前報<sup>7)</sup>では、種々の土質材料に対して提案されている粒子破碎指標をまとめている。また、12種類の軟岩の室内スレーキング試験結果に対して、比較的容易に求められる粒径加積曲線に着目して、①50%径、②2mm通過率、③均等係数、④残留率差の絶対値の総和、⑤負の二項分布パラメータ、の5つを取り上げ、それらの変化傾向を明らかにしている。特に、スレーキングが激しく生じる軟岩については、50%径、2mm通過率や負の二項分布パラメータとスレーキングサイクル数との間に一定の関係が認められること、負の二項分布パラメータrとmとの間に特異な関係が認められることを明らかにしている。なお、上述した、望月らと矢萩らの暴露試験結果は、図からデータを読みとり、後述する解析に利用した。また、佐藤らの結果には、今回さらに約4年3カ月間放置した試料の解析結果も付加している。

## 3. 試験試料と暴露試験方法

### (1) 試験試料

試験用試料は北海道勇払郡の道路工事現場から採取した。現場では、掘削深度5m程度であり、風化していない健全な泥岩が現れていた。その泥岩を大型掘削機やリッパ等で一辺30~40cmのブロック状にして採取した。この泥岩は地質学的には、新第三紀の受乞泥岩であり、現場の自然含水比は21.80%、細粒化した土粒子の密度は2.48g/cm<sup>3</sup>、液性限界、塑性限界はそれぞれ70.98、44.28%であった。

実験室に搬入したブロック試料を、所定の粒径になるように、ハンマーや直ナイフなどで立方体状に

分割し、粒径が31.5～37.5mmとなる泥岩小塊を作製した。

## (2) 試験方法

暴露試験では、自然地盤を想定して、供試体への降雨の自然給排水が容易なることを考慮して、容器としてCBR試験用モールド（内径150mm、高さ175mm、カラー高さ50mm）とふるい容器（標準網ふるい、目開き1mm以下）の両者を用いた。試料の細粒化によって容器から試料が流出しないように、前者の容器では、モールド底部にポーラスストーンとろ紙を、後者の容器では、ろ紙のみを敷いた。

また、CBR試験用モールドでは、泥岩小塊約30個を3～4層、供試体高さ約80～100mm程度になるように、手で敷き詰めた。さらに、上部ポーラスストーンを載せ、実験供試体（図-1）とし、供試体の初期質量と高さを測定した。このような供試体を15体作製したが、その初期状態を表-1に示した。なお、シリーズA、B、Cは後述する暴露期間の異なる供試体を表している。表には初期含水比21.80%、土粒子密度2.48g/cm<sup>3</sup>とした場合の初期空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、湿潤密度が狭い範囲に入っており、同程度の供試体が作製できたものと思われる。

一方、ふるい容器では、泥岩小塊を一層に敷きならべ、すべての泥岩小塊に直接、日光や降雨が当たるようにし、7個の供試体を作製した。

CBR試験用モールドに詰めた試料の暴露試験では、供試体上面には日光や降雨が直接当たるため、供試体下部と比較すると厳しい暴露条件となる。したがって、試料の細粒化は供試体上面から始まり、下方に進展する。さらに、供試体上面の試料の細粒化が進み、上面に細粒な層が形成されると、下部の試料の乾燥・湿潤の変化度合いを低下させるため、細粒化速度を遅らせることが予想される。一方、ふるい容器の場合には、モールドに詰めた供試体より、細粒化の進展速度が早くなる可能性がある。このような比較を行うために、両者の容器を用いた。

さらに、ある層厚の地盤を想定すれば、その乾湿繰返し条件は、モールド供試体に類似していること、体積変化・質量変化が容易に測定できること、室内スレーキング試験と比較することなどを考え、CBR試験用モールドを用いている。

CBR試験用モールドを用いた暴露試験では、供試体の上部ポーラスストーンを外した状態で、直射

日光や降雨が当たる場所（名城大学内）に放置して実施した。暴露日数は7,14,21,28,56日（平成5年7月23日～9月17日）の1組、暴露日数4,7,14,21,56,98,166日（平成5年9月15日～平成6年2月28日）の1組、暴露日数14,105,216日（平成5年10月20日～平成6年5月23日）の1組の3シリーズの実験を行った。以下では、これらのシリーズの試験を、A、B、Cシリーズとして示す。また、ふるい容器の供試体は、ふるい内に雨水が溜まらないように、台の上に放置し、暴露日数12,21,27,34,64,104,218日（平成5年10月19日～平成6年5月24日）とした。これをDシリーズとして示す。なお、各供試体を示す場合には、シリーズ名と暴露日数の両者を示すこととする。例えば、Aシリーズの7日暴露供試体は、A-7と示す。

暴露日数56日までは、毎日1回午後10時にA、Bシリーズの供試体についてのみ、質量と高さを測定した。供試体質量は感量0.1gの電子台ばかりを、供試体高さは最小目盛り0.05mmのノギスを用い、その時に置いた上部ポーラスストーンの深さをカラー上端から3箇所測定して計算した。

所定の暴露日数が経過した後、供試体内のすべての試料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125mm、最小ふるい目0.032mmの49個のふるい）すべてを用いてふるい分け、粒径加積曲線を得た。ふるい分けはロータップ型振とう機で一律15分間行った。なお、予備試験により、このふるい時間によってふるい残しの少ないことを確認している。また、暴露試験終了時点の天候によって、暴露試験用供試体の湿潤状態が異なるので、すべての供試体とも、室内で気乾燥した後ふるい分けを行った。なお、試験結果の解析方法は前報に示したと同様の方法を用いた。

## 4. 暴露期間中の気象条件と供試体の粒度変化

### (1) 暴露期間中の気象条件と供試体質量変化

暴露期間中の気象情報としては、直線距離で約4km離れた名古屋気象台の情報<sup>15)</sup>を利用した。気象台では、気圧、気温、露点温度、蒸気圧、相対湿度、風向、風速、日射時間、全天日射量、降水量などが毎時間ごとに記録されている。これらの内、軟岩のスレーキングに最も関係のあると思われる①降水量、②日照時間、③気温を取り上げた。なお、供試体の質量・高さの測定を毎日午前10時に行って

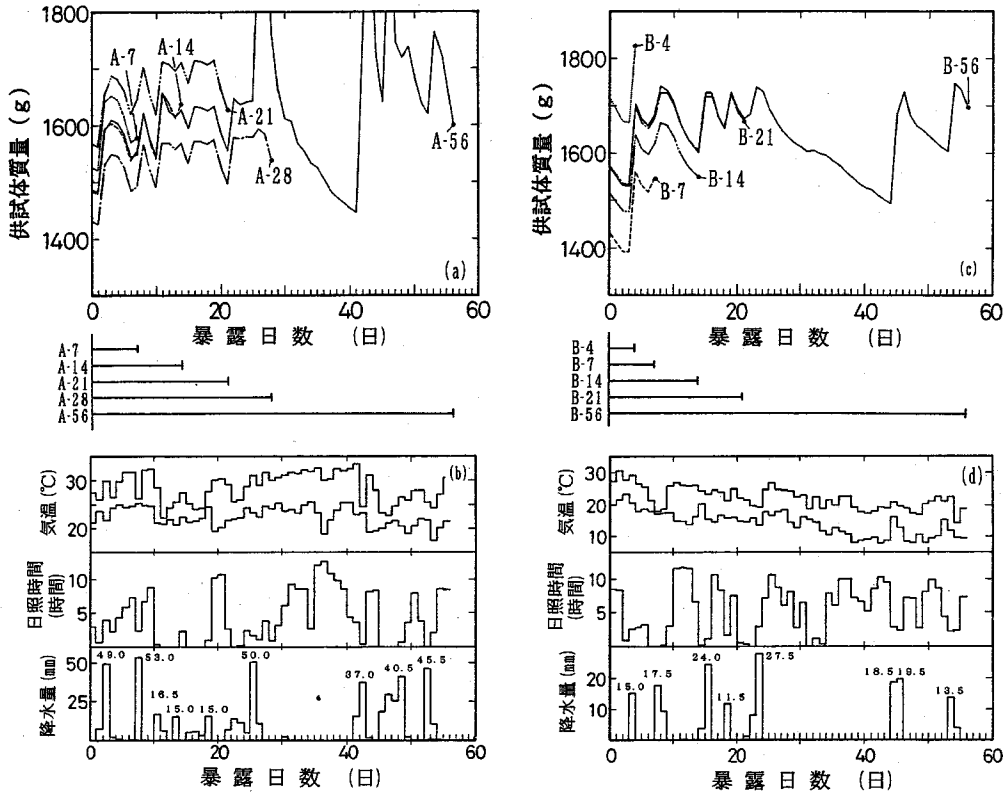


図-2 暴露試験期間の気象条件と供試体質量変化 (A, Bシリーズの暴露試験の場合)

いるので、①と②については、前日の午前10時から当日の午前10時までの1時間毎の値を合計して求めている。また、③についてもその間の最高値・最低値をとっている。

こうして求めたA, Bシリーズの初期の56日間の気象条件の変化を図-2に示してある。図中の上部には、各供試体の暴露期間が示してある。また、同図には、供試体質量変化が示してある。なお、Aシリーズで約140g, Bシリーズで約290gの質量の幅が現れたのは、供試体の初期質量の相違が原因である。これらの図より、降水量、日照時間と供試体質量との相関が読み取れる。大局的に見れば、降雨によって供試体質量は増し、降雨がなく気温も高く日照時間が長くなれば、質量の減少が認められる。ただし、日照時間、降雨量や降雨パターンの違いによって乾燥・湿潤の程度が異なるため、室内スレーキング試験で見られるような規則的な乾燥・湿潤を示しているわけではない。

## (2) 粒径加積曲線の移動

図-3は、所定の暴露日数を経過した後の粒径加積曲線を示している。個々の供試体の細粒化の相違が現われ、暴露日数の順序で粒径加積曲線が細粒側に順序よく移動しているわけではない。また、各シリーズで同様な結果になっているわけではない。

### a) Aシリーズの結果

暴露初期の明確な乾燥・湿潤の繰返しによって、A-7とA-14の両供試体は、大きく粒度分布が移動し、順序よく細粒化している。

A-21供試体は、14~16日のわずかな乾燥・湿潤と19~21日に至る乾燥を受けているのみで、14日以前の経過と比較すると、この期間には大きな乾燥・湿潤を受けていない。そのため、A-14供試体の粒度分布とほぼ同じ粒度分布となっている。同様に、A-28供試体も、14日以降には、一度の乾燥・湿潤を受けているだけで、A-14供試体の粒度分布からわずかに細粒化が進行しているのみである。一方、A-56供試体は、28日以降に初期状態

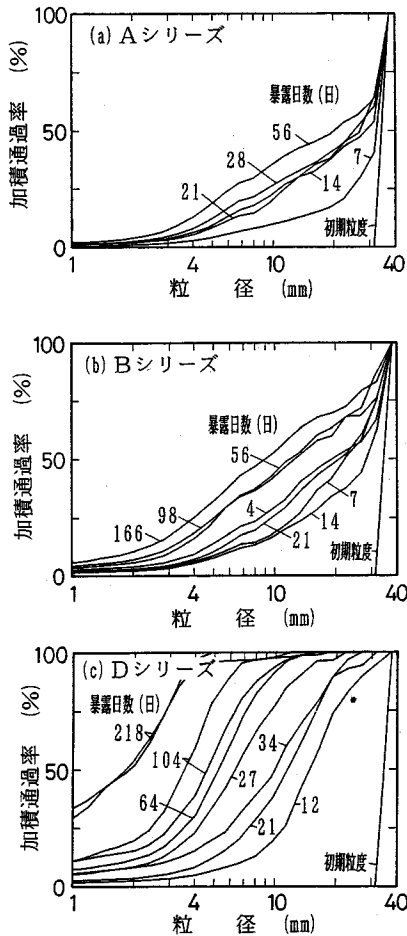


図-3 暴露試験による粒径加積曲線の変化

よりも乾燥することを一度経験しており、その後の三度の乾燥・湿潤の繰返しを受けている。このため、それ以前の供試体と比較すると、粒度分布が大きく移動している。ただし、56日経過しても、初期粒度の最大粒径の粒子が依然残っている。なお、A-56 供試体の質量が大きく増加しているのは、供試体の細粒化に伴う目詰まりが原因と考えられる。

#### b) Bシリーズの結果

暴露日数14日以降の供試体には、明確な乾燥・湿潤の繰返しの影響が粒度分布に現われ、暴露日数とともに細粒化の進行する様子がわかる。また、166日経過してもなお、初期最大粒径の粒子が残留している。一方、暴露初期のB-4, B-7, B-14の供試体の粒度分布には、逆転が生じており、B-56と

B-98の供試体の粒度分布にも大きな変化は認められていない。Aシリーズの結果と比較しても、B-4, B-7の供試体は細粒化が激しく生じている。これは、Bシリーズの初期の大きな乾燥過程に起因するものか、個々の供試体内の軟岩粒子の耐スレーキング性の相違が現れたのであるかは不明である。これらの点に関しては、さらに、種々の自然条件下の暴露試験を実施し、その結果の分析が必要になる。

#### c) Cシリーズの結果

CBR試験用モールドを用いた最も長期間の暴露試験の結果である。細粒化の傾向は、A, Bシリーズとほぼ同様である。これについては、現在も暴露試験を実施中であり、別の機会に報告したい。

以上のA～Cシリーズのすべての供試体の粒度分布は、粒径の減少に伴い残留率が徐々に減少する形になっている。すなわち、残留率分布では、初期最大粒径の粒子の値が最大となっている。

#### d) Dシリーズの結果

ふるい容器の暴露試験では、D-27とD-34の二つの供試体に細粒化の順序の逆転が生じているのみである。その他の供試体では、暴露日数とともに細粒化が進行している。CBR試験用モールド供試体との違いは、粒径加積曲線の移動量が大きく、21日経過後には、初期最大粒径の粒子が無くなっていることである。また、残留率分布の形状も異なり、図上で左右対称の正規分布のような形状を示し、残留率がピークを示す粒径も徐々に減少している。

これらの相違から、前述した細粒化の進行に関する予想の正しいことが明らかである。すなわち、軟岩地盤の表層部分では、Dシリーズの結果で見られるような激しい細粒化が生ずるが、深部（高々10cm程度）では、細粒化の進行が遅く、160日経過しても、初期分布の最大粒径の粒子が残留している。

### (3) 粒子破碎指標の変化

上述した暴露試験による軟岩の粒度変化を適切にとらえるために、前報と同様の粒子破碎指標を採用し、暴露日数との関係を明らかにした。すなわち、粒子破碎指標として、(a)50%径 $d_{50}$ (mm)、(b)2mm通過率 $p_2$ (%)、(c)均等係数 $U_c$ 、(d)残留率差の絶対値の総和 $S_R$ の4種類の値の変化を図-4に示した。なお、この図には、暴露日数初期にデータの多いA, Bシリーズの結果ならびに望月らの結果<sup>9)</sup>を示してある。

炉乾燥・水浸を繰返す室内スレーキング試験では、乾燥・湿潤の状態が明確であり、上記の粒子破碎指

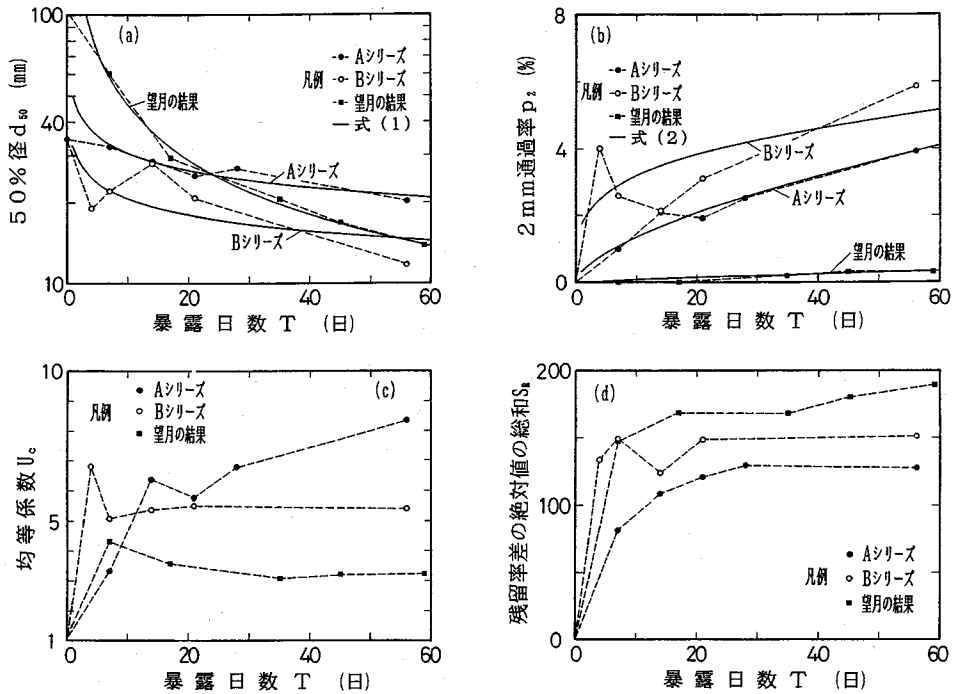


図-4 粒子破碎指標と暴露日数との関係 (A, Bシリーズと望月の結果)

標を乾燥・湿潤の繰返し回数に対して整理すれば、ある一定の関係が認められることを前報<sup>7)</sup>では示している。

しかし、自然の暴露試験では、図-2に示すように、気候の変化による供試体の乾燥・湿潤の繰返しはあるものの、その程度は晴天や雨天の継続日数、日照時間、降水量などによって大きく異なるので、晴～雨の繰返し回数が、室内スレーキング試験の繰返し回数にそのまま対応しないことは明らかである。

望月ら<sup>9)</sup>は、降雨量1mm以上の降雨日数に対するスレーキング率(あるふるいを通過した乾燥質量の百分率)を示し、この降雨日数と室内スレーキング試験の繰返し回数との対応関係を求めている。しかし、現在のところスレーキングに有効な降雨量が未知なことから、乾燥・湿潤の繰返しはスレーキングの原因であることを考えると、降雨量1mm以上の降雨日数のみによる評価では不十分な可能性が残される。

このように、暴露試験結果を適切に表現する時間スケールの取り方が決め得ないこと、また、実務において、数カ月から数年以上の期間のスレーキング現象を問題にするのであれば、降雨日数や降水量の

多寡、乾湿繰返し回数やその程度などが、実日数にほぼ比例すると考えられる。そこでここでは、暴露試験結果を評価する時間スケールとして、実日数を取ることにした。ただし、この点に関しては、今後の検討が必要であろう。

室内スレーキング試験では、50%径  $d_{50}$  は、スレーキングサイクル数とともに大きく減少するので、同様に(a)図では対数目盛りで示してある。Bシリーズの初期の結果(B-4, B-7供試体)のみを除けば、 $d_{50}$  は暴露日数とともに減少し、2mm通過率  $p_2$  は増加する傾向が明らかに現れている。Bシリーズの初期には3日間の乾燥によって激しくスレーキングした供試体を選択されたために、 $d_{50}$  は大きく減少し、 $p_2$  は大きく増加したものと考えられる。

$d_{50}$  や  $p_2$  に関するこうした傾向は、程度の差はあるが、室内スレーキング試験結果<sup>7)</sup>と同様であり、暴露試験結果の経時変化を把握したり、室内スレーキング試験結果とを比較する上で、一つの指標となる可能性を示している。そこで、 $d_{50}$  (mm)ならびに  $p_2$  (%)と暴露日数 T (日)との間に、前報と同様な形式の次式を仮定し、回帰分析を実施した。

表-2 粒子破碎指標の回帰分析結果

回帰式	回帰係数 など	試験名						
		Aシリーズ	Bシリーズ	Cシリーズ	Dシリーズ	望月ら <sup>9)</sup>	矢萩ら <sup>10)</sup>	佐藤ら <sup>11)</sup>
式(1)	係数 $a_d'$	50.20	36.38	36.43	88.62	214.0	73.67	81.88
	係数 $b_d'$	0.216	0.245	0.266	0.697	0.670	0.207	0.342
	データ数	5	7	3	9	5	6	3
	相関係数	-0.951	-0.822	-0.844	-0.966	-0.996	-0.961	-0.993
式(2)	係数 $a_p'$	0.321	1.431	1.484	0.196	0.014	2.109	0.004
	係数 $b_p'$	0.622	0.344	0.413	1.014	0.766	0.288	1.018
	データ数	5	7	3	9	3	6	2
	相関係数	0.964	0.808	0.937	0.977	0.855	0.943	1.000

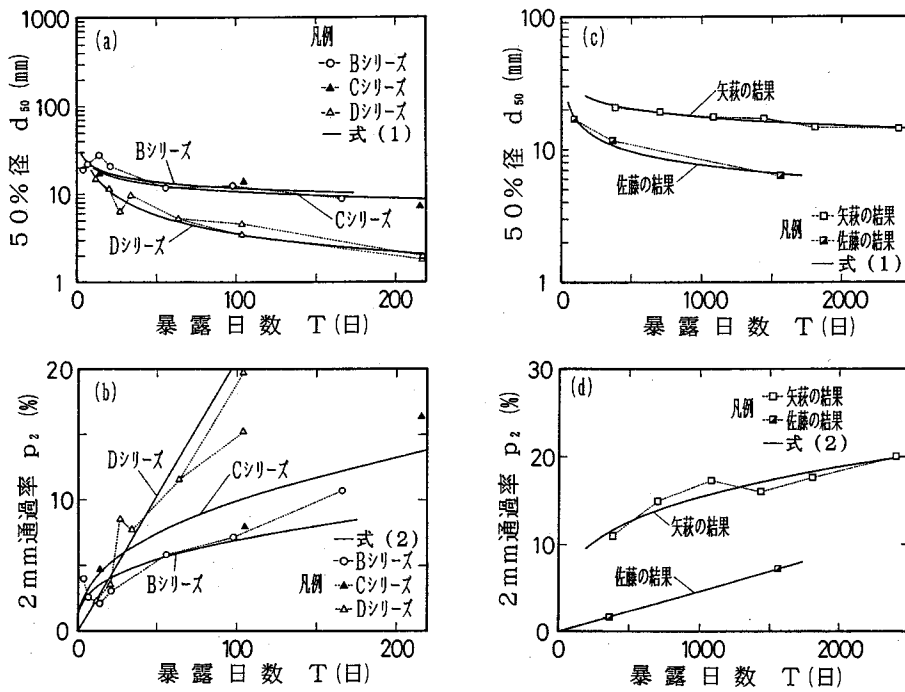


図-5 粒子破碎指標と暴露日数との関係 (B, C, Dシリーズ, 矢萩, 佐藤の結果)

$$d_{50} = a_d' \cdot T^{-b_d'} \quad (1)$$

$$p_2 = a_p' \cdot T^{b_p'} \quad (2)$$

その結果の回帰係数, 相関係数, データ数を表-2に示した。暴露試験数ならびに各データ数が少ないが, 相関係数はかなり高く, このデータの範囲内では両式の有用性が認められる。ただし, Tが大きくなった場合,  $p_2$ は100%に収束する必要があるし, 現在のところ  $d_{50}$ がある値に収束するのか, 無限に減少していくのかは不明である。これらの点につい

ては, 今後の検討が必要である。なお, 図中には, 実測値を破線, これらの回帰式を実線で示してある。

一方, 均等係数  $U_c$ は, 暴露初期に大きく増加するが, 7~15日以上経過すればほぼ一定値かわずかな増加を示すのみとなっている。また, 残留率差の絶対値の総和  $S_R$ も, 20日程度までは増加傾向を示すが, それ以降はほぼ一定値となっている。このように, 今回の試料のように比較的暴露初期に細粒化が早く進行する軟岩の場合には, これらの両者の

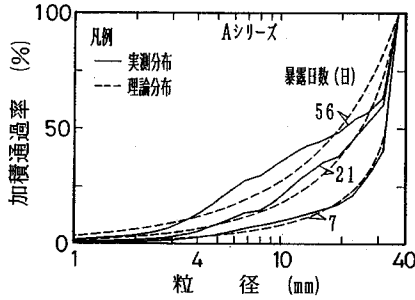


図-6 粒径加積曲線と負の二項分布の適合の程度

値は1カ月以上経過すれば、大きな変化を示さなくなるため、長期の暴露試験結果の変化をとらえる指標としては不向きであることが予想される。

図-5は、比較的長期間の暴露が行われている試験結果の50%径 $d_{50}$ (mm)と2mm通過率 $p_2$ (%)のみについて、経時変化を示したものである。試験の実施時期、試料、試験方法などが異なっても、式(1),(2)の適合性の高いことがわかる。図中に示したこれらの回帰式の係数は、データ数、相関係数とともに表-2に示してある。

#### (4) 負の二項分布による粒度変化法則

##### a) 負の二項分布の適合性

図-6には、今回実施した暴露試験の代表的な粒度試験結果を実線で、対応する負の二項分布を破線で示してある。A-7供試体では、すべての粒径範囲で実測分布に近い理論分布となっている。A-21ならびにA-56供試体では、粒径約20mm以上と約4mm以下の範囲で理論分布が過大評価、その中央部で過小評価になっているが、全体的な傾向をよく反映している。これは、負の二項分布が粒度の平均値と分散の両者によって決定されるためである。カイ2乗適合度検定の結果、細粒化の進行とともにカイ2乗計算値は増加するが、有意水準5%のカイ2乗理論値よりも小さくなっており、これらの分布が負の二項分布に従うという仮説は棄却されない。

また、Dシリーズの暴露日数の長い供試体でも、上述した傾向と同様の傾向を示しているが、カイ2乗計算値が有意水準5%のカイ2乗理論値よりもわずかに大きくなっている。この原因は、最大粒径を初期粒度の最大値に統一したためと考えられる。

しかしながら、負の二項分布が、粒径加積曲線の漸減する試料からS字形で減少する試料まで幅広く表現できることは、この分布関数の融通性を示すも

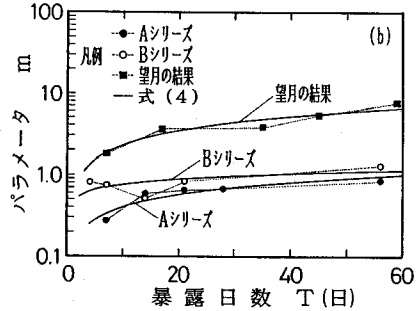
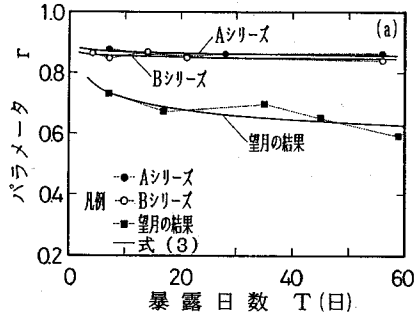


図-7 負の二項分布パラメータと暴露日数の関係 (A, Bシリーズ, 望月の結果)

のである。さらに、福本が示した粒子破碎モデルの粒度式<sup>10)</sup>が負の二項分布に対応しているため、本論文では負の二項分布を採用している。

##### b) 負の二項分布パラメータの変化

暴露日数の初期にデータの多いA, Bシリーズの結果ならびに望月らの結果<sup>9)</sup>について、負の二項分布パラメータ $r$ ならびに $m$ と暴露日数 $T$ (日)との関係を図-7に示してある。なお、負の二項分布パラメータの計算方法は前報<sup>7)</sup>に示してあり、その場合の最大粒径 $D_{max}$ は、各々の初期粒度の最大値がとってある。また、長期の暴露試験の結果であるB, C, Dシリーズの結果ならびに矢萩らの結果<sup>10)</sup>、佐藤らの結果<sup>11)</sup>が同様に、図-8に示してある。

これらのパラメータに対して、前報<sup>7)</sup>と同様な形式の次式を仮定して、回帰分析を実施した。

$$r = a_r \cdot T^{-br'} \quad (3)$$

$$m = a_m \cdot T^{bm'} \quad (4)$$

その結果の回帰係数、相関係数、データ数が表-3に示してある。また、図中にはこれらの回帰式が実線で示してある。これらの図表より、パラメータ $r$ ,  $m$ の経時変化の傾向が次のように明らかになる。

パラメータ $r$ は暴露日数とともに減少し一定値に収束するか、ほぼ一定値を取り続ける傾向にある。



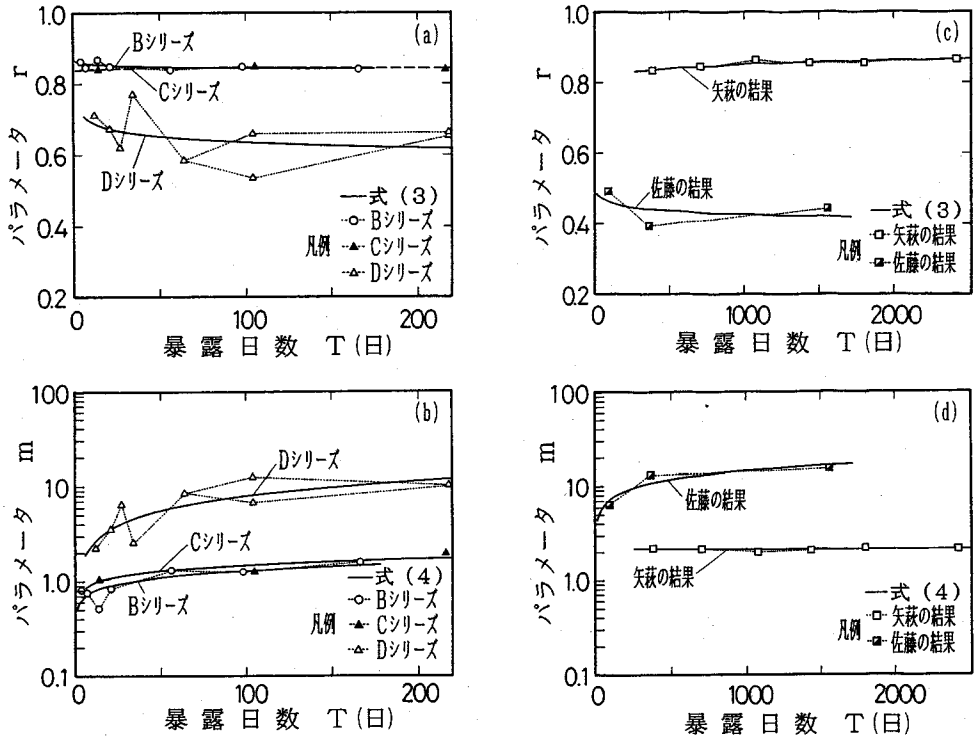


図-8 負の二項分布パラメータと暴露日数の関係 (B, C, Dシリーズ, 矢萩, 佐藤の結果)

表-3 負の二項分布パラメータの回帰分析結果

回帰式	回帰係数 など	試験名						
		Aシリーズ	Bシリーズ	Cシリーズ	Dシリーズ	望月ら <sup>(9)</sup>	矢萩ら <sup>(10)</sup>	佐藤ら <sup>(11)</sup>
式(3)	係数 $a_1$	0.883	0.865	0.838	0.753	0.847	0.753	0.539
	係数 $b_1$	-0.0075	-0.0051	0.0016	-0.0365	-0.0728	0.0179	-0.0338
	データ数	5	7	3	9	5	6	3
	相関係数	-0.580	-0.591	0.350	-0.358	-0.807	0.897	-0.442
式(4)	係数 $a_m$	0.122	0.456	0.588	0.745	0.578	2.256	1.832
	係数 $b_m$	0.517	0.227	0.201	0.514	0.596	-0.0081	0.3006
	データ数	5	7	3	9	5	6	3
	相関係数	0.922	0.801	0.878	0.843	0.957	-0.158	0.929

A～Cシリーズならびに佐藤らの結果ではほぼ一定値を取るため、式(3)の相関係数は低くなっている。Dシリーズならびに望月らの結果では、大きく減少する関係を示している。唯一の例外は、矢萩らの結果であり、増加する傾向を示している。これは、初期粒度分布が幅広いことが原因と思われるが、A～Cシリーズと同様ほぼ一定値と見なしてもよいと考えられる。また、同一試料であるA～Dシリーズの

結果において、 $r$ の変化傾向が大きく異なることは、試験方法によって細粒化の程度が異なることの現れと考えられる。

一方、パラメータ $m$ は暴露日数とともに増加し一定値に収束する傾向を示しており、相関係数もかなり高い。唯一の例外は、矢萩らの結果であり、ほぼ一定値を示しているため、相関係数は低い。

以上の結果ならびに前報で示した室内スレーキン

グ試験の結果より、負の二項分布パラメータ  $r$ ,  $m$  は、50%径  $d_{50}$  や 2mm通過率  $p_2$  と同様、暴露試験と室内スレーキング試験の結果を比較するための指標になる可能性を示している。さらに、暴露日数に伴う負の二項分布パラメータの変化傾向は、試料の初期粒度分布や細粒化の程度によって異なることがわかる。

試料の種類、供試体形状や暴露条件などが異なるにもかかわらず、さらには、室内スレーキング試験においても、同様な関係式が成立することは興味深い。ただし、軟岩の暴露試験結果を整理する際の時間スケールの取り方、パラメータ  $r$ ,  $m$  の経時的な変化法則をより明確にするためには、今後の暴露試験データの蓄積が望まれる。

### c) 負の二項分布パラメータ間の関係

前報<sup>7)</sup>では、室内スレーキング試験結果を整理し、粒度分布に適合する負の二項分布パラメータの  $r$  は細粒化とともに大きく減少し、 $m$  は大きく増加すること、 $r = 0.1 \sim 0.9$  の範囲内において、両パラメータ間に次式に示す平均的な関係のあることを明らかにしている。

$$r = 0.840 - 0.354 \cdot \log m \quad (5)$$

さらに、細粒化しにくい瑞浪泥岩の場合には、 $r$  の減少が少なく、上式とは異なる関係になることも明らかにしている。

今回の暴露試験結果について、同様の整理が図-9に示してある。この図には、式(5)とデータ分布幅(斜線の範囲)ならびに瑞浪泥岩の関係も示してある。どの暴露試験結果も、室内スレーキング試験結果で得られた分布幅の中に位置している。特に、望月ならびに佐藤らの結果は式(5)に近い関係を示している。また、受乞泥岩のA,B,Cシリーズの結果は、細粒化の程度が低いため、瑞浪泥岩の場合と類似した勾配を示している。一方、細粒化の激しいDシリーズの結果では、パラメータ  $r$ ,  $m$  の大きな変動はあるが、分布幅の中を右下がり移動する傾向が伺える。一方、矢萩らの結果は、パラメータ  $r$ ,  $m$  とともに大きな変化を示さないため、図上でほぼ同じ位置にプロットされている。これは、矢萩らの試料の初期粒度分布が幅広い粒径加積曲線を持つことが原因と考えられる。

これらの結果を総合すると、軟岩の細粒化に伴い  $r$  が0.8~0.9程度まで減少する間は、 $r$  の減少割合が少なく、さらに細粒化が進み  $r$  が0.8~0.9以下になると、式(5)の関係で大きく減少することがわかる。また、 $r \sim m$  関係が初期粒度分布にも影

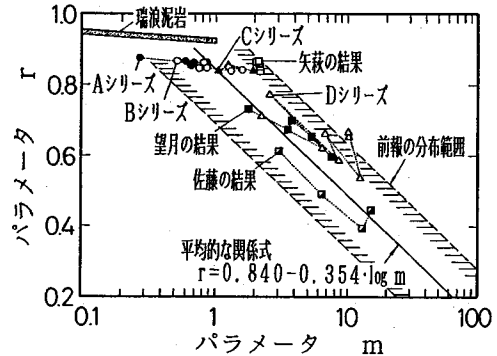


図-9 負の二項分布パラメータ  $r$ ,  $m$  の関係

響されることがわかる。しかしながら、試料や試験方法(室内スレーキング試験と暴露試験)が異なっても、 $r$  と  $m$  の間に特異な関係が得られることは興味深い。暴露試験と室内スレーキング試験の結果を比較し、後者の試験の位置づけを明らかにするための指標になるとと思われる。ただし、暴露試験では室内スレーキング試験と比較して、 $r$ ,  $m$  の移動量が少ないため、図上で規則正しい変化を示しているわけではないので、今後のデータの蓄積が必要になる。

## 5. 結論

本研究では、軟岩の室内スレーキング試験の位置づけを明確にすることを最終目的として、文献資料から得られた暴露試験結果の再整理を行うとともに、新たに暴露試験を実施し、軟岩のスレーキング特性を明らかにした。その際、暴露後の供試体の粒度変化を、①50%径、②2mm通過率、③均等係数、④残留率差の絶対値の総和、⑤負の二項分布パラメータ、の5つの粒子破碎指標の変化でとらえ、これらの経時変化を明らかにした。

得られた結論を要約すれば、以下ようになる。

- (1) 暴露日数  $T$  (日) の経過とともに軟岩の細粒化が進行し、50%径  $d_{50}$  (mm) や 2mm通過率  $p_2$  (%) の変化がそれぞれ次式で表現できる。

$$d_{50} = a_1 \cdot T^{-b_1 d}, \quad p_2 = a_2 \cdot T^{b_2 p}$$

一方、均等係数と残留率差の絶対値の総和は1カ月程度で一定値に収束する傾向を示すため、長期間の暴露試験結果を評価する指標としては不向きである。

- (2) 暴露試験後の軟岩の粒度分布が負の二項分布に

当てはまるとした仮説を検定したところ、仮説は棄却されない場合が多い。

- (3) 試料の種類や試験条件が異なるにもかかわらず、負の二項分布パラメータは暴露日数T(日)とともに、一定の傾向で変化し、次式で表現できる可能性が明らかになった。

$$r = a_r \cdot T^{-br}, \quad m = a_m \cdot T^{bm}$$

なお、多くの場合には暴露日数とともにパラメータrは減少し、一定値に収束する傾向がある。また、パラメータmは増加し、一定値に収束する傾向がある。

- (4) 試料の種類や試験条件が異なるにもかかわらず、負の二項分布パラメータの間には、 $r \sim \log m$ の直線関係が認められ、これらのパラメータによって、暴露試験と室内スレーキング試験結果を比較する可能性を明らかにした。

今後、種々の軟岩の暴露試験と室内スレーキング試験を実施し、後者の試験の位置づけを明確にして行きたい。なお、試料採取に当たっては、北海道開発局の秀島好昭氏、参鍋修二氏、長谷川正信氏の協力を得た。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 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・神下防災調整池堤体工事—土と基礎, Vol.32, No.7, pp.15-20, 1984.
- 2) 高薄和雄, 宮林秀次, 小島宗隆, 小原潔: 軟岩ずりを活用した大規模盛土の設計・施工, 土と基礎, Vol.32, No.7, pp.53-59, 1984.
- 3) 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.
- 4) 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.
  - 5) 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.
  - 6) 岩の力学連合会: ISRM 指針 (ISRM Suggested Methods), Vol.1, pp.21-24, 1982.
  - 7) 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.
  - 8) 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度変化, 第11回土質工学研究発表会, pp.917-920, 1976.
  - 9) 望月秋利, 寺尾雅裕, 木下哲夫, 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.
  - 10) 矢萩賢仁, 豊田光雄, 中村昭: 岩石質材料の原位置暴露試験, 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.
  - 11) 佐藤健, 板橋一雄, 河邑眞: 乾湿繰り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.
  - 12) 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.
  - 13) 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.
  - 14) Chigira, M.: Dissolution and oxidation of mudstone under stress, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, No.1, pp.60-70, 1993.
  - 15) 名古屋地方気象台: 地上気象観測原簿(平成5年7月23日~平成5年11月10日), 気象庁, 1983.
  - 16) 福本武明: まさ土の粒度分布に関する一考察, 第22回土質工学研究発表会, pp.165-166, 1987.

(1994. 6. 30 受付)

## EVALUATION METHOD FOR THE DISINTEGRATION OF SOFT ROCKS BY IN-SITU EXPOSURE TEST

Kazuo ITABASHI, Takeshi SATO, Tomio MORI and Masaru IWATA

It is well known that soft rocks are disintegrated by repetitions of drying and wetting in nature. Since very few in-situ exposure test of soft rock specimen have been carried out so far, the process of disintegration of soft rock has not yet been clarified sufficiently. In this study, the Ukegoi mudstone are used to in-situ exposure test and test results by another authors are analysed to investigate the method for evaluate the disintegration of soft rocks. The results of this study are as follows: (1) settlement phenomena are confirmed by repetition of drying and wetting, (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.