

# 乾湿繰り返しによる泥岩の細粒化試験と結果の整理法

佐藤 健\*・板橋一雄\*\*・河邑 眞\*\*\*

泥岩の耐スレーキング性調査法としてよく知られる乾湿繰り返しの室内試験を、乾燥温度、乾燥時間、吸水率、初期粒度を変化させながら実施し、各サイクル毎に得られた粒度分布を確率分布の一つである負の二項分布で近似して、泥岩の細粒化評価を試みた。その結果、細粒化後の粒度分布が負の二項分布で的確に表現できることを70例に及ぶ試験結果より確認し、分布形を規定する2つのパラメータ値が細粒化に伴って、初期最大粒径によって決まるユニークな関係線上を規則的に移動し、この関係は試験条件によらず一定になることを見出した。

**Key Words:** grain size distribution, laboratory test, mudstone, negative binomial distribution, slaking test, weathering.

## 1. まえがき

新第三紀以降に堆積した泥岩は、土が岩になる中途段階のもので、固結度が低く、乾燥、湿潤を繰り返し与えると容易に細粒化するものが多く見られる。これは、スレーキングとしてよく知られている現象で、泥岩を対象にした土工事に関連していろいろな問題を誘発している。例えば、建設後数年経過した泥岩盛土の強度低下の例<sup>1), 2)</sup>、泥岩材料による宅造、道路盛土の長期沈下の例<sup>3), 4)</sup>など、いくつか報告されている。

スレーキングという用語は Terzaghi and Peck の成書<sup>5)</sup>にも見つけることができ、水浸によって間隙中に封じ込められた空気の圧力が上昇して生じる引っ張り破壊現象であると解説している。スレーキングの発生メカニズムについては、そのほかにもいくつかの説明<sup>6), 7)</sup>がなされている。

本研究は泥岩を盛土材料として使用する際によく行われるスレーキング試験について、①試験条件、②結果の評価法、の観点から研究成果を取りまとめたものである。泥岩盛土に対する設計、施工的観点からの報告<sup>8), 9)</sup>、スレーキング発生後の泥岩の物性変化に主眼を置いた研究<sup>10)~12)</sup>は散見されたが、盛土材として使用する泥岩の耐スレーキング性の品質検査に関する研究は少なく、試験の方法も統一されていないのが現状である。本論文では、①として乾燥温度、乾燥時間、拘束圧、吸水率、初期粒度に着目し、これら条件によってスレーキングの進行がどのように変化するのかを、従来から提案されている粒度分布から求められる種々の指標を用いて検討した。また、別途行った屋外でのスレーキング試験結果と

の比較から、室内の強制的な乾燥・湿潤の繰り返し効果と自然条件との対応を考察した。

②として、従来の方法に加え、負の二項分布による方法を新たに提案している。これは、スレーキング後の粒度分布に負の二項分布をあてはめ、そのパラメータ値によってスレーキングの進行程度を定量的に評価する方法である。この方法は、まさ土の締固めによる粒子破碎指標<sup>13)</sup>に使われているが、スレーキングによる細粒化指標に利用したのは本研究が最初の試み<sup>14)</sup>である。筆者らの行った70例に及ぶ試験結果への適用を通じて、スレーキング後の粒度分布の変化が負の二項分布で的確に表現できることを本論文によって検証する。

## 2. スレーキング試験と細粒化評価法

スレーキング特性を調べる試験として、いろいろな方法<sup>15)</sup>が提案され、実施されている。時間短縮のために、いずれも乾燥・水浸を強制的に与えて、スレーキング発生を促進する方法で、盛土材に用いる泥岩など軟岩のスレーキング発生の有無を事前に調査するために行われる。スレーキングの発生が認められた場合には、実際の盛土内での応力状態を考慮して、圧縮力を負荷した状態で再試験が行われることもあるが、通常は、材料変更などの対策がとられる。

乾湿の与え方には、1回だけの方法<sup>16), 17)</sup>と数回繰り返す方法<sup>3), 18), 19)</sup>がある。スレーキング発生の有無を調べるだけならば、なるべく短時間で済む試験がよいと指摘<sup>20)</sup>されているが、今回の試験は乾湿の繰り返しによって細粒化がどのような規則性で進むのかを調べることも眼目にあつたので、時間は少しかかるが、実務でもよく行われている日本道路公団の乾湿繰り返し試験<sup>21)</sup>を基本に、3. で述べるような実験を計画した。

スレーキングの進行程度を測る方法として、目視観察によるランク分け<sup>22), 23)</sup>、吸水率変化に着目した方法<sup>24)</sup>も

\* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科  
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

\*\* 正会員 工博 名城大学助教授 理工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 工学部建設工学科

あるが、基本的には、粒度分布の変化に着目する方法が大部分である。粒度分布変化を示す指標は福本<sup>25)</sup>、石井<sup>26)</sup>、板橋ら<sup>27)</sup>によってまとめられており、これらを参考にして、本研究では次に示す①～⑤の5つの方法を用いてスレーキングによる泥岩の細粒化を調べ、各方法の適用性について考察した。

① 50%径による評価法：細粒化前後の50%径に着目する方法である。細粒化が激しく生じ、粒度分布が大きく移動する場合には有効な方法と考えられる。

② Leslie<sup>28)</sup>系の評価法：任意のある粒径以下の粒子の増加率によって評価する方法である。日本道路公団の試験法<sup>21)</sup>でも「ある粒径」として、9.5mmが用いられている。今回の解析では、供試体の初期粒度を2mm以上としたので、「ある粒径」を2mmとして解析した。

③ 均等係数による評価法：細粒化前後の均等係数の変化をみる方法である。粒径加積曲線上の2点に着目する利点はあるが、粒径加積曲線がほぼ平行に移動するような場合には、この値の変化は少なくなる。

④ 残留率差の絶対値の総和による評価法：細粒化前後に得られる二つの残留率ヒストグラムの差によって、粒度分布全体の移動量を評価する方法である。各ヒストグラムの差には正値・負値が生じるので、その絶対値の総和を細粒化指標とする。したがって、粗粒分の減少量と細粒分の増加量を区別することが困難となる。なお、本研究では細粒化前の粒度として、初期粒度に統一して解析している。

⑤ 負の二項分布による評価法：残留率ヒストグラムを負の二項分布で近似<sup>13)</sup>し、そのパラメータ ( $r, m$ ) の変化によって評価する方法である。このパラメータは、粒度分布の平均、分散から求められるので、粒度分布全体を表現している点に利点がある。

### 3. スレーキング実験

#### (1) 試料

岐阜県東濃地域に分布する瑞浪泥岩を試料に選んだ。本泥岩の堆積年代は新第三紀中新世で、その上部には第四紀更新世の土岐砂礫層が分布する。採取現場の表面はかなり風化が進んでいたため、風化して多数の亀裂が確認できる表層部分からの試料と表面から1m程度掘削した深度での比較的健全な試料を区別して採取した。以下では、前者をWS(風化試料)、後者をUS(未風化試料)として示すこととする。

US試料採取時の湿潤密度は1.65g/cm<sup>3</sup>、含水比50.2%、比重2.58、間隙比1.35、飽和度96%で、一軸圧縮強度(US)は52-83kgf/cm<sup>2</sup>であった。WSは試験を行っておらず不明である。スレーキング実験に用いた初期粒度分布をFig.1に示した。US、WSとも最大粒径を50.8mm、最小粒径を2mmとなるように粒度調整

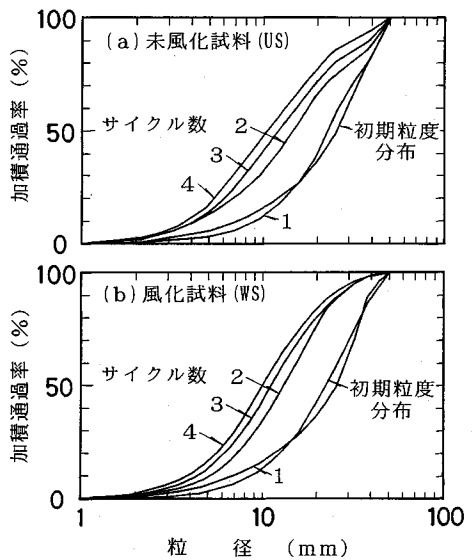


Fig.1 Initial grain size distributions and their changes after each cycle of wetting-drying repetitions.

したものを実験試料とした。ただし、初期粒度の影響をみる場合には、均一粒度(53.0~63.0mm, 9.5~19.0mm)の試料(Fig.4参照)を作成した。なお、Fig.1には後述する試験条件C1のスレーキング後の粒径加積曲線も併記してある。

#### (2) 実験方法

スレーキングに影響を及ぼすといわれている4つの要因(吸水率、乾燥温度、拘束圧、乾湿繰り返しサイクル数)の寄与度がわかるように実験を計画した。具体的には、Table 1に示すC1-C5の5種類を考え、本実験を実施した。スレーキング試験では乾燥・湿潤または湿潤・乾燥を1サイクルと考える2通りの方法があるが、サイクル数に対応した乾燥試料で正確な粒度分布を求めたいので、今回は湿潤・乾燥を1サイクルとした。なお、今回用いた瑞浪泥岩の初期飽和度が比較的高く、初期水浸によってほとんど吸水しないことも予想できた。

本実験では、各サイクル数に相当する試料(4kg)を別々に準備しておき、所定のサイクル数到達後にその粒度を測定した。

Table 2の予備実験P1は、24時間水浸後の試料を20℃恒温室に置き、吸水率の経時変化を調べながら、C2の110℃炉乾燥と同じ吸水率変化になるようなC3における乾燥日数を求めるために行ったものであるが、30日間乾燥させるとほとんど吸水率の変化が見られなくなったので、試験時間も勘案して乾燥日数を30日間とした。予備実験P2は、24時間水浸させた試料を110℃で乾燥させたときの吸水率変化を調べるために行ったもので、C3と同じ吸水率変化となるC2、C5における乾燥時間を求めるための実験である。拘束条件

**Table 1** Slaking test series due to laboratory wetting-drying repetitions and outdoor climate change.

試験名	本実験概要 (水浸・乾燥の与え方)
C1	【(24時間水浸)→(110℃・24時間乾燥)】を1サイクル *吸水率変化 ((約50%)~(約0%))
C2	【(24時間水浸)→(110℃・数時間乾燥)】を1サイクル 乾燥時間は予備試験結果の(20℃・30日間乾燥) の吸水率になるまで乾燥 *吸水率変化 ((約50%)~(約13%))
C3	【(24時間水浸)→(20℃・30日間乾燥)】を1サイクル *吸水率変化 ((約50%)~(約13%))
C4	野外放置し、3カ月後・1年後の粒度分布を調べる *吸水率変化はわからない
C5	【(24時間水浸)→(110℃・数時間乾燥)】を1サイクル 乾燥時間は予備試験結果の(20℃・6日間乾燥) の吸水率になるまで乾燥 *吸水率変化 ((約50%)~(約24%))

**Table 2** Preliminary tests for estimating drying time and decrease of water content.

試験名	予備実験概要	目的
P1	20℃での吸水率変化 (時間(日数)-吸水率変化曲線を求める)	C3の乾燥時間, C2, C3の吸水率変化を求める
P2	110℃での吸水率変化 (時間-吸水率変化曲線を求める)	C2, C5の乾燥時間を求める

の有無もスレーキングに影響を及ぼすことはよく知られているので、C1とC2では、内径15cm、高さ30cmの鋼製モールドに試料を詰め、3kgf/cm<sup>2</sup>の荷重を負荷した状態でスレーキング試験(無拘束の試験をN、側方拘束状態で圧縮力を負荷した試験をPと呼ぶ)を行った。なお、以下では試験条件を、例えば、C1-WS-N、C1-US-Pのように略記する。C1-WS-Nは、WSを用いた無拘束のC1条件の試験、C1-US-Pは、USを用いた拘束条件でのC1条件の試験を示す。

C2で炉乾燥時間に幅があるのは、乾燥温度の違いによるスレーキングへの影響を調べるためにC3と同じ吸水率変化にしたからである。そのときの吸水率変化と炉乾燥時間は、C2-WS-Nで44.6→11.8%(約8時間)、C2-US-Nで49.8→10.2%(約10.5時間)、C2-WS-Pで51.1→37.3%(約6.5時間)、C2-US-Pで53.0→40.9%(約5時間)であった。

C5は、20℃の恒温室内に6日間放置した場合と同じ吸水率変化となる110℃・炉乾燥実験である。これは自然状態下でのスレーキング発生を模擬しようとしたもので、1週間に1日降雨に曝される状態を考えている。吸水率変化と乾燥時間は、C5-WS-Nで44.6→24.8%(約4時間)、C5-US-Nで49.8→24.2%(約6.5時間)であった。

乾湿繰り返しサイクル数が増えて、スレーキングに

よる細粒化が進むと24時間水浸、一定時間の乾燥による吸水率変化は当初の値から変化する。水浸による吸水率の回復は、泥岩の初期飽和度が比較的高いこともあり、それほど問題にならないが、粒径の大小による各試料毎の乾燥程度の違いは大きく、5-10cmの塊状試料による予備試験での吸水率変化がそのまま本実験の各サイクルでの乾燥による吸水率変化に一致するのか問題が残る。したがって、Table 1中のC2, C3, C5の吸水率変化は予備実験で得られた目安の値である。

(3) 粒度試験と結果の解析法

スレーキング試験後の試料は、ふるい分析によって粒度分布を求めた。使用したふるいは、土質工学会基準で規定されている7つの標準網ふるい(50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.75, 2.0mm)である。なお、ふるい分けの際、受け皿に残った2mm以下の粒子は最大値でも高々3%であったので、スレーキング後の最小粒径は1mmと仮定した。このようにして得られたデータから加積通過率を求め、滑らかな曲線によって粒径加積曲線を描いた。その例が、Fig.1に示してある。これらの滑らかな粒径加積曲線から、50%径、2mm通過率、60%径ならびに10%径を読み取り、前述した①②③の細粒化評価法を適用した。

細粒化評価法④では、用いるふるい間隔により結果が異なる。そこで、対数目盛り上でほぼ等間隔に規定されているJIS規格のふるい目に対応する加積通過率を読み取り、各ふるいの残留率を計算した。そして、初期粒度分布と比較して、残留率差の絶対値の総和を求めた。

また、残留率ヒストグラムに離散分布である負の二項分布を当てはめるために、以下の操作を行ってパラメータ( $r, m$ )を求めた。まず、最大粒径 $D_{max}$ から対数軸上で等間隔に粒径をとり、式(1)によって、 $n$ 番目の粒径 $d_n$ を粒径番号 $n$ として離散化する。その際、公比 $\lambda$ はJIS規格のふるい目間隔の値 $\sqrt{2}$ とした。

$$n \log\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \log\left(\frac{d_n}{D_{max}}\right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $n=0, 1, 2, \dots$

滑らかに描いた粒径加積曲線から各粒径番号 $n$ に対する残留率 $q_n$ を読み取り、粒径番号に関する平均値 $\mu$ と分散 $\sigma^2$ を求めた。負の二項分布の理論に基づけば、これらの値 $\mu, \sigma^2$ とパラメータ $r, m$ の間には、式(2)の関係があるので、二式を連立して解いた式(3)によって、残留率分布に最も適する負の二項分布のパラメータが求められる。

$$\mu = \frac{mr}{1-r} \quad \sigma^2 = \frac{mr}{(1-r)^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$r = \frac{\sigma^2 - \mu}{\sigma^2} \quad m = \frac{\mu^2}{\sigma^2 - \mu} \dots \dots \dots (3)$$

なお、負の二項分布は次式によって与えられる<sup>13)</sup>。

$$q_n = \binom{n+m-1}{n} (1-r)^m r^n \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $n=0, 1, 2, \dots$   
 $m=1, 2, 3, \dots$

(4) 実験結果

各試験毎の細粒化評価法①～⑤の結果を Fig.2, 3 にまとめて示した。各評価方法の適用結果から推測される乾湿繰り返し後の細粒化の特徴をまとめると以下のようになる。

①50% 径の変化：1 サイクルの試料には、初期粒度のわずかな相違の影響が現れており、50% 径の増加している場合も認められるが、多くの場合にはサイクル数の増加とともに減少傾向を示している。今回行った4 サイクルまでの繰り返し回数では50% 径が一定値に落ちつく傾向は見られなかった。したがって、更に乾燥・湿潤を繰り返すと、細粒化が進行する可能性が伺える。試験条件によっては、50% 径が初期粒度分布の半分以下になっているものもあり、最大粒径が比較的大きな泥岩試料については、有効な細粒化評価法になるとと思われる。

②2 mm 通過率の変化：すべての試験条件において増加傾向を示し、今回実施した繰り返し回数の範囲では、一定値に収束する様子は伺われない。しかし、最も大きな値を示した C1-WS-P でも3% 程度であり、今回の試料はスレーキングによって細粒化しても2 mm 以下の細粒分はそれほど多くならないことが予想できる。

③均等係数の変化：他の細粒化指標と比較すると、すべての試験条件で、それほど大きな変化は認められず、一定の傾向的变化も認められなかった。これは、60% 径と10% 径が同じ比率で減少したためと考えられる。

④残留率差の絶対値の総和：ほとんどの試験条件で、増加傾向を示しているが、4 サイクルまでの繰り返し回数ではまだ一定値に収束していない。ただし、乾湿のサイクル数の少ない間には、大きな値の変化を示しているが、繰り返し回数が増すにしたがって、値の変化量は少なくなっている。

⑤負の二項分布のパラメータの変化：多くの試験条件において、パラメータ  $m$  は増加傾向、パラメータ  $r$  は減少傾向を示している。ただし、パラメータ  $r$  がほぼ一定値を示す場合には、パラメータ  $m$  も大きな変化を示していない。簡単な仮定に基づき粒子破碎モデルを提案した福本<sup>13)</sup>によれば、負の二項分布のパラメータ  $m$  は粒子破碎回数(経過時間)に対応しており、パラメータ  $r$  は隣接するふるいに留まる残留率の比を示している。したがって、乾湿のサイクル数が増すごとにパラメータ  $m$  が大きくなることは、粒子破碎回数が増していくことに合致している。

以上5つの整理法を評価すれば、粒度分布の変化を総

合的に考えることができる点で、負の二項分布のパラメータ変化に着目するのが最も良い方法であると考えられた。

4. 考 察

(1) 乾燥温度、吸水率、拘束圧の影響

①～⑤の各細粒化指標が、試験条件 C1～C5 によってどのように変化するかを、Fig.2, 3 に示した。Fig.2 (a)～(f) は WS (風化試料)、Fig.3 (a)～(f) は US (未風化試料) の結果である。Fig.1 でも認められるように、乾湿の繰り返し回数が1 回の場合には、初期粒度のわずかな相違の影響が現れており、各細粒化指標にばらつきが認められる。しかし、そのサイクル数が2 回以上になると、初期粒度の影響よりもスレーキングによる細粒化の影響が大きくなり、一定した変化傾向が見られる。これらの図より、試験条件によって細粒化程度に違いの生じることも明らかになり、粒子破碎が激しく生じる試験条件の順序は、 $C1=C3 > C2 > C5$  となっている。

乾燥後の吸水率による細粒化への影響は C1 と C2 の結果から判断でき、乾燥後の吸水率が絶乾状態になる条件 (C1) の方が未乾燥状態 (C2) よりも細粒化の進行が激しいことがわかる。

Fig.2 と 3 における C2 と C3 を比較することにより、乾燥後の吸水率状態が同一で、乾燥温度・乾燥時間が異なる場合の比較が可能である。低温・長時間乾燥 (C3) の方が、高温・短時間乾燥 (C2) より細粒化し易くなっていることがわかる。また、乾燥温度が低く吸水率変化が小さい場合 (C3) でも、吸水率変化が大きく乾燥温度も高い場合 (C1) と同程度に細粒化していることがわかる。これらのことは、細粒化が常温での乾燥によっても、十分に発生する可能性のあることを示唆したもので、110℃ の炉乾燥が自然条件と較べて必ずしも細粒化を促進する乾燥法とは言えないことが、以上の結果よりわかった。

なお、風化状態の相違による細粒化の進行状況の違いは、WS と US の結果を比較すれば明らかである。いずれの試験条件においても WS の細粒化指標の方が大きく変化しており、風化泥岩の方がスレーキングに対する抵抗の弱いことがわかる。また、拘束圧の有無による細粒化の程度は、C1-WS-N と C1-WS-P の結果から推定され、拘束圧のある場合は拘束圧がない場合に比較して細粒化が抑制されていることがわかる。2 mm 通過率が C1-WS-P で大きくなっているのは、側方を拘束して圧縮力を負荷した状態では、浸水時の膨張圧により泥岩接触部分で局部的破碎が発生し、2 mm 以下の粒子が多くなったためと考えている。

乾燥温度、吸水率、拘束圧の各試験条件が細粒化の進行にどのような影響を及ぼすかについては、いくつかの

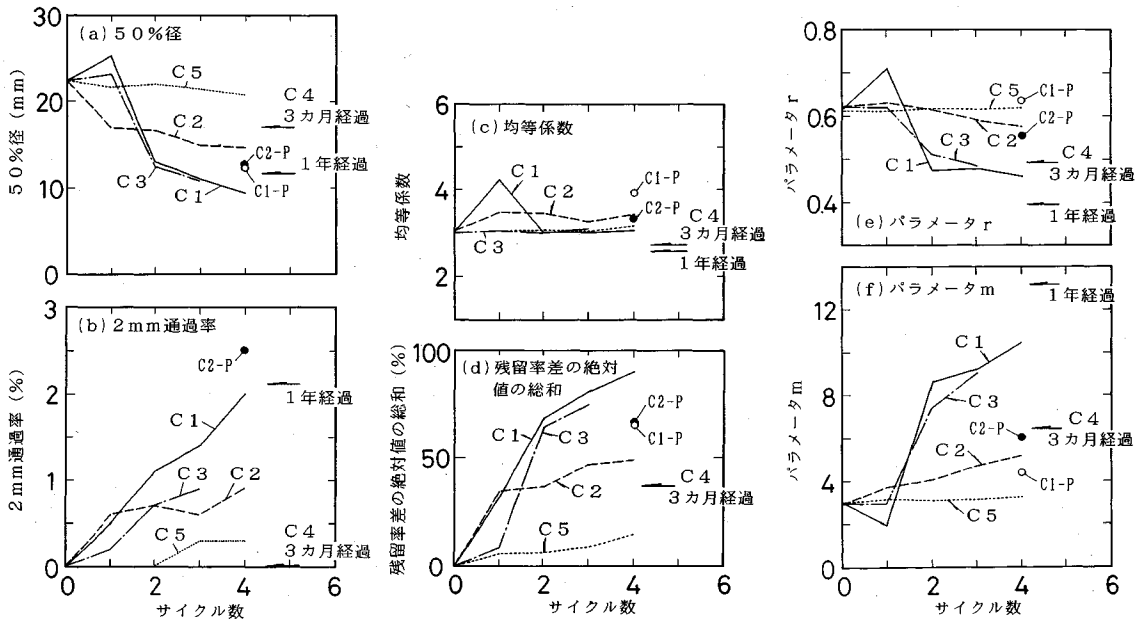


Fig.2 Change of each index according to increase of number of wetting-drying repetitions for WS.

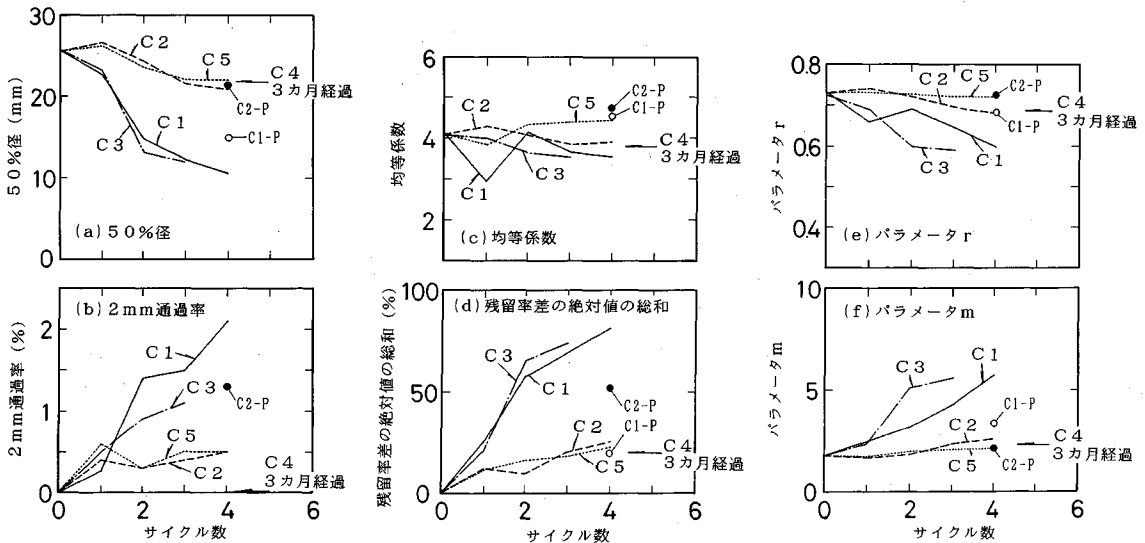


Fig.3 Change of each index according to increase of number of wetting-drying repetitions for US.

研究成果が既にある。しかしながら、いずれの研究もある粒径に着目して、その粒径以下の粒子の増加率によって、細粒化の程度を調べたものばかりで、筆者らの行ったように、粒度分布を表現するいくつかの指標(50%径、2mm通過率、均等係数、残留率差の絶対値の総和、負の二項分布)を用いて、粒度の変化を総合的に検討した例はない。

(2) スレーキングに対する初期粒度の影響

スレーキングに対する初期粒度の影響をみるため、US(未風化試料)を用い、大小2種類の均一粒度試料を調整し、C1の試験条件で各々10個の供試体を作成

した。そして、10サイクルまでの乾湿繰り返しを行い、各サイクル終了後の供試体をふるい分析し、粒度分布を測定した。2種類の均一試料の初期粒度は53.0~63.0mmと9.5~19.0mmであり、Fig.4にその初期粒度分布とスレーキング後の粒度分布が示してある。以下では、前者をA試料、後者をB試料として示す。Fig.5に乾湿繰り返しサイクル数の増加に伴う各指標値の変化を示した。なお、Fig.5には初期粒度が2.00~50.8mmの試験名C1-US-Nの結果も併記してある。以下では、これをC試料として示す。

いずれの結果も全体的な傾向としては、初期粒度に関

係なく乾湿繰り返しのサイクル数の増加とともに、50%径は減少、2mm通過率は増加、残留率差の絶対値の総和は増加、負の二項分布のパラメータ $r$ は減少、パラメータ $m$ は増加傾向を示すことが分かった。更に、詳細に見ると、以下のことが分かる。

サイクル数の少ない段階では、50%径は初期粒度の影響を受け、A、B、C試料とも値が大きく異なるが、スレーキングの進行に伴い、最大粒径の順ですべて減少している。そして、10サイクルになるとほとんど同じ値に収束している。

2mm通過率は4サイクルまでは初期粒度の影響を受け、初期粒度に細粒分が多い試料ほどサイクルの進行に伴い大きな値となっている。ただし、5サイクル以上になると、A試料とB試料の関係が逆転しており、10サイクルになっても両試料とも増加傾向を示している。

均等係数は3サイクルまでは大きな変動を示している。これは10%径と60%径のわずかな変化が均等係数に大きく影響することを表している。ただし、3サイクル以上になると、A試料、B試料ともほぼ一定値となっている。

残留率差の絶対値の総和は、すべて増加傾向を示し、初期最大粒径の小さい方が小さな値となっている。ただし、初期の最大粒径が大きくても、その初期分布の幅の広いC試料の方が小さな値となっている。このような原因は、Fig.4から認められるように、A試料、B試料とも10サイクル後には粒径10mm以下の粒度分布がほぼ同様になっており、初期粒度分布が粗粒であるほど、分布の移動量が大きくなるためである。

負の二項分布のパラメータ $r$ は、A試料、C試料ともサイクル数の増加とともに減少している。しかし、B試料では、4サイクルまでは増加し、それ以上のサイクルではA試料と同じような減少をする特異な挙動が見られた。このパラメータ $r$ は式(3)によって求められているので、式(3)に現れる粒径番号に関する平均値 $\mu$ と分散 $\sigma^2$ の変化傾向を考察することによって、この特異な変化の原因が推定できる。

A試料は初期粒径が大きいので、1サイクルごとの粒子破砕量が多く、スレーキングの進行にともない平均値 $\mu$ も分散 $\sigma^2$ も増加する。しかし、 $\sigma^2$ の増加率よりも $\mu$ の増加率が大きいので、 $r$ が減少することになる。一方、B試料の場合には、スレーキング後の粒度変化がA試料よりは少ないため、スレーキング初期段階では、 $\sigma^2$ の増加率よりも $\mu$ の増加率の方が小さくなり、 $r$ が増加する。そして、スレーキングが進むと、その関係が逆転して $r$ が減少することになる。

負の二項分布のパラメータ $m$ は、すべての試料でサイクルとともに増加しており、その大ききの順序はC試料・A試料・B試料となっている。

いずれにしても、以上の各評価法の適用結果から、初

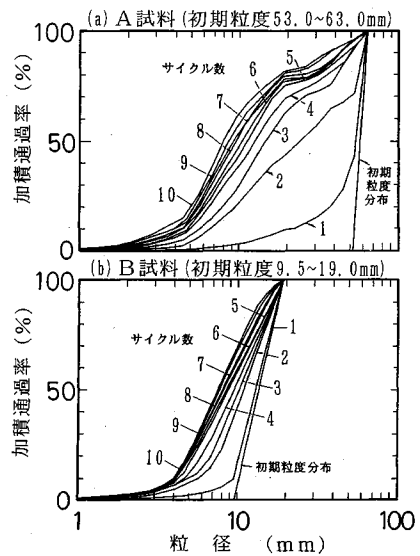


Fig.4 Initial grain size distributions and their changes after indoor wetting-drying repetitions for A and B samples.

期粒度によって細粒化の仕方が少し異なることが分かり、粒径の大きなものほど、細粒化の進行が激しい傾向が認められた。

### (3) スレーキングの室内試験と自然条件との比較

自然条件下でのスレーキングの進行程度を調べるために、Fig.1に示す初期粒度の泥岩(US, WS)を排水に注意しながら屋外に放置し、実験開始(平成元年12月25日)後、3か月、1年にそれぞれふるい分け試験を実施して細粒化を調査した。

Fig.2,3にC4-USとC4-WSの3か月と1年後の各指標値を矢印で示した。これらの結果より、C4での3か月、1年後の各指標値に対応する室内試験のサイクル数を読み取って、Table3に示した。小数点以下の数値は、整数部のサイクル数と次のサイクル数の間にC4における細粒化の指標値が存在していることを表す。なお、均等係数による評価法では、いずれの条件の結果も一定の傾向を示さないため、この指標値を用いて自然条件下での細粒化と比較するには問題があると判断し、Table3には均等係数による結果は記載していない。

2mm通過率は、C4-US、C4-WSとも3か月後は0%、C4-WSの1年後もC1、C2、C3、C5より大きな値となったため、2mm通過率を介して自然状態と室内試験との対応を議論することはできなかった。C1-WS-N、C3-WS-Nの50%径を除き、室内試験での各指標値よりもC4-WSの1年後の値の方が大きくなり、自然条件下で1年間に進行する細粒化が、4サイクルまでの比較ではあるが、強制的に乾湿を与える室内試験での細粒化よりも激しい結果になった。室内で強制的に与える乾湿の繰り返しは、自然条件と較べて必ずしも細粒化を促進する条件ではないことが今回の比較試験よ

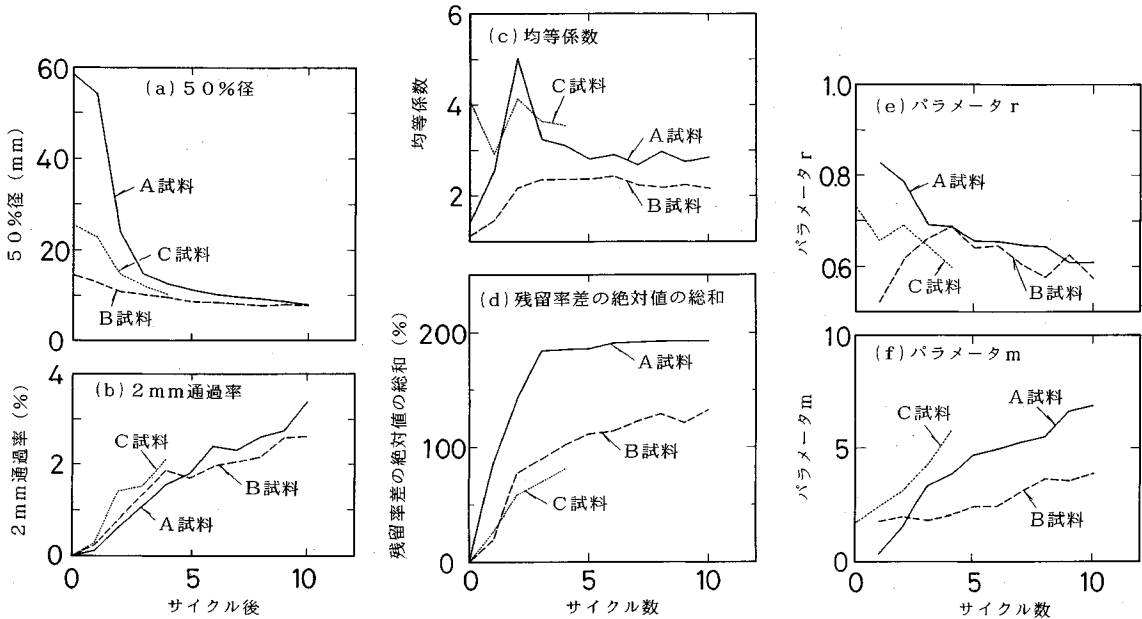


Fig.5 Change of each index for A and B samples according to increase of number of wetting-drying repetition.

り明らかになった。特に、C1との比較から判断すれば、実務でよく行われる【常温24時間水浸→110℃・24時間炉乾燥を1サイクルとして】10サイクルまで繰り返す試験法<sup>21)</sup>が、スレーキングを調べるための試験としては妥当な条件になっていることが、今回の実験結果より伺われた。

(4) 負の二項分布による粒度分布の再現性

スレーキングによる泥岩の細粒化指標として、わが国でよく用いられる指標に、①粒径9.5mm以下の質量百分率に着目したスレーキング率<sup>2)</sup>、②粒径2mm以上の質量百分率に着目した耐スレーキング指数<sup>19)</sup>が挙げられる。これらの着目する粒径は長年の実績にもとづいて、妥当と思われる値が採用されていると推測されるが、必ずしも粒度分布の全体を的確に表現した指標とはならない。本論文では、粒度分布を負の二項分布で近似し、その分布形を規定する2つのパラメーター ( $r, m$ ) に着目して粒度分布の変化を総合的に評価することを提案している。スレーキング試験後の粒度分布が負の二項分布でどれくらい的確に表現できるかを示しておく。

各サイクル毎の粒度分布を負の二項分布で近似したときのカイ自乗値はいずれの結果も1.2-23.9の範囲にある。危険率5%のときのカイ自乗値は27.6(自由度17)、32.7(自由度21)であるから、試験結果は負の二項分布と見なしてもよいことがわかる。

(5) スレーキングによる細粒化の規則性

粒度分布にたいする負の二項分布の当てはめから得られた ( $r, m$ ) 値の変化は、いずれの結果も細粒化にともなって、C1-B-Nの4サイクルまでの変化を除き、 $r$

が減少、 $m$ が増加の傾向を辿ることがわかった。 $m$ が地質学的な経過年数を表していることから、サイクル数の増加とともにこの指標値が増加することは容易に理解できる。 $r$ の減少は、先述したように最大粒径より対数軸上で等間隔に番号を付したとき、その番号の(平均値の増加率)>(分散の増加率)、に相当することがわっている。したがって、スレーキングによる細粒化の特徴として、最大粒径から $\lambda=1/\sqrt{2}$ の等間隔で粒径番号を付したとき、その番号に対する平均値の増加率が分散の増加率を上回るような変化をしながら細粒化する規則性のあることがわかる。

今回行った試験結果全てを、( $r, m$ )の変化がわかるように $r \cdot \log(m)$ 図上に整理したのがFig.6である。初期粒度、拘束圧の有無、乾燥温度などによらずユニークな直線上にすべての結果がプロットされ、スレーキングの進行とともに、いずれもその直線上を右下方に移動する傾向のあることがわかった。最小自乗近似によってこの直線を式示すれば、

$$r = 0.8 - 0.4 \log(m)$$

が得られ、子細にこの図を眺めると、初期最大粒径毎にほぼ平行な直線上に $r, m$ 値が整理される傾向にあることもわかった。

Fig.6中には3ヶ月、1年後の自然環境下におけるスレーキング試料の結果も示したが、試験条件、試料条件によらず、粒度分布の表現指標である二項分布パラメータ ( $r, m$ ) が常にユニークな関係線上を移動するという点は、室内試験と自然条件での細粒化の進行程度を考える上でたいへん意義深い。つまり、 $r$ が $m$ 、いずれか

**Table 3** Comparisons of index values for grain size distribution after indoor wetting-drying repetitions with those which are obtained from outdoor climate change.

[ 弱風化試料 ]

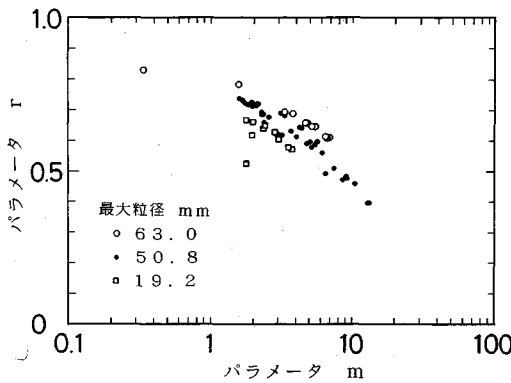
試験	50%径 (mm)		2mm通過率 (%)		残留率差 絶対値総和 (%)		パラメータ			
	3ヶ月	1年	3ヶ月	1年	3ヶ月	1年	r		m	
C4-W S-N	3.3	2.7	0.0	0.0	1.1	1.1	1.9		1.7	
C1-W S-N	1.7	2.7	0.0	0.0	2.0	2.0				
C2-W S-N			0.0	0.0	1.5	1.5	2.8		1.8	
C3-W S-N	1.6	2.5	0.0	0.0						
C5-W S-N			0.0	0.0						

[ 未風化試料 ]

試験	50%径 (mm)	2mm通過率 (%)	残留率差 絶対値総和 (%)	パラメータ	
				r	m
C4-U S-N	3.3	3.3	0.8	0.7	0.8
C1-U S-N	1.1	0.0	3.0	3.7	3.0
C2-U S-N	2.9	0.0	0.9	1.1	0.9
C3-U S-N	1.1	0.0	3.5		
C5-U S-N		0.0			

※ 図中の数字はサイクル数

..... : 測定不能



**Fig. 6** Values of  $(r, m)$  for negative binomial distribution plotted on semi-logarithmic paper.

の指標の乾湿繰り返しサイクル数と自然条件下での経過年数との対応がつけば、室内での強制的な乾湿の繰り返しが自然条件下でどのような時間的効果になっているのか推測できるからである。今回の実験では乾湿繰り返しのサイクル数が少なく、自然状態と室内の細粒化の程度の対応づけができなかったが、乾湿繰り返しのサイクル数を増やした実験も目下実施しており、室内試験の乾湿繰り返しの効果が自然条件下でどのようなタイムスケールに対応しているのかについて今後報告する予定である。

本研究が対象にする泥岩は、スレーキングしてもふり分けによる粒度分析が可能な試料である。スレーキングによって粘土化してしまった場合には、その粒度分布が力学的性質の指標にはなりにくい。したがって、ここに提案する粒度分布にもとづく整理法は意味の薄いものになる。

## 5. 結 論

従来は、ある粒径に着目して、その粒径以下の粒子の増加率によって、乾燥温度、吸水率、拘束圧等の試験条

件による細粒化の進行程度の違いを議論していたが、筆者らは、粒度分布の変化を表現する5つの指標(50%径、2mm通過率、均等係数、残留率差の絶対値の総和、負の二項分布のパラメータ)を乾湿繰り返し各サイクル毎の泥岩試料に適用して、試験条件、試料条件による細粒化の進行程度の相違を粒度の変化から総合的に調べた。本論文から得られた主要な結論をまとめると次のようになる。

1) 今回比較した試験条件において、スレーキングが激しく起きる順序は  $C1 \approx C3 > C2 > C5$  となることだが、均等係数を除く全ての指標の変化よりわかった。乾燥温度よりも、乾燥時の吸水率変化がスレーキングの進行に大きく影響する傾向が全ての粒度指標の変化より明らかになった。

2) どのような試験条件のもとでも、風化試料の方がスレーキングを生じ易い。また、従来の研究からも明らかになっているように、拘束圧を作用させると、スレーキングの進行を抑制できることが、今回の実験からも確認できた。

3) 室内試験と屋外に放置された自然条件下でのスレーキングの進行具合を、粒度分布の変化を介して比較したところ、WSに限定されるが、いずれの指標値を用いた場合でも、自然条件下での細粒化の方が室内試験よりも激しくなり、室内で強制的に与える乾燥・湿潤の行為が自然条件下でのスレーキングに較べて細粒化を促進する試験条件になっているとは必ずしも言えないことがわかった。

4) 種々の細粒化評価法を比較した結果、粒度分布全体を評価しているという意味で、負の二項分布のパラメータによる評価が最適であると考えられた。さらに、負の二項分布を規定するパラメータ  $(r, m)$  が、スレーキングによる細粒化の進行とともにユニークな関係線上を辿りながら規則的に変化することがわかり、 $r$ - $\log(m)$  図上にその関係を整理すると、



$$r=0.8-0.4 \log(m)$$

の直線関係が得られ、この関係は乾燥温度などの試験条件や初期粒度に関係しないこともわかった。この関係は自然条件下でのスレーキング後の試料についても認められた。

本研究は文部省科学研究費補助金（重点領域，課題番号 03805041）に基づき行われたものである。関係各位に感謝申し上げる次第である。また、試料採取に際して（株）アイコ 大山英治、中村吉男の両氏にお世話になった。記して、感謝申し上げる。

#### 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：第3章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.
- 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) Terzaghi, K. and Peck, R. B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, pp.146~147, 1948.
- 6) 仲野良紀：膨張性岩石，土と基礎，Vol. 24, No. 6, pp. 43~44, 1976.
- 7) 森 麟：スレーキング，土と基礎，Vol. 6, No. 5, pp. 29~30, 1978.
- 8) 仲野良紀：泥岩の力学特性と膨張性トンネルおよびフィルダム，土と基礎，Vol. 28, No. 7, pp. 37~43, 1980.
- 9) 大根義男：盛り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.
- 10) 山口晴幸・黒島一郎・福田誠：第三紀泥岩の空隙分布，土と基礎，Vol. 36, No. 12, pp. 55~60, 1989.
- 11) 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，pp. 75~84, 1990.
- 12) 山口晴幸・吉田廣太郎・黒島一郎・福田誠：スレーキングによって破碎した第三紀泥岩の三軸せん断特性，土と基礎，Vol. 38, No. 1, pp. 59~66, 1990.
- 13) 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.
- 14) 佐藤健・永井康貴・中村吉男・大山英治・板橋一雄：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.
- 15) 土の物理的性質に関する新しい試験方法研究委員会：[委員会報告] 土の物理試験に関する最近の動向，新しい土の物理試験方法に関するシンポジウム発表論文集，pp. 5~44, 1992.
- 16) Morgenstern, N.R. and Eigenbrod, K.D. : Classification of Argillaceous Soils and Rocks, ASCE, GT. 10, pp. 1137~1156, 1974.
- 17) Kojima, K. : Geotechnical Evaluation of Soft Rock Mass Based on Softening Characteristics, Proc. of 3rd Int. Cong. of IAEG, Vol. 1, pp. 218~228, 1978.
- 18) 奥園誠之：切土のり面の崩壊とのり面勾配，土と基礎，Vol. 20, No. 2, pp. 35~39, 1972.
- 19) ISRM : Suggested Methods for Determining Swelling and Slake-durability Index Properties, 1972.
- 20) 山口晴行・黒島一郎・福田誠：スレーキング試験に関する考察，新しい土の物理試験方法に関するシンポジウム発表論文集，pp. 141~148, 1992.
- 21) 土質工学会：土の締固めと管理，土質基礎工学ライブラリー 36, pp. 256~270, 1991.
- 22) 日本国有鉄道：地質調査標準示方書（施管第166号），1969.
- 23) 吉中龍之進・小島圭二・田中荘一：簡易スレーキング試験方法の提案，第12回岩盤力学シンポジウム，pp. 36~39, 1979.
- 24) 山口晴幸・吉田慶太郎・黒島一郎・福田 誠：第三紀泥岩のスレーキング現象，土と基礎，Vol. 37, pp. 5~10, 1989.
- 25) 福本武明：粒子破碎の程度を示す指標，土と基礎，Vol. 29, No. 12, pp. 64~65, 1981.
- 26) 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.
- 27) 板橋一雄・立石哲郎・田口泰敏：砂の粒度分布の表現法とその比較，土と基礎，Vol. 37, No. 4, pp. 23~28, 1989.
- 28) Leslie, D.D. : Large Scale Triaxial Test on Gravelly Soils, Proc. 2nd Pan American Conf. S.M., Vol. 1, pp. 181~201, 1963.

(1993. 4. 14 受付)

## SOME CONSIDERATIONS ON SLAKING TEST OF MUDSTONE THROUGH NEGATIVE BINOMIAL DISTRIBUTION

Takeshi SATO, Kazuo ITABASHI and Makoto KAWAMURA

Different five series of laboratory and outdoors slaking tests were carried out to investigate the resistibility of mudstone for slaking due to wetting-drying repetitions. Test results were analyzed using some indexes, those which are based on the grain size distribution obtained from sieve analysis at each cycle of the repetitions. These analyses concluded that the grain size distribution after slaking can be effectively evaluated by the negative binomial distribution, and two parameters prescribed the distribution were plotted on an unique relation curve depending on the maximum value of initial grain size distribution used in the tests.