

# 粒度分布に基づく泥岩のスレーキング特性の評価

名城大学工学部 正会員 板橋 一雄  
基礎地盤コンサルツ(株) 正会員 和田 英孝  
名城大学工学部 学生会員 岩田 賢

## 1. まえがき

破碎性の高いぜい弱岩（泥岩、頁岩、凝灰岩等）は自然の風化作用により激しい粒子破碎（スレーキング現象）を起こすことが知られている。そして、多くの研究機関において、種々のスレーキング試験方法やその結果の評価法が提案されている。例えば、日本道路公団では初期粒度19.0～37.5mmの試料 3Kgを用い、24時間水浸-24時間炉乾燥（温度110°C）を1サイクルとして、5サイクル行う試験方法を提案している。そして、5サイクル終了後の試料の 9.52mm ふるい通過率をスレーキング率として定義している。

種々の報告によれば、ぜい弱岩の種類・試験条件・サイクル数などによって、そのスレーキング特性が著しく異なることが確認できる。そこで、本研究では採取地点や初期粒度の異なるぜい弱岩を用いたスレーキング試験結果に対して、著者らが提案してきた粒子破碎評価法を適用し、破碎性の相違を定量的に示すことならびに粒子破碎評価法の適用性の検討を目的とした。今回用いた試験データは本研究室で実施したスレーキング試験結果の他に、土質工学会や土木学会の論文集等に掲載されたスレーキング試験結果を解析データとして用いた。

## 2. 粒子破碎評価法

本研究では粒子破碎量を定量的に評価する方法として、粒径加積曲線上の点の移動に基づく方法と、残留率の変化に基づく方法に注目して行った。そこで、以下に本研究に用いた粒子破碎評価法についてその定義や特徴等をまとめて示す。

1) 50%径（中央粒径、 $D_{50}$ ）による評価法<sup>1)</sup> この評価法は粒子破碎に伴う粒径加積曲線上の一点（50%径）の変化を用いて粒子破碎量を評価する方法である。粒度が大きく変化し、 $D_{50}$ が大きく変化する場合には適切な評価方法になりうると考えられるが、50%径以下の粒子のみが破碎したり、50%径以上の粒子が50%径以上の複数の粒子に破碎した場合には変化しないという欠点がある。

2) Leslie系の評価法（2mm通過率）<sup>2)</sup> この評価法は粒径加積曲線上の一点の加積通過率に注目する方法である。その定義は「ある粒径以下の残留率の増加量」となっており、フィルターの目詰まり等の細粒分の増加程度が問題になる場合に有効であろう。しかし、「ある粒径」が規定されておらず、研究者によって異なった粒径を用いていることが問題となる。そこで、本研究では「ある粒径」を日本統一土質分類法の粒径区分の砂と礫の境界の粒径（2mm）に統一して解析を行った。

3) 均等係数（ $D_{60}/D_{10}$ ）による評価法<sup>3)</sup> この評価法は粒径加積曲線上の2点（ $D_{60}$ 、 $D_{10}$ ）を用いる方法である。均等係数は土質工学の分野において一般に利用されており、理解し易い。しかし、粒子破碎によって粒径加積曲線が平行に移動したり、10%径以下の粒子のみが破碎した場合等、均等係数は変化しない場合も考えられる。そのような場合適切な評価法とは言い難い。

4) 残留率差の絶対値の総和による評価法<sup>4)</sup> 粒子破碎前後の残留率の差の絶対値の総和により粒子破碎量を求める方法である。この方法は上記の3つとは異なり粒度分布全体の変化をとらえる点で優れた方法であると考えられる。しかし、粗粒分減少量や細粒分増加量などの区別が不可能であり、粒径加積曲線

---

Evaluation of the Slaking Properties of Mudstone based on the Grain Size Distribution

K. Itabashi, M. Iawata (Meijo University), H. Wada (Kisojiban Consultants Co., LTD)

の形状やその変化をとらえることができない。また、粒子破碎前後の残留率分布が大きく移動し、全く重ならない場合には、この数値が上限の200%となってしまう、その後の粒子破碎量を評価できなくなる。本研究では、初期粒度の残留率を基準として、各スレーキングサイクル後の残留率との差を求め、残留率差の絶対値の総和としている。

5) 負の二項分布のパラメータ (r, m) による評価 福本は、簡単な4つの仮定に基づいて粒子破碎モデルを導いている<sup>5)</sup>。そして、まさ土の粒子破碎現象に適用し、その適合性を検討している。それによれば、残留率分布が離散分布である負の二項分布によって表現できる。

$$f_n = \binom{n+m-1}{n} (1-r)^n r^m$$

ここに、 $f_n$  : n番目ふるいの残留率  $r, m$  : 負の二項分布のパラメータ  
 $n$  : 最大粒径から対数軸上で等間隔に取ったふるい番号 (0, 1, 2, ...)

また、著者らは、まさ土の一次元圧縮試験結果や泥岩のスレーキング試験結果に対しても負の二項分布を当てはめ、その適合性の検討を行っている。そして、二つのパラメータ (r, m) が片対数グラフ上で一意的な関係を示すことを明らかにしている<sup>6)</sup>。なお、負の二項分布のパラメータは、最大粒径から数えた粒径番号nと残留率 $f_n$ から求められる平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ を用いて、次式によって求められる。

$$r = \frac{\sigma^2 - \mu}{\sigma^2} \quad m = \frac{\mu^2}{\sigma^2 - \mu}$$

### 3・解析データ

本研究の解析では、本研究室で実施した瑞浪泥岩のスレーキング結果（初期粒度3種類、最大100サイクル）に加え、土質工学会や土木学会の論文集等に掲載されているぜい弱岩のスレーキング試験結果（粒径加積曲線）を利用した。一般のスレーキング試験結果の粒径加積曲線は、JIS規格ふるい（0.032mm～125.0mm:49個）すべてを用いて描かれてはいない。また、土質試験標準ふるい（0.074mm～50.8mm:12個）がすべて用いられたとしても、このふるい目間隔は対数軸上でも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規格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考え、解析データを作成した。本研究で用いた試験結果の一覧を表-1に示す。ここでは、試料の採取地点または地層名、初期粒度分布、スレーキング試験条件などがまとめてある。試験試料は、主に、三浦半島の逗子層泥岩、岐阜県瑞浪層の泥岩、淡路島和泉層群の頁岩である。スレーキング試験に関しては、その他にも示唆に富

表-1 ぜい弱岩のスレーキング試験一覧表

粒度区分	整理番号	参考文献番号	採取地点、地層名	初期粒度分布 (mm)	水浸時間	水浸温度	乾燥時間	乾燥温度	最終サイクル
分布粒度	1	7	埼玉県寄居町新第三紀児玉層泥岩	19.1~38.1	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	3
	2	8	中生代白亜紀有馬層頁岩	9.52~25.4	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	5
	3	9	福井県いわき市第三紀凝灰質泥岩	0.074~19.1	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	5
	4	10	神奈川県三浦半島新第三紀三浦層群逗子泥岩	不明	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	15
	5	11	神奈川県三浦半島新第三紀三浦層群逗子泥岩	25.4~38.1	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	10
	6	12	神奈川県内泥岩	19.1~38.1	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	40
	7-①	13	神奈川県三浦半島新第三紀三浦層群逗子泥岩	19.1~38.1	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	15
	7-②	"	"	19.1~38.1	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	15
	7-③	"	"	19.1~38.1	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	15
	8-①	14	淡路島南部和泉層群頁岩	63.0~106.0	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	10
8-②	"	"	90.0~125.0		屋外放置			59日	
9-①	15	岐阜県瑞浪市瑞浪泥岩	9.50~19.0	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	10	
均一粒度	9-②	"	"	53.0~63.0	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	10
	10-①	16	神奈川県三浦半島新第三紀三浦層群逗子泥岩	250 $\mu$ m <sup>7)</sup> 0.7 $\mu$	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	10
	10-②	"	"	250 $\mu$ m <sup>7)</sup> 0.7 $\mu$	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	10
	10-③	"	"	250 $\mu$ m <sup>7)</sup> 0.7 $\mu$	2.4時間	常温	2.0日	20℃	3
	10-④	"	"	250 $\mu$ m <sup>7)</sup> 0.7 $\mu$	2.4時間	常温	2.0日	20℃	3
	11-①	17	岐阜県瑞浪市瑞浪泥岩	53.0~63.0	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	30
	11-②	"	"	31.5~37.5	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	100
	11-③	"	"	16.0~19.0	2.4時間	常温	2.4時間	110℃	20

んだ研究成果があるが、本研究では粒径加積曲線に着目しているため、ここに示した資料は粒径加積曲線が明確に示されているものを選定してある。また、スレーキングに対する初期粒度の影響を見るために、JIS規格ふるい1個分に留まる初期粒度分布の試料あるいはブロック状の試料を均一粒度として示してある。そして、初期粒度分布が2個以上のふるい残留率から成る試料を分布粒度として示してある。スレーキング試験条件は多くの試験例で、日本道路公団のスレーキング条件が採用されている。一般に、スレーキングサイクル数は10回程度であるが、スレーキングサイクル数の多い整理番号4、6、7、11に興味を持たれる。また、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整理番号8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・スレーキングによる粒子破碎の評価

ここでは、前述した粒子破碎評価法を用いて、スレーキング試験による粒子破碎特性を定量的に評価した結果を示す。図-1~4にスレーキングサイクルの増加に伴う50%径、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、これらの図では初期粒度分布が均一粒度の場合と分布粒度の場合で二つに分けてある。そして、図中の番号は表-1の整理番号に対応している。図-1はスレーキングサイクルに伴う50%径の変化を示している。50%径はサイクル数の増加と共に指数関数的に減少していることが分かる。また、初期粒度の差異は明確ではないが、初期粒度の50%径の大きな試料の方が大きな減少傾向を示しているように見られる。さらに、整理番号11の本研究室で実施した試験結果については50%径の減少量が小さい。これは、本研究室で用いた泥岩が他の文献にみられる泥岩に比べ破碎しにくいものであったためと思われる。図-2はスレーキングサイクルに伴う2mm通過率の変化を示している。サイクル数の増加と共に2mm通過率が増加していることが分かる。また、10サイクル目の2mm通過率で比較すると、初期分布が均一粒度の場合には3~10%程度であるが、初期分布が分布粒度の場合には3~35%と大きな幅が認められる。この内、整理番号1、2、5、6、7-③の試料では大きな2mm通過率の増加を示している。これらの試料は初期粒度分布の幅が広いものであるから、初期粒度の幅が広く、スレー

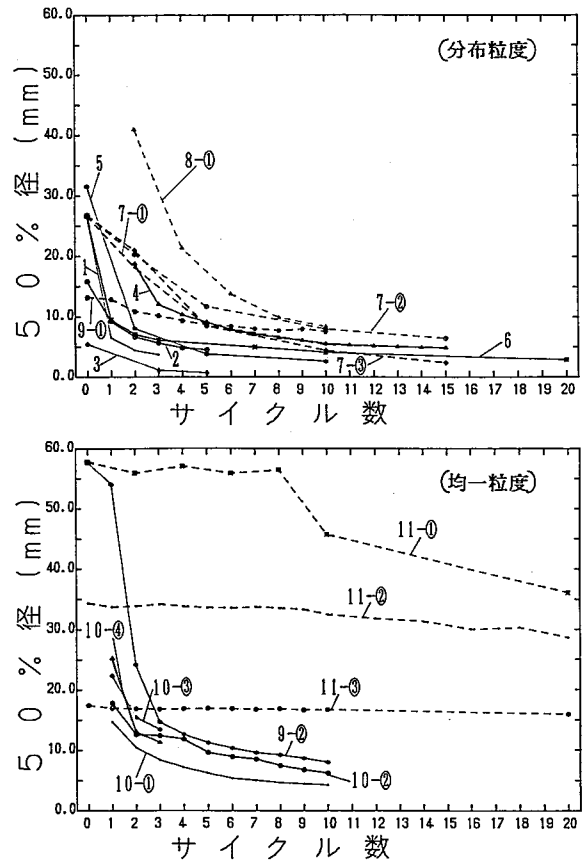


図-1 サイクル数に伴う50%径の変化

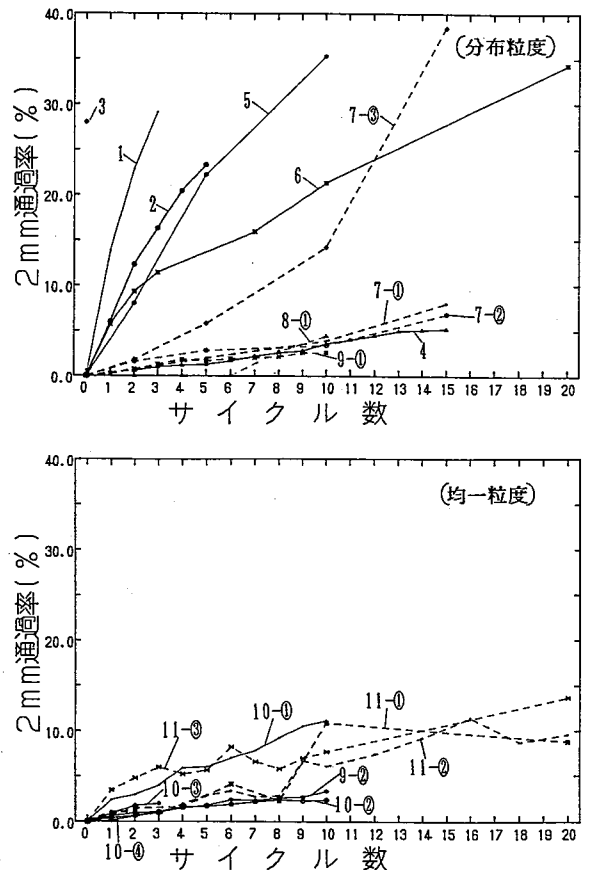


図-2 サイクル数に伴う2mm通過率の変化

キングし易いぜい弱岩の場合には、2 mm通過率が大きく増加するものと考えられる。図-3はサイクル数に伴う均等係数の変化を示している。整理番号11-①~③の本研究室で実施した試験結果についてはバラツキが見られるものの、分布粒度と均一粒度とも数サイクル終了後はある値に収束しており、その後は大きな変化を示していないことが分かる。これは、粒子破碎により粒径加積曲線が細粒側に平行移動したことが原因で、均等係数がある値から変化しなくなったためである。また、初期粒度分布の幅の広い整理番号3の試料では、均等係数がスレーキングと共に減少している。これは、10%径の減少よりも、60%径の減少割合が大きくなったためである。以上のように、均等係数は増減する場合があるし、増加しても小さなサイクル数で一定値に収束してしまうので、均等係数によるスレーキングの評価法は適切な方法とは言い難い。図-4はサイクル数に伴う残留率差の絶対値の総和の変化を示している。分布粒度と均一粒度ともサイクル数の増加と共に残留率差の絶対値の総和が急激に増加していることが分かる。整理番号10-①~④は、スレーキングが1サイクル終了した時点でもうすでに残留率差の絶対値の総和の上限値である200%を越えている。そのため、それ以降の粒子破碎を定量的に評価することができなかった。従って、残留率ヒストグラムが大きく変化する材料に対しては、この評価方法は適切ではないと考えられる。また、整理番号11-①~③の本研究室で実施した試験結果をみると他の試験結果と比較してその値の増加量が小さいことが分かり、本研究室で用いた泥岩は破碎性の小さい試料であったと考えられる。

図-5は、負の二項分布のパラメータ( $r$ ,  $m$ )の関係を片対数グラフで示している。分布粒度と均一粒度とも図上である狭い幅にある直線関係を示しながらサイクル数の増加と共に右下に移動する傾向を示している。粒子破碎量の少ない整理番号11の試料を除けば、日本各地のぜい弱岩であり、初期粒度が異なるにもかかわらず、一定の関係を示していることは興味深い。また、暴露試験の結果である整理番号8-②の結果も同様な直線関係の中に存在し、こうした評価法の有効性を示しているものと考えられる。また、今後、スレーキング試験結果とともに暴露試験結果も集積されれば、暴露日数が通常のスレーキングサイクル数と

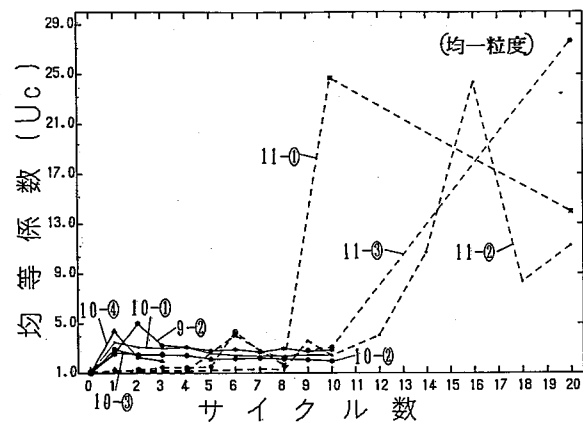
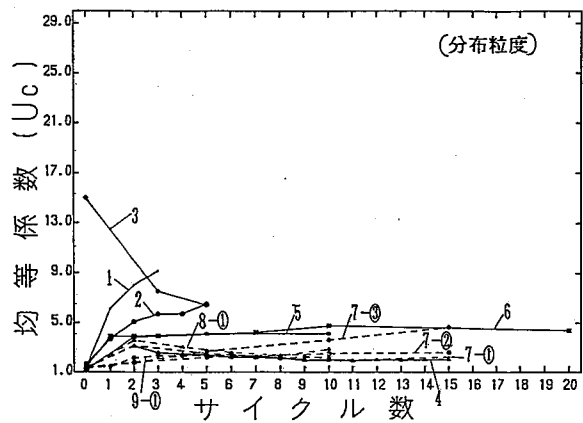


図-3 サイクル数に伴う均等係数の変化

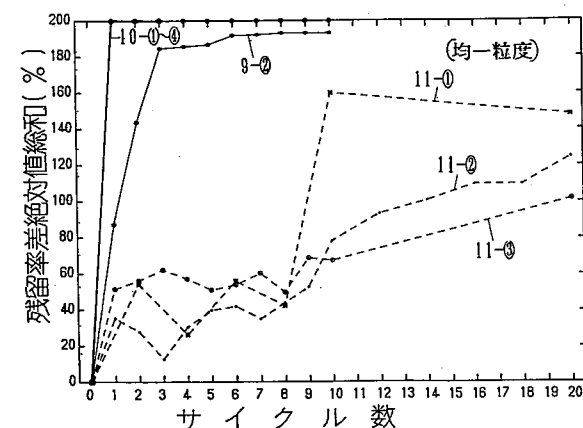
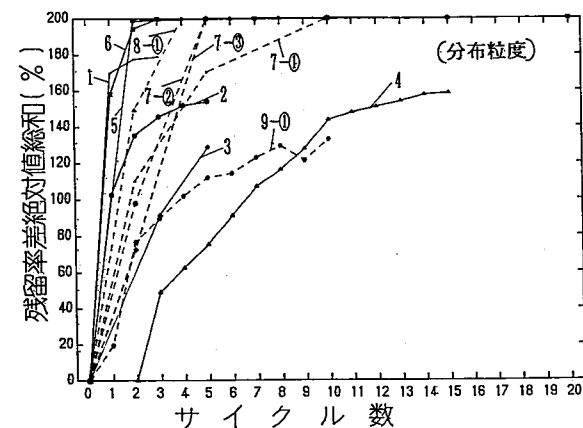


図-4 サイクル数に伴う残留率差の絶対値の総和の変化

対応させることが可能になると考えられる。

整理番号11-①～③の本研究室で実施したスレーキング試験結果を見るとその移動量が小さく、30サイクル以降100サイクルまで、 $r=0.9$ 、 $m=0.5$ 程度のところで収束する傾向が見られる。これは、本研究室で用いた泥岩は他の文献で見られる泥岩と比較すると破碎性が小さいものであり、そのため破碎による粒径加積曲線の変化が少なくパラメータ( $r$ 、 $m$ )の変化量が小さな値を示したことが原因であろう。そして、パラメータ( $r$ 、 $m$ )がある値に収束した時点(実験では30サイクル程度の時)で本試験で用いた泥岩のスレーキングによる粒子破碎の限界が示され、この点の $r$ 、 $m$ に基づけば、スレーキングに伴う最終の粒度分布が予測できる。

### 5・あとがき

本研究では種々のぜい弱岩のスレーキング試験結果を収集し、著者らが提案してきた粒子破碎評価法を適用し、破碎性の相違を定量的に示すことならびに粒子破碎評価法の適用性の検討を目的とした。得られた結果を要約すると、以下ようになる。

#### ①種々の粒子破碎評価法によって採取地点や初期粒度

分布の異なるぜい弱岩のスレーキング試験結果からその破碎性の違いを示すことができた。特に本研究室で用いた瑞浪泥岩は他の文献に見られる泥岩よりも破碎性の低いことが確認できた。

②粒子破碎評価法の適用性を検討した結果、均等係数は数サイクルのスレーキング後に一定値に収束して変化せず、スレーキング評価法としては適当ではない。2mm通過率は初期粒度分布に幅がありスレーキングし易い材料の場合には大きな変化を示すので、このような条件下での評価指標に利用できる。また、残留率差の絶対値の総和は、初期粒度分布が均一粒度であって、大きな粒度変化を示すと、最大値200%に収束して、その後の粒子破碎の評価ができなくなる。そこで、この方法は粒度分布が徐々に変化する場合の評価指標に利用できる。

③ぜい弱岩の種類や初期粒度が異なるにもかかわらず、負の二項分布のパラメータ( $r$ 、 $m$ )は片対数グラフ上で狭い幅にある一定の直線関係を示し、スレーキングによる粒子破碎とともに右下に移動している。このような一意的な関係を示すことは、この粒子破碎評価法の有効性を示しているものと考えられる。また、粒子破碎量が小さいと、図上の移動量も少なく、本研究室で実施した瑞浪泥岩の場合には、30サイクル以降の結果が図中の一点に収束しており、粒度分布の予測が可能である。

④屋外での暴露試験結果を負の二項分布のパラメータ( $r$ 、 $m$ )で評価すると、室内のスレーキング試験結果と同様な $r \sim m$ 関係を示し、屋外暴露試験と室内スレーキング試験との対応関係を明確にできる可能性がある。

最後に本研究は、文部省科学研究費(重点領域研究:研究代表者 河邑眞)の補助を受けた。また、資料整理に当たっては、本学4年の籠島浩二君、熊崎新君、林富士男君、森忠広君の協力を得た、記して謝意を表する。

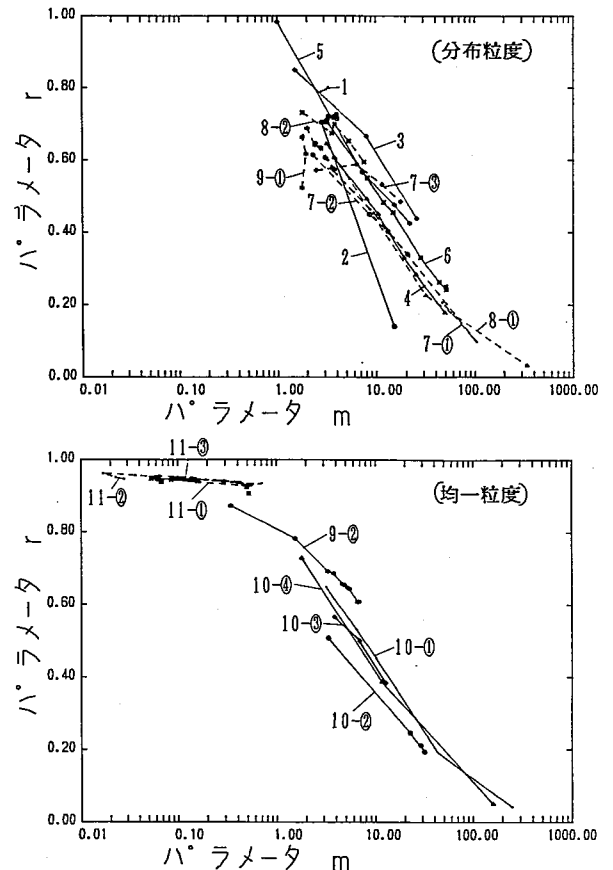


図-5 負の二項分布のパラメータ( $r$ 、 $m$ )の変化

参考文献

- 1) 松尾新一郎・沢孝平：マサ土の粒度分布特性による破碎性の検討，土木学会第28回年次学術講演会概要集Ⅲ，pp.288～289，1973.
- 2) Leslie, D. D: Large Scale Triarial on Gravelly Soils, Poc. 2nd Pan American Conf. S. M, Vol. 1, pp. 181～202, 1963.
- 3) 西田一彦：真砂土の工学的特性について，土木学会関西支部講演概要集，pp.81～82，1963.
- 4) 谷本喜一・西勝：締固めによる土粒子の破碎について，土木学会第18回年次学術講演会概要集Ⅲ，pp.17～18，1963.
- 5) 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講演概要集，pp.165～166，1987.
- 6) 板橋一雄・立石哲郎・河邑眞・佐藤健・和田英孝：泥岩の粒子破碎特性とまさ土との比較，第27回土質工学研究発表会概要集，pp.449～450，1992.
- 7) 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，第28巻，7号，pp.45～52，1980.
- 8) 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概要集，pp.593～596，1982.
- 9) 赤津武男・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，土と基礎，第32巻，7号，pp.15～20，1984.
- 10) 谷口敬一郎・楠見晴重・名草俊比古・武山峰典：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概要集，pp.963～964，1987.
- 11) 黒島一郎・福田誠：泥岩のスレーキング現象，土木学会第42回年次学術講演会概要集Ⅲ，pp.392～393，1987.
- 12) 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概要集，pp.1137～1138，1988.
- 13) 福岡秀基・小西武・村沢譲・名草俊比古・新津誠：逗子層における凝灰質泥岩と泥岩の劣化状況比較，第24回土質工学研究発表会概要集，pp.1085～1086，1988.
- 14) 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回年次学術講演会概要集Ⅲ，pp.480～481，1990.
- 15) 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評価法，土木学会論文集投稿中
- 16) 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.
- 17) 板橋一雄・和田英孝・熊崎新・森富雄・佐藤健：泥岩のスレーキングに伴う粒子破碎の評価，平成4年度土木学会中部支部研究発表会，pp.453～454，1993.