

# 破碎性土質材料の一次元圧縮ならびに単純せん断挙動と粒子破碎特性

名城大学理工学部 正会員 板橋 一雄  
名城大学理工学部 学生会員 牧 岳志  
名城大学理工学部 学生会員 高木 聖崇  
名城大学理工学部 学生会員 久原 善光

## 1. まえがき

花崗岩質岩石が風化したまさ土ならびに土と岩の中間の性質を示す材料である軟岩は、破碎性の顕著な土質材料である。今日、まさ土地帯の利用頻度は高まっており、まさ土斜面の豪雨時の崩壊やまさ土材料の盛土の沈下による災害が発生している。このように、まさ土は応力変化や風化などによって経時的に強度が低下し、建設当初は安全であった土構造物や斜面が不安定になる場合がある。また、従来軟岩は、施工材料として利用されてこなかったが、近年堅固な岩石質材料が入手困難になり、盛土材料として利用されるようになってきた。しかし、盛土施工後の乾湿繰り返しによって細粒化が生じ、圧縮沈下の問題の生じた事例が報告されている。こうした粒子破碎現象は、土質材料の粒度特性に変化をもたらすばかりではなく、その力学的特性にも影響を及ぼすため重要な問題と考えられる。しかし、粒子破碎量の評価法は、試験条件や目的によって異なったものが用いられており、その客観的な評価は難しい。そこで本研究では、破碎性土質材料としてまさ土と軟岩を用いて、一次元圧縮試験ならびに単純せん断試験を実施し両材料の圧縮、せん断挙動を明らかにするとともに、試験後の粒度を測定し、種々の評価法を用いて粒子破碎特性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 粒子破碎評価法<sup>1)</sup>

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、粒径の分布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述べる。

①50%径（中央粒径， $D_{50}$ ）による評価法 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）を用いて粒子破碎量を評価する方法である。

②Leslie系の評価法（2mm通過率） 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」となっている。そこで、本研究では「ある粒径」を砂と礫の境界の粒径（2mm）に統一して解析を行った。

③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、単位時間毎に等比級数的に分解するモデルを作り、それを粒度式と呼んでおり、粒径番号 $n$ の残留率 $q_n(r, m)$ を次式で表現している<sup>2, 3)</sup>。

$$q_n(r, m) = \binom{n+m-1}{n} (1-r)^m \cdot r^n \quad (1)$$

ここに、 $q_n$  :  $n$  番目のふるいの残留率       $r$  : 相隣り合う粒径の残留率の比  
 $m$  : 粒子の分解回数に対応するパラメータ ( $m=1, 2, 3, 4, \dots$ )  
 $n$  : 最大粒径から等間隔・離散的にとった粒径番号 ( $n=0, 1, 2, 3, \dots$ )

筆者らは、まさ土と軟岩の一次元圧縮試験結果、単純せん断試験結果および泥岩のスレーキング試験結果に対して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<sup>4-6)</sup>。そして、二つのパラメータ  $r, m$

が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。また、式(1)が、確率・統計学でいう負の二項分布であるので、パラメータ  $r$ 、 $m$  を粒径番号  $n$  に関する平均値  $\mu$  と分散  $\sigma^2$  を用いて、次式によって求められる。

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

### 3. 試料と試験方法

試験に用いた試料は、愛知県藤岡町で採取したまさ土と北海道宗谷郡猿払村で採取した軟岩を用い、均一粒度の試料を作製した。ここでは、二つの破砕性土質材料の圧縮・せん断特性の相違や粒子破砕特性の相違を調べるために、両試料とも初期粒径4.00~4.75mmを用いた試験結果について示す。今回の試験では、アルミ板による柔拘束型の単純せん断試験装置を使用した。試料ペDESTALに固定した試料拘束リングとゴムスリーブ(内径60mm)の中に、まさ土(約81g)あるいは軟岩(約74g)の試料を三~四等分にして詰め、試料ペDESTALの側面を一層につき約300回ソフトハンマーで打撃した。敷き詰めた後、試料の初期間隙比を最密で均一にすることを目的として、さらに打撃を加え供試体の高さを20mmに統一した。それぞれの土質材料につき、12個の供試体を作成し、半数は一次元圧縮試験に用い、残りは単純せん断試験に用いた。供試体の詳細については表-1に示すが、初期間隙比は、各材料毎に狭い範囲に入っており、同様な供試体が最密の状態で作製できたものと考えられる。また、土粒子密度は軟岩の方が高いにもかかわらず、供試体の初期間隙比は高くなっており、試料の粒子形状や表面特性に関する粒子の詰まり方の違いの大きなことが予想される。一次元圧縮試験では、単純せん断試験装置にセットした供試体に、垂直圧力を種々の最大圧力(1.6~25.6kgf/cm<sup>2</sup>)まで段階的に加えた。各荷重段階においては、30分間の垂直変位量を測定した。また、単純せん断試験では、一次元圧縮終了後、その最大圧力を一定に保ち、せん断速度を一定(0.6mm/min)として、水平変位が12mmとなるまで実施した。両試験では、垂直圧力と垂直変位、せん断応力と水平変位をコンピュータによって自動計測(0.2秒間隔でデータ計測)した。それぞれの試験が終了した後、試験前後の粒度の変化を調べるために供試体すべてを用いて粒度試験を実施した。粒度試験ではJIS規格のふるいすべてを用いて、電動式ロータップ型振とう機で一律15分間のふるい分けを実施した。

表-1 供試体の初期条件

試料名	粒径 (mm)	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	試料重量 (g)	初期間隙比	供試体数
まさ土	4.00~4.75	2.605	80.960~80.970	0.842~0.844	12
軟岩	4.00~4.75	2.774	74.255~74.265	1.162~1.165	12

### 4. 試験結果と考察

4.1 一次元圧縮試験 図-1には、二つの試料の垂直変位~荷重関係を示す。両試料とも、垂直荷重の増加に伴い、ほぼ直線的に垂直変位が増加している。垂直圧力25.6kgf/cm<sup>2</sup>について比較してみると、まさ土の垂直変位量が約1.1mmであるのに対して、軟岩の垂直変位量は約2.2mmと2倍になっている。このことから、軟岩の圧縮性の高いことがわかる。これは、各試料の粒子の形状や表面特性の相違に基づく粒子の詰まり方の違いや粒子自体の強度の相違が現れたものと考えられる。また、図-2にe-logp関係を示すが、垂直圧力の増加に伴って間隙比の減

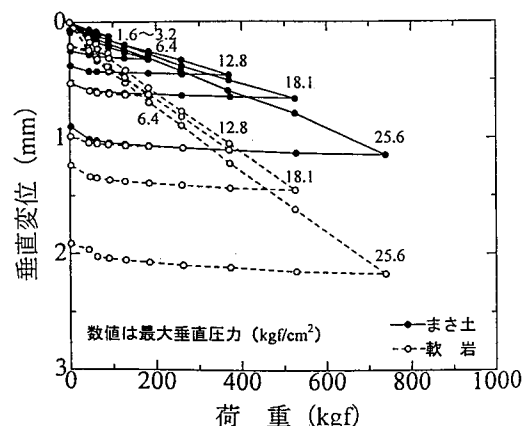


図-1 垂直変位~荷重関係

少する様子がわかる。初期間隙比の大きな軟岩は、やはり空隙比の減少が大きく現れている。さらに興味深いことは、この空隙比の減少傾向が粘土の圧密試験結果に類似していることである。すなわち、圧密降伏応力のような圧力が存在し、除荷時の関係は図上でほぼ平行な直線になっていることである。そこで、圧密降伏応力を求める方法を用いて、空隙比が急激に減少する圧力を求めてみた。その結果、まさ土では  $p_c = 11.91 \text{ kgf/cm}^2$ 、軟岩では  $p_c = 11.03 \text{ kgf/cm}^2$  となり、両者ともほぼ同様の値となっている。以下では、この圧力を圧縮降伏応力と呼ぶこととする。

図-3には、各荷重段階毎の垂直変位～時間 (logt) 関係を示す。この図より、垂直変位は時間的に増加し、一般に知られているクリープ関数のような関係 (図上で直線関係) を示すことがわかる。また、その勾配は垂直圧力の増加に伴って増加し、垂直圧力が高い場合には、30分経過しても垂直変位の増加の著しいことがわかる。従って、各荷重段階の載荷時間を変えれば、得られる  $e$ -logp 関係の異なることに注意が必要である。こうした時間依存挙動の原因は、粒子自体や粒子骨格のクリープ変形あるいは時間遅れを伴った粒子破碎などが考えられるので、載荷時間を変えた一次元圧縮試験を実施することに興味を持たれる。

図-4には、一次元圧縮試験後の供試体の粒径加積曲線を比較して示してある。垂直圧力の小さい場合には、粒径加積曲線の順序は一定していないが、垂直圧力が大きくなると、その増加に伴い、粒径加積曲線は順序よく細粒側 (左側) に移動している。また、垂直圧力が圧縮降伏応力より大きく、粒度変化の激しい場合を比較すると、軟岩の方が細粒化の程度が大きくなっており、垂直変位や空隙比の大きな変化の原因の一部が粒子破碎であることを示唆している。

**4.2 単純せん断試験** 図-5には、せん断応力～せん断ひずみ関係を示す。両試料ともグラフの大きな傾向にはほとんど変わりはない。すなわち、せん断初期から数パーセントまでのせん断ひずみの間に、せん断応力が急増し、3～7%程度のせん断ひずみにおいて最大せん断応力を示し、その後はわずかな増減はあるもののほぼ一定値を保っている。ただし、詳細に比較すると、せん断応力の微小変動はまさ土の方が多く認められる。これは、両試料の粒子形状、粒子の表面特性、供試体内の粒子の詰まり方、骨格構造などの相違が影響しているものと想像できる。例えば、次のような現象が想像できる。せん断応力に対してまさ土粒子は高いせん断強度を発揮するため、ある粒子に応力集中が生じ、せん断応力の微小な増加が現れる。しかし、粒子は脆性に富むために、過剰な応力集中のために粒子が破碎

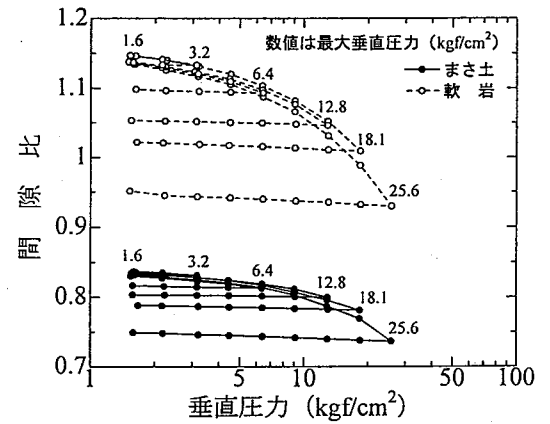


図-2 e-logp関係

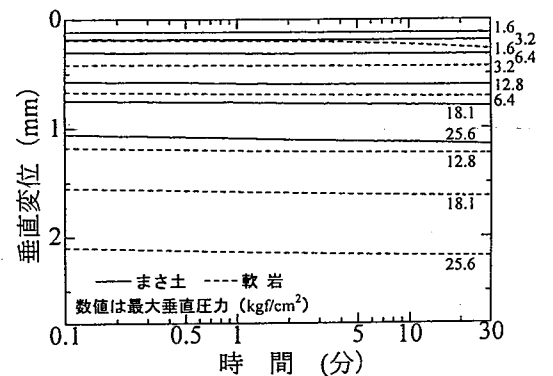


図-3 垂直変位～時間関係

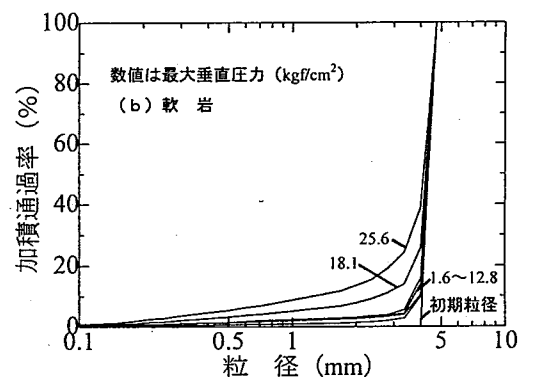
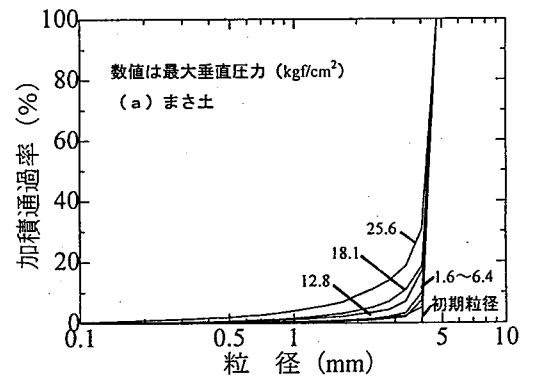


図-4 一次元圧縮試験後の粒径加積曲線

され、逆に微小な応力減少が現れる。一方、軟岩は、ある粒子に応力集中が生じたとき、せん断応力が高まる前に粒子破碎が生じたと考えられ、微小な応力増加はほとんど現れなかったと想像できる。また、せん断応力の微小な減少もほとんど認められず、せん断応力～せん断ひずみ曲線は滑らかなものになったと考えられる。図-6には、垂直ひずみ～せん断ひずみ関係を示す。垂直圧力が小さい間では、ダイレタンシーのために大きな体積膨張を示すが、垂直圧力が3.2kgf/cm<sup>2</sup>以上になると体積収縮が生じている。また、せん断ひずみ1%付近までは、両試料とも体積膨張が見られる。これは、圧縮終了後に垂直圧力に耐えられる安定した骨格構造となっているため、せん断に伴う体積膨張により粒子間の接点数が減少し、その接点に加えられる力が増加しないと大きな粒子破碎が起こらないためだと考えられる。まさ土と軟岩を比較してみると、軟岩の方が体積膨張が少なく、体積収縮は大きくなっている。この原因は前述したように、両試料の粒子形状、粒子の表面特性、供試体内の粒子の詰まり方、骨格構造などの相違であろうと考えられる。

図-7には、最大せん断応力～垂直圧力の関係を示す。両試料ともほぼ同様の位置に最大せん断応力がプロットされ、ほぼ同じ破壊包絡関係を示している。全応力範囲の破壊包絡関係を直線と仮定すると、次式が得られ、正の接片が現れる。

$$\text{まさ土} : \tau = 0.922 + \sigma \tan 21.6^\circ \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\text{軟岩} : \tau = 0.829 + \sigma \tan 21.9^\circ \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

さらに、詳細に見れば、わずかに上に凸の曲線的な破壊包絡関係を示しているため、原点からの勾配を摩擦角と考えると、垂直応力の増加に伴い摩擦角は減少することになる。

図-8には、単純せん断試験後の粒径加積曲線を示す。一次元圧縮試験の結果と比較すると、両試料とも粒径加積曲線の大きな移動が認められ、せん断応力の作用に伴い粒子破碎の進行した状況がわかる。特に、垂直圧力を圧縮降伏応力より大きくした供試体では、大きな粒度変化が認められる。また、両試料を比較すると、軟岩の方が粒度変化が大きく、破碎しやすい土質材料であるといえる。

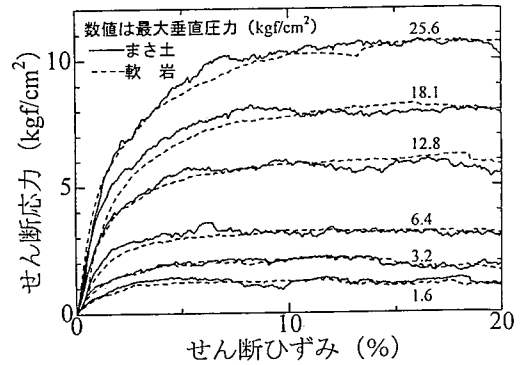


図-5 せん断応力～せん断ひずみ関係

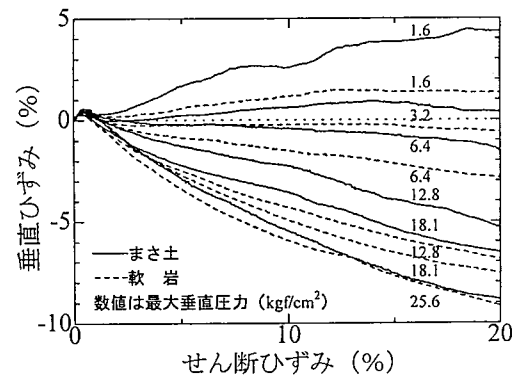


図-6 垂直ひずみ～せん断ひずみ関係

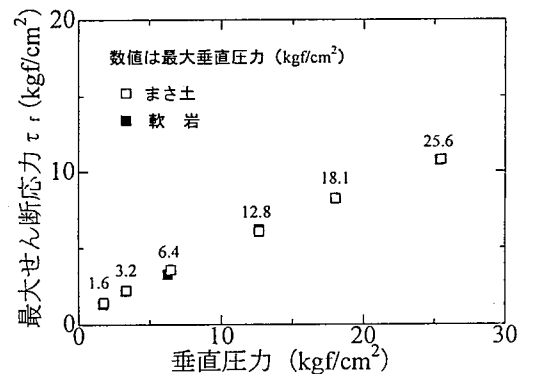


図-7 最大せん断応力～垂直圧力

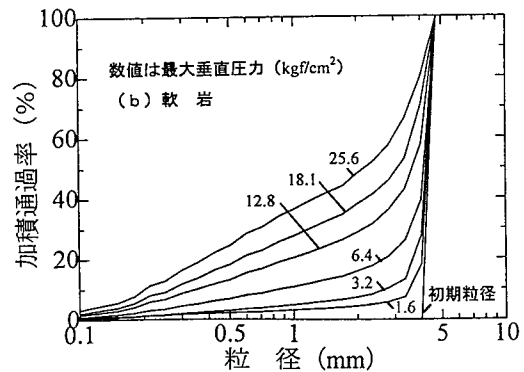
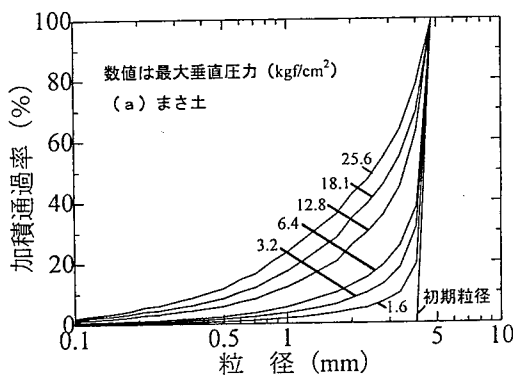


図-8 単純せん断試験後の粒径加積曲線

## 5. 一次元圧縮試験・単純せん断試験における粒子破碎評価

ここでは、前述した粒子破碎評価法を用いて、一次元圧縮試験、単純せん断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-9には、50%径による評価結果を示す。両試料とも、一次元圧縮試験では50%径に大きな減少は見られないが、単純せん断試験では垂直圧力が12.8kgf/cm<sup>2</sup>を越えたあたり、すなわち、圧縮降伏応力を越えたあたりから、大きく減少しており、粒子破碎の激しく生じたことがわかる。前述した両試験の力学的挙動から、軟岩の方が破碎性の高い土質材料であると考えられたが、この評価法では材質の違いによる破碎特性の相違が明確には表れていない。ただし、最大垂直圧力が25.6kgf/cm<sup>2</sup>の時には、わずかに軟岩の方が破碎性の高いことがわかる。以上のことより、この評価法は粒子破碎が激しく生じる結果を評価する場合には、有効な方法と考えられる。

図-10には、2mm通過率による評価結果を示す。垂直圧力が増加するに伴い、2mm通過率も増加している。特に、単純せん断試験での粒子破碎の著しいことがわかる。また、両者の試験結果とも軟岩の方が大きな値をとっており、軟岩の方が破碎性の高い土質材料であることがわかる。Leslie系の評価法ではどの粒径の通過率に着目するかが問題となるが、供試体の初期粒径を考慮した上で、適切な粒径の通過率（今回は2mm通過率）を設定することで有効な評価法になると考えられる。

図-11には、負の二項分布のパラメータ  $r$ 、 $m$  による評価結果を示す。パラメータ  $r$  ~ 垂直圧力関係を見ると、全体的な傾向としては、垂直圧力の増加に伴わずかに  $r$  が減少する傾向が認められる。また、軟岩について見ると、一次元圧縮試験と単純せん断試験の結果で明瞭な差異が現れており、後者の場合の方が  $r$  の大きな減少を示しており、粒子破碎が激しいほど  $r$  が大きく減少する関係を示しているものと考えられる。一方、まさ土の場合には、垂直圧力の小さい一次元圧縮試験において、わずかの粒度変化しか生じないために、粒度から計算されるパラメータに大きなばらつきが生じており、 $r$  に一定の傾向が現れていない。ただし、単純せん断試験の結果では、軟岩と同様の  $r$  の低下傾向が現れている。パラメータ  $m$  ~ 垂直圧力関係を見ると、一部の結果を除けば、明瞭な増加傾向を示している。特に、単純せん断試験の結果では、両試料とも  $m$  の大きな増加を示している。

福本の粒子分解モデルによると、パラメータ  $r$  は粒子の破碎段階にかかわらず一定値が仮定され、パラメータ  $m$  は粒子の分解回数に対応するパラメータと考えられている。実験結果とこれらの仮定とを比較すると、パラメータ  $m$  に関しては、合致した結果となっている。すなわち、大きな垂直圧力を作用させる

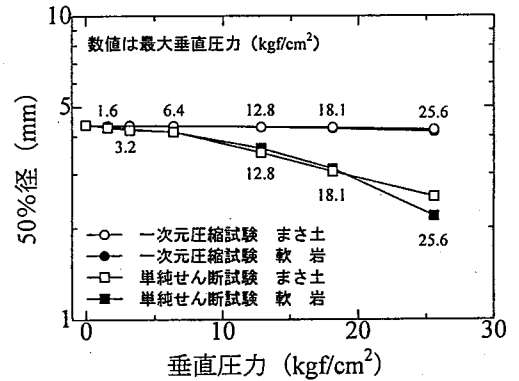


図-9 50%径による評価

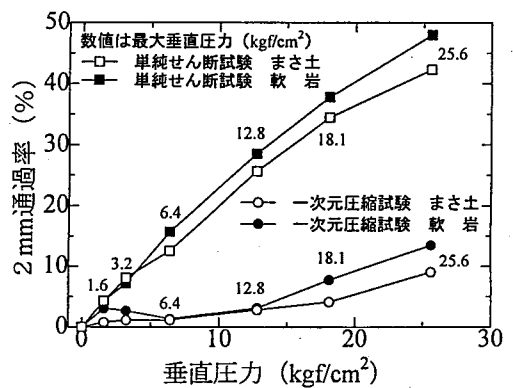


図-10 2mm通過率による評価

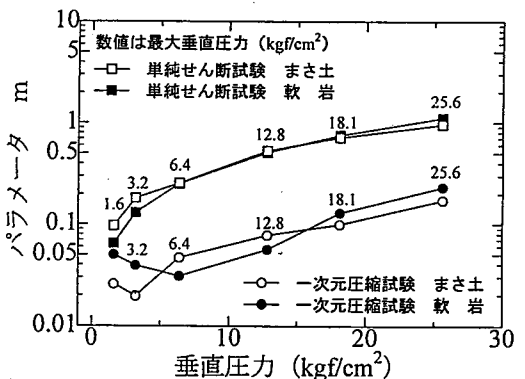
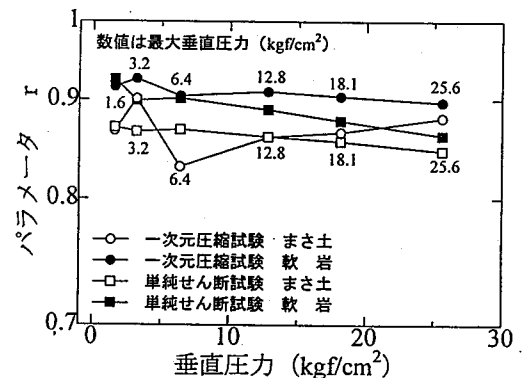


図-11 負の二項分布のパラメータ  $r$ 、 $m$  による評価

と、粒子破碎が激しく生じるために、 $m$ が大きくなっている。一方、パラメータ  $r$  は仮定とは異なり、わずかではあるが、粒子破碎の進行に伴い減少傾向を示している。そこで、式(2)の特徴を考えてみた。

式(2)から明らかなように、 $(r, m)$  と  $(\mu, \sigma^2)$  の間には、一対一の対応関係がある。その関係を示すと、図-12が得られる。特徴的な点は、原点を通る直線が  $r = \text{一定}$  の関係を示すこと、 $\mu = \sigma^2$  の直線が  $r = 0$  の関係を示すこと、 $m = \text{一定}$  の関係はわずかに下に凸の曲線関係を示すことなどである。

図-13は、今回の実験結果を、番号に関する分散  $\sigma^2$  と平均値  $\mu$  との関係で表示したものである。一次元圧縮試験の結果が原点近くにほぼ直線的な関係でプロットされ、単純せん断試験の結果は、その延長線上にわずかに上に凸の関係でプロットされている。すなわち、試料が同じであれば、試験法にかかわらず、同様な関係を示しており、興味深い。ただし、原点を通る直線関係にはなっておらず、これはパラメータ  $r$  が減少することと対応している。また、軟岩とまさ土とを比較すると、軟岩の方が上側にプロットされており、同一の平均値  $\mu$  の値に対しては、軟岩の分散  $\sigma^2$  の方が大きくなることを示している。このことは、軟岩の方が幅広く粒子破碎が進行していることの現れと考えられる。

## 6. あとがき

本研究では、破碎性土質材料であるまさ土と軟岩を対象として、一次元圧縮試験と単純せん断試験を行い、圧縮挙動・単純せん断挙動を明らかにするとともに、それらに伴う粒子破碎特性を明らかにした。得られた結果を要約すれば、以下ようになる。

- ①一次元圧縮試験の結果、粘土の圧密降伏応力と類似した圧力が存在し、その圧力（圧縮降伏応力）を越えると、粒径加積曲線の移動が顕著に現れた。
- ②最密に詰めた供試体の一次元圧縮試験では、軟岩の方が大きな垂直変位の増加、間隙比の減少を示した。
- ③一次元圧縮試験では、クリープ変形のような時間依存挙動が認められた。
- ④両試料の単純せん断試験のせん断応力～せん断ひずみの関係は、ほぼ同じ傾向を示したが、まさ土供試体におけるせん断応力の微小変動が顕著に認められた。
- ⑤両試料の単純せん断試験の破壊包絡線はほぼ同じになり、わずかに上に凸の曲線的な関係になった。
- ⑥圧縮降伏応力より大きな垂直圧力を加えた供試体の単純せん断試験では、顕著な粒子破碎が認められた。
- ⑦粒子破碎の程度を評価する種々の方法の特徴が明らかになった。

今後の検討課題としては、載荷時間の増加による  $e$ - $\log p$  関係の変化と粒子破碎の進行程度、供試体の初期間隙比の違いによる圧縮・せん断挙動と粒子破碎程度の変化などが、考えられる。

## 参考文献

- 1) 板橋一雄、立石哲郎、和田英孝：まさ土の圧縮試験に伴う粒度分布の変化、第3回地盤工学シンポジウム（土質学会中部支部）、pp. 157-162, 1991.
- 2) Fukumoto, T.: Particle Breakage Characteristics of Granular Soils, S & F, Vol. 32, No. 1, pp. 26-40, 1992.
- 3) Fukumoto, T.: A Grading Equation for Decomposed Granite Soil, S & F, Vol. 30, No. 1, pp. 27-34, 1990.
- 4) 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.
- 5) 大脇忠雄、浅井健、村中達朗、板橋一雄：まさ土の単純せん断挙動と粒子破碎、土木学会中部支部講演概要集, pp. 399-400, 1996.
- 6) 橋詰康之、小笠原聖、岩田賢、板橋一雄：まさ土の一次元圧縮挙動と粒子破碎、土木学会中部支部講演概要集, pp. 371-371, 1995.

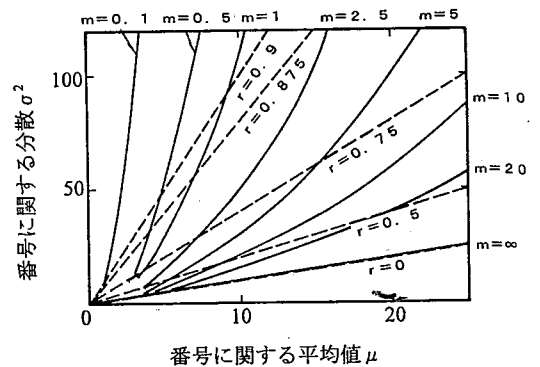


図-12  $(r, m)$  と  $(\mu, \sigma^2)$  の関係

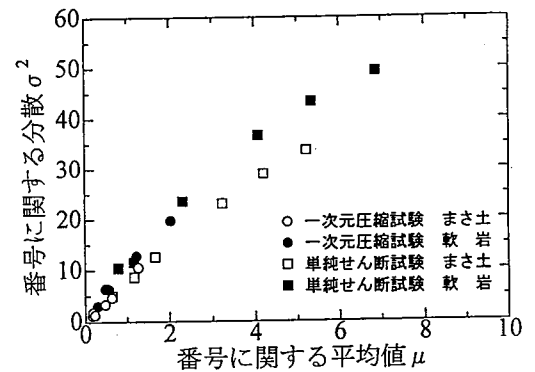


図-13 番号に関する分散  $\sigma^2$  と平均値  $\mu$  の関係