

まさ土の圧縮試験に伴う粒度分布の変化

名城大学理工学部 正会員 板橋 一雄
正会員 立石 哲郎
学生会員 和田 英孝

1. まえがき

著者らは、まさ土の粒子破碎による粒度分布の変化を調査してきた。それは、初期の粒度を同じにした試料土に異なった大きさの締固めエネルギーを加え、粒度分布の変化を調べたものである。それによれば、締固め回数の増加とともに粒子破碎が進行し、粒径加積曲線が左にシフトすること、粒子破碎量は破碎前後の残留率差の絶対値の総和により評価できること、粒度分布は負の二項分布によって近似でき、そのパラメータの変化に特異な関係が認められることなどが明らかになっている¹⁾²⁾。締固め試験では、作用外力が動的であるため、粒子破碎が激しく生じるという利点がある反面、荷重が加わった際の試料の変位量が測定できないこと、実質的に試料に加わったエネルギーがよくわからないことなどの欠点がある。そこで、今回の報告ではまさ土に対して一次元圧縮試験を実施し、荷重～間隙比関係ならびに粒子破碎の状況を明らかにすることを目的とした。

2. 粒子破碎の評価方法

この報告で用いた粒子破碎の評価方法は、粒径加積曲線の移動量から得られるものであり、その評価方法を簡単にまとめると以下ようになる。

(1) 均等係数の変化による評価法 曲率係数とともに粒度分布の状態を示す均等係数を用いた評価法である。西田(1963)は粒径加積曲線の形の変化に着目し、その変化が粒子破碎を示していると考えた。これは粒径加積曲線の2点の移動量の比を利用したものである³⁾。

(2) 細粒分の増加による評価法 Leslie(1963)は、ある粒径の加積通過率の増加量(%)に着目している。これは粒径加積曲線上の、ある粒径の加積通過率の変化を利用したものである。

$$Lb = (f' - f)$$

ここに、 f' 、 f はそれぞれ粒子破碎前後のある粒径の加積通過率である。

(3) 残留率差の絶対値の総和による評価法 谷本・西(1963)は、粒子破碎前後の各ふるいの残留率差の絶対値の総和によって、粒子破碎量を評価した。この方法は、粒子破碎に伴う粒径加積曲線の全体の移動量を評価できる点で上記の二つの方法より優れている⁴⁾。式で表現すると次式となる。

$$S = \sum |p' - p|$$

ここに、 p' 、 p は粒子破碎前後の残留率、 Σ は各ヒストグラムの総和を意味する。

(4) 粒度分布に適合する分布関数のパラメータの変化による評価法 福本や著者らの研究によると、まさ土の粒度分布は負の二項分布で近似できることがわかっている⁵⁾。そこで、このパラメータの変化によって粒子破碎を評価した。負の二項分布の粒径 n 番目の残留率 $q_n(r, m)$ は次式で表される。

$$q_n(r, m) = \binom{n+m-1}{n} (1-r)^m r^n \quad \begin{array}{l} n=0, 1, 2, \dots \\ m=1, 2, 3, \dots \end{array}$$

ここに、 r は粒子分解の形式に関わるパラメータ、 m は粒子の分解回数に関わるパラメータ、 n は仮定した最大粒径から対数目盛り上で等間隔、離散的に取った粒径番号を意味している。また、負の二項分布の特性より、パラメータ r と m は粒径番号に関する平均 μ_n と分散 σ_n^2 によって、次式のように表される。

Compression Test and Grain Size Distribution of a Decomposed Granite Soil

K. Itabashi, T. Tateishi and H. Wada (Meijo University)

$$r = \frac{\sigma_n^2 - \mu_n}{\sigma_n^2} \qquad m = \frac{\mu_n^2}{\sigma_n^2 - \mu_n^2}$$

3・試料の調整と試験方法

三河地方一ヶ所から採取したまさ土を気乾燥した後、0.25mmふるい上で水洗いし、粗粒分に付着した細粒分を洗い流した。そして、炉乾燥した試料をJIS規格ふるいすべてを用いて、各粒径別に分類した。この区分された試料を配合して、負の二項分布に近い初期粒度をもつ試料を作成した。これは、粒子破碎に伴い負の二項分布のパラメータが変化する傾向を明らかにするためである。ただし、負の二項分布は0～∞の範囲を示す分布であるから、完全に一致させることはできない。そこで、負の二項分布のパラメータを $r=0.1$ 、 $m=10$ とした理論分布を求めた後、その頻度が0.01以下となる部分を無視するために、残りの部分に0.01以下の合計を比例配分して、新たな頻度分布を求めた。こうして求めた新たな頻度分布に負の二項分布を当てはめてみると、 $r=0.0339$ 、 $m=31.01$ が得られた。なお、負の二項分布を当てはめる際の粒径の離散化に当たっては、試料の最大粒径は4.75mm（土質工学会基準の細礫の最大粒径）とし、粒径比 λ は $\sqrt[4]{2}$ （ふるいで採用されている値）とした。その結果、粒径の平均値は3.680mm、標準偏差は0.622mm（粒径番号に関する平均値 μ_n は1.087、標準偏差 σ_n は1.061）となった。この分布は、細粒分の少ない分布であり、粒子破碎によって細粒分が増加する傾向がよくわかるようにしてある。

この様にして決定した初期粒度分布が表-1に示してある。なお、区分された各粒径ごとの土粒子密度を繰り返し測定したところ、粒径1mm以下では、2.69～2.70の間ではほぼ一定値となっていることがわかった。また、粒径1mm以上の場合には、粒径の増加とともに土粒子密度は2.70から2.62へとほぼ直線的に減少していることもわかった⁶⁾。さらに、そのばらつきはどの粒径でも0.01～0.03の範囲に入っており、非常に小さくなっている。そこで、表-1には初期粒度分布に用いた粒径の土粒子密度の平均値も付記してある。

土粒子を力学的に破碎させるには、締固め試験やせん断試験、圧縮試験、まさ土の試料調整方法である落下法などがあるが、この報告では一次元の圧縮試験を実施した。締固め試験と較べると、粒子破碎の程度は少ないと思われるが、圧縮試験では、供試体の変位が測定でき、間隙比の変化が計算できること、載荷量の大きさによって粒子破碎の程度がコントロールできることの利点が挙げられる。

まさ土の粒子破碎は含水比により影響を受けるとい指摘がある⁷⁾ので、その影響を除くために、用いる試料は炉乾燥試料とした。粒径別に区分した炉乾燥試料を表-1に示す割合いで約200gを配合し、最大・最小密度試験用モールドを利用し、土質工学会基準の「砂の最大密度・最小密度試験方法」を採用して、供試体が最大密度となるように詰めた。この供試体準備方法では、容器側面を木づちで打撃し、余盛り部分を直ナイフで切るようになるが、今回の試験では、その際の粒子破碎量はわずかであることが予想されるので無視してある。さらに、余盛り部分が必要となるために、供試体内の粒度配合が表-1の配合に必ずしもなっているとは限らないが、ここでは、各粒径の試料が配合どうり混ざっているものと仮定した。この方法で19供試体を作成したが、それらの初期間隙比を計算した結果、0.871～0.919の範囲を示した。この初期間隙比を求める際には、前述したように粒径により土粒子密度が異なる⁶⁾ので、その点を考慮して間隙比は求めてある。この初期間隙比のばらつきの範囲は大きいかも知れないが、後に示す同一時期に実施した供試体では、初期間隙比の幅が小さくなっている。

上述のように準備した供試体をそのまま圧密試験機にセットし、一次元圧縮試験を実施した。11個の供試体については、圧密試験に用いられる荷重を段階的に加え、最大圧力が0.3、0.6、0.8、1.2、1.6、3.2、6.4、12.8 kgf/cm²に達してから段階的に除荷を行った（段階載荷と呼ぶ）。なお、各荷重段階では、載荷時間10分、除荷時間1分とし、3秒間隔で鉛直変位量を自動計測した。この鉛直変位量と初期間隙

比より、一次元圧縮試験時の供試体間隙比を計算した。残りの8供試体については、荷重を一度に30分間加えた後、5分間の除荷を行った(単一載荷と呼ぶ)。その際の最大圧力は、1.2, 3.2, 6.4, 12.8 kgf/cm²の4種類とし、2回の実験を行った。載荷・除荷後の各供試体は、その粒度変化を見るために、JIS規格ふるいを用いて、ロータップ型振とう機にかけ、一律30分のふるい分けを行った。

4・試験結果とその評価

図-1は、段階載荷の場合の荷重～間隙比関係を示している。同図(a)、(b)は試験を実施した時期で2つに分けてあり、図中には供試体の初期間隙比も記入してある。どの荷重～間隙比曲線を見ても、粘土の $e \sim \log p$ 関係に類似しており、載荷初期に急激な間隙比の減少が現れ、荷重が大きくなるとともにある一定の間隙比に収束する傾向を示している。また、除荷時の荷重～間隙比関係は荷重の大きい部分でほとんど間隙比が変化せず、載荷重がゼロに近いところで急激な膨張を示している。図(a)では、最大荷重の異なる供試体の初期間隙比の範囲が0.902~0.907となっており、載荷時の荷重～間隙比曲線が狭いバンド幅内に納まっている。ただし、図(b)では、供試体の初期間隙比に大きなばらつきが現れており、その荷重～間隙比関係にもばらつきが認められている。このことは、初期間隙比や初期粒度が同一となる供試体を作成することの難しさ示しているものと考えられる。

図-2には、表-1に示した供試体の初期粒度分布と段階載荷を行った後の各供試体の粒径加積曲線が示してある。図中には、供試体に加えた最大圧力が記入してあるが、最大荷重の増加とともに、粒子破砕量が大きくなり、粒径加積曲線が左に移動していることがわかる。特に、最大圧力が6.4, 12.8 kgf/cm²と大きい場合には、初期粒度分布から大きく移動している。

表-2には、段階載荷の場合の粒子破砕に伴う粒径加積曲線の移動量を評価する数値が示してある。すなわち、均等係数 U_0 、2mmの加積通過率(%)、粒子破砕前後の残留率差の絶対値の総和 S (%)、50%粒径(mm)が示してある。粒子破砕後の50%粒径は初期の粒度分布の値よりも小さくなっており、最大圧力12.8kgf/cm²の場合で、0.08~0.15mm程度の移動量を示している。粒度分布の中心的傾向を示す50%粒径は減少する傾向を示しているが、粒径加積曲線の細粒部分の移動量の方が大きいため、均等係数は初期の値より大きくなっている。同様に、初期の粒度分布には存在しなかった2mm以下の粒子量も最大圧力の増加とともに増えており、最大圧力12.8kgf/cm²の場合で、約4.5%の値となっている。残留率差の絶対値の総和は粒子破砕前後の粒径加積曲線の全体的な移動量を示しているため、最も大きな変化量を示しており、最大圧力12.8kgf/cm²の場合で、13~18%の値になっている。

次に、粒度分布を離散化し(最大粒径4.75mm、粒径比 $\lambda = \sqrt[4]{2}$ とした)、負の二項分布を当てはめた場合のパラメータ r 、 m とカイ2乗値、自由度などを表-3に示した。カイ2乗値の結果より、すべての粒度分布は負の二項分布と見なしてよいことがわかる。粒子破砕とともに平均粒径が減少し、標準偏差が増加している。また、それに伴い負の二項分布のパラメータ r は増加し、 m は減少の傾向を示している。このパラメータ r 、 m の関係を示すと図-3となる。図中には、初期分布の点と加えた最大圧力が示してある。単一載荷の場合には明確ではないが、段階載荷の場合には、最大圧力の増加とともに r が増加し、 m が減少する傾向が明確に現れている。○印と●印で異なるのは、粒度試験に用いたふるい数の相違のためであるが、いずれにせよ、 $r \sim \log m$ の図上で直線的な関係が認められることは興味深い。さらに、単一載荷の場合もほぼ同様な関係を示している。これらの供試体の初期間隙比や荷重～間隙比関係に大きなばらつきが生じているけれども、すべてのデータに対してこの関係が認められる原因としては、前述したように初期間隙比の計算方法に問題があること、まさ土の粒子破砕が初期間隙比や荷重～間隙比関係に対して鈍感であり、それらが異なっているにもかかわらず、同じ粒子破砕を示すことなどが考えられる。

5・あとがき

本研究では、初期粒度を同じにしたまさ土の一次元圧縮試験を実施し、その荷重～間隙比関係を明らかにした。また、まさ土の粒子破碎状況を見るために、加える最大圧力を変化させた供試体の粒度試験を実施し、粒子破碎の評価指標を求め比較した。

得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 試料調整した最大粒径4.75mmのまさ土を最大密度・最小密度試験容器に詰めると、最小間隙比が0.871～0.919となった。砂と比較して、この間隙比に大きなばらつきが認められる原因は、容器寸法に対して最大粒径が大きいことや、まさ土粒子の表面特性が考えられる。今後、同一間隙比を持つ供試体の作成方法に関する検討が必要になる。
- (2) 初期間隙比の同じ供試体に対して、最大圧力を異にした一次元圧縮試験の結果、載荷時の荷重～間隙比関係は狭いバンド幅に納まっており、載荷初期に急激な間隙比の減少が現れ、荷重が大きくなるとともにある一定の間隙比に収束する傾向を示した。また、除荷時の荷重～間隙比関係は荷重の大きい部分でほとんど間隙比が変化せず、載荷重がゼロに近いところで急激な膨張を示した。
- (3) 載荷後の各供試体の粒度試験の結果を用い、各種の粒子破碎評価方法で比較したところ、最大圧力の増加に伴い、粒子破碎の進行する状況が明らかになった。特に、粒度分布の全体的な変化を評価する二つの指標（すなわち、残留率差の絶対値の総和と負の二項分布による評価）が有効であると考えられる。また、負の二項分布の二つのパラメータ r , m の間には特異な関係が認められた。

今後の検討課題としては、試験結果の再現性を検討するとともに、ここでは、1種類の初期粒度の供試体の検討を行ったが、さらに異なった粒度分布の試料についても検討して行きたい。また、（荷重～間隙比～変位量～エネルギー～粒子破碎量）の関係を明らかにして行きたい。なお、本研究に当たり、本学4年の細岡生也君（現名古屋大学大学院）の協力を得た。記してここに謝意を表する。

参考文献

- 1)板橋一雄・立石哲郎・田口泰敏：まさ土の粒子破碎に伴う粒度変化の評価、第25回土質工学会研究発表会、pp. 287～288, 1990
- 2)田口泰敏・板橋一雄・立石哲郎：締固めによるまさ土の粒度特性の変化、平成元年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp. 298～299, 1990
- 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、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回土質工学会研究発表会講演概要集、pp. 165～166, 1987
- 6)和田英孝・板橋一雄・立石哲郎：まさ土の粒径による物理的性質の変化、平成2年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp. 278～279, 1991
- 7)松尾新一郎・福本武明：マサ土の破碎性に影響する諸要因、土質工学会論文報告集、Vol. 16, No. 4, pp. 85～92, 1976

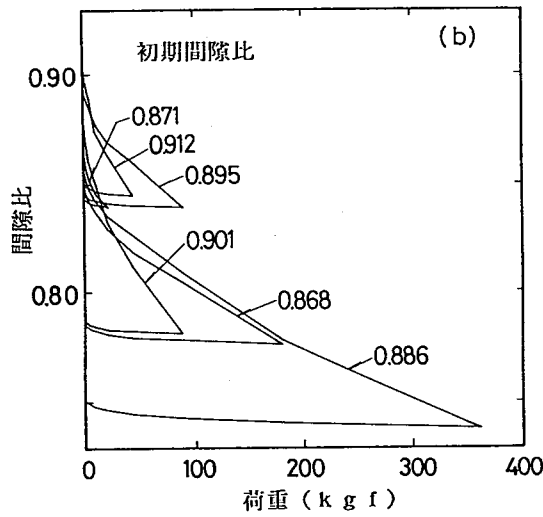
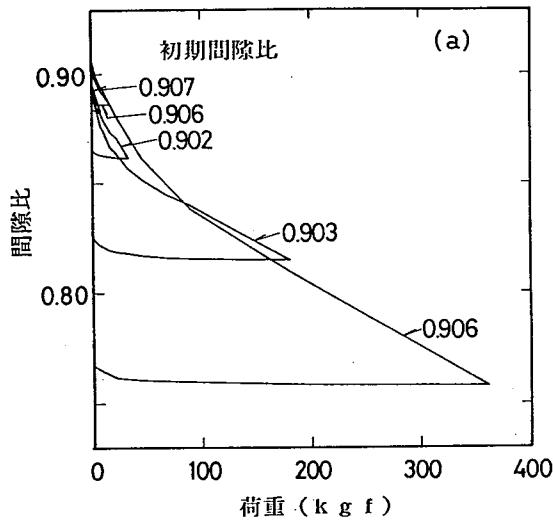


図-1 荷重～間隙比の関係

表-1 供試体の初期粒度分布と各粒径の土粒子密度

粒径 d (mm)	頻度 (%)	土粒子密度 (gf/cm ³)
4.00~4.75	35.17	2.626
3.35~4.00	35.17	2.633
2.80~3.35	19.36	2.637
2.36~2.80	7.74	2.646
2.00~2.36	2.52	2.652

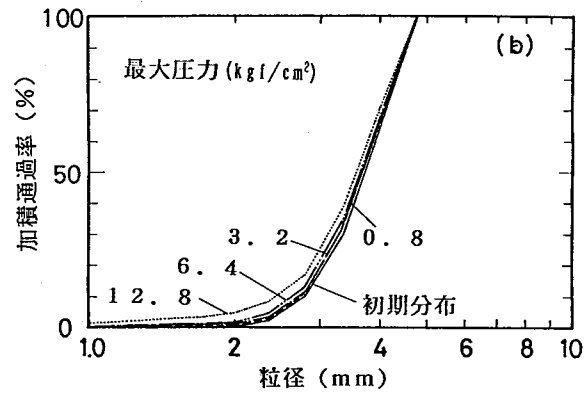
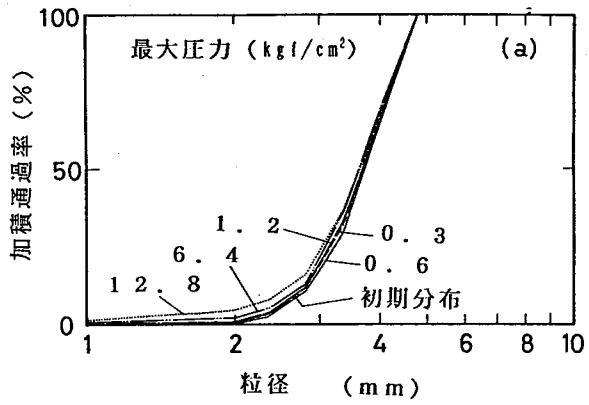


図-2 供試体の初期粒度分布と载荷試験後の粒度分布

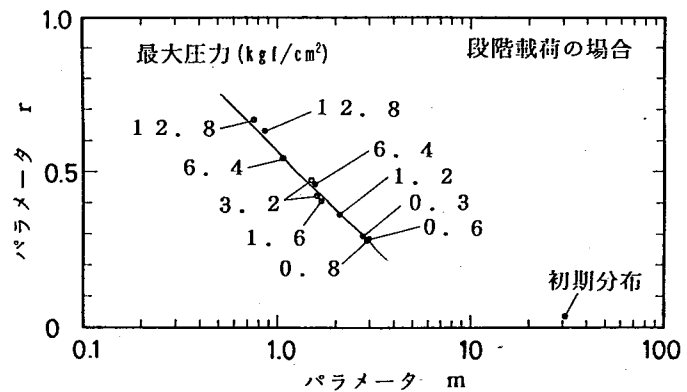
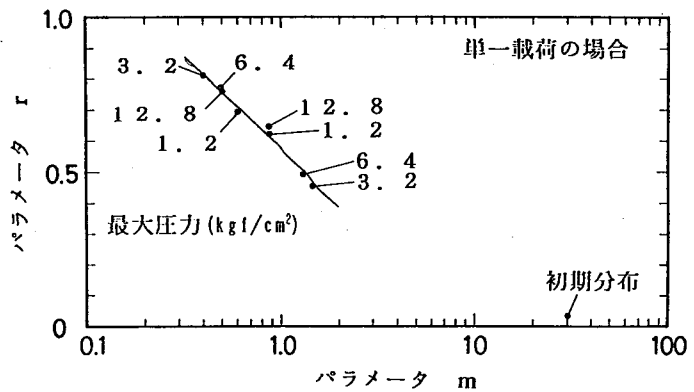


図-3 負の二項分布のパラメータ r, m の関係

* 荷重により 粒のばらつきになる

* 粒子破砕の特性を反映

表-2 粒子破碎の指標一覧表 (a)

最大圧力 (kgf/cm ²)	均等係数 U _c	2.00mmの 加積通過率(%)	残留率差の 絶対値の総和S(%)	50%径 (mm)
調整試料	1.402	0.00	-----	3.712
0.3	1.437	0.58	3.88	3.696
0.6	1.375	0.67	10.70	3.682
1.2	1.438	0.90	6.12	3.686
6.4	1.443	1.96	11.78	3.615
12.8	1.552	4.42	13.37	3.629

(b)

最大圧力 (kgf/cm ²)	均等係数 U _c	2.00mmの 加積通過率(%)	残留率差の 絶対値の総和S(%)	50%径 (mm)
調整試料	1.402	0.00	-----	3.712
0.8	1.414	0.39	5.79	3.666
1.6	1.450	0.67	8.05	3.696
3.2	1.441	1.68	10.96	3.678
6.4	1.456	1.60	10.54	3.644
12.8	1.543	4.60	18.36	3.576

表-3 分布関数によるパラメータの変化 (a)

最大圧力 (kgf/cm ²)	r	m	平均粒径μ (mm)	標準偏差σ (mm)	カイ二乗値	自由度 f
調整試料	0.0339	31.01	3.680	0.622	0.542	3
0.3	0.2928	2.796	3.658	0.707	3.862	16
0.6	0.2813	2.958	3.657	0.704	5.394	16
1.2	0.3609	2.103	3.649	0.737	4.986	16
6.4	0.4587	1.572	3.584	0.804	11.619	16
12.8	0.6260	0.882	3.550	0.917	12.280	16

(b)

最大圧力 (kgf/cm ²)	r	m	平均粒径μ (mm)	標準偏差σ (mm)	カイ二乗値	自由度 f
調整試料	0.0339	31.01	3.680	0.622	0.542	3
0.8	0.2856	2.949	3.645	0.709	3.510	21
1.6	0.4084	1.700	3.662	0.752	8.312	26
3.2	0.4761	1.515	3.563	0.820	12.604	23
6.4	0.5491	1.085	3.608	0.844	14.442	26
12.8	0.6692	0.789	3.508	0.967	19.824	26