

# 粒度変化によるまさ土の粒子破碎の評価

名城大学理工学部

板橋 一雄

立石 哲郎

四日市中央工業高校

田口 泰敏

## 1. まえがき

まさ土は破碎性の高い粒子で構成されていることが知られている。その粒子破碎は、粒度分布に変化をもたらすのみならず、強度・変形特性などの力学的性質にも影響を及ぼし、工学的な立場からも重要な問題の一つになっている<sup>1)</sup>。そこで、粒子破碎に伴う土の力学的性質の変化をとらえる前に、粒子破碎に伴う粒度変化の状況を客観的に把握する方法を確立することが望まれる。

粒子破碎のとらえ方には、種々の方法が提案されてきている<sup>2)</sup>。一方、著者らはまさ土の粒度分布に対して、対数正規分布や負の二項分布が適用できることを明らかにしてきた<sup>3)</sup>。そこで本研究では、人工的に粒子破碎を生じさせたまさ土試料の粒度分布の変化傾向を明らかにすることを目的とする。

## 2. 従来の粒子破碎の評価方法

粒子の破碎（粉碎）は粉体工学で取り扱われる主要テーマの一つであるが、土質工学の分野では粒度分布や粒子表面積の変化に着目した研究が進められている。この内、粒度分布の変化については、種々のとらえ方がなされている。従来の評価法を簡単にまとめると、以下のようになる。

(1) 粒径加積曲線上の点の移動量 松尾・沢（1973）は単一粒径のまさ土の破碎性の指標として、破碎率と移動率を定義している。そして、混合粒度のまさ土を落下試験により破碎し、粒度分布の中央粒径  $d_{50}$  や 20% 粒径  $d_{20}$  の移動量を評価指標としている<sup>4)</sup>。

$$H = 1 - \frac{d_{50}'}{d_{50}} \quad \dots (1) \quad I = 1 - \frac{d_{20}'}{d_{20}} \quad \dots (2)$$

ここに、 $d_{50}$ 、 $d_{50}'$  は破碎前後の中央粒径、 $d_{20}$ 、 $d_{20}'$  は破碎前後の 20% 粒径である。また、Leslie（1963）は最小ふるい以下の土粒子の増加量を評価指標としている。

これらの、評価指標は粒径加積曲線の 1、2 点の移動量を利用しようとするものである。

(2) 均等係数の変化量 西田（1963）は、土質工学で利用されている均等係数の変化を評価指標にすることを考えた。すなわち、粒径加積曲線上の 2 点の比の変化量を指標とする考えである<sup>5)</sup>。

(3) 破碎前後の粒径加積曲線間の面積など 吉越（1970）は礫材料の大型三軸圧縮試験の結果から、試験前後の試料の粒度分布が変化することを示している。そして、その破碎の量を試験前後の粒径加積曲線で囲まれる面積により表現している<sup>6)</sup>。また、高野・岸田・佐伯（1974）は砂地盤の杭先端部の粒度変化を粒径加積曲線の移動量で評価することを考えている<sup>7)</sup>。

(4) 破碎前後の粒度分布の残留率の差 谷本・西（1963）は締固め試験による粒子破碎前後の試料の粒度分布について、各ふるいの残留率の差の絶対値の総和をとって、粒子破碎量の指標としている<sup>8)</sup>。同様な考え方を森（1965）<sup>9)</sup> や Marsal（1965）<sup>10)</sup> も採用している。

これを式で表せば、次式になる。

$$S = \sum |p' - p| \quad \dots (3)$$

ここに、 $p'$  と  $p$  は粒子破碎前後の残留率であり、 $\Sigma$  は各ヒストグラムでの総和を意味する。

---

Evaluation of particle breakage of the decomposed granite soil based on the grain size distribution :K. Itabashi, T. Tateishi, Y. Taguchi (Meijo University)

### 3. 試料の調整

まさ土の粒子破碎の評価法を比較するために、三河地方から採取したまさ土の粒度試験を実施した。粒度試験は、土質試験で採用されている網ふるい法としたが、そのふるいはJIS規格ふるいすべてを用いた。なお、試料の最大粒径は8.0mmであった。

力学的に粒子破碎を生じさせる方法には、圧縮試験、せん断試験、締固め試験などがあるが、粒度試験に必要な量の試料が一度に作成できることや、粒子破碎の程度が容易にコントロールできることを考慮し、ここでは、締固め試験を採用した。締固め試験では、内径10cmモールドと2.5kgランマーを用い、3層とし、1層当りの締固め回数を25、50、100、200回の4通りとした。なお、福本は締固め試験によるまさ土の粒子破碎の程度がその含水状態により異なることを指摘している<sup>11)</sup>、その影響を除くために、炉乾燥試料を使用した。

まさ土粒子の破碎は、その破碎方法、加えたエネルギー、試料の含水状態などが影響する。さらに、破碎前の粒度分布にも影響されることが考えられる。そこで、粒子破碎前の試料は以下に示す手順で粒度調整した。まず、採取してきたまさ土を0.425mmふるいの上で水洗いし、その残留分を炉乾燥した後、JIS規格ふるい(0.425~125mm)を用い、各ふるいに留まる試料に区分した。そして、区分した各試料を再び混合して、初期の粒度分布が負の二項分布の理論値になるように粒度調整を行った。ここで、負の二項分布を採用した理由は、福本や著者らの研究によって、まさ土の粒度分布が負の二項分布や対数正規分布で近似できることが明らかにされているためである。ただし、負の二項分布の分布範囲は0~∞であるから、分布の裾の部分で理論分布と完全に一致させることは不可能になる。

負の二項分布は離散分布であるため、仮定する最大粒径 $d_{max}$ から、対数目盛り上で等間隔、離散的に粒径をとり、粒径はその番号 $n$ で表現される。そして、番号 $n$ の粒径における残留率は分布パラメータ $r$ 、 $m$ のみで表現され、次式となる。

$$q_n(r, m) = \binom{n+m-1}{n} (1-r)^m r^n \quad \begin{matrix} n=0, 1, 2, \dots \\ m=1, 2, 3, \dots \end{matrix} \quad \dots (4)$$

ここに、 $m$ は粒子の分解回数、 $r$ は粒子分解の形式に関わるパラメータ(0~1の範囲を示す)を意味する。また、負の二項分布の特性から、離散化した粒径番号 $n$ に関する平均値 $\mu_n$ と分散 $\sigma_n^2$ は分布パラメータ $r$ 、 $m$ と次式の関係のあることがわかる<sup>12)</sup>。

$$r = \frac{\sigma_n^2 - \mu_n}{\sigma_n^2} \quad \dots (5) \quad m = \frac{\mu_n^2}{\sigma_n^2 - \mu_n} \quad \dots (6)$$

なお、仮定する最大粒径はJIS規格ふるいのふるい目間隔とその最大ふるい目を考慮して、 $d_{max} = 128\text{mm}$ とした。そして、平均値 $\mu_n$ と分散 $\sigma_n^2$ を表-1のように仮定して、負の二項分布の理論値を計算し、2種類の初期分布を示す試料を作成した。ただし、試料に含まれる最大の粒径は8.0mmであり、最小の粒径は0.425mmであるから、完全には負の二項分布に一致させることはできない。

表-1 初期分布の平均値と分散

試料番号	平均値 $\mu_n$	分散 $\sigma_n^2$
1	2.5	2.6
2	2.5	4.0

その初期の粒度分布を残留率ヒストグラムで示した図が図-1である。また、粒径加積曲線の形で示すと、図-2となる。試料-1は平均粒径が2.4mm、標準偏差が1.66mmであり、図上でほぼ左右対象の分布になっている。試料-2は平均粒径が2.55mm、標準偏差が1.82mmとなっており、試料-1と較べてわずかに粗粒分が多くなっている。

### 4. 試験結果と従来の評価法

試験結果として、平均粒径 $\mu$ (mm)、標準偏差 $\sigma$ (mm)、対数目盛り上の平均値 $\lambda$ 、標準偏差 $\delta$ 、松尾・沢の提案したIとH、0.425mmの加積通過率、均等係数 $U_c$ 、残留率差の総和 $S$ 、正規分布

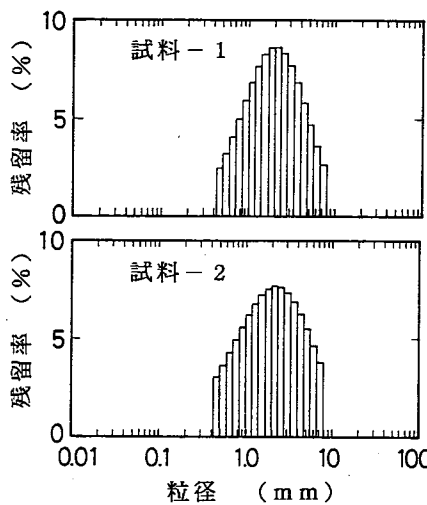


図-1 初期の残留率分布

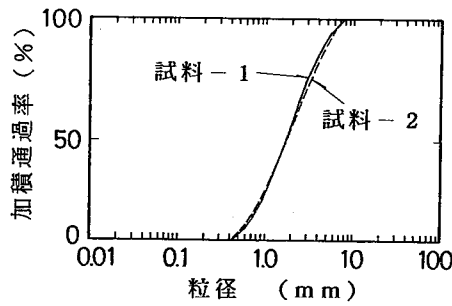


図-2 初期の粒径加積曲線

図-1 初期の残留率分布  
 図-2 初期の粒径加積曲線  
 わずかに増加する傾向を示している。

と対数正規分布を仮定した場合のカイ2乗値、乾燥密度 $\gamma_d$  ( $gf/cm^2$ )を一覧表として、表-2に示した。  
 いずれの試料についても、平均粒径 $\mu$ と $\lambda$ は締固め回数とともに減少する傾向があることがわかる。また、標準偏差 $\sigma$ は大きく変化せず、 $\zeta$ は

松尾・沢の提案したIとHと締固め回数との関係を見ると、締固めとともに、粒子破碎が進み、中央粒径 $d_{50}$ や20%粒径 $d_{20}$ が変化し、IもHも増加する傾向がある。さらに、均等係数や0.425mmの加積通過率も同様に、締固め回数とともに増加する傾向が認められる。

表-2 試験結果の一覧表  
 試料-1

締固め回数 N	0	25	50	100	200
平均値 $\mu$ (mm)	2.406	1.849	1.840	1.898	1.699
標準偏差 $\sigma$ (mm)	1.661	1.458	1.517	1.597	1.555
平均値 $\lambda$	0.640	0.291	0.234	0.225	0.041
標準偏差 $\zeta$	0.700	0.871	0.965	1.032	1.127
I	-	0.287	0.347	0.380	0.515
H	-	0.284	0.298	0.286	0.380
0.425mm通過率	0	6.9	9.8	12.0	16.7
均等係数	3.25	3.61	4.06	5.10	6.94
残留率佐の総和 S	-	31.4	34.2	33.4	46.8
正規分布 $\chi^2$	42.5	63.0	59.0	51.5	85.5
対数正規分布 $\chi^2$	4.64	38.2	36.9	26.8	27.2
乾燥密度	-	1.57	1.64	1.68	1.75

試料-2

締固め回数 N	0	25	50	100	200
平均値 $\mu$ (mm)	2.550	2.081	2.016	1.927	1.628
標準偏差 $\sigma$ (mm)	1.818	1.656	1.716	1.683	1.574
平均値 $\lambda$	0.670	0.379	0.292	0.220	-0.035
標準偏差 $\zeta$	0.748	0.920	1.001	1.044	1.150
I	-	0.246	0.337	0.388	0.535
H	-	0.266	0.298	0.314	0.461
0.425mm通過率	0	7.0	9.4	12.0	18.7
均等係数	3.66	4.02	4.28	5.17	7.44
残留率佐の総和 S	-	23.1	30.8	35.8	53.0
正規分布 $\chi^2$	48.8	47.0	61.3	67.4	107.8
対数正規分布 $\chi^2$	8.68	38.6	29.7	23.4	21.2
乾燥密度	-	1.59	1.65	1.69	1.75

残留率差の総和 S と締固め回数の関係を図-3に示すが、1カ所を除き、締固め回数とともに S が増加している。これは、締固め回数とともに、粒度分布の変化が大きくなっていることを示すものである。しかし、締固め1回当たりの残留率差の総和 ( $S/N$ ) は急激な減少傾向を示している。また、締固め試料の乾燥密度は締固めとともに増加するが、ある一定の極限值に収束する傾向にある。

これらの事実より、次のことがわかる。締固めという形の外力の加え方では、締固め密度にある上限値があり、それに対

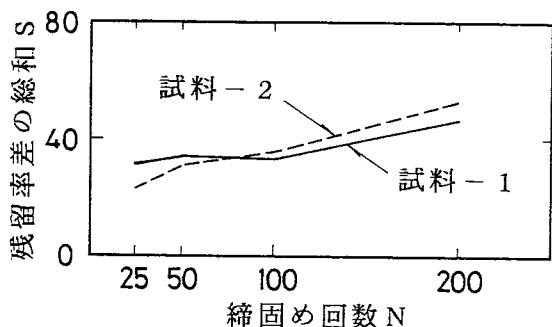


図-3 残留率差の総和と締固め回数

応じて粒子破碎後の粒度分布もある一定の分布に近づく。これは、粒子破碎が強度の弱い粒子から卓越的に始まり、ある程度粒子破碎が生じると、残りの粒子や破碎後の粒子はある値以上の強度を持つために、それ以上の粒子破碎が生じなくなるためであろう。

### 5. 粒子破碎に伴う粒度分布の変化

前節では、主に従来の評価法で粒子破碎を見てきたが、ここでは、著者らが提案する粒度分布モデルに関する評価について示す。

試験結果の一例として、試料-1について締固め回数の増加に伴う残留率のヒストグラムの変化を図-4に示す。また、粒径加積曲線の変化を図-5に示す。図中には、対数正規分布を仮定した場合の平均値 $\lambda$ 、分散 $\zeta$ ならびに負の二項分布を仮定した場合の粒径番号に関する平均値 $\mu_n$ 、分散 $\sigma_n^2$ が示してある。これらの値が締固め回数とともに、一定の傾向を示しながら変化しており、対数正規分布や負の二項分布によって粒子破碎に伴う粒度変化が評価できることを示唆している。そこで、式(5)、(6)により負の二項分布のパラメータ $r$ と $m$ を求め、締固め回数との関係で整理し図-6に示した。

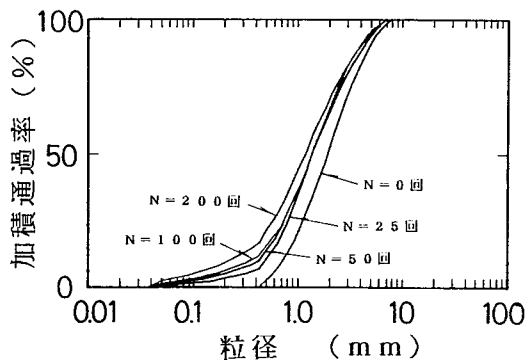


図-5 締固めによる粒径加積曲線の変化

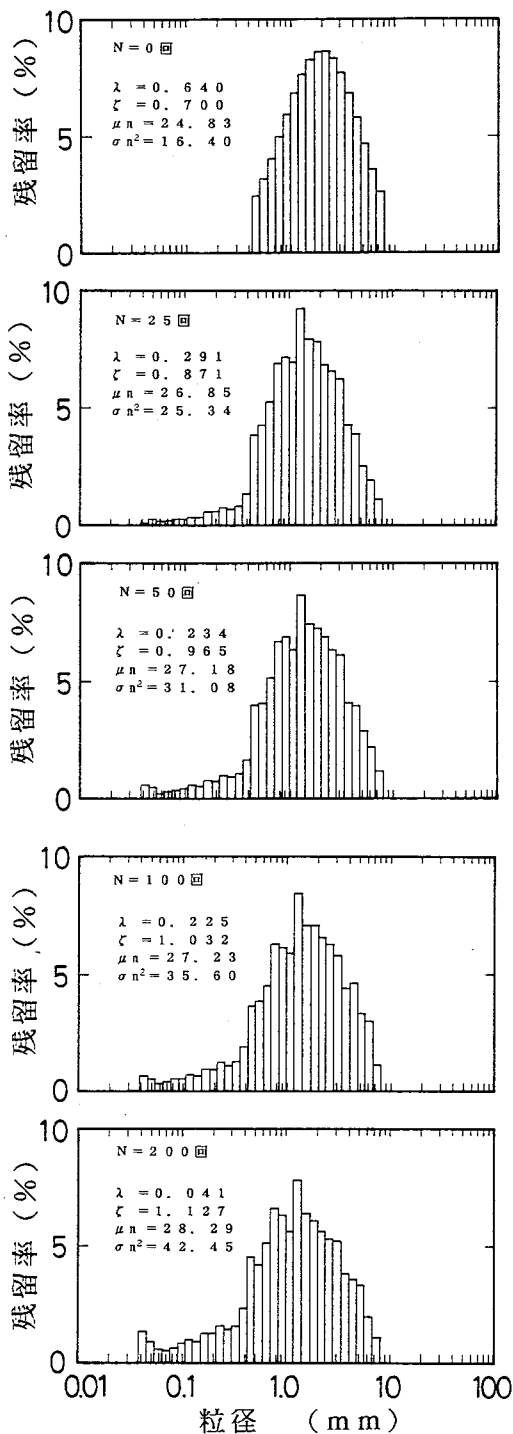


図-4 締固めによる残留率分布の変化

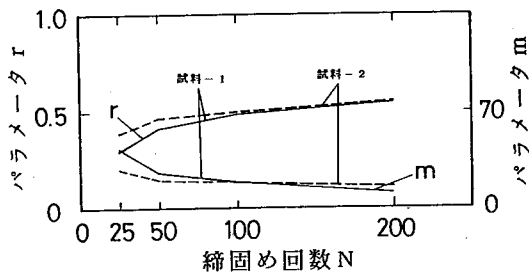


図-6 負の二項分布のパラメータ  $r$ ,  $m$  の変化

$r$  は締固め回数とともに増加し、一定の値に収束する傾向にある。また、 $m$  は減少傾向にあり、やはり一定の値に収束している。これは、締固め回数の増加に伴い、ある一定の粒度分布に近づいていくことに対応している。ところで、 $m$  は分解の回数に対応するパラメータであるから、 $N$  が大きければ、分解回数は大きくなると考えるのは間違いである。すなわち、ここでは、全ての試料で仮定する最大粒径を同一にしているので、締固め回数  $N$  を大きくすることは、加えたエネルギーを大きくすることであるから、その粒度分布になるまでの分解回数が少なくて済むと考えれば、 $m$  の変化は理解できる。

#### 6. 残留率差ならびに残留率比による評価

図-7 は試料-1 について、粒子破碎後の残留率ヒストグラムから初期に与えた残留率ヒストグラムを差し引いた残留率差の分布を、締固め回数をパラメータとして示した図である。大局的に見れば、約 1 mm を境として細粒分側では残留率差が増加し、粗粒分側では減少していることがわかる。特に 0.4 mm 以下の細粒分は締固め回数とともに明確な増加を示している。また、残留率差がゼロとなる粒径では、粒子破碎して減少する量と粗粒分側から供給される量とがバランスしていることを示している。ただし、図上の関係はなめらかな関係を示しておらず、約 1 mm 程度と 4 mm 以上の粒径の部分において大きな凹凸が認められる。この原因が締固め試験上の問題であるのか、このまき土自体の特徴であるかは、より詳細な検討が必要になる。

図-8 は、試料-1 の締固め回数 25 回の場合の残留率差の分布と対応する対数正規分布ならびに負の二項分布の理論分布を重ねて示したものである。なお、理論分布は粒子破碎前後の分布から求めた分布パラメータより求めている。粒子破碎前後の粒度分布が比較的良く理論分布に対応しているため、理論値の差の分布も全体的な傾向は実測値に近い関係を示している。

つぎに、図-9 は粒子破碎前後の残留率の比の関係を示している。ここでは、残留率比は初期の残留率

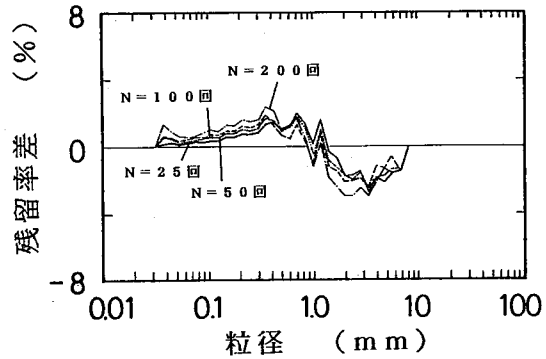


図-7 締固めに伴う残留率差の変化

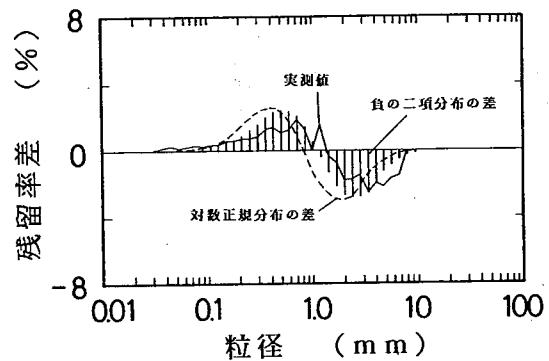


図-8 残留率差の実測値と理論値の比較

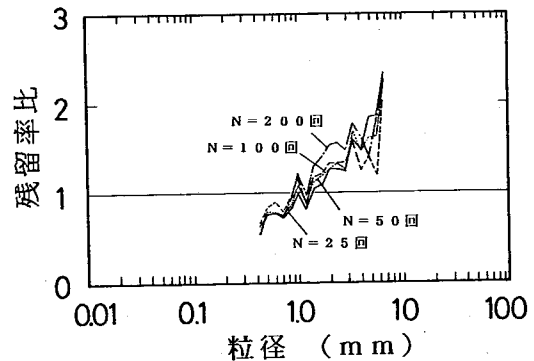


図-9 締固めに伴う残留率比の変化

を破碎後の残留率で割った値を取っているので、残留率が増加する細粒部分の粒径範囲では1以下の値となり、残留率が減少する粗粒部分では1以上の値となる。3 mm以下の範囲では締固め回数の増加に伴う残留率比の増加が認められる。図-8と同様、理論分布の比を実測値と比較すると、図-10が描かれる。やはり、3 mm以下の範囲では理論値と実測値の対応は良いが、それ以上の範囲では実測値が理論値を大きく上回っている。この原因は、初期に粒度分布が最大粒径8 mmで打ち切られているためと考えられる。すなわち、8 mm以上の土粒子が分解して供給される破碎粒子がないため、実測値の残留率比が大きく測定されてしまう。

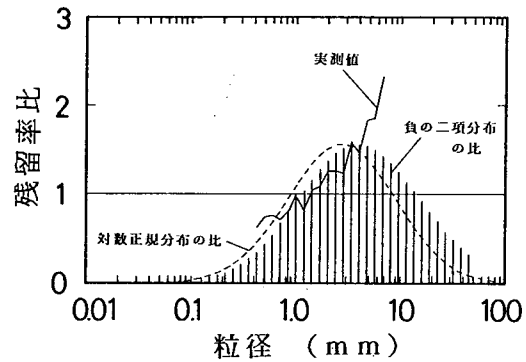


図-10 残留率比の実測値と理論値の比較

## 7. あとがき

本研究では、締固め試験によって粒子破碎を生じさせたまさ土試料の粒度試験を実施し、その試験結果に対して従来の粒子破碎評価法ならびに著者らが提案してきた分布関数を当てはめる方法を適用した。その結果、従来から提案されている方法で評価すると、いずれの手法でも締固め回数の増加に伴い一定の傾向を示すことがわかった。また、対数正規分布や負の二項分布のパラメータも、締固め回数に伴い傾向的な変化を示しており、これらの分布関数によって粒子破碎を評価できることも明らかになった。さらに、粒子破碎前後の残留率ヒストグラムの差や比の分布による表現も可能であり、これらの分布が理論分布と対応していることも明らかになった。

ここでは、初期の粒度分布が2種類のみであるが、更に、異なった初期粒度の場合を検討することも必要になろう。また、今回は粒子破碎の方法として締固め試験を用いたが、今後、加える応力や生じる変位の測定が可能な圧縮試験を実施し、圧縮試験時の粒子破碎量をとらえたい。そして、(応力～変位～粒子破碎量)の関係を明らかにして行きたい。

なお、本研究に当り、4年生の望月良修君、山脇 明君の協力を得た。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 土質工学会編：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用、土質基礎工学ライブラリー16、1979
- 2) 福本武明：粒子破碎の程度を示す指標、土と基礎、29-12、1981
- 3) 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、土木学会中部支部、1989
- 4) 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、土木学会関西支部、1973
- 5) 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、1963
- 6) 吉越 洋：レキの大型三軸試験、第5回土質工学研究発表会、1970
- 7) 高野明信、岸田英明、佐伯英一郎：砂地盤中に埋め込まれたクイの荷重-沈下特性、第9回土質工学研究発表会、1974
- 8) 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、1963
- 9) 森 満雄：火山レキの締固め特性と支持力、土と基礎、13-6、13-7、1965
- 10) Marsal, R. J. : Soil Properties-Shear Strength and Consolidation, Pro. 6th ICSMFE, 1965
- 11) 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、1976
- 12) 福本武明：A grading equation for decomposed granite soil, Soils and Foundations, 1990