

砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響に関する研究

榎戸 源則*・池田 直樹**・柴田 英明*

A Study on Influence of Crushing of Soil Particle on the Shear Characteristics of Sand

Motonori ENOKIDO*・Naoki IKEDA**・Hideaki SIBATA*

Synopsis: In order to evaluate the influence of crushing of soil particle on the shear characteristics of sand, we have carried out undrained triaxial compression test. These test values were compared with calculation values by 5 methods. As the result of that, the crushing values of soil particles by 5 methods are nearly equal. As it is simple, Marsal's method seems to be better. Main conclusions are as follows. (1) Undrained triaxial compression tests show; 1) We obtained a formula between plasticity energy and effective main stress. 2) Another formula between plasticity energy and undrained shear strength of crushed sand, is obtained. 3) There is close relation between shear characteristics and plasticity energy through first void ratio. (2) Formula between crushed sand particle values and plasticity energy are obtained. (3) The relation between shear characteristics and crushed particle values is expressed as 2 formulas from (1) and (2).

Keywords: crushing of soil particle, shear characteristics, plasticity energy, relative density, void ratio

要 旨: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響を評価するため、脆弱な風化花崗岩質山砂を用いて、非排水三軸試験をおこなった実験値と、5つの粒子破碎の算出法による計算値と比較した。その結果、これらの数量化手法による差異は少ないので、その処理の簡便さの利点から、Marsalによる方法が優れているとみられる。主たる結論は次の通りである。(1)非排水三軸試験結果からは、1)平均有効主応力とその最小値との差と塑性エネルギーとの関係式が得られ、2)破碎砂のせん断特性である非排水せん断強度と塑性エネルギーとの関係が得られた。(3)せん断特性と塑性エネルギーは、作製時の間隙比によりよく関係づけられる。(2)粒子破碎量と圧縮せん断課程における塑性エネルギーとの関係式が得られた。(3)結論(1)および(2)の結果から圧縮せん断特性と粒子破碎量の関係は2つの式(4-16)、(4-17)で表すことができた。

1. ま え が き

砂のせん断特性に影響を及ぼす因子には、土の粒径、粒度、粒形、密度等があるが、さらに、粒子の破碎についても、検討が必要と考えられる。粒子破碎とせん断特性に関する研究は少ない。豊浦砂を用いた研究例では、硬質なため、拘束圧が数百 kPa の領域においては、殆ど破碎をしない⁹⁾。しかし、風化の著しい砂の場合、無視できない程度の破碎をおこすとみられる。

本研究では、風化した花崗岩質山砂や火山灰質山砂のような脆弱な砂質土のせん断特性は、粒子破碎の影響が

大きいことがわかった。このようなせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響を検討するには、粒子破碎量を評価する必要がある。

本報では、Marsal, Hardin, Leslie, Lee & Farhoomandらによる粒子破碎量の評価手法により、定量化を試みたものである²⁾。これらの手法は、粒子破碎前後の粒度分布曲線の変化により、粒子破碎量を求める。その他、粒子破碎量を粒子の比表面積の変化で表わす Rittinger や Bondらの方法もある。この比表面積の変化による評価方法についても検討したが、粒径0.074 mm以下の細粒粒分の評価が困難であり、著者らがすでに報告したよう

* 土木工学科 教授
Professor. Civil Engineering Division.

** 東電設計(株) 工修
Tōden Sekkei Co. Graduate School of Engineering.

に、これらの方法は、Marsalらの手法と同じ傾向を示すので⁽¹⁾⁽²⁾、本研究では、Marsalらの手法により、粒子破砕量の評価をおこなった。

著者らが本研究をおこなうまでに実施した既往の研究では、下記のことが明らかにされている。

(1) 排水及び非排水圧縮せん断強度と、粒子破砕量との間には有意な関係がある。

(2) 偏差応力と平均有効主応力の値が一定となる定常状態において⁽¹⁾、相対密度が同一の場合、粒子破砕量が多くなる程、平均主応力の値は小さくなる。

(3) 液状化強度は粒子破砕により減少する。

(4) 粒子破砕量と供試体になされた仕事量の間には、有意な関係がある。

(1)と(2)は、圧縮せん断試験によるものであるが、(1)のせん断強度と粒子破砕量は、ともに増加する傾向がみられた。(2)は、せん断中大ひずみ状態に達した時、偏差応力と平均有効主応力が、それぞれ一定値に停滞する場合がある。この平均有効主力の対数値を縦軸、粒子破砕量を横軸にして片対数グラフ上に画くと、両者の間には双曲線関係がみられた。(3)は液状化強度の対数軸を縦軸、粒子破砕量を横軸にして片多数グラフ上にとると、(2)と同じように、双曲線関係になる。(4)は、静的・動的の両方の供試体になされた仕事量と粒子破砕量との関係をみたものであるが、右上がりの直線的関係にある。しかし、これら(1)~(4)の破砕量は大きくないし、その関係も明確でないので、粒子破砕量を増加させるため、1. 有効拘束圧を増加させ、2. 粒度分布を変化させる必要がある。さらに、粒度分布を変化させることにより、砂自身の粒径や粒度等による粒子破砕性状への影響も考えなくてはならない。

これら(1)~(4)での粒子破砕量は、純粋にせん断過程で発生した破砕のみでなく、圧縮過程とせん断後のふるい分け試験による破砕も含まれている。このため、せん断特性と粒子破砕量との関係をあきらかにするためには、せん断過程以外における粒子破砕量を除く必要があるため、これに対する検討も試みたのである。

以上の経緯をふまえて、本研究は次の目的のために実施された。

(1) 風化した花崗岩質山砂や火山灰質山砂のような脆弱な砂質土のせん断試験により発生する粒子破砕量を数値化する。

(2) (1)により数値化された粒子破砕量を用いて、せん断特性に及ぼす粒子破砕の影響を定量的に評価する。

2. 試験概要

2-1 試験方法

以下に試験の要点を簡潔に述べる。

(1) 粒径0.42 mm以下、0.420~0.840 mm、0.840~2.000 mmに分けられた試料を配合し、

(2) 空中落下法により供試体を作製する。(直径7.5 cm、高さ15 cmの円柱状)

(3) 脱気水で供試体を飽和させる。飽和し易いようあらかじめCO₂を流入する。

(4) 1, 3, 5×10² kpaの三通りの圧力で圧密する。

(5) 8時間以上放置した後、せん断試験をおこなう。

せん断試験は、ひずみ制御(0.12%/min)により、繰り返しせん断試験は応力制御(周波数0.10 Hz)による。圧縮試験はせん断後に載荷重を除く。

(7) せん断後に圧密する。

(8) 圧密圧力を除荷する。

2-2 試料

試料は、草木山砂(草木ダム周辺で得られる風化した花崗岩質山砂)を用いた。粒径0.420 mm以下、0.420~0.840 mm、0.840~2.000 mmにあらかじめふるい分けして、供試体作製直前に配合する。ふるい分試験結果のばらつきを少なくするため、粒度調整に十分注意する。粒度分布は4通りとした。(表-1、図-1) 試料Ⅰの粒度分布をもとにして、試料Ⅱは0.840~2.000 mmの粒径100%とする。試料Ⅲは、試料Ⅰと平均粒径をそろえ、均等係数を変えた。試料Ⅳは豊浦砂とほぼ同じ粒度分布とした。

データの処理方法は、1. せん断特性と粒子破砕量を

表-1 各粒度分布の配合量および土質定数

粒度分布		I	II	III	IV
配合量	0.840~2.000 mm	45.1%	100%	27.2%	—
	0.420~0.840 mm	24.5%	—	72.5%	—
	~0.420 mm	30.4%	—	0.3%	100%
土質定数	G_s	2.669	2.663	2.664	2.693
	e_{max}	1.143	1.271	1.273	1.688
	e_{min}	0.650	0.854	0.801	0.879
	D_{50} (mm)	0.744	1.300	0.744	0.255
	D_{10} (mm)	0.137	0.970	0.592	0.175
	D_{60} (mm)	0.944	1.360	0.780	0.262
	U_c	6.89	1.40	1.32	1.50

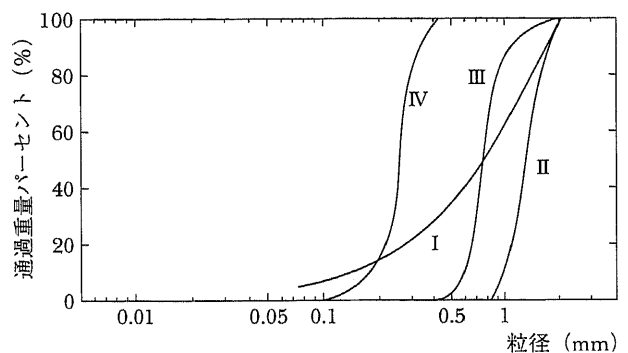


図-1 各試料の粒度分布曲線

それぞれエネルギーと関係づけ、定式化を試み、2. せん断特性と粒子破碎の関係を検討した。

3. 静的非排水三軸圧縮試験

3-1 圧縮せん断特性

脆弱な砂の応力ひずみ曲線において、応力が大ひずみ領域で僅かながら低下し、ピークが発生することが、過去の試験結果より明かにされているが¹³⁾、豊浦砂の応力ひずみ曲線には、かなり緩い密度でない限り、このような現象はみられない。本研究においても、このような傾向はみられた。

拘束圧が等しく、相対密度の異なる試料の有効応力経路は、相対密度が低い程過剰間隙水圧が大きくなり、偏差応力のピークが生じた後、経路が反転している。反転後は、有効応力の変化は殆どみられず、ある一定状態(定常状態)に留まる¹⁾。これは、せん断による粒子破碎の影響をうけるためであるとみられる。

本研究では、供試体に加えられたエネルギーを用いてせん断特性や粒子破碎量の傾向を検討する。

三軸応力下におけるせん断中の全エネルギー変化 $\delta E'$ は、有効主応力 σ'_1, σ'_3 、主ひずみ増分 $\delta \varepsilon_1, \delta \varepsilon_3$ 、体積ひずみ増分 δV により、式(2-1)のようになる。

$$\begin{aligned} \delta E' &= \sigma'_1 \cdot \delta \varepsilon_1 + 2\sigma'_3 \cdot \delta \varepsilon_3 \\ &= (\sigma'_1 - \sigma'_3) \left(\delta \varepsilon_1 - \frac{\delta V}{3} \right) + \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \delta V \\ &= q \cdot \delta \varepsilon + P \cdot \delta V \end{aligned} \quad (2-1)$$

ここに、 $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ 、 $\delta \varepsilon = \delta \varepsilon_1 - \delta V/3$ 、 $P = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$

$$\delta V = \delta \varepsilon_1 + 2\delta \varepsilon_3$$

であり、圧縮排水三軸試験を考えている。

試験は、圧密過程とせん断過程に二大別される。圧密過程について、(2-1)式を適用すると、圧密過程は、常時等方応力状態にあり、

$$\begin{aligned} q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = 0 \quad \text{であるので、(2-1)式は} \\ \delta E' = P \cdot \delta V \end{aligned} \quad (2-2)$$

次に、せん断過程については、本研究は非排水試験であるので、

$$\begin{aligned} \delta V = 0 \quad \text{となるので、(2-1)式は} \\ \delta E' = q \cdot \delta \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (2-3)$$

となる。従って、(2-2)、(2-3)式により、圧密およびせん断の全過程におけるエネルギー増分は、

$$\delta E' = q \cdot \delta \varepsilon_1 + P \cdot \delta V \quad (2-4)$$

となる。この $\delta E'$ は、可逆エネルギー部分 δV と不可逆エネルギー増分 δW とにわけられ

$$\delta E' = \delta V + \delta W$$

と表わせる。このうち、粒子破碎は不可逆な現象であるので、供試体に加えられたエネルギーとして、塑性的なエネルギー成分である W をとると、(2-4)式を用いて供試体の単位体積当たりに加えらるる塑性エネルギー W は、

$$W = \int q \cdot \delta \varepsilon_1 + \int P \cdot \delta V - \int q \cdot \delta \varepsilon_{1c} - \int P \cdot \delta V_c \quad (2-5)$$

と表せる。ここに、添字 c は、可逆エネルギー成分を示すものとする。

(2-5)式を実際に適用するには、せん断終了後にせん断荷重および圧密荷重を除去し、その除荷過程も含めた平均有効主応力-体積ひずみ曲線、偏差応力-軸ひずみ曲線のそれぞれに囲まれた面積を求め、その面積の和を(2-5)式の W とした。図-2 にその一例を示す。(a)が圧密過程の平均有効主応力-体積ひずみ曲線、(b)がせん断過程の偏差応力-軸ひずみ曲線である。斜線部の面積の和が塑性エネルギーに相当する。

次に、圧密前の体積の補正について述べる。圧密前に脱気水を流し供試体を飽和させると、草木山砂のような脆弱な砂は、軸変位(1 mm をこえる場合がある)を生ずる。硬質な砂(豊浦砂)では、殆どみられない現象である。この通水時の変位は測定できないので、軸変位により補正計算をする。即ち、圧密過程における体積ひずみ V_c 、軸ひずみ ε_{1c} 、側方ひずみ ε_{3c} とすると、圧密過程は等方応力状態にあるので、次の(2-6)従って(2-7)式から ε_{3c} が求められる。

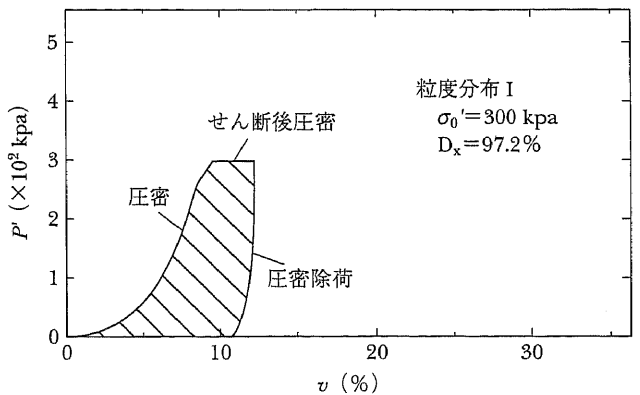


図-2(a) 圧密過程における塑性エネルギーの説明図

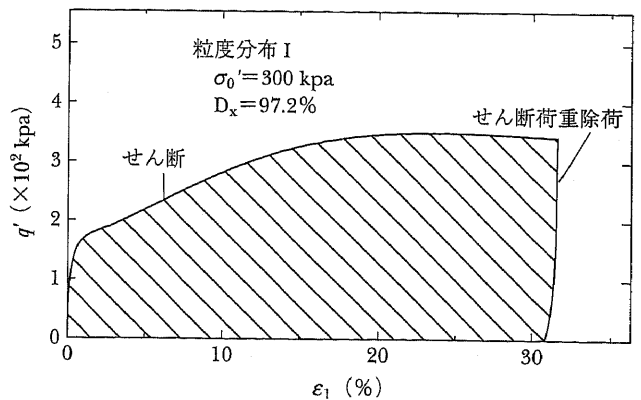


図-2(b) 圧縮せん断過程における塑性エネルギーの説明図

$$V_c = \varepsilon_{1c} + 2 \cdot \varepsilon_{3c} \quad (2-6)$$

$$\therefore \varepsilon_{3c} = \frac{V_c - \varepsilon_{1c}}{2} \quad (2-7)$$

圧密前の軸ひずみ ε_1 はわかっているのので、圧密過程の軸ひずみと側方ひずみと同じ比率で通水時のひずみが生じていると仮定し、通水時の側方ひずみ ε_3 を求める。

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_1 \times \frac{\varepsilon_{3c}}{\varepsilon_{1c}} \quad (2-8)$$

から側方変位量、供試体直径、圧密前の体積が算出される。

3-2 e_0 と $\log P'$ の関係

粒度のよい試料を用いた場合、非排水三軸圧縮試験における圧密終了時の間隙比 e_0 と有効応力経路における平均有効主応力 P' の関係を試験開始時から終了まで片対数グラフ上にプロットしていくと、 P' は拘束圧に無

関係にある直線に収束する¹⁾。この際、細粒分が多い程直線の傾きは大きくなる。草木山砂についても、同じ傾向となる。図-3 に粒度分布 I の例を示す。他の II-IV についての図は省略した。次に、片対数上で直線回帰をおこなうと次式が得られた。

$$e_0 = a - b \cdot \log P' \quad (3-1)$$

この a, b の値は表-2 に、土質定数とともに示した。 a, b の値は最大間隙比 e_{max} および e_{min} とともに増加している。

図-4 に図-3 の粒土度分布 I の直線と同じように、II-IV についても表示したが、図-4 によると、粒度分布 II と III は、ほぼ同じ直線になる。表-2 において、土質定数のなかで粒度分布 II と III の e_{max} は、ほぼ同じ値となっているので、 e_{max} の値が a, b に影響しているのではないかと推定される。

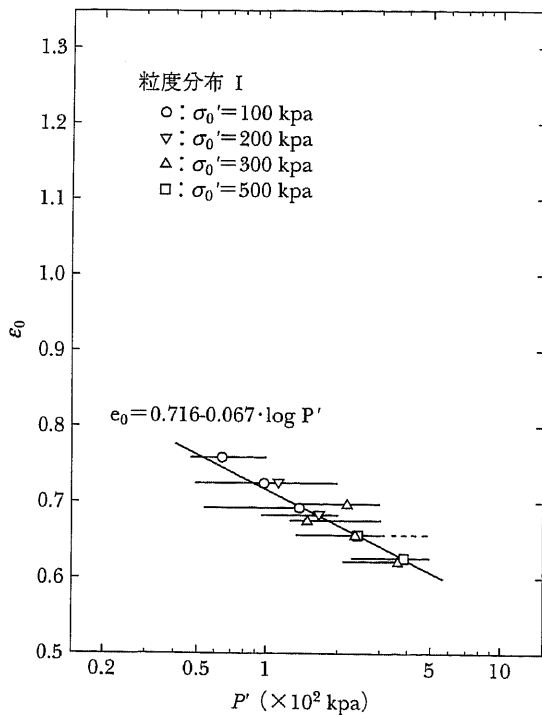


図-3 e_0 と $\log P'$ の関係 (粒度分布 I)

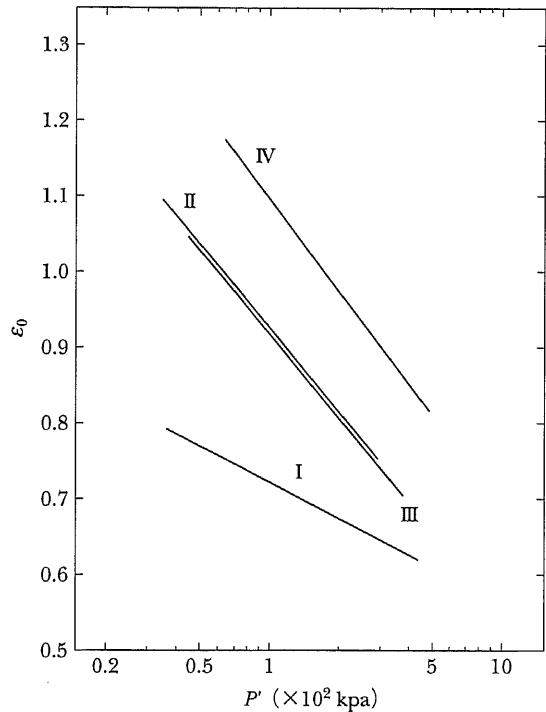


図-4 粒度分布別の $e_0 \sim \log P'$ 直線

表-2 式 (3-1) の係数 a, b と土質定数

粒度分布		I	II	III	IV
係数	a	0.716	0.916	0.913	1.090
	b	0.067	0.160	0.163	0.180
土質定数	e_{max}	1.143	1.271	1.273	1.688
	e_{min}	0.650	0.854	0.801	0.879
	D_{50} (mm)	0.744	1.300	0.744	0.255
	D_{10} (mm)	0.137	0.970	0.592	0.175
	D_{60} (mm)	0.944	1.360	0.780	0.262
	U_c	6.89	1.40	1.32	1.50

3-3 ($P'_0 - P'_{min}$) と W_1 との関係

圧縮せん断試験の有効応力経路における平均主応力 P' の最小値を P'_{min} とする。

この P'_{min} は、他の条件が同じならば、間隙比により異なる。即ち、間隙比大きければ、 P'_{min} は小さくなり、小さければ大きな値となる。これは過剰間隙水圧の発生による。間隙比が小さく供試体の密度が大になれば、間隙水圧の発生は少なく P' は大となり、逆の場合は小となる。

この P' の初期値 P'_0 と最小値 P'_{min} の差 ($P'_0 - P'_{min}$)

は試験毎に異なる。そこで、 $(P'_0 - P'_{min})$ とせん断過程の塑性エネルギー W_1 の関係を検討する。図-5 に粒度分布 I の試験結果を示す。II-IV についても I と同じように、右下りの有効拘束圧線と右上がりの等相対密度線となった (図は省略)。この結果、これら $(P'_0 - P'_{min})$, W_1 , 有効拘束圧 $\sigma'_0 (= P'_0)$ と相対密度 D_r の関係は、図-6 のようになり、 $(P'_0 - P'_{min})/W_1$ と D_r の関係が得られた。ここに、初期相対密度とは、供試体作製時に空中落下法によりモールド内に落とした試料の相対密度である。

D_r の代わりに e を用い、初期相対密度の間隙比を e_1 , 圧密終了時の間隙比を e_0 とし、 Δe_{10} を次式で表す。

$$\Delta e_{10} = e_1 - e_0 \quad (3-2)$$

次に、 $(P'_0 - P'_{min})/\Delta e_{10}$ の値と W_1 との関係をも最小二乗法を用いて、近似式を求めた。

$$(P'_0 - P'_{min})/\Delta e_{10} = C \cdot W_1 \quad (3-3)$$

図-7 に粒度分布 I の場合を示す。 $C=11.200$ となる。II, III, IV の場合それぞれ $C=22.619, 16.826, 9.892$ である。(図は省略) (3-3) 式は、 Δe_{10} が、供試体作製時から圧密終了までの間隙比の変化量である故、せん断時には、圧密過程が影響を与えていることを意味する。

しかし、ここではせん断特性の比較を試みているので、圧密過程のパラメーターは除去したいので、先ず Δe_{10} を $e_1 \cdot \sigma'_0$ で除去したものと W_1 との関係を対数グラフにとり、最小二乗法により次式の関係を得、図-8 に示す。

$$\log(\Delta e_{10}/e_1 \cdot \sigma'_0) = d + f \cdot \log W_1 \quad (3-4)$$

この係数は、 $d = -2.822, -3.436, -3.330, -2.928$

$$f = -0.870, -0.715, -0.876, -0.795$$

となる (粒度分布 I, II, III, IV)。(3-4) 式を変形して e_1 の式を求め、(3-3) 式に代入すれば、圧密過程に関わる e_1 が消去される。即ち、(3-4) 式を変形し (3-5) 式とする。

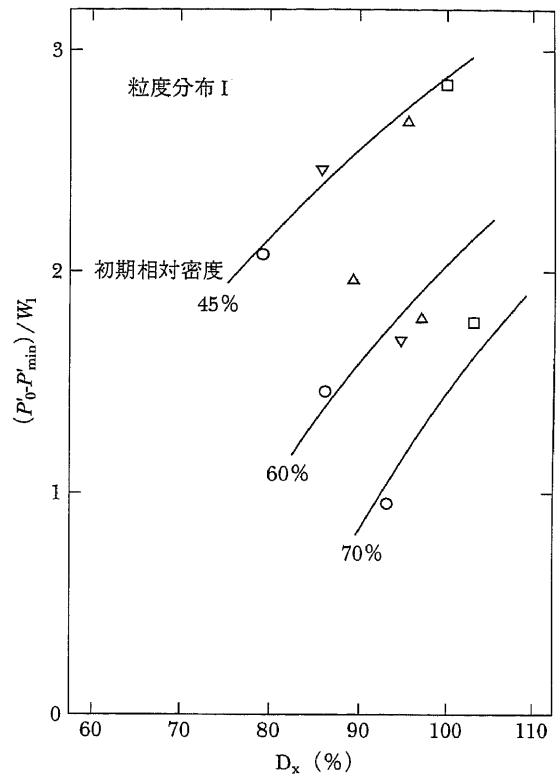


図-6 $(P'_0 - P'_{min})/W_1 \sim D_r$ 関係 (粒度分布 I)

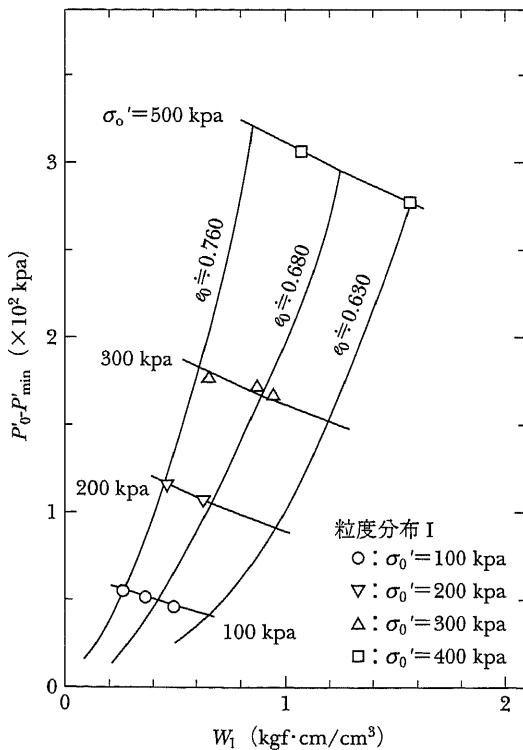


図-5 $(P'_0 - P'_{min})$ と W_1 の関係 (粒度分布 I)

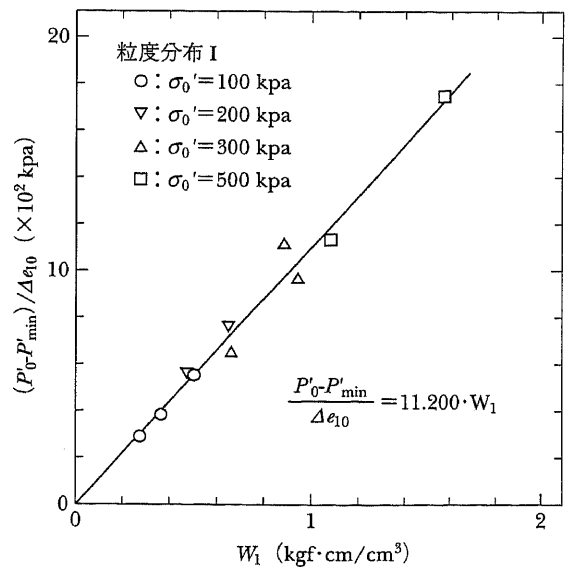


図-7 $(P'_0 - P'_{min})/\Delta e_{10}$ と W_1 の関係 (粒度分布 I)

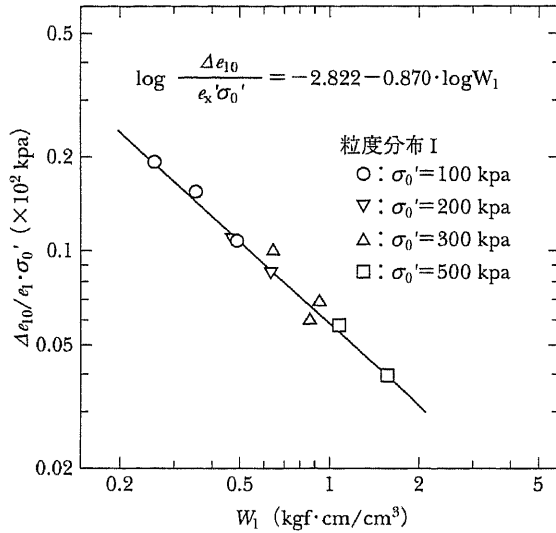


図-8 $\Delta e_{10}/e_1 \cdot \sigma'_0$ と W_1 の関係 (粒度分布 I)

表-3 式 (3-7) による計算値と実測値による ($P'_0 - P'_{min}$) の比較

No.	実測値 ($\times 10^2$ kpa)	計算値 ($\times 10^2$ kpa)	差 ($\times 10^2$ kpa)
1	0.536	0.495	-0.041
2	0.516	0.483	-0.033
3	0.463	0.475	0.012
4	1.150	1.141	-0.009
5	1.064	1.078	0.014
6	1.743	1.801	0.058
7	1.696	1.837	0.141
8	1.654	1.727	0.073
9	3.047	3.388	0.341
10	2.752	3.162	0.410

$$\Delta e_{10}/e_1 \cdot \sigma'_0 = \exp(d) \cdot W_1^f \quad (3-5)$$

(3-5)式に(3-2)式を代入し変形すると,

$$e_1 = e_0 / (1 - \exp(d) \cdot \sigma'_0 \cdot W_1^f) \quad (3-6)$$

$$(3-3)式は P'_0 - P'_{min} = c \cdot W_1 \cdot \Delta e_{10} = c \cdot W_1 \cdot (e_1 - e_0)$$

と表される。これに(3-6)式を代入すると, (3-7)式が得られる。

$$P'_0 - P'_{min} = (e \cdot \exp(d) \cdot \sigma'_0 \cdot e_0 \cdot W_1^{f+1}) / (1 - \exp(d) \cdot \sigma'_0 \cdot W_1^f) \quad (3-7)$$

これが ($P'_0 - P'_{min}$) と W_1 の関係を表す式となる。表-3に実測値と(3-7)式による計算値を粒度分布 I の試料について示す。(3-7)式は e_0 を用いているが, 相対密度 D_r より求められた e を e_0 におきかえる。

$$e_0 = e_{max} - D_r (e_{max} - e_{min}) / 100 \quad (3-8)$$

この e_0 を(3-7)式に代入すると, D_r との関係式となる。

以上 ($P'_0 - P'_{min}$) と W_1 との関係について検討したが, せん断特性の関係をj知るのに, 初期相対密度の間隙

表-4 式 (3-7) の係数 c, d, f と土質定数

粒度分布		I	II	III	IV
係数	c	11.200	22.619	16.829	9.892
	d	-2.822	-3.436	-3.330	-2.928
	f	-0.870	-0.715	-0.876	-0.795
土質定数	e_{max}	1.143	1.271	1.273	1.688
	e_{min}	0.650	0.854	0.801	0.879
	D_{50} (mm)	0.744	1.300	0.744	0.255
	D_{10} (mm)	0.137	0.970	0.592	0.175
	D_{60} (mm)	0.944	1.360	0.780	0.262
	U_c	6.89	1.40	1.32	1.50

比 e_1 をパラメーターとして用い, 圧密過程まで考慮に入れることが, 一つの有効な手段であると考えられる。表-4に係数 c, d, f をまとめて, 土質定数とともに示す。

3-4 q_{max} と W_1 との関係

硬質な砂をもちいた非排水状態の静的せん断試験では, 緩い供試体でない限り, ひずみが数%の領域においてせん断力が急増するが, 本研究で用いた草木山砂のように, 中程度の拘束圧で粒子破碎をおこす砂の場合, 大ひずみの領域でせん断力にピークが認められるので, 偏差応力の最大値 q_{max} とせん断過程の塑性エネルギー W_1 との関係を検討した。

前節の検討結果をうけ, 本節でも e_1 を用いて, q_{max} と W_1 の関係を検討する。 q_{max} と $\Delta e_{10}/e_1 \cdot \sigma'_0$ の関係を対数値で表すと, 次式が得られる。

$$\log q_{max} = g + h \cdot \log(\Delta e_{10}/e_1 \cdot \sigma'_0) \quad (3-9)$$

粒度分布 I について図示すると, 図-9 のようになる。

I-IV について, g, h の値は次のようになる。

$$g = -1.806, -2.643, -2.328, -1.988$$

$$h = -1.100, -1.117, -1.074, -1.108$$

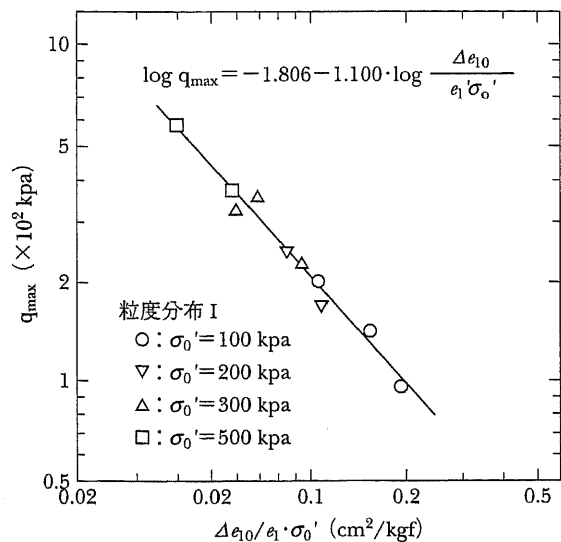


図-9 q_{max} と $\Delta e_{10}/e_1 \cdot \sigma'_0$ の関係 (粒度分布 I)

上式に、(3-5)式を対応させると、次の(3-10)式になる。

$$q_{max} = \exp(g+d \cdot h) \cdot W_1^{f \cdot h} \quad (3-10)$$

これを粒度分布ごとに画くと、ほぼ同じような直線が得られる。粒度分布 I について示したのが、図-10である。

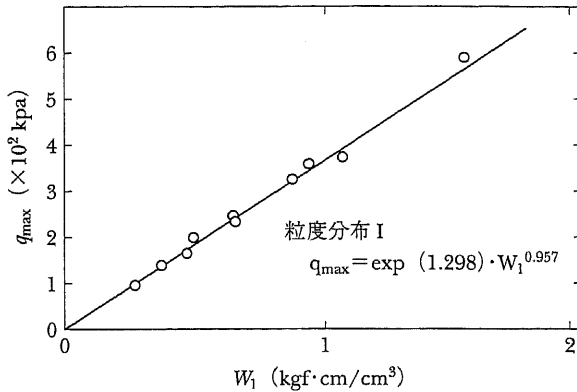


図-10 q_{max} と W_1 の関係 (粒度分布 I)

4. 粒子破碎とせん断特性

4-1 粒子破碎量の数量化手法²⁾

(1) Marsal の方法

図-11のように、せん断直後の粒度分布曲線を幾つかの区間に分け、その中にあるふるい目区間 A-B を仮定

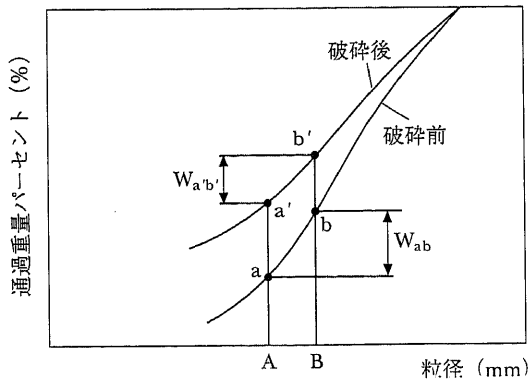


図-11 Marsal による粒子破碎量

表-5 Marsal による粒子破碎量の計算例

粒度分布	破碎前	破碎後	差
0.840~2.000 mm	34.17	28.08	+6.09
0.420~0.840 mm	25.58	24.91	+0.67
0.250~0.420 mm	15.94	17.61	-1.67
0.105~0.250 mm	14.27	17.32	-3.05
0.074~0.105 mm	2.88	3.27	-0.39
~0.074 mm	7.16	8.81	-1.65

$B_m = 6.76$

する。この時、ふるい目区間 A-B に残留した砂の重量パーセントをせん断前後でそれぞれ W_{ab} , $W_{a'b'}$ とする。区間 A-B での減少分 ΔW_{ab} は、

$$\Delta W_{ab} = W_{ab} - W_{a'b'} \quad (4-1)$$

となる。この W_{ab} を粒度分布の全区間で加えたものが、Marsal の粒子破碎量 B_m である。この際、注意すべきは、 ΔW_{ab} が減少量であって増加量は考えていない点である。表-5 に計算例を示す。この粒径区間は、本研究で用いたふるい目による。この表からわかるように、Marsal による方法は、粒径の大きなものの破碎に支配されている。

(2) Hardin の方法

(1)と同じように、せん断前後の粒度分布曲線を用いて粒子破碎量を示した。ある粒度 D における粒子の破碎ポテンシャルを b_p とすると、

$$b_p = \log_{10} (D/0.074) \quad D \geq 0.074 \text{ mm} \quad (4-2)$$

$$b_p = 0 \quad D < 0.074 \text{ mm}$$

通過重量パーセントの微小部分を100で割った値を df とすると、全粒径での破碎ポテンシャルは

$$B_p = \int_0^1 b_p df \quad (4-3)$$

この式は図-12に示す斜線領域に相当する。同じように試験前後の b_p を b_{p0} と b_{p1} で表すと(4-4)式が得られる。

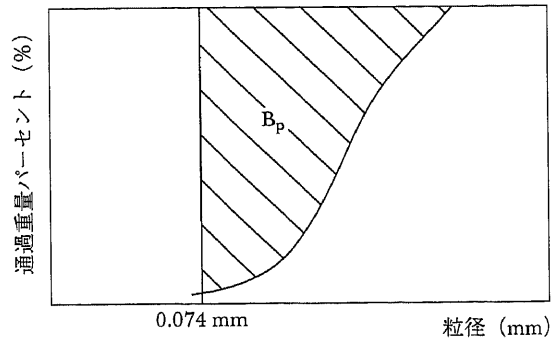


図-12 Hardin による粒子破碎のポテンシャル, B_p

$$B_i = \int_0^1 (b_{p0} - b_{p1}) df \quad (4-4)$$

この B_i は図-13に示すせん断前後の粒度分布曲線に囲まれた部分の面積に相当する。Hardin はこの B_i をもとの粒度分布曲線における B_p で除した値 B_r を破碎量とした。

$$B_r = B_i / B_p \quad (4-5)$$

(3) Leslie の方法

破碎前の粒度分布曲線における通過重量パーセントが10%の粒径での破碎前後の通過重量パーセントの増加分を粒子破碎量 B_l とし、計算方法を図-14に示す。

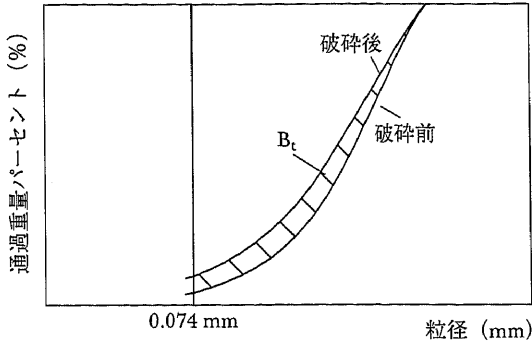


図-13 Hardinによる粒子破碎のポテンシャル B_p の破碎前後における差 B_c

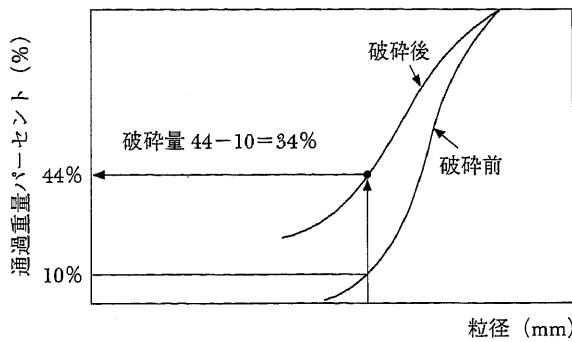


図-14 Leslieによる粒子破碎量

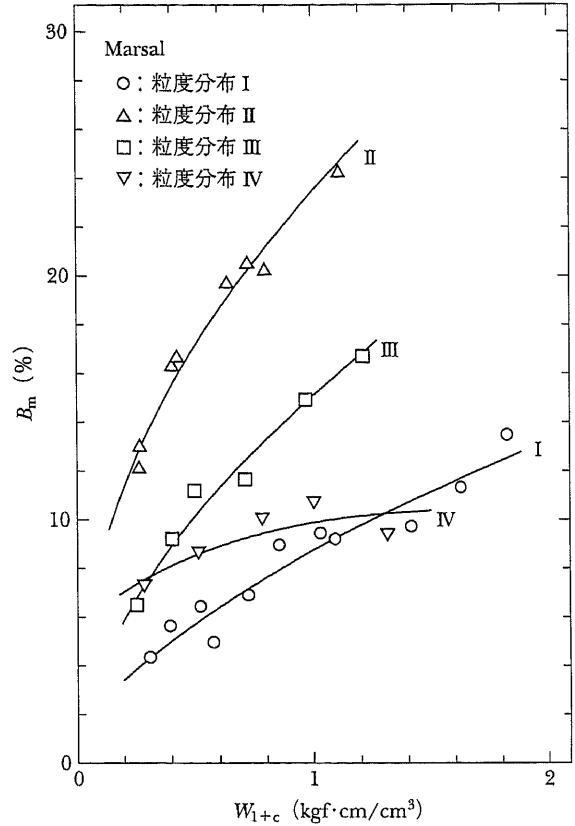


図-16(a) 全粒度分布における B_m と W_{1+c} の関係(1)

(4) Lee and Farhoomand の方法

破碎前後の粒度分布曲線において、通過重量15%の粒径を求め、その粒径の比で粒子破碎量を表す。破碎前の粒径 D_{15i} と後の粒径 D_{15a} を用い、 D_{15i}/D_{15a} を粒子破碎量とした (図-15)。

4-2 粒子破碎量と塑性エネルギーとの関係

(1) Marsal の手法による粒子破碎量

この手法を粒度分布 I に適用し、粒子破碎量とせん断過程の全塑性エネルギー W_{1+c} の関係が得られる (図-16(a))。この関係を対数関係にとりなおすと、図-16(b) のようになり、その直線の近似式は(4-6)式とな

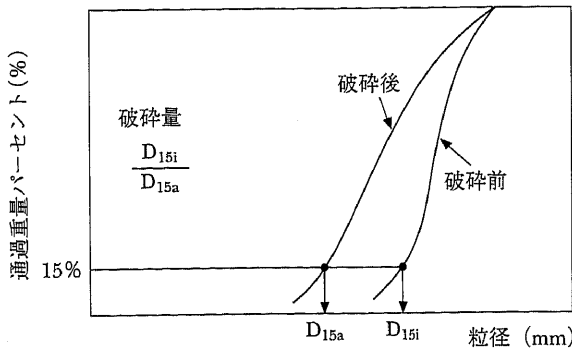


図-15 Lee & Farhoomandによる粒子破碎量

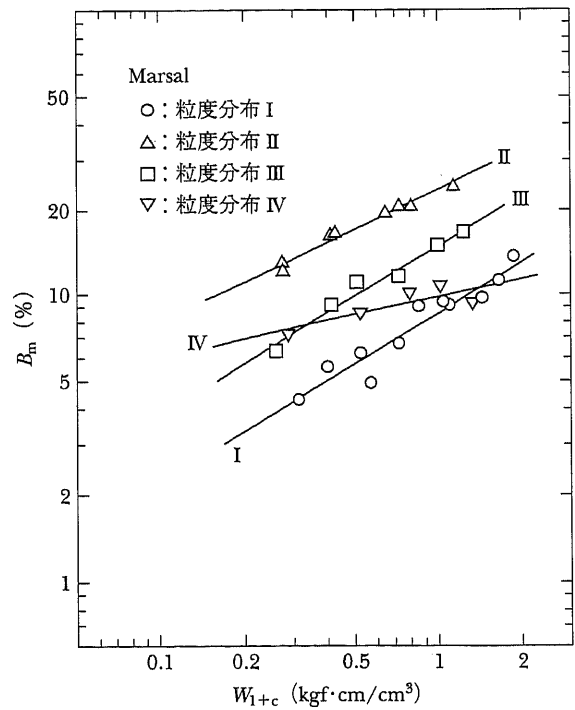


図-16(b) 全粒度分布における B_m と W_{1+c} の関係(2)

る。

$$\log B_m = i + j \cdot \log W_{1+c} \quad (4-6)$$

この図から、粒度分布 I, II, III は同じ傾向があるが、粒度分布 IV はやや異なっている。Marsal による粒子破碎量は、全粒度分布について考えているが、その結果は粒径の大きなものに左右される(前述)。IV の試料が他の I-III と異なるのは、この点に原因があると推定される。表-1 に示したように、I, II, III は粒径 0.420 mm 以上の粒子をそれぞれ 69.6%, 100%, 99.7% を含んでいるが、IV は 0.420 mm 以上の粒子はない(0.420 mm が 100%) からである。

(2) Hardin の方法による粒子破碎量

図-17(a) に粒度分布 I-IV の試料について、Hardin による粒子破碎量 B_r と塑性エネルギーとの関係を示した。図-17(b) は、これらの値を両対数で取り直したものであるが、この方法によると、粒度分布の相違による図の違いは殆どない。(4-5)式によると、Hardin の方法は、破碎前の粒度分布がもっていた破碎のポテンシャルに対し、破碎により減少したポテンシャルの比率を求めている。即ち、どの粒度分布においても、あるエネルギーが加えられた場合、そのポテンシャルの比率はあまり変わらない。

この事実から、Hardin の方法は、中程度の拘束圧に

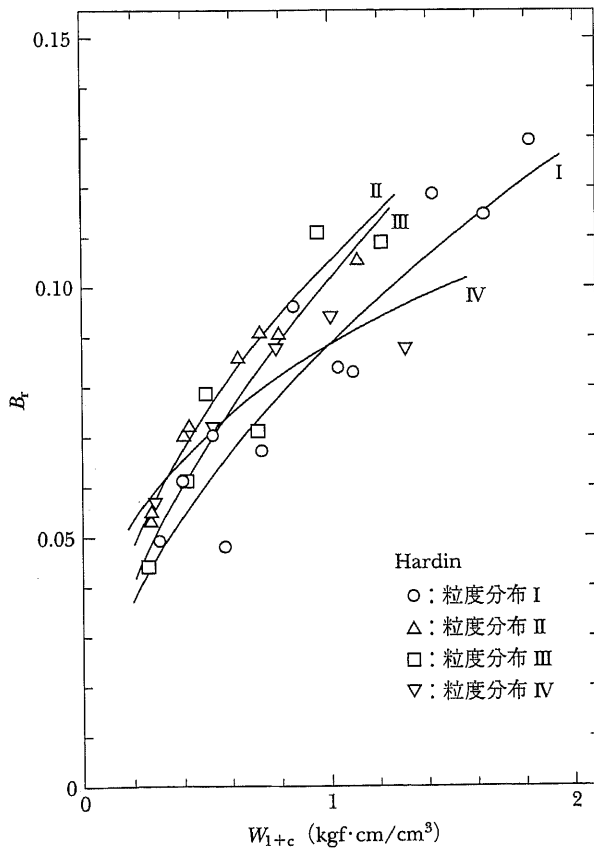


図-17(a) 全粒度分布における B_r と W_{1+c} の関係(1)

において、「粒度分布に無関係に砂全体としての粒子破碎性状を表すのに適している」とみられる。僅かな相違が生じるのは、粒径の大きなものは小さなものに比し風化が進行していないので、粒径による風化の程度に差があることによると推定される。

(3) Leslie の方法による粒子破碎量

粒度分布 I-IV の試料について、Leslie による粒子破碎量と塑性エネルギーとの関係をしめしたのが、図-18(a) であり、対数値でとったのが、図-18(b) である。図から明らかなように、いずれも右上りの傾向が顕著である。Leslie の方法は、破碎前の通過重量パーセント 10% の粒径 D_{10} における通過重量パーセントの変化をとっているため、粒径の大きさの影響もあるが、粒径の小さなものの破碎量に左右されるとみられる。表-1 における D_{10} の値をみると、I, IV, III, II の順序で 0.137 mm, 0.175 mm, 0.592 mm, 0.970 mm と大きくなっており、これらの値が結果を左右していると考えられる。

(4) Lee and Farhoomand の方法による粒子破碎量

図-19(a) にこの方法による粒子破碎量と塑性エネルギーとの関係を示す。図-19(b) は対数値による。この結果が(1)~(3)の手法によるのと異なる点は、粒度分布 IV の粒子破碎量が最も小さな値となっていることである。

(1) で述べた粒径の含有率の影響が、(1) の Marsal の方法より顕著に現れたことによるとみられる。また塑性エネルギー W_{1+c} の値が 0.2 $\text{Kgf}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ の近くですべての粒度分布の曲線交わっている。

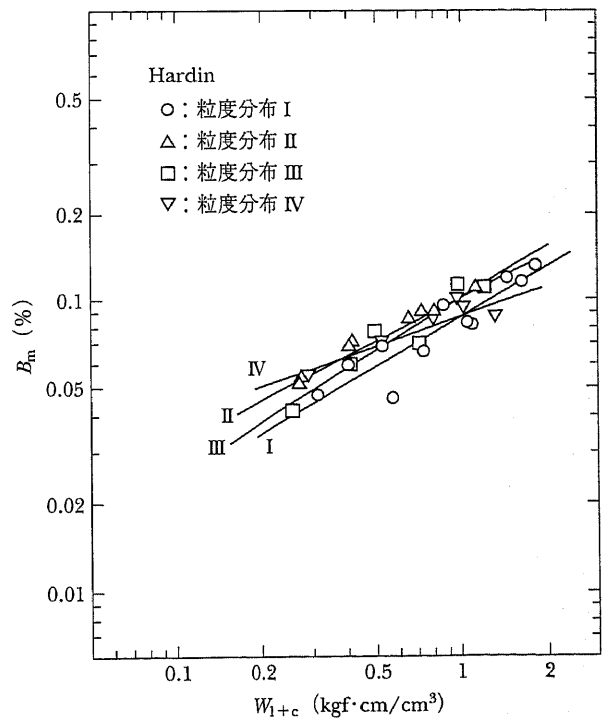


図-17(b) 全粒度分布における B_r と W_{1+c} の関係(2)

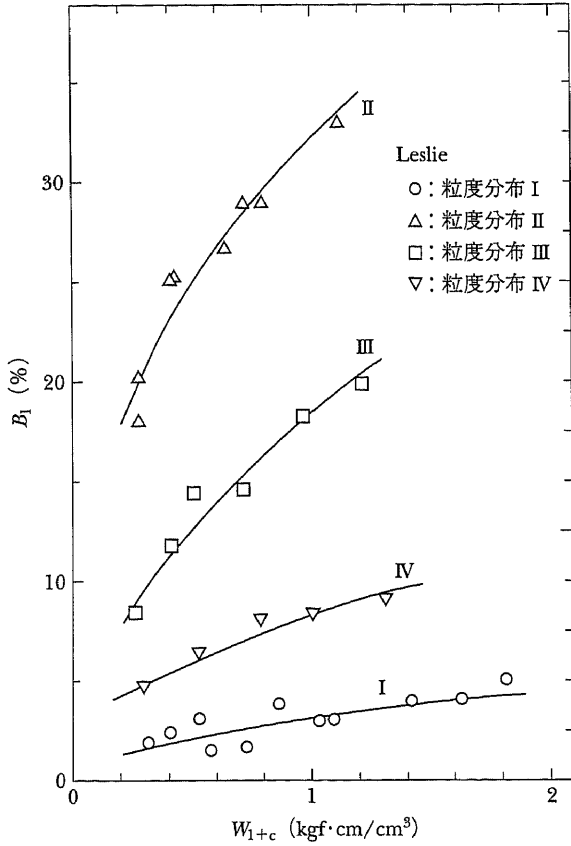


図-18(a) 全粒度分布における B_1 と W_{1+c} の関係(1)

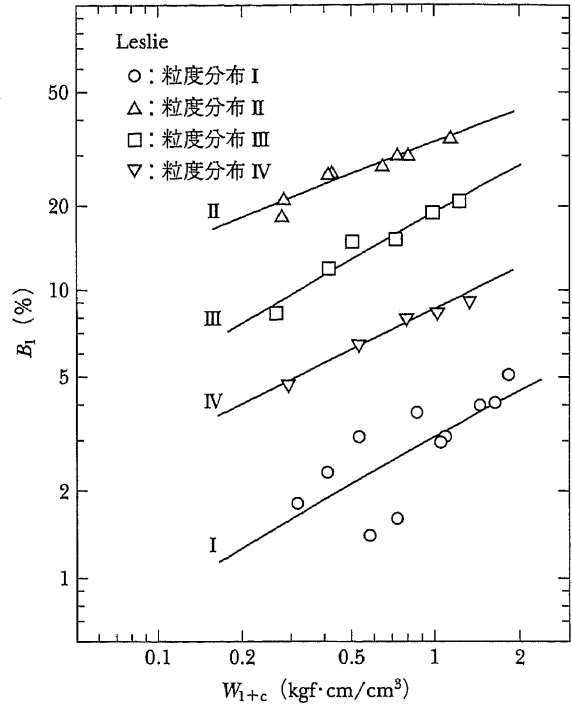


図-18(b) 全粒度分布における B_1 と W_{1+c} の関係(2)

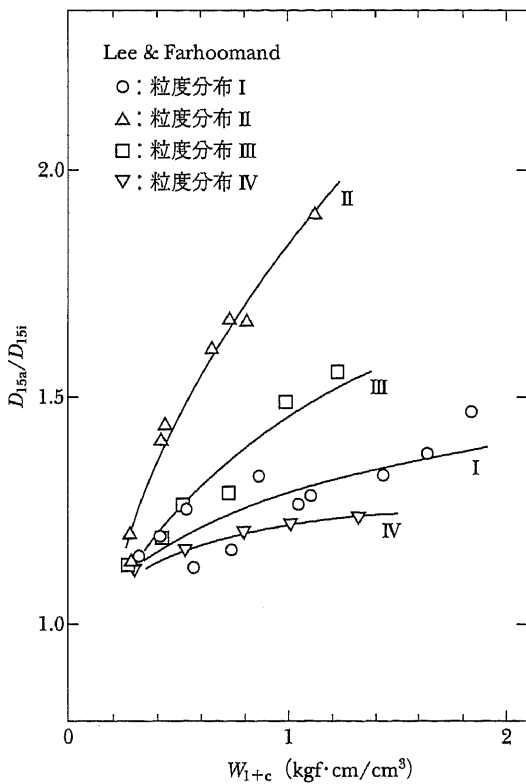


図-19(a) 全粒度分布における D_{15a}/D_{15i} と W_{1+c} の関係(1)

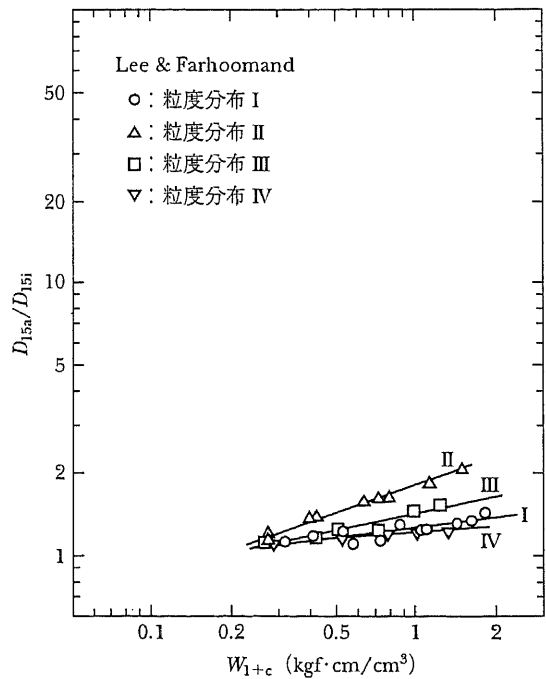


図-19(b) 全粒度分布における D_{15a}/D_{15i} と W_{1+c} の関係(2)

(5) 4つの方法の比較

Hardin, Leslie および Lee と Farhoomand についても, Marsal と同じように近似曲線を求めると, 次式がえられた。

$$\text{Hardin: } \log B_r = k + l \cdot \log W_{1+c} \quad (4-7)$$

$$\text{Leslie: } \log B_1 = m + n \cdot \log W_{1+c} \quad (4-8)$$

$$\text{Lee Farhoomand: } \log (D_{15i}/D_{15a}) = o + r \cdot \log W_{1+c} \quad (4-9)$$

これら4種類の粒子破碎の数量化手法について, データの処理をおこなったが, Hardinを除く他の3手法は, 粒径の大きなものか小さなものかいずれかの値に支配されると推定される。そこで, Marsalによる粒子破碎量と Leslieによるそれを加え, その破碎量を B_{m+1} として塑性エネルギーとの関係を示すと, 図-20なる。近似式は(4-10)式が得られる(係数値表は省略)。

$$\log B_{m+1} = i' + j' \cdot \log W_{1+c} \quad (4-10)$$

ここで求めた粒子破碎量と塑性エネルギーの関係から塑性エネルギーを媒介変数として, 前述の塑性エネルギーとせん断特性の式との関係を求めれば, 所期の目的は達成される。しかし, 粒子破碎量と塑性エネルギーとの関係式には, 圧密過程の粒子破碎量と塑性エネルギーが含まれている。この圧密過程の粒子破碎量を除去するために, 圧密終了後ふるい分け試験を実施した。図-

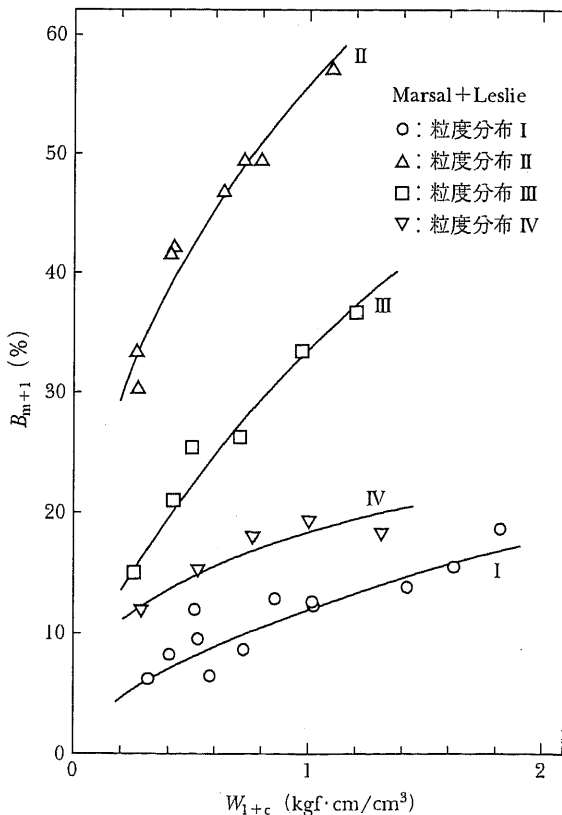


図-20 Marsal と Leslie の粒子破碎量を加えた B_{m+1} と塑性エネルギーの関係

16(b)の Marsal 法の結果に, 粒度分布 I について圧密時の粒子破碎量を示すと, 図-21になる。図からわかるように, 圧密時の塑性エネルギーは, 有効拘束圧 5 Kgf/cm^2 でも $0.177 \text{ Kgf}\cdot\text{cm/cm}^3$ とかなり小さく, 多少のばらつきはあるが, 前述の両対数上の直線に近似している。従って図-22に示したように, 圧密時の粒子破碎量及び塑性エネルギーを除き, せん断過程の粒子破碎量と塑性エネルギーの関係を求めるには, 圧密過程とせん断過程の両方の粒子破碎量を含んでいる A 点を曲線上の B 点に移動すればよい。この結果, 式も(4-6)~(4-10)の W_{1+c} を W_1 とすれば, せん断過程の粒子破碎量と塑性エネルギーの関係式(4-11)~(4-15)が求まる。

$$\text{Marsal: } \log B'_m = i + j \cdot \log W_1 \quad (4-11)$$

$$\text{Mardin: } \log B'_r = k + l \cdot \log W_1 \quad (4-12)$$

$$\text{Leslie: } \log B'_1 = m + n \cdot \log W_1 \quad (4-13)$$

$$\text{Lee and Farhoomand: } \log (D_{15i}/D_{15a})' = o + r \cdot \log W_1 \quad (4-14)$$

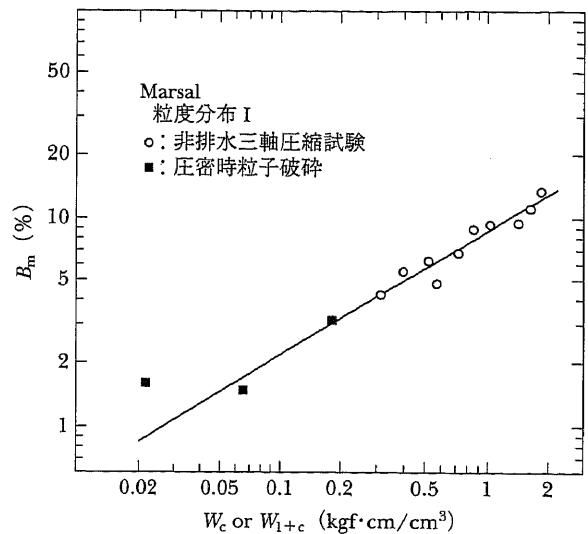


図-21 圧密時粒子破碎量の評価

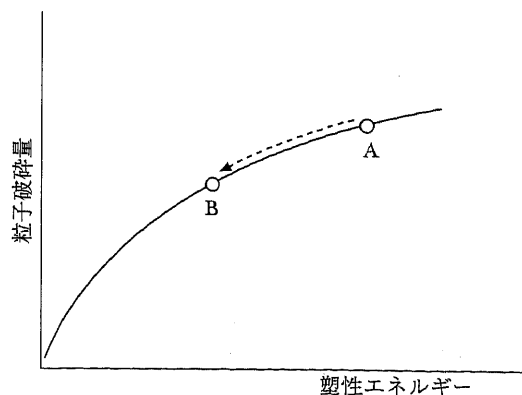


図-22 圧密過程の成分を除いた場合の粒子破碎量-塑性エネルギー関係の変化

Marsal and Leslie: $\log B'_{m+1} = i' + j' \cdot \log W_1$ (4-15)
 (4-6)~(4-10)式における粒子破砕量は、圧密過程とせん断過程の粒子破砕を含むものであったが、(4-11)~(4-15)式により、せん断過程のみの粒子破砕量が算定される。圧密過程の粒子破砕量と区別するため、ここで求められたせん断過程の粒子破砕量にはダッシュを付して、 B'_m とした。

4-3 粒子破砕量とせん断特性との関係

(1) ($P'_0 - P'_{\min}$) と粒子破砕量との関係

3-3 で求めた ($P'_0 - P'_{\min}$) の式は(3-7)である。

$$P'_0 - P'_{\min} = c \cdot \exp(d) \cdot \sigma'_0 \cdot e_0 \cdot W_1^{f+1} / (1 - \exp(d) \cdot \sigma'_0 \cdot W_1^f) \quad (3-7)$$

この式と(4-2)式で得られたせん断過程における粒子破砕量と塑性エネルギーの式(4-11)~(4-15)を関係づけてみる。式の形は同じであるので、Marsalによる式について示すと、(4-11)式を変形して

$$B'_m = \exp(i) \cdot W_1^j \quad (4-11a)$$

式(3-7)と(4-11a)から次式を得る。

$$P'_0 - P'_{\min} = c \cdot \exp(s) \cdot \sigma'_0 \cdot e_0 \cdot B_m^{s'} / (1 - \exp(V) \cdot \sigma'_0 \cdot B_m^{s'}) \quad (4-16)$$

ここに、 $s = d - i(f+1)/j$, $t = (f+1)/j$, $w = d - i/f/j$, $x = f/j$ である。

この式は Marsal の方法による粒子破砕量を ($P'_0 - P'_{\min}$) と関係づけるものである。他の Hardin, Leslie, Lee and Farhoomand および Hardin と Leslie を加えた 4 種類についても、同様の変換ができる。

(2) q_{\max} と粒子破砕量との関係

前述の式(3-10)により q_{\max} と塑性エネルギー W_1 との関係が与えられている。即ち

$$q_{\max} = \exp(g + d \cdot h) \cdot W_1^{f+h} \quad (3-10)$$

これについても、Masal の方法について、式を導くと、(3-10)と(4-11)から次式が得られる。

$$q_{\max} = \exp(y) \cdot B_m^{z'} \quad (4-17)$$

ここに、 $y = g + d \cdot h - f \cdot h \cdot i/j$, $z = f \cdot h/j$

(4-17)式が q_{\max} と粒子破砕量を関係づける。Marsal 以外の他の 4 つの方法についても同様に変換しうる。これら(4-16)と(4-17)式の関数は省略。

4-4 粒子破砕量の数量化方法に関する評価

4-3 において、粒子破砕量と圧縮せん断特性の関係を求めた。これらの式を実際に適用した計算値と実測値を比較した表は省略。この表には、粒度分布 I の試料についての結果を示したが、4-2 で述べた 5 つの方法による差異は、殆どない。(4-17)式による q_{\max} に対する結果は、($P'_0 - P'_{\min}$) によるものに比し、差が大きくなっている。これは、(4-17)式に土質定数や供試体間隙比などの試験時の供試体の状態を示す変数が含まれていないからであると推定される。これらの変数を導入するためには、試験の精度をあげ、測定を厳密にする必要があると考えられる。

以上、5 つの方法について、せん断特性による粒子破砕の数量化の比較検討をおこなったが、その差異は少ない。また、その処理の簡便さの利点から Marsal の方法がよいと判断される。

5. 結 論

砂のせん断特性に及ぼす粒子破砕の影響を比較するため、脆弱な風化花崗岩質山砂である草木山砂を用いて、非排水三軸圧縮試験と繰り返し非排水三軸試験をおこない次のような結論が得られた。

(1) 非排水三軸圧縮試験について

1. 平均有効主応力 P'_0 とせん断過程において生ずる平均有効主応力の最小値 P'_{\min} の差 ($P'_0 - P'_{\min}$) と、せん断過程の塑性エネルギー W_1 の関係式(3-7)が得られた。即ち

$$P'_0 - P'_{\min} = c \cdot \exp(d) \cdot \sigma'_0 \cdot e_0 \cdot W_1^{f+1} / (1 - \exp(d) \cdot \sigma'_0 \cdot W_1^f) \quad (3-7)$$

2. 破砕性砂のせん断特性である非排水せん断強度 q_{\max} とせん断過程の塑性エネルギー W_1 との関係について(3-10)式が得られた。

$$q_{\max} = \exp(g + d \cdot h) \cdot W_1^{f+h} \quad (3-10)$$

3. せん断特性と塑性エネルギーを関係づけるためには供試体作製時の間隙比を用いるのがよい。

4. 軸ひずみの大きな領域において、平均有効主応力と偏差応力との間隙比が一定値(定常状態)に留まる時、供試体の間隙比 e_0 と平均有効主応力 P' との関係は、拘束圧に関係なく片対数上である直線に近似できる。

(2) 粒子破砕量と塑性エネルギーとの関係

粒子破砕量と圧縮せん断過程における塑性エネルギーの関係は(4-11)~(4-15)式で表しうる。

(3) 粒子破砕量とせん断特性との関係

結論(1)の 1. 及び 2. と(2)の結果から圧縮せん断特性の一部と粒子破砕量の関係は、(4-16)および(4-17)式で表される。

$$P'_0 - P'_{\min} = c \cdot \exp(s) \cdot \sigma'_0 \cdot e_0 \cdot B_m^{s'} / (1 - \exp(v) \cdot \sigma'_0 \cdot B_m^{s'}) \quad (4-16)$$

$$q_{\max} = \exp(y) \cdot B_m^{z'} \quad (4-17)$$

(4) 本研究で得られた実験式によるせん断特性の計算値と試験による実測値を 5 つの粒子破砕量の算出法について比較した結果、数量化手法による差異は少ない。またその処理の簡便さの利点からも、Marsal による方法が優れているとみられる。

参 考 文 献

- 1) K. Been and M. G. Jefferies (1985): "A State Parameter for Sands" Geotechnique Vol. 35, No. 2, pp. 99-112
- 2) Bobby O. Hardin (1985): "Crushing of Soil Particles" Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE Vol. 1, No. 10, pp. 1177-1192
- 3) 石原研而 (1976): 「土質動力学の基礎」鹿島出版会

- 4) 磯崎真一・三浦清一・新田 登 (1992): 「火山灰質粒状体の粒子破碎に及ぼす応力系の影響」土木学会第47回年次学術講演概要集, 第3部, pp. 328-329
- 5) 日下部伸・森尾 敬・岡林 功・兵動正幸・村田幸一 (1997): 「砂質土の単粒子破碎と非排水せん断挙動に関する考察」第32回地盤工学研究発表会, pp. 661-662
- 6) Lee, K. L. and Farhoomand, I. (1967): "Crushing of Granular Soil" Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, pp. 68-86
- 7) Leslie, D. D. (1975): "Shear Strength of Rockfill" Physical Properties Engineering Study No. 526, South Pacific Division, Corps of Engineerings Laboratory, Sausalito, Calif p. 124
- 8) Marsal, R. J. (1965): "Discussion of Shear Strength" Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 3, pp. 310-316
- 9) 三浦哲彦・山内豊聡 (1977): 「砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響」土木学会論文報告集, 第260号, pp. 109-118
- 10) Miura, N. and Ohara, S. (1979): "Particle-Crushing of Decomposed Granite Soil under Shear Stresses" Soils and Foundations, Vol. 9, No. 3, pp. 1-14
- 11) 永瀬英生・都筑信也 (1989): 「砂粒子の破碎試験」第24回土質工学研究発表会, pp. 533-534
- 12) 永瀬英生・榎戸源則・鶴飼恵三 (1989): 「圧縮力を用いた破碎試験による砂粒子の破碎形状」土木学会第44回年次学術講演会概要集第3部, pp. 856-857
- 13) 永瀬英生・花井好機・三沢伸吾 (1987): 「まさ土の三軸圧縮試験」第22回土質工学研究発表会, pp. 856-857
- 14) 大野司郎・落合英俊・安福規之 (1996): 「砂の破碎性と圧縮性に関する一考察」土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 50-51
- 15) 新城俊也 (1997): 「砂の K 値に及ぼす粒子破碎の影響」第32回地盤工学研究発表会, pp. 663-664