

粒状体のせん断特性に及ぼす粒径の影響について

落 合 英 俊*

Effect of Grain Size on the Shear Characteristics of Granular Materials

by

Hidetoshi Ochiai

(Civil Engineering)

In this paper the effect of grain size on the shear characteristics of granular materials is studied from the results of drained triaxial compression tests. The materials tested are Shirasu, Coral and Coal having different shape and surface texture. Deviator stress, angle of shearing resistance, volume changes, dilatancy factor and energy components at failure are mainly examined. In the examination it is clarified that they generally increase with a decrease in grain size, and that as the shape and surface texture become unusual, the effect of grain size on them increases. As volume changes and dilatancy factor at failure increase with a decrease in grain size, in all materials the critical void ratios, which are determined by $(\Delta V/V_0)_{r=0}$ method and $(d\dot{V}/V_{e1})_{r=0}$ method, increase correspondingly with a decrease in grain size. And in all materials of each grain size the critical void ratio determined by $(d\dot{V}/V_{e1})_{r=0}$ method is larger than that by $(\Delta V/V_0)_{r=0}$ method.

1. まえがき

土質工学において材料として用いる土は一般に土粒子・水・空気の三相構造をなしており、個々の土粒子は外力の作用によりその相対的位置が変化しやすく、連続物体というよりは粒状体の集合体としてその性質をとらえねばならない。また土は均質性に乏しく外的条件によってもその性質が著しく変化する。そのため土の応力-ひずみ関係は鉄鋼やコンクリートなどの他の工学材料に比べて非常に複雑なものとなっている。

土の力学的性質、主としてせん断特性には種々の因子が影響を及ぼしているが、土の種類とその状態に大別できる¹⁾。土の種類というのは材質（土粒子の比重、土粒子自身の強さ）、形（丸み、表面の粗度）、粒度（粒径、均等性）であり、状態というのは密度、含水量、骨組構造（間ゲキ比の不均一性、粒子配列の方向性など）である。それゆえ土のせん断特性を厳密に論ずるには、それらの因子がどのように影響しているかを調べる必要がある。従来現場との結びつきから密度とせん断強さとの関係については多くの研究がなされている。一般に土は密度を大きくするとせん断強さは増大するものであり、道路の盛土等における土の締め

あるいはチュウ積粘土等の軟弱地盤の圧密改良工法は、そのような効果を期待して行なわれているものである。

ところで粒状体のせん断特性を明らかにするには、密度とともに間ゲキ比の不均一性や粒子配列などのいわゆる骨組構造が重要な因子となっており、この骨組構造を規制する一つの因子として粒径が考えられる。そこで本文では粒径の異なる粒状体の供試体について排水三軸圧縮試験を行ない、粒径がせん断特性に及ぼす影響について考えてみた。またシラス、コーラル、石炭粉という特殊な試料を用いて、材質および形がせん断特性に及ぼす影響についても検討したものを併せて報告する。

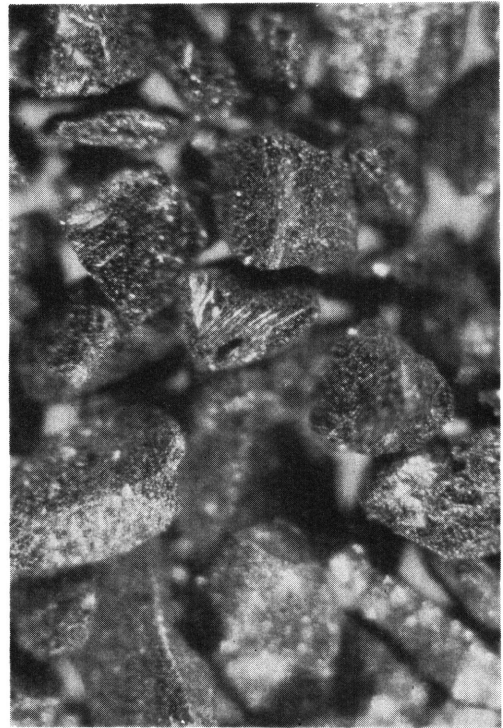
2. 試料、供試体および実験方法

試験に用いた試料は比重 2.37 のシラス、比重 2.74 のコーラル、比重 1.34 の石炭粉の 3 種類である。これら 3 種類の試料を粒径範囲が 2000~840 μ 、840~420 μ 、420~250 μ となるようにフルイを用いて粒度調整した。粒径範囲 420~250 μ の各試料の顕微鏡写真を Photo. 1 に示した。シラスの粒子形状はガラス質で薄く扁平で角張ったものが多くみられ、なかには多面体のようなものも含まれており、土質工学の分野で特殊土として取扱がわれている特異な粒子形状を

* 土木工学科



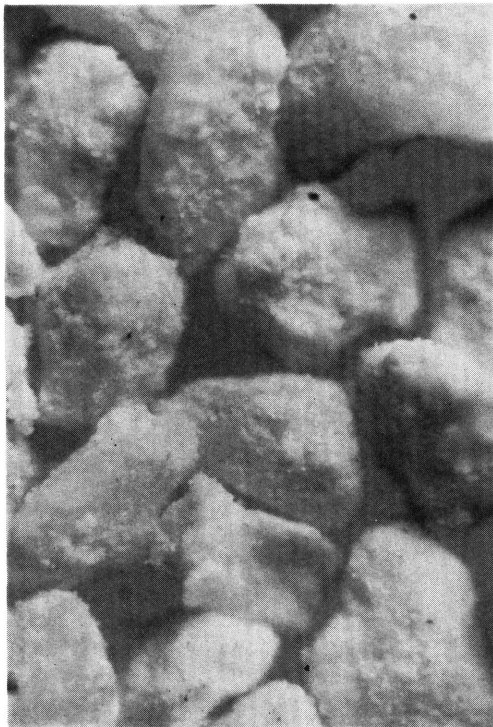
(a) Shirasu



(c) Coal

Photo 1 Microphotographs of materials (420~250 μ)

Photo 1



(b) Coral

Photo 1

有する試料である。コーラルは紡錘状をなした比較的丸みをおびた粒子が多く、粒子表面は非常にきめがあらいが指でつぶすとポロポロくずれやすく、セン断により粒子の破砕がかなり起こるのではないかと考えられる。石炭粉は比較的鈍い稜角を有する粒子が多く、粒子表面はきめがなめらかである。

供試体の大きさは直径 5.0cm、高さ 12.5cm であり、密なものとするゆるいものの 2 種類の初期間ゲキ比 e_0 に調整した。各試料の粒子形状が異なり、粒径および粒径範囲も異なるので同一初期間ゲキ比にすることは不可能であるため、密な状態の供試体作成にあたっては、各粒径の試料とも同じ締固めエネルギーを与えることにした。つまりペDESTAL にセットしたゴムスリーブとモールドの中に所定量の試料を 4 層に分けて注ぎ込み、各層ごとに直径約 4.0cm、重さ 500g 程度の鉄製のおもしをのせ、モールドの外側に木製の棒により 30 回の打撃による振動を与えて締め固めた。ゆるい状態の供試体作成にあたっては、各粒径の試料とも所定量の試料をモールド内に注ぎ込むだけとした。これら 2 つの初期間ゲキ比はそれぞれ空気乾燥状態における最小間ゲキ比と最大間ゲキ比に近い値であるとみなしてよいであろう。

セン断にあたっては側圧 σ_3 を 0.5, 1.0, 1.5,

2.0kg/cm² の4段階にとり、ヒズミ速度を毎分供試体高さの約1%として、定側圧定ヒズミ法で三軸圧縮試験を行なった。試験はすべて気乾燥状態における試料について排水(気)試験を行ない、軸荷重、軸変位、体積変化量を測定した。

3. 試験結果および考察

各粒径の試料について、4段階の側圧 σ_3 に対する平均初期間ゲキ比 e_0 の値を示したものが Table 1 である。粒子表面のきめが比較的なめらかな石炭粉では粒径による初期間ゲキ比の差がさほどみられないが、コーラル、シラスの順に粒子形状が特異なものになるにつれて粒径による影響が大きく現われている。粒径が大きくなるほど初期間ゲキ比は小さくなっているが、これは必ずしも同じ締固めエネルギーで粒径が大きくなると密度が小さくなるということではなく、粒径範囲によるものであろう。一般に粒径範囲が大きくなると大きな粒子間の間ゲキを小さい粒子が満たすことにより密度は小さくなる。本試験ではフルイの都合上、粒径が大きくなるほど範囲を大きくしているため、同じ締固めエネルギーを与えたにもかかわらず、Table 1 に示すような値となっている。

なお試験は2種類の間ゲキ比で行なったので、その結果の整理にあたってその2点間を直線で結んでいるものもあるが、これは必ずしも直線関係にあるという意味ではない。

3.1 破壊時の軸差応力とせん断抵抗角について

砂質土について三軸圧縮試験を行なった場合の応力-ヒズミ曲線の形は大別して2つに分けられる。密な供試体では比較的小さいヒズミにおいて応力の最大値が現われ、その後のヒズミの増大とともにかなり明瞭に応力の減少を示すが、ゆるい供試体では比較的大きいヒズミにおいて応力の最大値が現われ、その後のヒズミの増大に対してほとんど応力の減少を示さない。ここで定める破壊時というのは軸ヒズミ15%以内における軸差応力の最大点である。それゆえ非常にゆるい供試体で軸ヒズミが15%を越えてもただらとした応

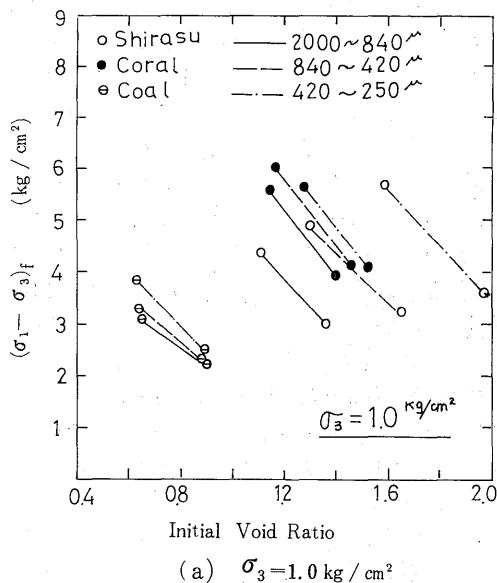


Fig. 1 Relation between deviator stress at failure and initial void ratio

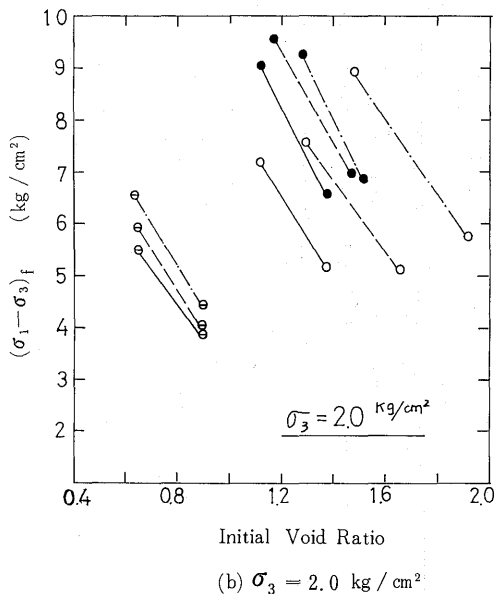


Fig. 1

Table 1 Average initial void ratio

Materials Grain Size(μ)	Shirasu		Coral		Coal	
	DENSE	LOOSE	DENSE	LOOSE	DENSE	LOOSE
2000~840	1.128	1.131	1.130	1.376	0.657	0.907
840~420	1.302	1.658	1.169	1.473	0.644	0.881
420~250	1.488	1.951	1.268	1.514	0.627	0.898

力の増加を示すものは、軸ヒズミ15%に対応する点を破壊時としている。これはヒズミが大きくなると供試体の変形が不均等になり、応力算定に問題がでてくるからである。以後破壊時を表わすものにはサフィクス f をつけることにする。

側圧 1.0, 2.0kg/cm² の時の破壊時の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を初期間ゲキ比 e_0 に対してプロットしたものが Fig. 1 である。シラス、コーラル、石炭粉ともに粒径による $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の変化の様相は同じであり、粒径が小さくなるにつれて $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は大きくなる。また粒径による $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の差は石炭粉、コーラル、シラスの順に粒子形状が特異になるほど大きくなる。これは同じ締固めエネルギーのもとで粒子形状が特異になるほど粒径による密度の変化が大きくなるということと好対照をなしている。すなわち粒子形状が特異なものになるほど、同じ締固めエネルギーのもとで粒径が小さくなると初期間ゲキ比は大きくなり、そのため軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は小さくなるように考えられるが、逆に $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は大きくなっている。これは破壊時の軸差応力に及ぼす粒子形状の影響が非常に大きいことを示すものである。

Mohr-Coulomb の規準を用いてセン断抵抗角 ϕ_d を求めたものが Fig. 2 である。石炭粉のように普通の粒子形状をなし、粒子表面が比較的なめらかなものでは粒径による影響はさほど大きくないが、コーラルのように粒子表面がきわめてあらく、粒子自身の強さも弱いものやシラスのように特異な粒子形状をもち、

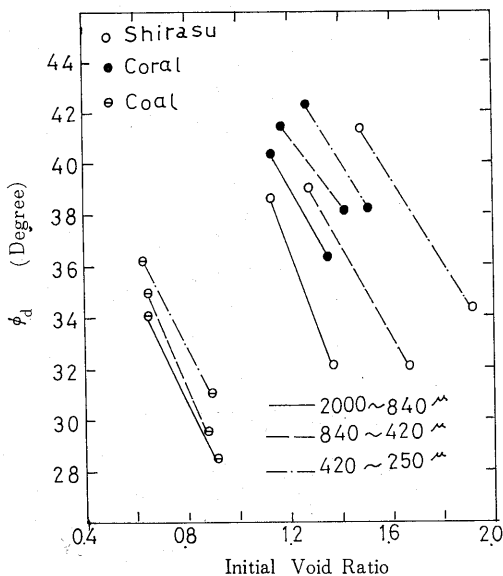


Fig. 2 Relation between angle of shearing resistance ϕ_d and initial void ratio

粒子間のインターロッキングがきわめて強いものでは粒径の影響が顕著である。石炭粉のようにごく普通の粒子から成る試料の場合、粒径が小さくなることにより ϕ_d が大きくなることは粒子間の接触点数が多くなることおよび後で述べるように体積膨張が大きくなるためと考えられるが、シラス、コーラルでは表面状態をも含めた粒子形状の特異性による粒子間のインターロッキングによるものも原因していると考えられる。コーラルの ϕ_d がゆるい場合でもかなり大きい、これは粒子表面が非常に粗であることおよび ϕ_d の計算に粒子の破碎に費いやされる仕事も含まれているためであろう。

3.2 破壊時の体積変化とダイレイタンスィファクターについて

粒状体を排水状態でセン断すると体積変化が生じるが、体積変化—ヒズミ曲線の性状はほぼ同様な形をなしており、その曲線は最初体積の減少を示しその後増加する。非常にゆるい状態のものでは試験の終りまで初期の体積以上の増加を示さず、またある場合には体積の減少のみを続け、そのまま定常状態に落ち着き体積の増加を示さないこともある。試験で測定されるこのような体積変化量はセン断応力の変化によるダイレイタンスィーと平均主応力の変化によるものことから成っていると考えられるが、これらの成分はセン断中に各々独立に生じることはなく、おたがいに関係を及ぼし合いながらセン断の進行とともに変化していくものであろう。それゆえセン断のある段階においてそれらの成分を独立に取りだすことは非常に困難であるし、またセン断中の体積変化の機構というのは単にそれらの成分を加え合せたような簡単なものではないと考えられる。ここではセン断応力によるダイレイタンスィーと平均主応力によるものと合せた試験で測定される体積変化量 ΔV について考えてみることにする。

Fig. 3 は各試料についての破壊時の体積変化 $(\Delta V/V_0)_f$ を側圧 σ_3 に対して求めたもので、 V_0 はセン断前の初期体積である。各試料とも粒径が小さくなるにつれて $(\Delta V/V_0)_f$ は大きくなる。これは粒径が小さくなると粒子間の接触点数がふえ、粒子どうしの乗り越え運動が粒径の大きい場合に比べると広範囲になるためであると考えられる。さらに本試験では粒径が大きくなるほど粒径範囲を広くしているため粒度配合がよくなり、そのため大きい粒径の間ゲキを小さい粒径の粒子が満たすことにより間ゲキ比は小さくなるが、セン断時の粒子の移動が間ゲキ内でうまく配列され、膨張が小さくなると考えられる。

コーラルでは粒径による変化がシラス、石炭粉に比

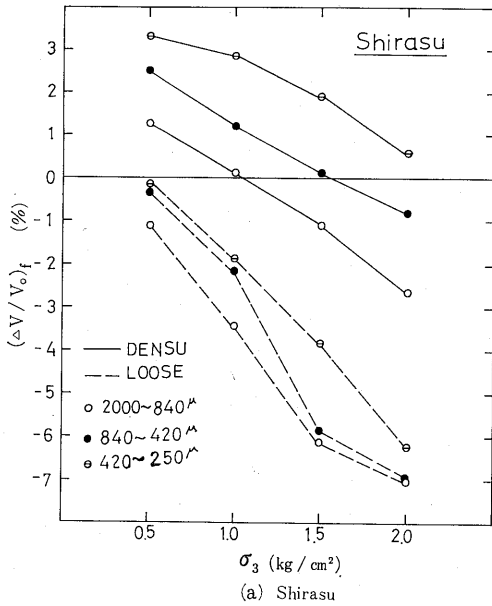


Fig. 3 Relation between $(\Delta V/V_0)_r$ and confining pressure

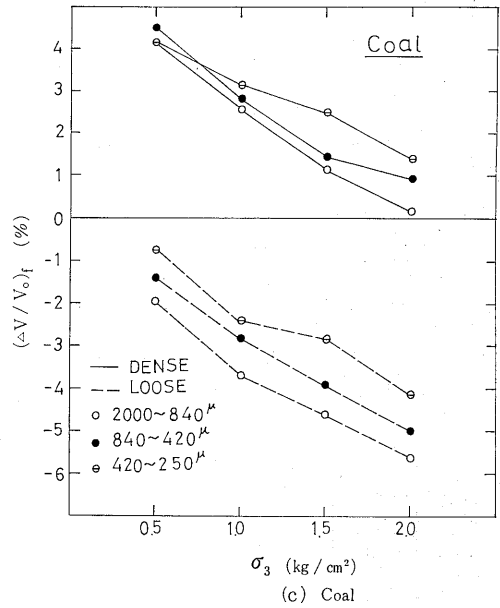


Fig. 3

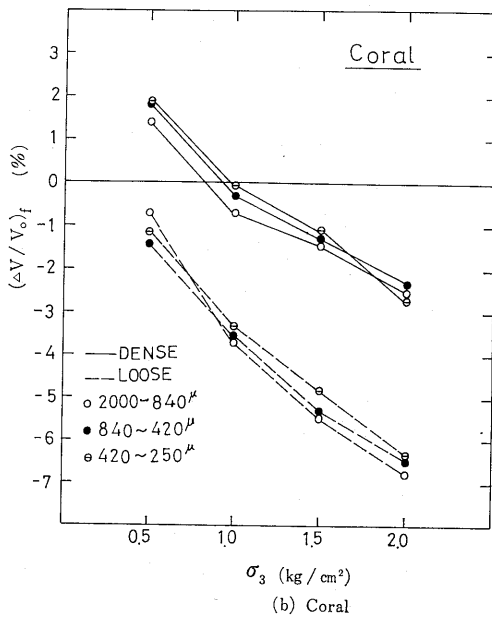


Fig. 3

べて小さいが、これはコーラル粒子が非常にろく、粒子自身の破砕が生じているためであろう。また密な状態でも σ_3 が 1.0 kg/cm^2 になると $(\Delta V/V_0)_r$ の値は負になっているが、これもコーラル粒子の破砕が大きく影響しているのものであろう。シラス、コーラル、石炭粉の三試料を比べてみると、特異な粒子形状を有するシラスが粒径による影響を一番強くうける。

また側圧 σ_3 が大きくなると、 $(\Delta V/V_0)_r$ は小さくなるが、これは σ_3 が大きくなると膨張しようとする場合にはその膨張が妨げられるし、収縮しようとする場合にはその収縮が促進されるためである。

三軸圧縮試験において、土の強度成分に占めるダイレイタンスに伴う成分の計算に対する式は今まで多くの提案がなされているが²⁾³⁾⁴⁾、それらの多くはそのダイレイタンスに伴う成分が $d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1$ の関数である点で一致している。 $d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1$ は軸ヒズミの増分 $\dot{\epsilon}_1$ に対する体積ヒズミの増分 $d\dot{V}/V$ の比であり、ダイレイタンスファクターと呼ばれている。

破壊時のダイレイタンスファクター $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r$ と側圧 σ_3 の関係を表わしたものが Fig. 4 である。コーラルのバラツキが大きい、これは粒子破砕が原因しているものと考えられ、このようにセン断により粒子破砕が生じる土では別の考え方が必要であろう。シラス、石炭粉の場合についてみると密なものでは粒径による影響がかなり大きく、粒径が小さくなるほど $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r$ は大きくなる。ゆるい場合には石炭粉では密な場合と同様の傾向があるがシラス、コーラルではバラツキがあり、はっきりした結論はだせない。また各試料とも側圧 σ_3 が大きくなると $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r$ は減少する。

ところで破壊時の体積が初期体積に比べて大きくなっているのか、小さくなっているのかということは非排水状態でセン断した時の間ゲキ水圧を推定するうえで非常に重要である。そこで Fig.3 のデータをもと

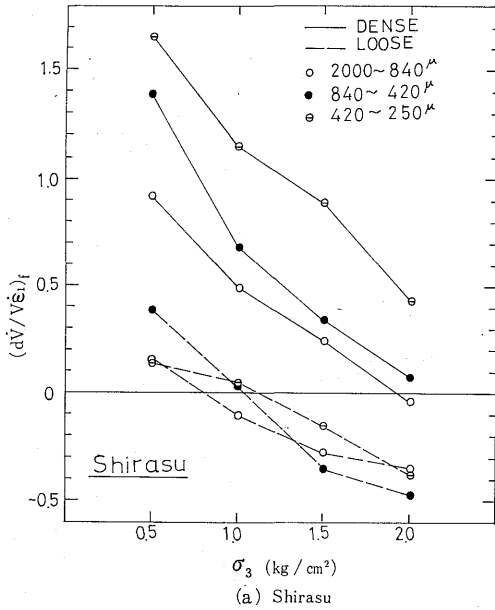


Fig. 4 Relation between $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r$ and confining pressure

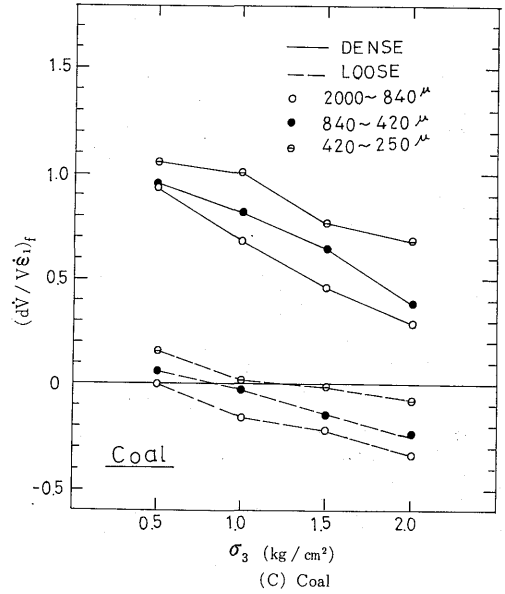


Fig. 4

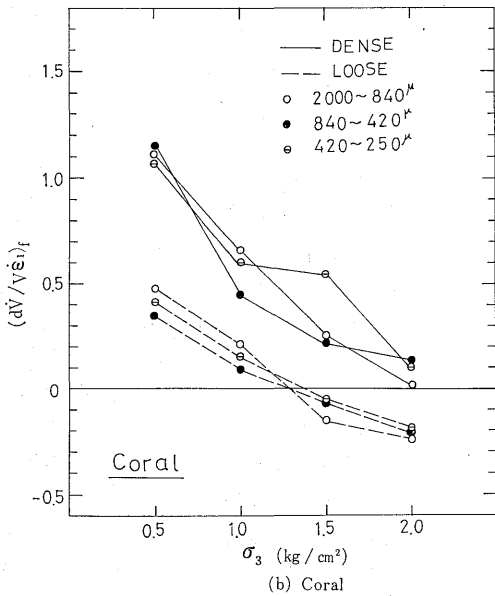


Fig. 4

に $(dV/V_0)_r$ と e_0 の関係をプロットし2点間を直線で結び、その直線あるいは直線を延長したものが $(dV/V_0)_r=0$ と交わる点の e_0 を求め、側圧 σ_3 に対してプロットしたものが Fig. 5 の実線である。また破壊時の体積のみならず、破壊時に体積が増加しようとしているのか、減少しようとしているのかということも間ゲキ水圧の挙動を推定するうえで重要である。そこで前と同様な方法で $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r$ と e_0 の関係直

線が $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r=0$ と交わる点の e_0 を求め、側圧 σ_3 に対してプロットしたものが Fig. 5 の破線で示すものである。

上に述べた二つの事柄はいわゆる限界間ゲキ比 e_{cr} に関するものである。第1の方法は Taylor⁵⁾ によって示されたもので、“排水セン断において破壊時の体積と初期体積が等しくなるような場合の初期間ゲキ比”を限界間ゲキ比と定めるもので、この方法を $(dV/V_0)_r=0$ 法と呼ぶことにする。第2の方法は春山・山内⁶⁾が乱したシラスの排水セン断特性の研究において提案しているもので、“セン断面の方向と粒子の移動方向とが定常的に等しいときの間ゲキ比”を限界間ゲキ比と定めるもので、その求め方は側圧 σ_3 をパラメーターとして $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r$ を e_0 に対してプロットして得られる曲線上の $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r=0$ になる点の e_0 を求めるもので、この方法を $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_r=0$ 法と呼ぶことにする。この春山・山内による定常の意味における限界間ゲキ比はシラスのように粒子がかなり扁平で、方向性をもち、一定応力、一定体積でセン断が進行する定常状態が現われる場合はよいが、普通の砂質土では排水三軸圧縮試験をすると一定応力になっても体積の増加が続いていることが多く、定常状態が現われない場合には問題がある。しかし破壊時に体積が増加しようとしているのか、減少しようとしているのかと目安にはなり、間ゲキ水圧の挙動を推定するうえでそれなりの意味をもつものと解釈される。

Fig. 5 において、排水セン断を行なったとき実線

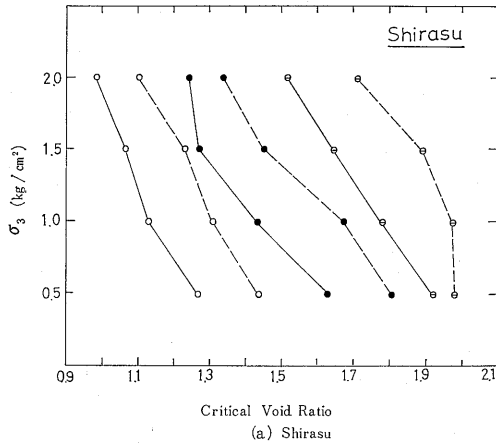


Fig. 5 Relation between confining pressure and critical void ratio

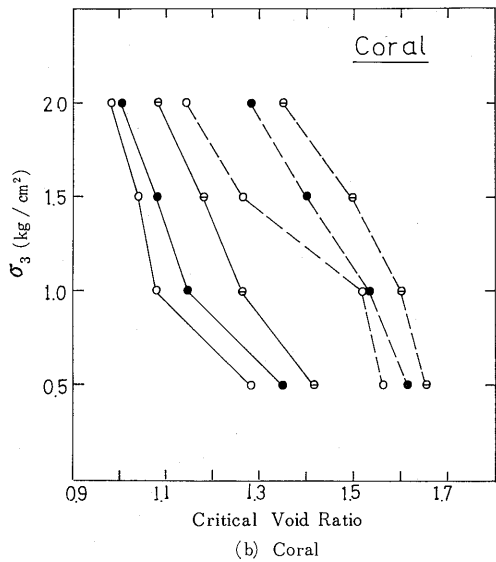


Fig. 5

より左側では破壊時の体積は初期体積より大きくなり、右側では小さくなる。それゆえ非排水状態でセン断すると左側の領域では負の間ゲキ水圧が発生し、有効応力はそれだけ増大することになり、右側の領域では正の間ゲキ水圧が発生し、有効応力は減じられることになろう。また破線より左側の領域では破壊時に体積は増加しようとしており、間ゲキ水圧は減少状態にある。一方右側の領域では体積は減少しようとしており、間ゲキ水圧は増加状態にあると考えられる。

$(\Delta V/V_0)_f=0$ 法で求めた限界間ゲキ比 e_{cr} についてみると、各試料とも破壊時の体積変化が粒径が小さくなるほど大きくなるので、 e_{cr} も大きくなる。シラス、コーラル、石炭粉の三試料を比べてみると、粒子表面が比較的なめらかで普通の粒子形状を有する石炭

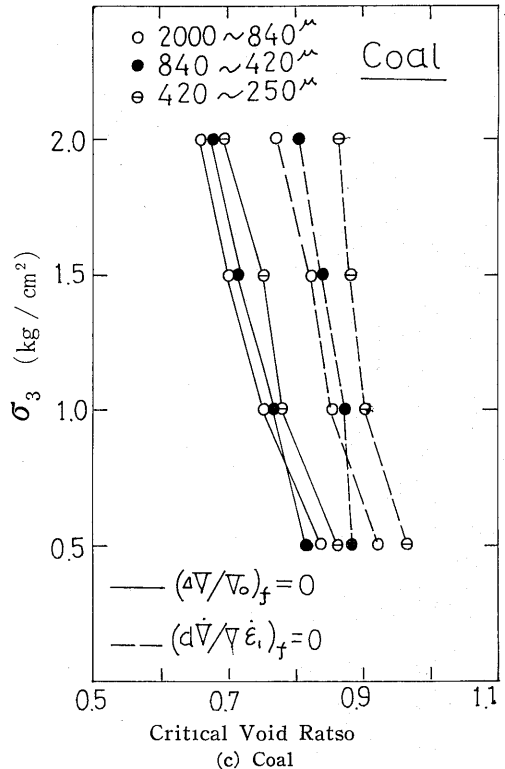


Fig. 5

粉では粒径による影響がさほど大きくないが、コーラル、シラスのように粒子表面が非常にあらいものや特異な粒子形状を有するものではかなり大きな影響がある。特にシラスの場合において顕著である。一方 $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_f=0$ 法で求めた e_{cr} も破壊時のダイレイタンシーファクターが粒径が小さくなるほど大きくなるので、それに対応して大きくなり、 $(\Delta V/V_0)_f=0$ 法で求めたものとほとんど同じ傾向である。

つぎに $(\Delta V/V_0)_f=0$ 法で求めた e_{cr} と $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_f=0$ 法で求めた e_{cr} を比較してみると各粒径の試料とも $(d\dot{V}/V\dot{\epsilon}_1)_f=0$ 法で求めたほうが大きくなる。それゆえある粒径の試料について実線より左側では負の間ゲキ水圧が発生し、その負圧は大きくなろうとしているので非常に安定状態にあり、破線より右側ではその逆の状態にある。実線と破線の間の領域では正の間ゲキ水圧が生じるが、その正の間ゲキ水圧は減少しようとしており、より安定状態になろうとしている。上に述べた2つの方法のいずれかで求めた e_{cr} もそれぞれ意味があり、どちらがより適確であるかの判断はむづかしいが、 $(\Delta V/V_0)_f=0$ 法で求めたものは Table. 1 の間ゲキ比をみた場合、あまりにも過少な値を示しているように考えられる。またどちらの e_{cr} を用いるかはその値をどのような目的に用いようとす

るかによって決めるべきであろう。たとえば地震時あるいは繰返し荷重を受ける飽和砂質土の流動化現象について考える際には正の間ゲキ水圧が発生するか負の間ゲキ水圧が発生するかということより、発生している間ゲキ水圧が増加状態にあるのか減少状態にあるのかということの方が大切であろう。いずれにしろ実線と破線の間領域をどのように取り扱おうかが問題であり、この点については今後研究を続けたいと考えている。

3.3 破壊時のエネルギー成分について

ここでは Rowe の応力-ダイレイタンス理論式を用いて破壊時のエネルギー成分について考えてみる。Rowe の応力-ダイレイタンス理論式はセン断中の体積変化の影響を $\{1 - (\partial v / \partial \epsilon_1)\}$ というファクターによってセル圧に対して補正するもので、圧縮ヒズミを正とすると次式で与えられている⁴⁾。

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_3' \{1 - (\partial v / \partial \epsilon_1)\}} = \tan^2 (45^\circ + \frac{\phi_f}{2}) = K_{pf} \quad (1)$$

ここで σ_1' : 軸方向有効主応力, σ_3' : 周方向有効主応力 (セル圧), $\partial \epsilon_1$: 軸ヒズミの増分, ∂v : 体積ヒズミの増分, ϕ_f : 修正された摩擦角 (Rowe の方法による) である。Rowe⁷⁾ によれば土に主応力系を与えた時の全仕事は次の4つの主成分に分けられる。(i) 体積変化が生じないとした時に摩擦に吸収される内的なエネルギー, (ii) 粒状体が膨張するため、粒子間のスベリ面上の有効応力が変化しそのために摩擦に吸収される内的なエネルギー, (iii) 体積変化中の外的な仕事, (iv) 貯えられそして回復する“弾性”エネルギー。以上4つの成分のうち、(iv) の弾性成分は正規圧密粘土では全ヒズミエネルギーの重要な成分であるといわれているが⁸⁾⁹⁾、砂質土の場合には他の成分に比べて非常に小さいものと考えられるので、ここでは(iv) の弾性成分を無視することにして、(i)(ii)(iii) の成分について検討を行なってみる。

$\delta(W_T)$ を軸差応力によって供試体に加えられる単位体積当りの仕事増加とすれば、次式で与えられる。

$$\delta(W_T) = (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot (\partial \epsilon_1) \quad (2)$$

式(1)を用いると上式は次のように変形できる。

$$\delta(W_T) = \sigma_3' (\partial \epsilon_1) \cdot [K_{pf} \{1 - (\partial v / \partial \epsilon_1)\} - 1] \quad (3)$$

$\delta(W_{it})$ を膨張が生じる時、膨張による外的な仕事を消去した後で供試体に内的に吸収される単位体積当りの仕事増加とすれば、次式で与えられる。

$$\delta(W_{it}) = \sigma_1' (\partial \epsilon_1) + 2\sigma_3' (\partial \epsilon_3) \quad (4)$$

式(1)と $(\partial v) = (\partial \epsilon_1) + 2(\partial \epsilon_3)$ の関係を用いて

式(4)を変形すると次のようになる。

$$\delta(W_{it}) = \sigma_3' (\partial \epsilon_1) \cdot \{1 - (\partial v / \partial \epsilon_1)\} (K_{pf} - 1) \quad (5)$$

$\delta(W_{it})$ を摩擦熱として内的に消散される成分とすれば、この成分は実際のセル圧 σ_3' と内的および外的な膨張の影響を修正した軸応力 $\sigma_1' / \{1 - (\partial v / \partial \epsilon_1)\}$ を用いて次式で与えられる。

$$\delta(W_{if}) = \frac{\sigma_1'}{\{1 - (\partial v / \partial \epsilon_1)\}} \cdot (\partial \epsilon_1) + 2\sigma_3' (\partial \epsilon_3) \quad (6)$$

この成分は体積変化が生じないとした時に摩擦に吸収される内的なエネルギーであるので $(\partial \epsilon_1) + 2(\partial \epsilon_3) = 0$ であり、また式(1)を用いて変形すると次のようになる。

$$\delta(W_{if}) = \sigma_3' (\partial \epsilon_1) (K_{pf} - 1) \quad (7)$$

この $\delta(W_{if})$ が上に挙げた(i)の成分であり、 $\delta(W_{it}) - \delta(W_{if})$ が(ii)の成分、 $\delta(W_T) - \delta(W_{it})$ が(iii)の成分に相当する。

式(3)、(5)、(7)はすべて $\sigma_3' (\partial \epsilon_1)$ という量に比例するので $\delta W / \sigma_3' (\partial \epsilon_1)$ という比をとって、初期間ゲキ比に対して $\sigma_3' = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の時のものをプロットしたのが Fig.6 である。Fig.6 で実線で示されている軸差応力によって供試体に加えられる仕事は各試料とも粒径が小さくなるにつれて大きくなり、その差は粒子形状が特異になるほど大きくなる。また各粒径の試料とも $\delta(W_{it}) - \delta(W_{if})$ という量で表わされる粒状体がセン断により膨張するために摩擦に吸収される内的なエネルギーは間ゲキ比が大きくなるに

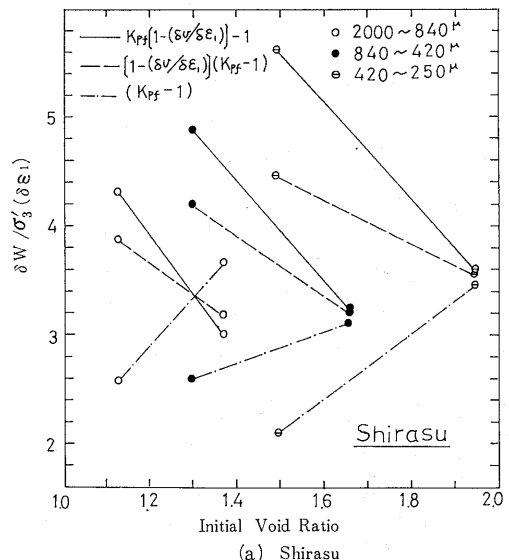


Fig. 6 Energy Components of failure

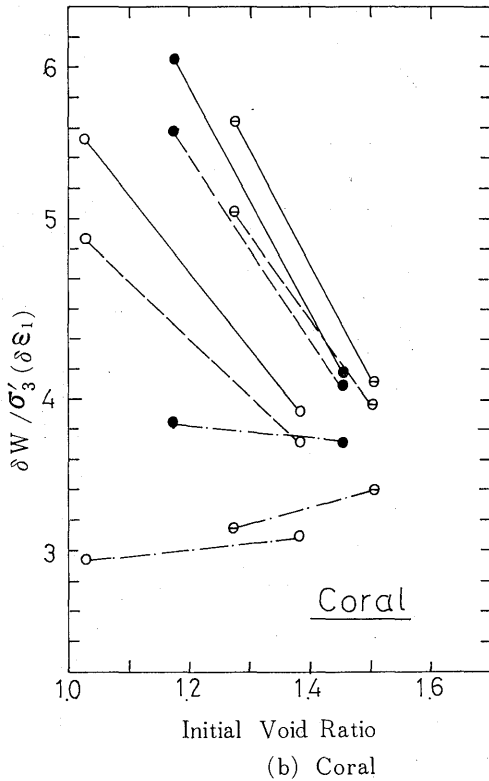


Fig. 6

つれて小さくなり、 $\delta(W_T) - \delta(W_{it})$ で表われる体積変化による外的な仕事も間ゲキ比が大きくなるにつれて減少するが、膨張のため摩擦に吸収される内的なエネルギーほど密度による変化は大きくない。

4. 結 論

粒子表面状態、粒子形状が異なる石炭粉、コーラル、シラスの三試料の粒径を変えて排水（気）三軸圧縮試験を行ない、粒状体のセン断特性に及ぼす粒径、粒子形状の影響を調べた結果、次のようなことが明らかになった。

(1) 破壊時の軸差応力は粒径が小さくなるほど大きくなり、粒子形状が特異なものほど粒径による影響が大きくなる。

(2) Mohr-Coulomb の規準より求めたセン断抵抗角も粒径が小さくなるほど大きくなり、粒子表面がなめらかなものでは粒径による影響は比較的小さい。

(3) 破壊時の体積は粒径が小さくなるほど大きくなり、これも粒子形状が特異になるほどその影響が大である。

(4) 破壊時のダイレイタンスーファクターはシラ

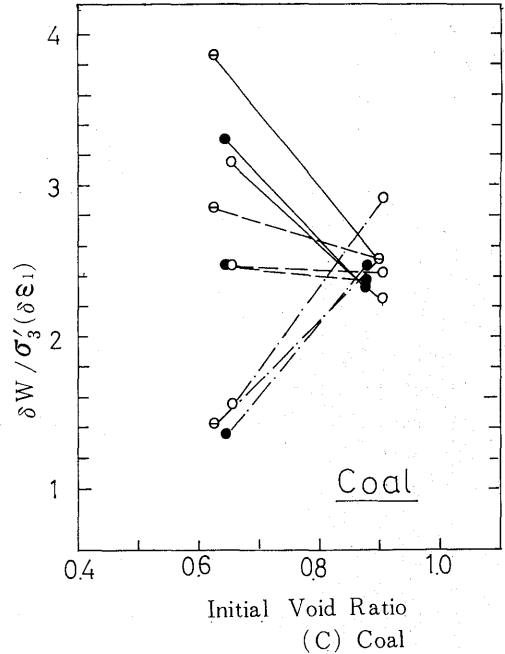


Fig. 6

ス、石炭粉では密な場合、粒径が小さいほど大きくなるが、ゆるい場合にはバラツキがある。また各試料とも側圧が大きくなると小さくなる。

(5) $(\Delta V/V_0)_r = 0$ 法で求めた限界間ゲキ比 $(d\dot{v}/V\dot{\epsilon}_1)_r = 0$ 法で求めた定常の意味における限界ゲキ比とも、粒径が小さくなるほど大きくなり、粒子形状が特異なものになるほどその影響が大きい。また各粒径の試料とも $(\Delta V/V_0)_r = 0$ 法で求めたものより $(d\dot{v}/V\dot{\epsilon}_1)_r = 0$ 法で求めた限界間ゲキの方が大きくなる。

(6) 破壊時に軸差応力によって供試体に加えられるエネルギーは粒径が小さいほど大きい。また各粒径の試料ともセン断により膨張のために摩擦に吸収される内的なエネルギーは間ゲキ比が大きくなるにつれて小さくなるが、その減少の程度は体積変化による外的な仕事の減少の割合よりも大きい。

付 記

粒状体に関する一連の研究にあたって、日頃御指導をいただいている九州大学工学部山内豊聡教授につつしんで感謝の意を表する。なおこの実験については九州大学工学部学生（現在前田建設工業勤務）青島憲一郎君の卒業研究としての協力を得て行なったものである。ここにあわせて謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 三笠正人：土質試験法第5編第1章セン断試験法概説
p. 327~335., (1970)
- 2) Bishop, A. W. : Correspondence on "Shear Characteristics of a Saturated Silt, Measured in Triaxial Compression", *Geotechnique*, Vol.4, No.1, p. 43~45. (1954)
- 3) Newland, P.L. & B. H. Allely : Volume Changes in Drained Triaxial Test on Granular Materials, *Geotechnique*, Vol.7, No.1. p. 17~34. (1957)
- 4) Rowe, P. W. : The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, *Proc. Royal Soc. London, A*, Vol. 269, p.500~527, (1962)
- 5) Taylor, D.W. ; *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, p. 354~358. (1948)
- 6) 春山元寿, 山内豊聡 : 乱したシラスの排水セン断特性について, *土と基礎*, Vol. 14, No.8, p.27~33. (1966)
- 7) Rowe, P. W. : Energy Components during the Triaxial Cell and Direct Shear Tests, *Geotechnique*, Vol. 14. No. 3. p. 247~261. (1964)
- 8) Poorooshasb, H. & K.H. Roscoe ; The Correlation of the Results of Shear Tests with Varying Degree of Dilation, *Proc. 5th. Int. Conf. S. M. F. E.* Vol. 1. p. 297~304, (1961)
- 9) Roscoe, K. H. Schofield, A. N. & A. Thurairajah : Yielding of Clays in States Wetter than the Critical, *Geotechnique*, Vol, 13. No. 3. p. 211~240. (1963)