

# 琉球大学学術リポジトリ

## 石灰質礫のせん断における粒子破碎に及ぼすひずみの影響

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): 石灰質礫, せん断, 粒子破碎, ひずみ キーワード (En): Carbonate gravel, Shear, Particle breakage, Strain 作成者: 新城, 俊也, 宮城, 調勝, 永吉, 功治, Shinjyo, Toshiya, Miyagi, Norikatsu, Nagayoshi, Koji メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/3625">http://hdl.handle.net/20.500.12000/3625</a>

## 石灰質礫のせん断における粒子破碎に及ぼすひずみの影響

新城 俊也\*・宮城 調勝\*・永吉 功治\*\*

Toshiya SHINJO, Norikatsu MIYAGI and Koji NAGAYOSHI: Effect of shear strain on particle breakage of carbonate gravel

キーワード：石灰質礫, せん断, 粒子破碎, ひずみ

Key words : Carbonate gravel, Shear, Particle breakage, Strain

### Summary

The consolidated drained shear test was carried out on crushed Ryukyu limestone in order to clarify the relationship between particle breakage and shear strain. Shear test was carried out at confining pressures of range from 49kPa to 294kPa. The gravel used was reconstructed from 2mm particle size to 9.5mm. In order to examine the effect of shear strain on particle breakage, the grain size distribution of the sample was examined at stage of various axial strain. The amount of particle breakage was evaluated at the percentage passing of 2mm particle size. The particle breakage was remarkably occurred in range of axial strain from 3% to 10%, regardless of the confining pressure. The surface area of specimen increases with the increase in axial strain. The dissipation energy consumed for friction and particle breakage increases with the increase in the axial strain. It is shown that the increase in the surface area with particle breakage is related to the dissipation energy for crushed Ryukyu limestone.

### 結 言

南西諸島の島々には、第四紀の琉球石灰岩が分布している。琉球石灰岩は、さんご礁堆積物が氷河性の海面変動や地殻変動等の影響を繰り返し受けて形成されたものである。その際のさんご礁堆積物の離水により主成分である炭酸カルシウムの溶解―再結晶作用により石質化している。そのため琉球石灰岩層は岩石化した固結層から未固結の砂礫層まで含んでおり、場所によって著しく固結度が異なっている。しかしながら、琉球石灰岩層全体としては固結層より砂礫層の方が卓越することが多い。このような固結層と砂礫層が複雑に分布する地盤を構造物基礎の支持層として利用するためには固結層のみならず砂礫層の力学特性を把握する必要がある。しかしながら、これまでの琉球石灰岩層の調査は固結層のみを対象としており、砂礫層を含めた地盤特性の研究は少ない<sup>1)</sup>。

琉球石灰岩層中の砂礫層の粒子は再結晶作用により石質化しているが、粒子は軟質であり破碎しやすいことが明らかにされている<sup>2)</sup>。粒子破碎の要因として応力レベルとひずみの影響が挙げられる。本研

\* 琉球大学農学部生産環境学科

\*\* 鹿児島大学大学院連合農学研究科

究では、石灰質礫についてせん断過程で生じる粒子破碎が、せん断ひずみの増加とともにどのように変化していくのかを調べた。

## 試 料

琉球石灰岩層中の砂礫層は、シルトから粗礫に至るまでの粒径からなり、不攪乱試料のサンプリングが容易ではない。そこで、琉球石灰岩層の砂礫の代わりに琉球石灰岩の碎石を用いた。碎石を用いてせん断試験を行いその結果から、砂礫層のせん断挙動を類推した。

試料は琉球石灰岩の碎石を粒径2mmから9.5mmに調整した礫を使用した。試料の粒度分布と物理的性質をそれぞれFig.1とTable 1に示す。

礫の最大・最小密度試験は基準化されていないが締固め試験用のモールド（直径10cm、高さ12.7cm）を用いて、地盤工学会標準の「砂の最小密度・最大密度試験」に準じて行った<sup>3)</sup>。

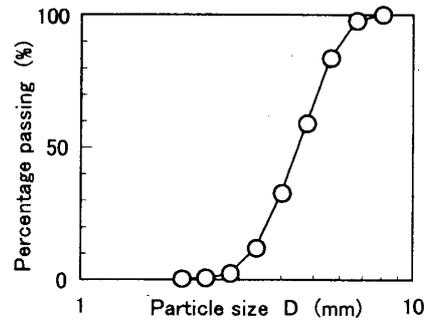


Fig. 1 Grading curve of sample

Table 1 Physical properties

Density of soil particles	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.72
Uniformity coefficient	$U_c$	1.4
Maximum void ratio	$e_{max}$	1.27
Minimum void ratio	$e_{min}$	0.86

## 実験方法

実験には、ひずみ制御型の三軸圧縮試験装置を用いた。

三軸圧縮試験の供試体の寸法は直径10cm、高さ20cmである。供試体は二つ割りモールドを用いて作成した。試料は、モールドの内壁にメンブレンを密着させた後、5層に分けて充填した。そのとき、各層ごとに試料の落下高さが40cmになるように、空気乾燥試料を空中落下させて充填した。充填後、供試体の下端から水を注入して飽和させた。その後、供試体内部に負圧を作用させ供試体を自立させてからモールドを取り除き三軸セルをセットした。その後、所定の側圧を作用させて供試体内部の負圧を解消した。なお、空中落下法による供試体の相対密度は $Dr=65\%$ から70%の範囲であった。

試験は圧密排水せん断試験（CD試験）を行った。有効側圧は $\sigma'_3=49\text{kPa}$ ,  $98\text{kPa}$ ,  $196\text{kPa}$ ,  $294\text{kPa}$ の4段階に変化させ、軸ひずみ速度 $1.0\text{mm}/\text{min}$ でせん断を行った。なお、圧密過程およびせん断過程ともに背圧 $98\text{kPa}$ を作用させている。

せん断試験は粒子破碎に及ぼすひずみレベルの影響を調べるため、所定の軸ひずみに達した時点でせん断試験を終了させた。有効側圧 $\sigma'_3=49\text{kPa}$ では軸ひずみ $\epsilon_1=1\%$ ,  $3\%$ ,  $5\%$ ,  $7\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ ,  $19\%$ 、有効側圧 $\sigma'_3=98\text{kPa}$ では $\epsilon_1=1\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$ ,  $4\%$ ,  $5\%$ ,  $6\%$ ,  $7\%$ ,  $8\%$ ,  $9\%$ ,  $10\%$ ,  $11\%$ ,  $12\%$ ,  $13\%$ ,  $14\%$ ,  $15\%$ ,  $16\%$ ,  $19\%$ 、有効側圧 $\sigma'_3=196\text{kPa}$ では $\epsilon_1=1\%$ ,  $3\%$ ,  $5\%$ ,  $7\%$ ,  $11\%$ ,  $12\%$ 、有効側圧 $\sigma'_3=294\text{kPa}$ では $\epsilon_1=3\%$ ,  $5\%$ ,  $7\%$ ,  $10\%$ ,  $13\%$ をそれぞれ与えた。

せん断試験終了後、粒子破碎の程度を調べるためにふるい分けにより試料の粒度分布を調べた。粒子破碎状況を詳細に把握するために、ふるい分けは通常用いる $75\mu\text{m}$ ,  $106\mu\text{m}$ ,  $250\mu\text{m}$ ,  $425\mu\text{m}$ ,  $850\mu\text{m}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $4.75\text{mm}$ ,  $9.5\text{mm}$ ふるいとそれ以外に $2.36\text{mm}$ ,  $2.8\text{mm}$ ,  $3.35\text{mm}$ ,  $4.0\text{mm}$ ,  $5.6\text{mm}$ ,  $6.7\text{mm}$ ,  $8.0\text{mm}$ ふるいも用いた。

なお、供試体はその都度あたらしい試料を用いて作製した。

実験結果

Fig. 2は、有効側圧 $\sigma_3' = 98\text{kPa}$ での軸ひずみを $\epsilon_1 = 1\%$ 、 $3\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$ 、 $19\%$ 加えたときの主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$  - 体積ひずみ $\epsilon_v$  - 軸ひずみ $\epsilon_1$ 関係を示してある。このあと加えた軸ひずみごとに粒子破碎の変化を明らかにしていく。

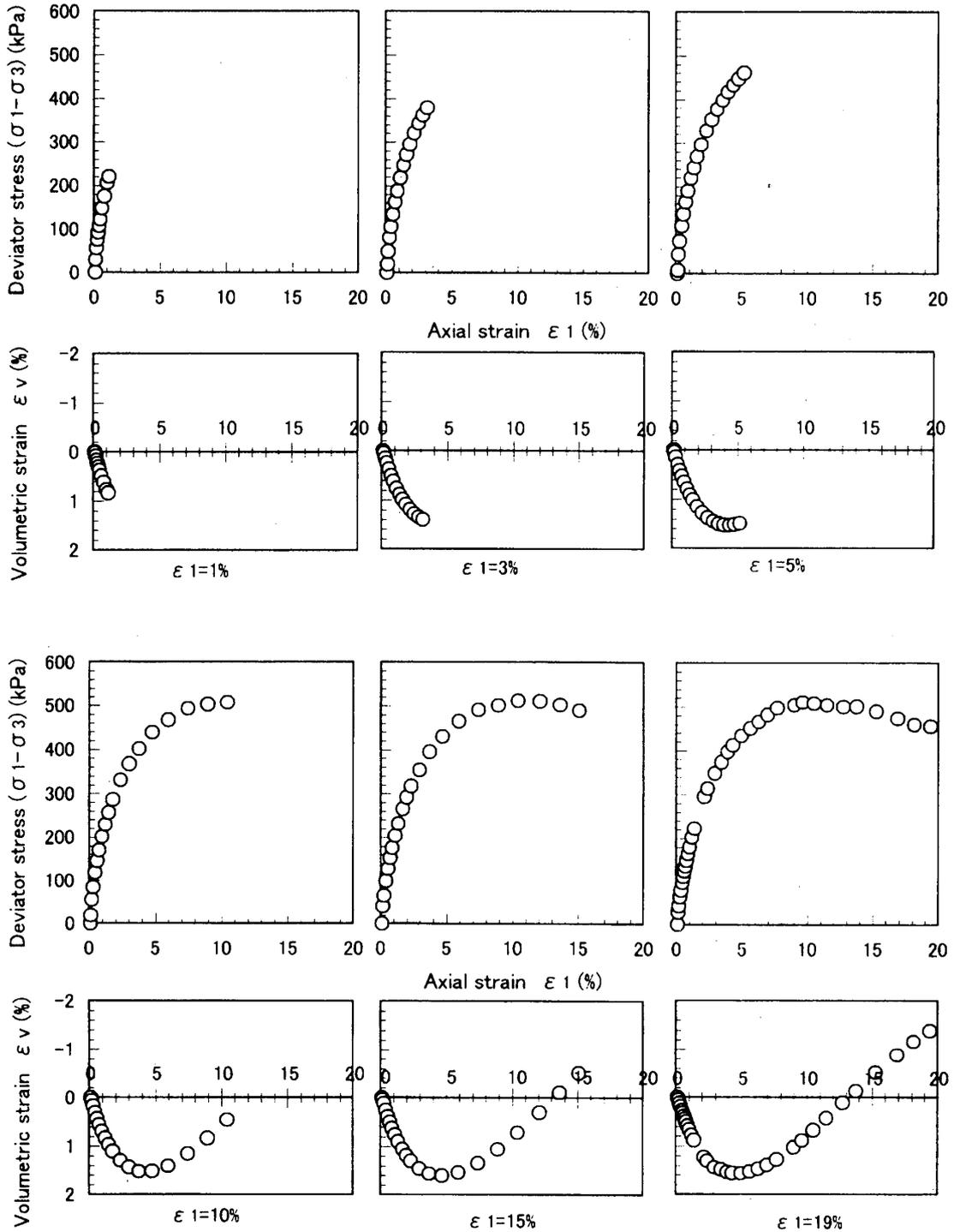


Fig. 2 Results of drained shear test ( $\sigma_3' = 98\text{kPa}$ )

軸ひずみ  $\varepsilon_1 = 1\%$  では、せん断応力は直線的に増加している。体積ひずみも直線的に増加している。軸ひずみ  $\varepsilon_1 = 3\%$  では、せん断応力の増加割合は徐々に減少している。体積ひずみの増加割合も徐々に減少している。軸ひずみ  $\varepsilon_1 = 5\%$  では、せん断応力の増加割合はさらに減少している。体積ひずみは増加傾向から減少傾向へ変化している。軸ひずみ  $\varepsilon_1 = 10\%$  では、せん断応力はピークに達している。体積ひずみは減少割合が大きくなっている。軸ひずみ  $\varepsilon_1 = 15\%$  では、せん断応力は増加傾向から減少傾向に変化している。体積ひずみはプラスからマイナスに減少しており体積が試験前の体積より大きくなっている。軸ひずみ  $\varepsilon_1 = 19\%$  では、せん断応力は減少傾向を示したままである。体積ひずみも減少したまま体積膨張しつつある。

次に、粒子破碎とひずみの関係に及ぼす応力レベルの影響を検討するために、Fig. 3 に有効側圧  $\sigma_3' = 49\text{kPa}$  から  $294\text{kPa}$  までの主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  - 体積ひずみ  $\varepsilon_v$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_1$  関係を各軸ひずみ  $\varepsilon_1$  ごとにまとめたものを示す。

有効側圧  $\sigma_3' = 49\text{kPa}$  と  $98\text{kPa}$  では、主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_1$  関

係は軸ひずみの増加とともにピーク強度を示している。体積ひずみ  $\varepsilon_v$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_1$  関係は軸ひずみの増加に伴い体積圧縮から体積膨張に変化している。一方、有効側圧  $\sigma_3' = 196\text{kPa}$  と  $294\text{kPa}$  では、主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_1$  関係は軸ひずみの増加とともにせん断応力も増大し続けている。体積ひずみ  $\varepsilon_v$  - 軸ひずみ  $\varepsilon_1$  関係は軸ひずみの増加とともに体積圧縮を示したままである。

Fig. 4 は、有効側圧  $\sigma_3' = 49\text{kPa}$  から  $294\text{kPa}$  のせん断試験後の粒度分布を各軸ひずみごとに示したものである。図中には試験前の粒度分布も併記してある。

軸ひずみごとの粒度曲線の変化を詳細にみるために、Fig. 5 に Fig. 4 の粒径  $2\text{mm}$  付近を拡大した粒度分布を示す。有効側圧  $\sigma_3' = 49\text{kPa}$  では軸ひずみの増加に伴い  $2\text{mm}$  ふるい通過量が  $0.2\%$  から  $1.4\%$  まで、有効側圧  $\sigma_3' = 98\text{kPa}$  では  $2\text{mm}$  ふるい通過量が  $0.3\%$  から  $2.9\%$  まで、有効側圧  $\sigma_3' = 196\text{kPa}$  では  $2\text{mm}$  ふるい通過量が  $0.3\%$  から  $3.7\%$  まで、 $\sigma_3' = 294\text{kPa}$  では  $2\text{mm}$  ふるい通過量が  $1.1\%$  から  $5.3\%$  までそれぞれ増大している。

各側圧において、軸ひずみの増加とともに粒度曲線が上方に移動しており、粒子破碎が進行していることがわかる。なお、側圧の増加に伴い粒子破碎は増大している。

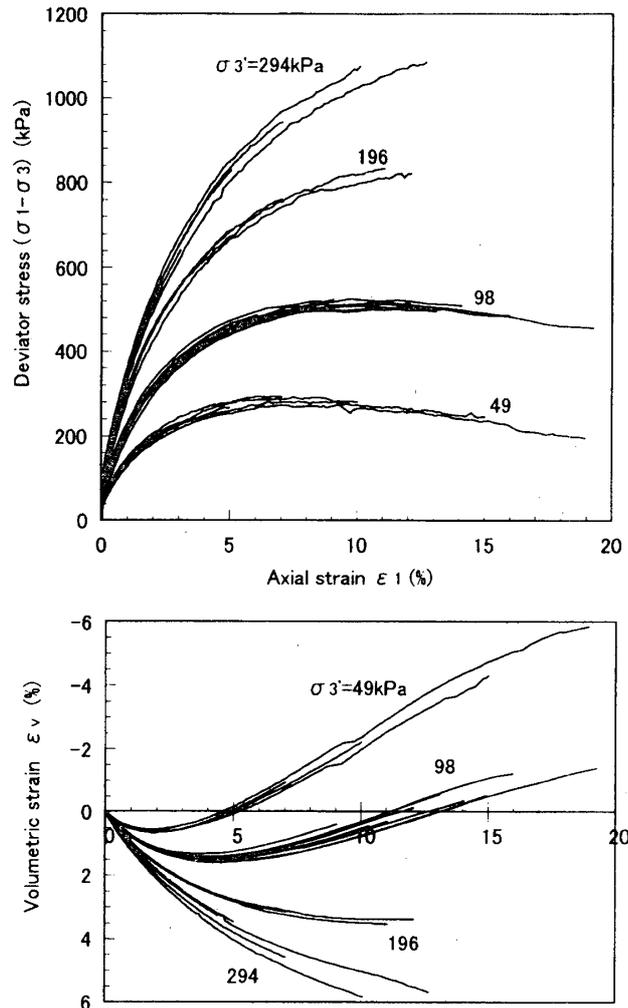


Fig. 3 Results of drained shear test

考 察

粒子破碎は2mmふるい通過量を用いて評価した。なお、せん断試験を行った応力範囲が有効側圧 $\sigma'_3=294$  kPa以下であり比較的低い応力レベルであることから等方圧密過程で生じる粒子破碎は考慮していない。

Fig. 6は、有効側圧 $\sigma'_3=98$  kPaのときの2mmふるい通過量 $p$ と軸ひずみ $\epsilon_1$ の関係を示したものである。図中の矢印はせん断応力がピーク強度に達したときの軸ひずみを示す。

2mmふるい通過量 $p$ は、軸ひずみが $\epsilon_1=3\%$ 付近から増加し始め、その時の増加割合は軸ひずみが $\epsilon_1=10\%$ 付近まで続いている。軸ひずみが $\epsilon_1=10\%$ 以上では、2mmふるい通過量 $p$ の増加割合は徐々に減少している。すなわち、粒子破碎は、軸ひずみの増加に伴い破碎がほとんど生じない領域から破碎が顕著になる領域そして破碎量の増加割合が減少する領域へと変化する傾向にある。

Fig. 7は、有効側圧 $\sigma'_3=49$  kPaから294 kPaまでの2mmふるい通過量 $p$ と軸ひずみ $\epsilon_1$ の関係をまとめて示したものである。図中の矢印はピーク強度に達したときの軸ひずみ $\epsilon_1$ を示しているが、有効側圧 $\sigma'_3=196$  kPaと294 kPaでは最大軸ひずみのときのせん断応力をピーク強度とみなした。

2mmふるい通過量 $p$ は側圧の増加に伴い増大しており、粒子破碎は応力の影響を大きく受けている。

一方、側圧一定の場合いずれの側圧においても2mmふるい通過量 $p$ は軸ひずみ $\epsilon_1=3\%$ 付近から増加し、その増加傾向は軸ひずみ $\epsilon_1=10\%$ 付近まで続いている。軸ひずみ $\epsilon_1=10\%$ 以上では、2mmふるい通過量の増加割合は徐々に減少している。

以上のことから、粒子破碎は、側圧の

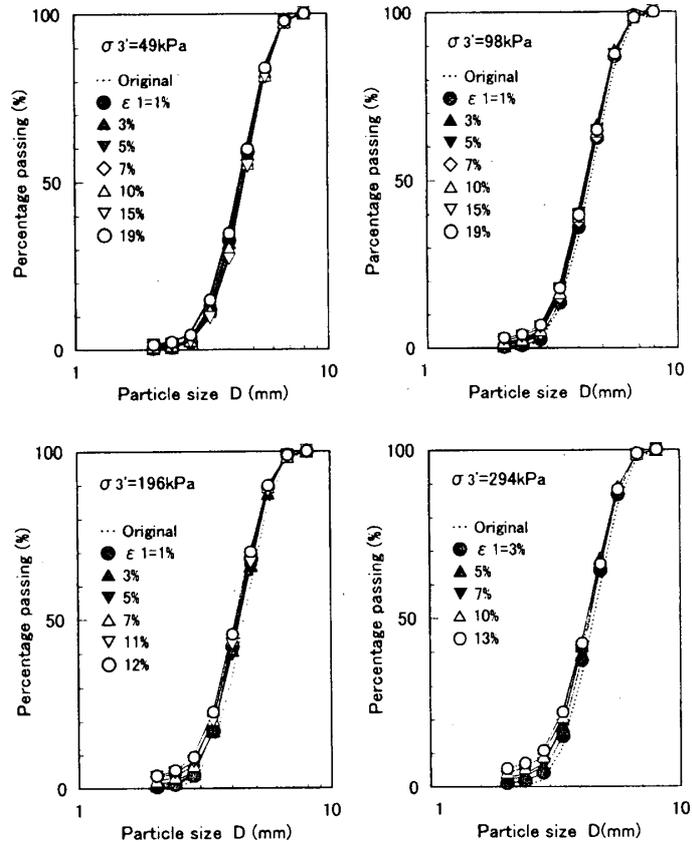


Fig. 4 Grading curves after shear test

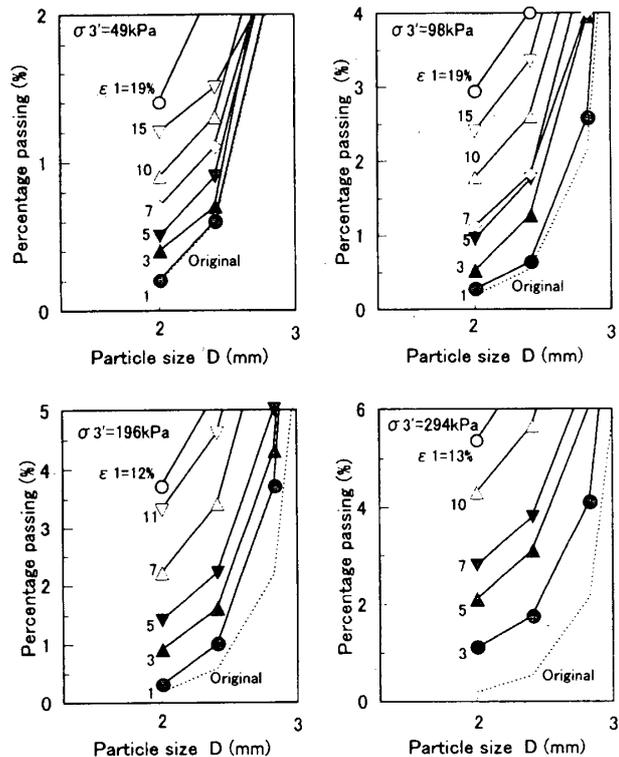


Fig. 5 Enlarged grading curves at 2mm sieve after shearing

大きさに関わらず、軸ひずみが  $\epsilon_1 = 3\%$  から  $10\%$  の過程で顕著に生じることがわかる。

一方、せん断過程での粒子破碎に使用される消散エネルギーは粒子の表面積と密接な関係にあることが知られている<sup>4)</sup>。粒子の表面積は、粒子を球体とみなして求められており、単位体積当たりの面積で表されている。消散エネルギーは、粒子間の摩擦や粒子破碎に消費されたエネルギーであり、単位体積当たりの仕事として求められている。

碎石粒子の表面積  $S_v$  ( $m^2/m^3$ ) を球体とみなして(1)式より求めた。

$$S_v = \Sigma [4\pi (D/2)^2 \cdot m_n / (\pi/6D^3 \rho_s)] / V_0 \quad (1)$$

ここに、 $D$ : 平均粒径、 $\rho_s$ : 土粒子密度、 $m_n$ : 各ふるいごとの試料の残留量、 $V_0$  供試体の初期体積である。なお、試験後の試料のシルト粒径以下含有量は全体の  $0.2\%$  程度であったため、ここではシルト以下粒径の表面積は考慮していない。

Fig. 8 は、有効側圧  $\sigma'_3 = 98kPa$  のときの試験前後の表面積の増加量  $S_v$  と軸ひずみ  $\epsilon_1$  の関係を示したものである。実際の碎石の表面積は球体と仮定したときの表面積より大きい。Fig. 6 に示した  $2mm$  ふるい通過量  $p$  と軸ひずみ  $\epsilon_1$  の関係と同様に、表面積  $S_v$  は軸ひずみ  $\epsilon_1$  の増加にともない増大し、その後表面積  $S_v$  の増加割合は徐々に減少している。

Fig. 9 は、有効側圧  $\sigma'_3 = 49kPa$  から  $294kPa$  までの表面積  $S_v$  と軸ひずみ  $\epsilon_1$  の関係をまとめて示したものである。有効側圧  $\sigma'_3 = 49kPa$  は、軸ひずみの増加に伴い表面積  $S_v$  も増大し続けている。一方、有効側圧  $\sigma'_3 = 98kPa$  以上では、側圧の大きさに関わらず軸ひずみ  $\epsilon_1$  の増加に伴い表面積  $S_v$  は増大し、その後表面積  $S_v$  の増加割合は徐々に減少する傾向を示している。なお、有効側圧  $\sigma'_3 = 49kPa$  の場合もさらに軸ひずみをあたえ続けると表面積の増加割合は減少傾向を示すと思われる。

次に、消散エネルギー  $E_D$  と軸ひずみ  $\epsilon_1$  の関係を調べた。

供試体単位体積当たりの消散エネルギー  $E_D$  は次式で定義されている。

$$E_D = \int p' \cdot d\epsilon_v + \int q \cdot d\epsilon_s \quad (2)$$

ここに、 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3$ 、 $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$ 、 $\epsilon_s = \epsilon_1 - \epsilon_v / 3$  である。Fig. 10 に、例として有効側圧  $\sigma'_3 = 98kPa$  での軸ひずみ  $\epsilon_1 = 10\%$  のときの消散エネルギーの求め方を示す。 $q - \epsilon_s$  関係および  $p' - \epsilon_v$  関

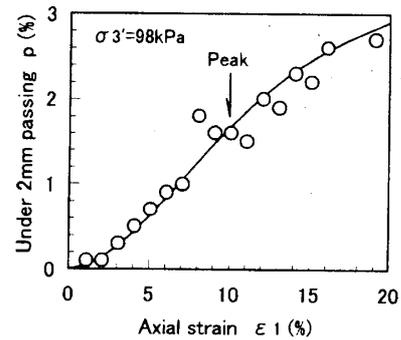


Fig. 6 Relationship between percentage passing and axial strain ( $\sigma'_3 = 98kPa$ )

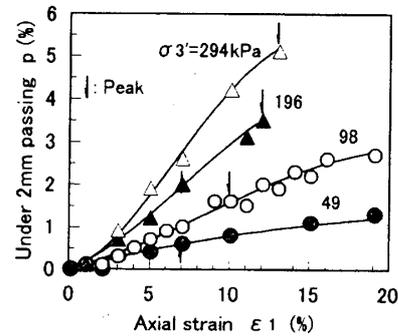


Fig. 7 Relationship between less than 2mm diameter and axial strain

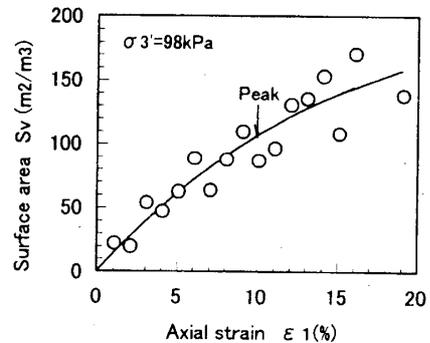


Fig. 8 Relationship between surface area and axial strain ( $\sigma'_3 = 98kPa$ )

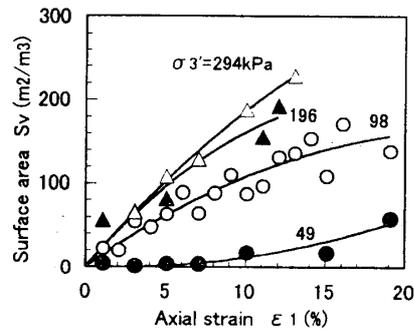


Fig. 9 Relationship between surface area and axial strain

系の曲線で囲まれた部分の面積をそれぞれ求めて加えたものが消散エネルギーである。

Fig. 11は、各側圧ごとの消散エネルギー

$E_D$ と軸ひずみ  $\epsilon_1$  の関係をまとめて示したものである。

側圧の増加に伴い消散エネルギーも増大している。一方、側圧一定のもとでは、軸ひずみ  $\epsilon_1 = 3\%$  付近から消散エネルギーが増加し始めている。軸ひずみ  $\epsilon_1 = 10\%$  付近を過ぎると消散エネルギーの増加割合は徐々に減少する傾向を示している。これは、軸ひずみの増加と粒子破碎量の関係と類似している。

Fig. 12は、消散エネルギー  $E_D$  と表面積  $S_v$  の関係を示したものである。消散エネルギー  $E_D$  の増加に伴い表面積  $S_v$  も増大しており、石灰質礫の場合も消散エネルギーは表面積で関係づけられる。なお、表面積  $S_v$  の増加割合は消散エネルギー  $E_D$  の増加に伴い減少する傾向にある。

なお、Fig. 13に2mmふるい通過量  $p$  と表面積  $S_v$  の関係を示した。2mmふるい通過量  $p$  の増加に伴い表面積  $S_v$  も増大しており、2mmふるい通過量  $p$  と表面積  $S_v$  はよく対応している。

### 摘 要

琉球石灰岩層中の砂礫のせん断に伴う粒子破碎とひずみの関係を調べるために琉球石灰岩の碎石を用いて圧密排水せん断試験を実施した。主な結果を以下に示す。

- (1) 粒子破碎は、軸ひずみの増加に伴い破碎がほとんど生じない領域から破碎が顕著に生じる領域そして破碎量の増加割合が徐々に減少する領域へと変化する傾向にある。
- (2) 粒子破碎は、側圧の増加に関わらず軸ひずみ3%付近から10%付近の間で顕著に生じる。
- (3) 表面積は軸ひずみの増加に伴い増大するが、その増加割合は軸ひずみの増加とともに徐々に減少する。
- (4) せん断中に加えられた消散エネルギーは、軸ひずみの増加とともに増大し、その後消散エネルギーの増加割合は徐々に減少する傾向にある。
- (5) 表面積の増加は粒子破碎に消費される消散エネルギー

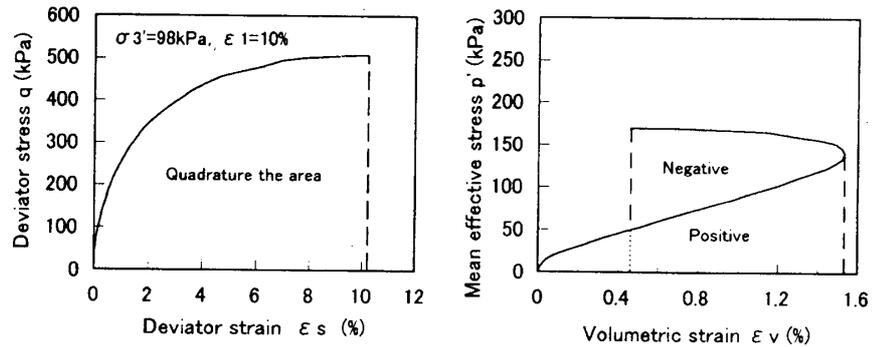


Fig.10 Calculation method of dissipation energy ( $\sigma_3' = 98\text{kPa}$ ,  $\epsilon_1 = 10\%$ )

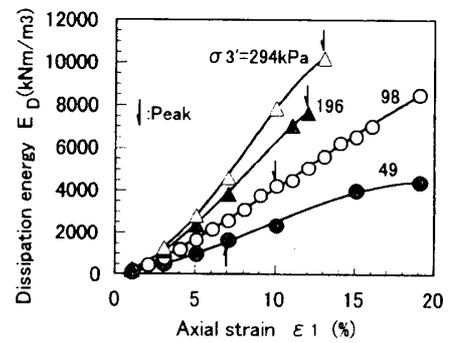


Fig.11 Relationship between dissipation energy and axial strain

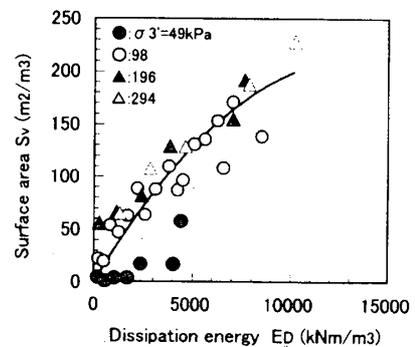


Fig.12 Relationship between surface area and dissipation energy

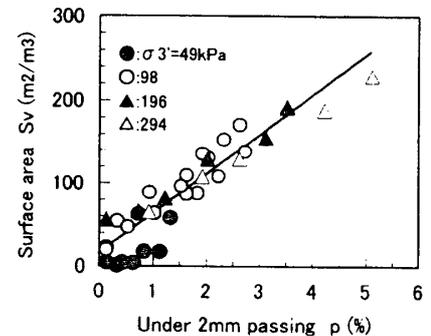


Fig.13 Relationship between percentage passing less than 2mm diameter and surface area

の増加と関係づけられる。

### 参考文献

- 1) 新城俊也, 永吉功治: 琉球石灰岩層における地盤特性の一検討, 第13回沖縄地盤工学会研究会講演集, p. 66 - 69, 2000
- 2) 新城俊也, 永吉功治: 石灰質砂礫のせん断特性, 平成12年度農業土木学会大会講演要旨集, p. 396 - 397, 2000
- 3) 地盤工学会編: 土質試験の方法と解説, p. 136 - 144, 2000
- 4) 三浦哲彦, 山内豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文集 (第260号), p. 109 - 118, 1977