

繰返し三軸試験による礫岩の繰返しせん断特性

永守 学^{1*}・谷 和夫²・岡田 哲実³

¹横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5土木工学棟)

²横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5土木工学棟)

³正会員 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

*E-mail:d07gc121@ynu.ac.jp

岩盤の繰返し载荷における力学特性の解明の方法の一つに繰返し三軸試験があり、現在までに泥岩を用いて数多く検討されてきたが、不均質な岩を用いた荷重増加条件下における力学特性の解明はあまり行われていない。

そこで、礫岩の繰返し载荷下における力学特性に関する知見を得るために、礫岩を用いた繰返し三軸試験を行った。それにより、初期せん断応力 $\Delta\sigma_x$ 及び応力振幅 $\Delta\sigma_y$ が、破壊に要した载荷回数 N_f 、等価せん断剛性率 G_{eq} 、及び履歴減衰率 h の各々のパラメータにどのような影響を及ぼしているか力学的な考察を行った。

Key Words :cyclic triaxial test,conglomerate, mechanics characteristic

1. はじめに

世界でも有数の地震国である日本では、構造物を建てる際には地震の発生を考慮した地盤や岩盤の選定が重要である。特に原子力発電所等の社会基盤となる重要構造物はより強固な岩盤の上に建てなければならない。そのために岩盤の力学特性を解明する研究が行われているが、岩盤の繰返し载荷条件下における力学特性には明確でない場合もあり、その解明が必要である。

岩盤の繰返し载荷における力学特性の解明の方法の一つとして繰返し三軸試験があり、現在までに泥岩などを用いて検討されてきた。¹⁾しかし、不均質な岩を用いた荷重増加条件下における力学特性の解明はあまり行われていない。²⁾

2. 試験方法

(1)使用した供試体

使用した供試体は直径 $D=70\text{mm}$ 、高さ $H=140\text{mm}$ 及び直径 $D=55\text{mm}$ 、高さ $H=110\text{mm}$ の新第三系凝灰角礫岩である。前者を15本、後者を4本使用し繰返し三軸試験を行った。

(2)試験方法及びひずみの計測

CU 条件による室内繰返し三軸試験を実施した。全て

の試験において有効拘束圧 σ_c は $0.2(\text{MPa})$ 、背圧 u_p は $0.6(\text{MPa})$ で行った。またひずみの計測には外部変位計、内部変位計としてひずみゲージ及び渦電流型変位計(以後Proximity Transducerの頭文字を取ってPTと表記する)の3つを用いた。外部変位計で計測したひずみを ε_{ext} 、ひずみゲージ及びPTで計測した局所ひずみをそれぞれ ε_{PT} と $\varepsilon_{\text{Gage}}$ で表す。

供試体の破壊の定義は同種の $\overline{\text{CU}}$ 単調三軸試験から、 σ_c と局所ひずみで計測した破壊ひずみ ε_{ult} 、及び σ_c と外部変位計で計測した破壊ひずみ ε_{ext} の間に得られた以下の2つの関係式を用いた。

$$\varepsilon_{\text{ult}}=-0.007\sigma_c+0.593(\%) \quad (1a)$$

$$\varepsilon_{\text{ext}}=-0.153\sigma_c+2.331(\%) \quad (1b)$$

この関係式に試験毎の $\sigma_c(=0.2(\text{MPa}))$ を代入することで ε_{ult} 及び ε_{ext} を算出し、破壊ひずみを定義した。なお初期せん断時に生じた軸ひずみは考慮せず、繰返し応力の载荷開始時からの軸ひずみで整理した。

(3)試験ケース

有効拘束圧を σ_c 、初期せん断応力増分を $\Delta\sigma_x$ 、応力振幅を $\Delta\sigma_y$ と表すと、繰返し三軸試験を行った際の軸応力 σ_a と時間 t の関係は図-1のように示される。この時、最小有効主応力 $\sigma'_{\text{amin}}(=\sigma_c+\Delta\sigma_x\Delta\sigma_y)$ の値がどの領域にあるかによってA、B、Cに場合分けができる。具体的には σ'_{amin} が σ_c より大きい値をとる場合(領域A)、 σ'_{amin} が0と

σ'_c の間にある場合(領域B), そして σ'_{amin} が 0 より小さい値をとる場合(領域C)の3つである.

領域 A は主応力方向の回転がなく引張応力も作用しない状態, 領域 B は主応力方向の回転はあるが引張応力が作用しない状態, そして領域 C は主応力方向の回転があり引張応力も作用する状態である. それぞれの状態を表-1 に示した.

ここで $\sigma'_{amin}=\sigma'_c+\Delta\sigma_x-\Delta\sigma_y$ ということを踏まえて領域A, B, Cそれぞれを不等号で表すと以下ようになる.

$$\sigma'_c+\Delta\sigma_x-\Delta\sigma_y>\sigma'_c \quad (3a)$$

$$0<\sigma'_c+\Delta\sigma_x-\Delta\sigma_y<\sigma'_c \quad (3b)$$

$$\sigma'_c+\Delta\sigma_x-\Delta\sigma_y<0 \quad (3c)$$

さらに $\Delta\sigma_x$ と $\Delta\sigma_y$ をそれぞれ σ'_c で除して無次元化し, $R_x(=\Delta\sigma_x/\sigma'_c)$ を横軸, $R_y(=\Delta\sigma_y/\sigma'_c)$ を縦軸にとった表で式(3a)から式(3c)をグラフ化したものを図-2に示す. ここで繰返し三軸試験の結果の試験ケースの分布図を図-3に示す.

表-1 領域 A, B, C それぞれの状態

状態	A	B	C
主応力方向の回転	なし	あり	あり
引張応力の作用	なし	なし	あり

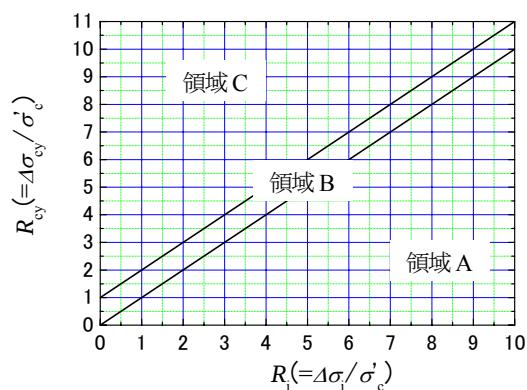


図-2 A, B, C それぞれの領域

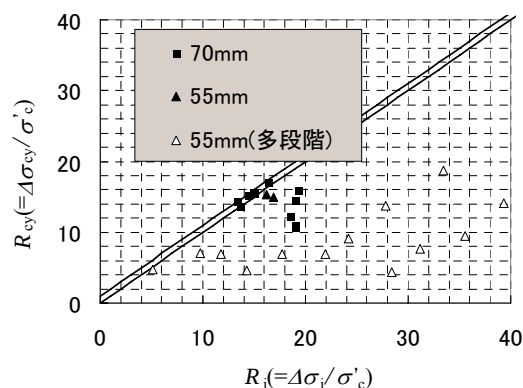


図-3 各試験の分布図

3. 試験結果

繰返し三軸試験の結果から求められた履歴曲線の一例を図-4~図-6に示す. 載荷回数 $N=1\sim 20$ まで, また N が20以上あるものは $N=20$ 以降間隔を置いて, 図-4~図-6から求められる履歴減衰率 h と載荷回数 N の関係を図-7に示す. 図-7より h と N の関係は反比例の関係にあると予測できる.

同様に履歴曲線から等価せん断剛性率 G_{eq} も求め, N との関係を図-8に示す. 図-8より G_{eq} は N に関係なく一定の値を示すと予測できる.

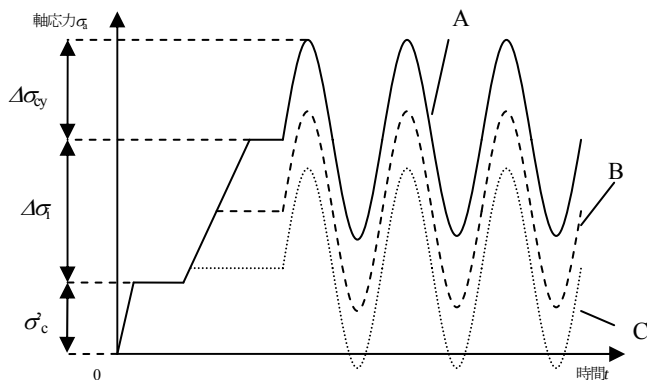


図-1 軸応力 σ_a と時間 t 関係

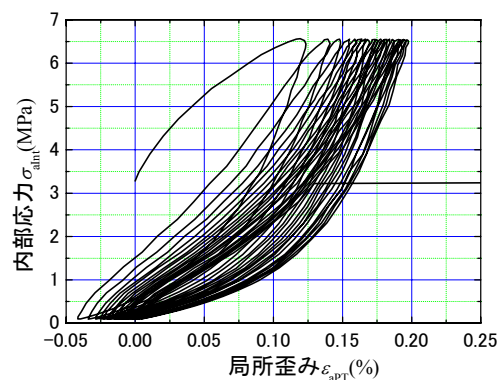


図-4 履歴曲線 ($\sigma_{min} \sim \varepsilon_{apT}$ の関係)(供試体名T5-3)

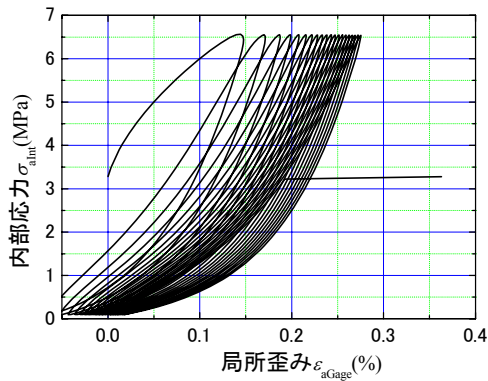


図-5 履歴曲線($\sigma_{\text{int}} \sim \varepsilon_{\text{aGage}}$ の関係)(供試体名T5-3)

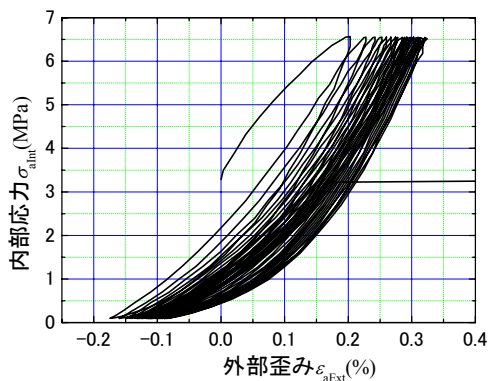


図-6 履歴曲線($\sigma_{\text{int}} \sim \varepsilon_{\text{aExt}}$ の関係)(供試体名T5-3)

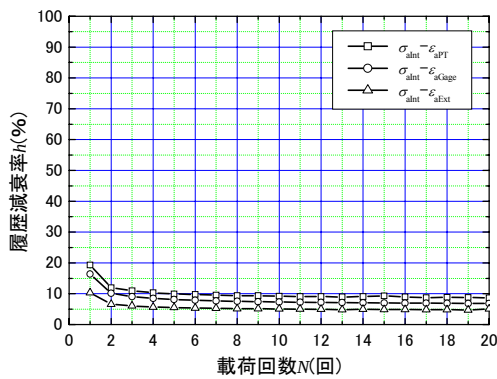


図-7 履歴減衰率と載荷回数の関係(供試体名 T5-3)

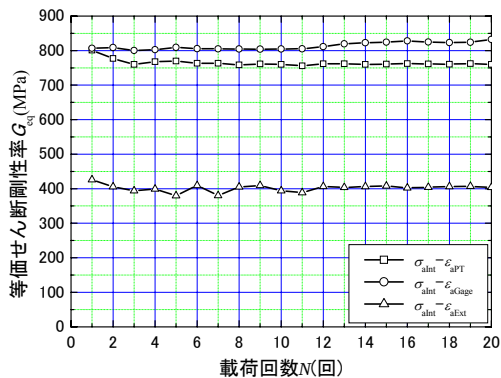


図-8 等価せん断剛性率と載荷回数の関係(供試体名 T5-1)

4. 考察

繰返し三軸試験の結果から、礫岩の力学特性を考察する。有効拘束圧を σ'_c 、初期せん断応力増分を $\Delta\sigma_y$ 、応力振幅を $\Delta\sigma_y$ とし、 $R_t(=\Delta\sigma_y/\sigma'_c)$ と $R_{cy}(=\Delta\sigma_y/\sigma'_c)$ とする。

(1) 履歴減衰率

履歴減衰率 h と載荷回数 N の関係は反比例の関係にある仮定を用いると、 h は N の関数として

$$h = (b/N) + h^* \quad (N \neq 0, b, h^* \text{は定数}) \quad (4a)$$

と表せる。これより h は $N \rightarrow \infty$ とした時に一定値 h^* に収束することがわかる。

この時さらに N を両辺にかけて

$$hN = b + h^*N \quad (4b)$$

と表される。この式から描ける横軸 N 、縦軸 hN のグラフの近似直線の傾きがその試験で得られる h^* となる。ここで R_t 及び R_{cy} の値が h^* の値にどのような影響を与えているか検討する。

a) R_t と h^* の関係

図-3 において R_t 一定値で見た時の R_{cy} の値の変化が、 h^* に与える影響を考察する。その結果を図-9～図-10 に示す。これらより $R_t=16 \sim 17$ の一定時、 R_{cy} の値が $15 \sim 18$ の範囲で h^* の値は $5 \sim 11(\%)$ の分布を示し、同様に $R_t=18 \sim 20$ の一定時、 R_{cy} の値が $9 \sim 17$ の範囲で h^* の値は $1 \sim 14(\%)$ の分布を示すことがわかった。

b) R_t と h^* の関係

a) と逆に、図-3 において R_{cy} 一定値で見た時の R_t の値の変化が h^* にどのような影響を与えているか考察する。その結果を図-11～図-12 に示す。これらより、 R_{cy} 一定値で見た時に、 R_t の値が増加すると h^* の値は減少する傾向にあることが分かった。

また図-11～図-12 より R_{cy} が $4 \sim 5$ の一定値をとる時、 R_t は 5 から 30 へ増加すると h^* は $2(\%)$ の減少を示し、 R_{cy} が $6 \sim 7$ の一定値をとる時、 R_t が 10 から 30 に増加すると h^* は $5(\%)$ から $4(\%)$ へ減少する傾向が見られる。

(2) 等価せん断剛性率

等価せん断剛性率 G_{eq} は載荷回数 N の値に依存せず一定値になるという仮定を用いて、 R_t 及び R_{cy} の値が載荷回数毎の G_{eq} の平均値 G_{eq}^* の値にどのような影響を与えているか検討する。

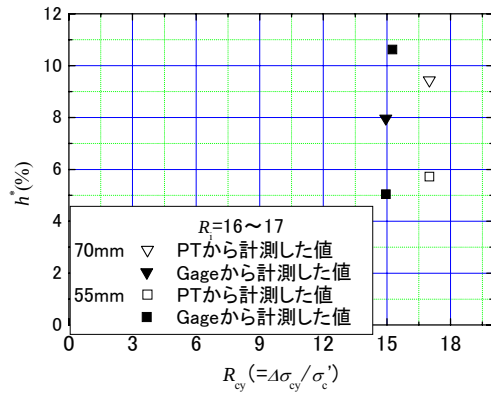


図-9 $h^* \sim R_{cy}$ の関係($R_f=16 \sim 17$)

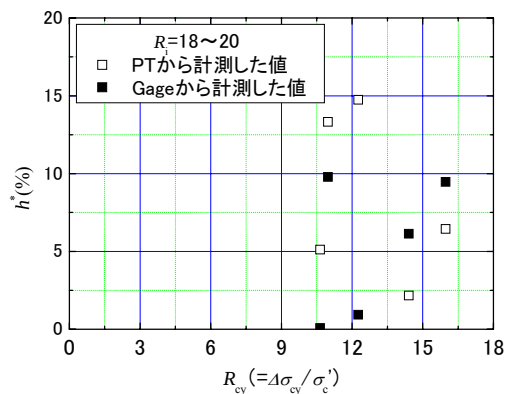


図-10 $h^* \sim R_{cy}$ の関係($R_f=18 \sim 20$)

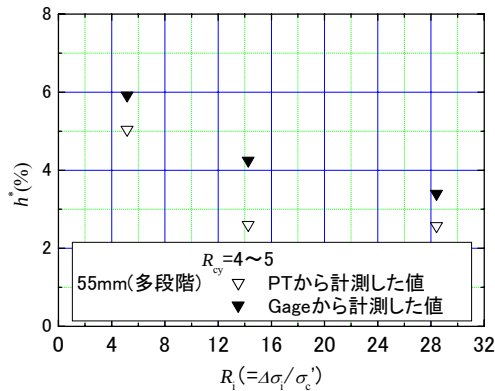


図-11 $h^* \sim R_f$ の関係($R_{cy}=4 \sim 5$)

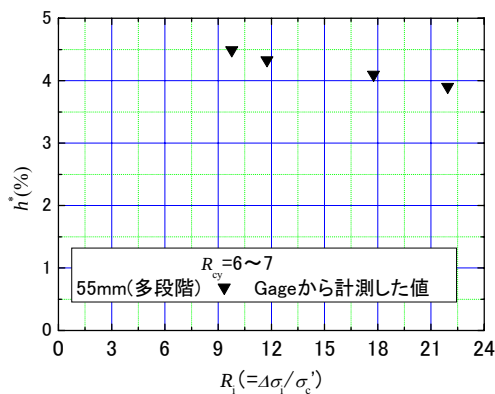


図-12 $h^* \sim R_f$ の関係($R_{cy}=6 \sim 7$)

a) R_{cy} と G_{eq}^* の関係

図-3 において R_f 一定値で見た時の R_{cy} の値の変化が G_{eq}^* に与える影響を考察する。その結果を図-13~図-14 に示す。

図-13 より $R_f=16 \sim 17$ で一定時、 R_{cy} の値が 15~18 の範囲で G_{eq}^* の値は 1000~4500(MPa) の分布を示し、図-14 より $R_f=18 \sim 20$ で一定時、 R_{cy} の値が 9~17 の範囲で G_{eq}^* の値は 1000~2500(MPa) の分布を示す傾向があることも分かった。

b) R_f と G_{eq}^* の関係

a) とは逆に図-3 において R_{cy} 一定値で見た時の R_f の値の変化が G_{eq}^* に与える影響を考察する。その結果を図-15~図-16 に示す。これらより R_{cy} 一定値で見た時に R_f の値が増加すると、 G_{eq}^* の値も増加するという傾向があることがわかる。

また図-15 より $R_{cy}=4 \sim 5$ で一定時、 R_f が 5 から 30 に増加すると G_{eq}^* は 2000(MPa) 増加し、図-16 より $R_{cy}=6 \sim 7$ で一定時、 R_f が 10 から 22 に増加すると G_{eq}^* は 1000(MPa) 増加する傾向があることも分かった。

兵藤ら¹⁾によると豊浦砂の G_{eq} は 0.4(MPa) 程度であるため、今回使用した礫岩の G_{eq} は豊浦砂のそれと比較すると概ね 2500~7500 倍近くあるという知見も得られた。

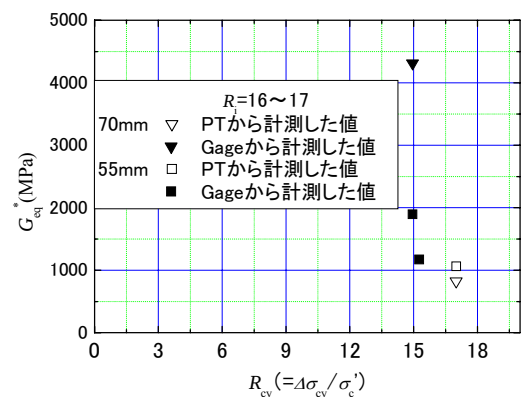


図-13 $G_{eq}^* \sim R_{cy}$ の関係($R_f=16 \sim 17$)

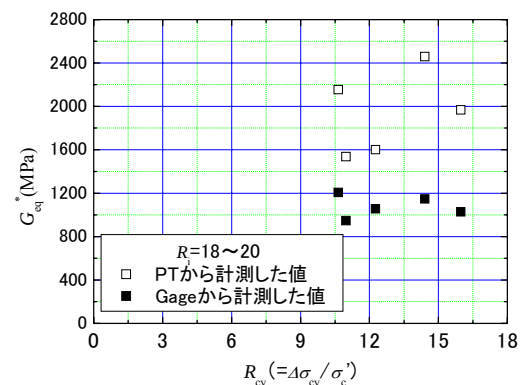


図-14 $G_{eq}^* \sim R_{cy}$ の関係($R_f=18 \sim 20$)

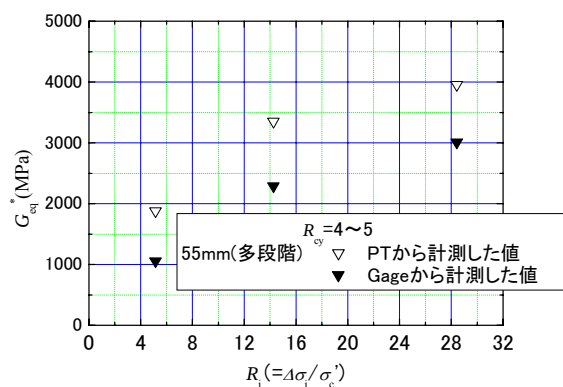


図-15 $G_{\alpha}^* \sim R_1$ の関係($R_{cy}=4 \sim 5$)

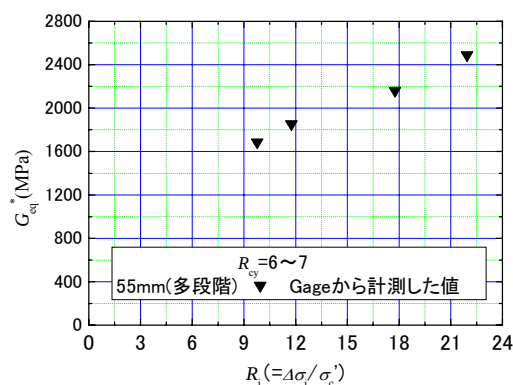


図-16 $G_{\alpha}^* \sim R_1$ の関係($R_{cy}=6 \sim 7$)

(2) 強度特性

図-3 において R_1 を一定値で見た時の R_{cy} の値の変化が、破壊に要した载荷回数 N_f にどのような影響があるか考察する。その結果を図-17 に示す。これより R_1 が 18~20 の時、 R_{cy} が増加すると N_f は減少する傾向があることがわかった。また R_1 が 18~20 の時、 R_{cy} が 10~16 の範囲に N_f が 10~2000(回) に分布していることもわかる。

次に、今度は図-3 において R_{cy} を一定値で見た時の R_1 の値の変化が N_f にどのような影響があるか考察する。その結果を図-18 に示す。これより R_{cy} 一定時、 R_1 が増加すると N_f は減少する傾向が見られることがわかった。また $R_{cy}=14 \sim 16$ の一定時、 R_1 が 10~40 の範囲で N_f は 1~1000(回) の分布を示すこともわかる。

5. まとめ

礫岩を用いた繰返し三軸試験を図 3 に示す応力条件で行った結果、以下の知見を得られた。なお有効拘束圧を σ_c 、初期せん断応力増分を $\Delta\sigma_1$ 、応力振幅を $\Delta\sigma_y$ とし、 $R_1 = \Delta\sigma_1 / \sigma_c$ 及び $R_{cy} = \Delta\sigma_y / \sigma_c$ 、载荷回数 N を無限大にした時の履歴減衰率 h の収束値を h^* 、等価せん断剛性率 G_{α} の平均

値を G_{α}^* とする。

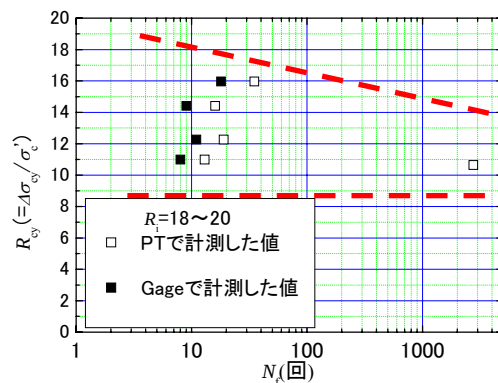


図-17 R_{cy} と N_f の関係($R_1=18 \sim 20$)

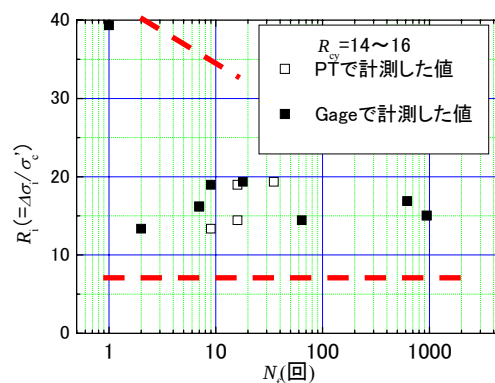


図-18 R_1 と N_f の関係($R_{cy}=14 \sim 16$)

(1) R_1 の値が 16~18 の範囲のとき h^* 及び G_{α}^* は R_{cy} に依存せず、 h^* は 1~14(%) の間に分布し、 G_{α}^* は 1000~4500(MPa) の間に分布を示す。

(2) R_{cy} の値が 4~7 の範囲のとき、 h^* は R_1 の増加に伴い減少し、一方 G_{α}^* は R_1 の増加に伴い増加する傾向を示す。

(3) 供試体の破壊に要した载荷回数 N_f は R_1 が 18~20 の一定時、 R_{cy} が増加すると N_f は減少する。

また R_{cy} が 14~16 の一定時、 R_1 が増加すると N_f は減少する。

6. 今後の課題

有効拘束圧 σ_c を 0.2(MPa) 以外で同種の礫岩を用いて繰返し三軸試験試験を行い、 σ_c の力学特性に対する影響の検討や、礫岩以外の供試体を用いて繰返し三軸試験試験を行い礫岩の力学特性との比較等が考えられる。

参考文献

- 1) 兵藤正幸, 村田秀一, 安福規之, 藤井照久: 飽和砂の非排水繰返しせん断変形に及ぼす初期せん断の影響, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム, 発表論文集, pp.199-204, 1988.
- 2) 三森恒平, 岡田哲実, 谷和夫, 大津仁史: 繰返し三軸試験に

おける礫岩の破壊, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 論文番号 59.

SHEARING REPEATEDLY CHARACTERISTIC OF CONGLOMERATE BY CYCLIC TRIAXIAL TEST

Manabu NAGAMORI, Kazuo TANI and Tetsuji OKADA

To understand the mechanical characteristics of rocks under cyclic loading, cyclic triaxial loading tests have been conducted for homogeneous rocks such as mudstone and sandstone. But the mechanics characteristic of heterogeneous rock such as conglomerate has not been clarified under the cyclic loading condition. In this study, we clarified the mechanics characteristic of heterogeneous rock by cyclic triaxial test using conglomerate.