

繰返し三軸試験における礫岩の破壊

三森 恒平¹・岡田 哲実²・谷 和夫³・大津 仁史⁴

¹横浜国立大学 工学部 建設学科 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: b0043034@ynu.ac.jp

²正会員 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 パッシブ研究センター (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

³横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

⁴東京電力 (株) 原子力技術・品質安全部 (〒100-8560 東京都千代田区千代田1-1-3)

土質材料に対する繰返し三軸試験のデータ整理では「過剰間隙水圧が初期有効応力と等しくなった時点」あるいは「両振幅ひずみが5%になった時点」などが破壊定義として一般的である。しかし、堆積軟岩では液状化や大ひずみが発生しないので、繰返し载荷による破壊を別に定めなければならない。そこで、17本の軟質な礫岩を用いた繰返し三軸試験の結果を分析し、礫岩の繰返し载荷条件下での破壊の定義を検討した。その結果、破壊状況を観察して引張破壊とせん断破壊に分類し、それぞれの破壊形式について制御した応力の変化とひずみの増加傾向の特徴を反映させた破壊の定義が適していると結論付けた。

Key Words : cyclic load, triaxial test, failure, soft rock, strain.

1. はじめに

繰返し三軸試験をデータ整理する際、土質材料の繰返し三軸試験では、過剰間隙水圧が初期有効応力と等しくなった時点、もしくは両振幅ひずみが5%に達した時点を液状化として考慮した破壊の定義が一般的である。

しかし、固結度を有する岩石の繰返し三軸試験では、破壊の定義は明確に定められていないため試験により様々である。例えば、応力の変化率と軸ひずみの関係を求め、その線形関係を保持できなくなった時点を破壊とする方法 (吉中ら¹⁾) や、拘束圧の値別に異なった破壊ひずみを定義する方法 (西ら²⁾) などがある。しかし、前者は適切な応力変化率に関する客観的な判断はなく、後者は「拘束圧6MPaの場合、ひずみが5%で破壊とする」といった、岩のひずみとしては大きすぎると思われる点で破壊を定義している。このことから軟岩を用いた繰返し三軸試験においては詳細な破壊の定義について統一的な考え方が確立していない。

そこで、どのような軟岩に対しても有用となる繰返し破壊の定義を設定することを目的として、岩種や試験条件ごとに破壊の定義を変えることなく、統一的なデータ整理を可能にするために、軟岩である礫岩の破壊条件を検討した。

2. 繰返し試験の方法

(1) 使用した試料

岩石は新第三系の礫岩で、地下9mの試掘坑内でサンプリングしたボーリングコアを用いた。全ての供試体の直径は約55mmで高さは約110mmである。せん断試験における直径：高さ=1：2の条件を満たしている。湿潤密度は2.21~2.36g/cm³、パルス透過法により測定された弾性波速度Vsは1.21~1.68km/s、Vpは3.27~4.25km/sである。

(2) 試験方法

CU条件による繰返し三軸試験17本を実施した。圧密時の有効拘束圧 σ'_c (MPa)、初期せん断時の軸応力増分、平均繰返し片振幅、B値、周波数を表-1に示す。変位の計測方法は、外部変位計とひずみゲージを用いた。外部変位計で計測したひずみ (以後、外部ひずみと呼ぶ) は上下端面のゆるみから発生するベディング・エラーの影響を受けて真のひずみを過大評価する。しかし、ひずみゲージは直接供試体に貼り付けるので、ベディング・エラーの影響を受けない。この計測データを以後局所ひずみと呼ぶ。

表-1 繰返し三軸試験の条件

圧密時の有効拘束圧 σ'_c (MPa)	0.2
初期せん断時の軸応力増分 $\Delta\sigma'_i$ (MPa)	0.0, 0.4, 0.6, 4.0, 4.2
繰返し軸応力の片振幅 $\Delta\sigma'_{cy}$ (MPa)	2.7~2.9, 1.1~2.6
B値 (%)	93~98
周波数 Fr (Hz)	0.01, 0.5, 2, 3

繰返し载荷の制御方法は、応力振幅を一定に保ち、供試体のひずみを自由に变化させる応力制御法を用いた。繰返し片振幅 $\Delta\sigma'_{cy}$ が初期せん断時の軸応力 $\Delta\sigma' + \sigma'_c$ より大きい場合には軸方向応力が負（引張）になるため、供試体両端面はキャップ及びペDESTALに接着した。

3. 試験結果

(1) 岩の破壊形態

比較する代表的なケースの試験条件を表-2に示す。ケース1は繰返し载荷時に最小有効主応力が負になり引張応力が作用する。ケース2は初期せん断時軸応力を大きくしてせん断応力のみ繰返し载荷を行った。

試験後のスケッチ（供試体展開図）を図-1に示す。ケース1が上図、ケース2が下図と対応している。この図のように17本の供試体は、供試体の载荷面と平行に開口した亀裂が入る引張で破壊するパターンと、傾斜した亀裂が入るせん断で破壊するパターンに分けられる。

(2) 応力と時間、ひずみと時間の関係

①引張破壊したケース1

軸応力と時間、外部ひずみと時間、局所ひずみと時間の関係を図-2に示す。なお、ひずみの値は繰返し载荷の開始時をゼロとした。このため、繰返し载荷時の引張側の剛性が圧縮側の剛性より小さいために、引張側の繰返しひずみが圧縮側より大きくなっている。

軸差応力は時間の変化とともにほぼ一定の値を保ち、80秒付近で急激に応力振幅が小さくなり引張応力を作用させることができずに制御不能となった。一方、外部ひずみと局所ひずみを見てみると、外部ひずみが80秒付近まで増加しているのに対し、局所ひずみの振幅は20秒付近でひずみが増加から減少に転じてしまっている。よって、局所ひずみは20秒以降は信頼が置けないと考えられる。そして、局所ひずみは外部ひずみと同様に80秒付近で急激な変化をしている。これは80秒付近でひずみゲージが切れたことを反映していると推測される。従って、ケース1の引張破壊では、軸差応力と外部ひずみから、80秒付近での急激な変化をもって破壊したと判断する。

②せん断破壊したケース2

軸差応力と時間、外部ひずみと時間、局所ひずみと時間の関係を図-3に示す。軸差応力はずっと一定の値を示すが、最大主応力が160秒付近から漸次的に下降に転じる。外部ひずみは最初の载荷から漸次的に増加し、局所ひずみは175秒付近で急激な変化をしているが、100秒付近で一度、微妙な変化を起こしていることから信頼性が低い。ここで図-4の同じ礫岩のCU単調三軸試験の結果から、拘束圧0.2MPaの場合、破壊ひずみは局所ひずみの場合平均0.5%であることと、外部の破壊ひずみは約2.5%であることを利用して、局所ひずみが測れていた場

合は、振幅最大値が0.5%に達した時点をもって破壊ひずみ、信頼性が低い場合は外部ひずみの振幅最大値が2.5%に達した場合を破壊とする。従って、ケース2の破壊は局所ひずみの信頼性が低いことから、外部ひずみの振幅の最大値が2.5%に達した175秒付近を破壊とする。

4. 破壊の定義

引張破壊とせん断破壊では破壊の際に形成される亀裂の入り方が異なるため、その要因となる応力制御とひずみ変化にも特徴的な違いが見れる。

引張破壊の場合、ある時点まで応力が保持され、破壊した点で応力がかかりにくくなり急激な変化を起こす。外部ひずみは引張方向に変位が伸びていき、ある時点で急激な変化を起こす。局所ひずみも同様

表-2 異なる破壊パターンを示した代表的な試験条件

ケース	1	2
圧密時の有効拘束圧 σ'_c (MPa)	0.20	0.20
初期せん断時の軸応力増分 $\Delta\sigma$ (MPa)	0.40	4.03
繰返し载荷時の最大有効主応力 σ'_{max} (MPa)	2.81	7.20
繰返し载荷時の最小有効主応力 σ'_{min} (MPa)	-0.65	1.75
繰返し载荷時の平均軸応力の片振幅 $\Delta\sigma'_{cy}$ (MPa)	1.73	2.73
B値 (%)	92.6	94.8
振動数 Fr (Hz)	2	3
破壊モード	引張	せん断

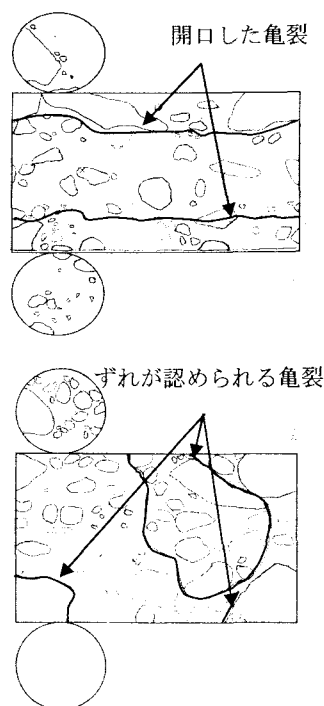


図-1 (上) 引張破壊（ケース1）のスケッチ
(下) せん断破壊（ケース2）のスケッチ

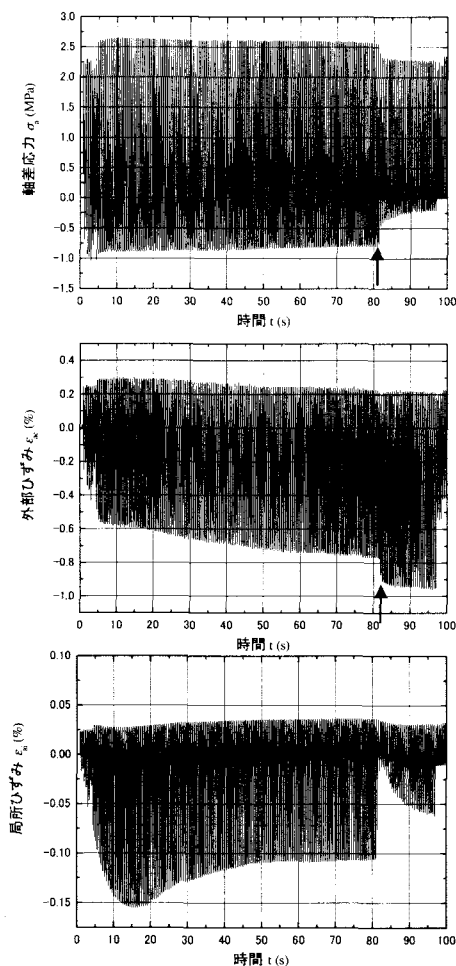


図-2 ケース1の軸差応力（上），外部ひずみ（中）局所ひずみ（下）と時間のグラフ

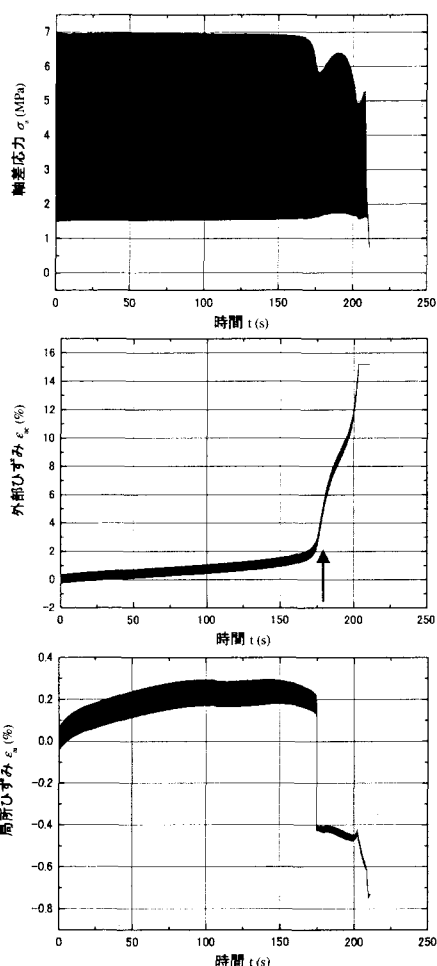


図-3 ケース2の軸差応力（上），外部ひずみ（中）局所ひずみ（下）と時間のグラフ

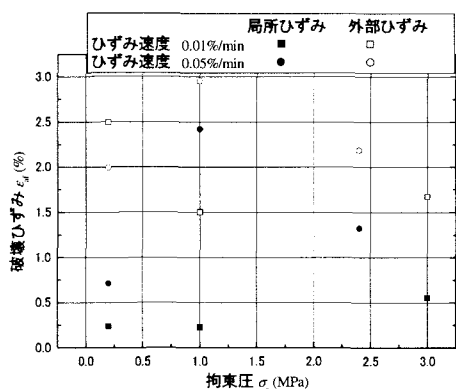


図-4 CU単調三軸試験の破壊ひずみと拘束圧の関係

に急激な変化を起こすが，その急激な変化までの挙動に注意して，変位が大きくなる方向でなければ採用できない。

せん断破壊の場合，試験体が徐々に歪んでいく

ことから応力，外部ひずみでは共に漸次的な変化を起こす。一方，局所ひずみはせん断による亀裂からある点で急激な変化を起こす。したがって，礫岩のように固結度を有する岩石に対する破壊の定義は破壊の形態に応じてせん断破壊と引張破壊に分類し，その上で引張破壊は応力の変化と外部ひずみ，せん断破壊は局所ひずみまたは外部ひずみに着目することが妥当であると考えられる。

上に記した各破壊形態における応力制御とひずみ変動の特徴，および実験データからの判定客観性を考慮して破壊の定義として以下が適切であると判断した。

(1) 引張破壊

引張破壊の場合，試験体に亀裂が入りその亀裂を境に急激に離れるため，破壊がひずみ量にあまり依存しない。また試験体が破壊した時点で引張応力が作用しにくくなるため繰返し最小主応力がかかりにくくなる。よって外部ひずみが急激に変化し，引張応力が0に近づいた時点を破壊とするこ

とが妥当である。

(2) せん断破壊

同じ岩種のCU単調三軸試験で得られた拘束圧と破壊ひずみの関係から破壊時の局所ひずみ量を決定し、その値を超えた時点とする。ただし、局所ひずみが外部ひずみと違いせん断破壊の特徴であるひずみの増加傾向を示さず、信頼性が乏しい場合、破壊時点は外部ひずみで決定する。

5. 繰返し片振幅応力と破壊に至るまでの繰返し回数の関係

载荷の振動数と初期せん断時軸差応力 $\Delta\sigma_i$ により供試体の凡例を変えて、今回の試験における結論から決定した各繰返し試験の破壊までの载荷回数と平均軸差応力のグラフを作成した(図-5)。このグラフから次のことが言える。

- ・繰返し軸差応力の片振幅が小さくなるにつれて破壊に要する载荷回数は増加する傾向にある。
- ・同じ拘束圧0.2MPa、初期せん断時の軸差応力4.0~4.2MPa、及び0.4MPaと比較すると、周波数が高くなるほど破壊に要する载荷回数が多い傾向がある。
- ・初期せん断応力が4MPa以上だとせん断破壊で、1MPa以下だと引張り破壊である。それぞれの破壊形態における初期せん断の影響には、一定の傾向が認められない。

6. まとめ

本研究に用いた礫岩の繰返し三軸試験では引張破壊とせん断破壊で破壊形態を分類し、それぞれ以下のように破壊を定義する。

- ①引張破壊は引張応力が急激に0に近づき、ひずみが急激に変化した時点と破壊とする。
- ②せん断破壊はCU単調三軸試験により得られた破壊時の軸ひずみを破壊とする。ただし、軸ひずみは原則として、ベッディング・エラーを含まないように供試体の側面で計測した局所ひずみとする。しかし、繰返し三軸試験での局所ひず

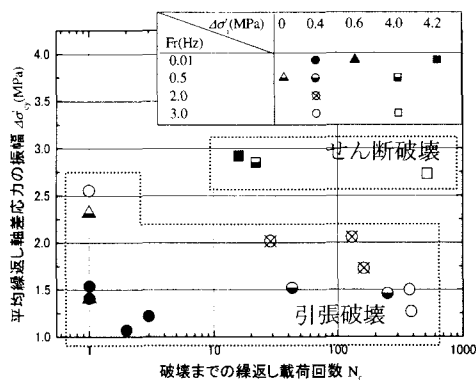


図-5 破壊までの载荷回数と平均軸差応力の振幅

みが信頼できない場合には、同じくCU単調三軸試験において外部変位計で計測された破壊時の軸ひずみと同じ軸ひずみに至った時点と破壊と決定する。

7. 今後の予定

今回は有効拘束圧0.2MPaで試験を行ったが他の有効拘束圧でも試験を実施し、拘束圧の影響を調べる。また、引張破壊とせん断破壊の二種類が破壊傾向として見られたが、伸長破壊の検討も試みる。

謝辞

本研究は電力9社、日本原子力発電(株)、電源開発(株)による電力共通研究の一部として実施した。関係各位の御配慮に感謝致します。

参考文献

- 1)吉中龍之進, 瀬戸亥一郎, 上田幸男: シルト質軟岩の動的強度・変形特性, 土木学会第45回年次学術講演会, III, pp.488-489, 1990.
- 2)西好一, 江刺靖行: 泥岩の力学的特性に関する研究(その4) 振動荷重下における強度-変形特性, 電力中央研究所報告, No.382014, 1982.

FAILURE OF CONGLOMERATES IN CYCLIC TRIAXIAL TEST

Kohei MIMORI, Tetsuji OKADA, Kazuo TANI and Hitoshi OTSU

Failure for soil are commonly defined, either as excess pore water pressure becomes the initial effective stress or as double amplitude of cyclic strain becomes 5%. For soft rocks, however, a different definition may be needed, because neither liquefaction nor large strains are not observed in cyclic tests. In this study, seventeen cyclic triaxial tests are conducted on a conglomerate rock to investigate the appropriate definition of failure of soft rocks in cyclic tests. The test results demonstrate that, failure patterns are classified into tensile and shear modes, and the specific definitions are proposed for the respective failure models.