

繰返し三軸試験による堆積軟岩のせん断破壊後の変形・強度特性

石丸 真^{1*}・岡田 哲実¹・関口 陽¹・河井 正²・風間 基樹²

¹電力中央研究所 地球工学研究所地震工学領域（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

²東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

*E-mail: ishimaru@criepi.denken.or.jp

近年、大規模な地震動に対する重要構造物の基礎地盤あるいは周辺の岩盤斜面の安定性評価が求められている。大規模な地震動に対しては時刻歴非線形解析の適用が試みられているが、時刻歴非線形解析において破壊後の挙動まで評価するためには、岩石の破壊後の変形・強度特性のモデル化が必要である。

本研究では、モデル化に資する知見を得るため、堆積軟岩を用いた三軸試験を実施した。試験では、単調載荷を基本として、その載荷途中の各段階で変形特性を求めるための繰返し載荷を行った。その結果、ピーク後のひずみ軟化過程で繰返し載荷を行っても、応力-ひずみ関係の骨格曲線の形状は単調載荷のみの場合とあまり変わらないことや、ピーク前後における剛性や履歴減衰率の特性を明らかにした。

Key Words : *sedimentary soft rock, shear failure, deformation characteristics, residual strength, cyclic triaxial test*

1. はじめに

近年、大規模な地震動に対する重要構造物の基礎地盤あるいは周辺の岩盤斜面の安定性評価が求められている。大規模な地震動に対しては時刻歴非線形解析の適用が試みられているが、時刻歴非線形解析において破壊後の挙動まで精度良く評価するためには、岩石の破壊後の変形・強度特性のモデル化やその検証が必要である。既往の研究における堆積軟岩を対象とした室内試験では、破壊前の変形特性^{1)~3)}や、強度特性^{1), 4)}の評価に関するものが多く、破壊後の変形・強度特性に着目した検討はあまり行われていない。

本研究では、モデル化に資する知見を得るため、堆積軟岩を用いた三軸試験を実施した。試験では、単調載荷を基本として、その載荷途中の各段階で変形特性を求めるための繰返し載荷を行い、せん断破壊後の変形・強度特性（骨格曲線の形状、等価ヤング率、履歴減衰率等）について検討を行った。

2. 試験条件

本研究では、新第三紀鮮新世末期から更新世前期の上総層群の泥岩を用いた。供試体は30cm角程度のブロッ

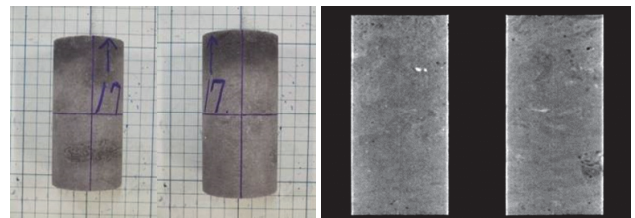


図-1 X線CT画像の例（ケースEの供試体）

クからコア抜きし、直径5cm×高さ10cmに整形した。なお、本試験に用いる供試体は物性のばらつきが少ない方が望ましいため、X線CT撮影を行って弱面や貝殻等の物質が少ない供試体を選定した。図-1にX線CT画像の例を、表-1に試験前の供試体の物性値をそれぞれ示す。供試体は真空槽で十分に脱気した後、三軸試験装置にセットして、通水、背圧（0.5MPa）負荷を行った。上記の手順で供試体を飽和させた場合、B値は全ての試験ケースで0.95以上であった。なお、供試体を三軸試験装置にセットする際は、摩擦低減処理として供試体の上下端面に0.1mm厚のテフロンシートを設置した。

載荷試験は $\overline{CU}$ 条件で行い、試験時の拘束圧は0.2MPa、0.5MPa、1.0MPaとした。また、載荷パターンは単調載荷のみを行う場合（ひずみ速度0.01%/min）と、単調載荷と繰返し載荷を組み合わせる場合（ひずみ

表-1 供試体の物性値一覧

試験ケース	A	B	C	D	E	F	G
拘束圧 (MPa)	0.2	0.5	1.0	1.0	0.2	0.5	1.0
載荷条件	単調載荷のみ				単調載荷＋繰返し載荷		
湿潤密度 (g/cm^3)	2.03	2.07	2.04	2.03	2.04	2.04	2.06
含水比 (%)	24.5	22.2	23.2	24.1	23.7	24.2	22.8
乾燥密度 (g/cm^3)	1.63	1.69	1.66	1.64	1.65	1.64	1.68
P波速度 (m/s)	2296	2329	2240	2266	2297	2276	2329
S波速度 (m/s)	981	989	990	995	968	983	989
動ポアソン比 (-)	0.39	0.39	0.38	0.38	0.39	0.39	0.39

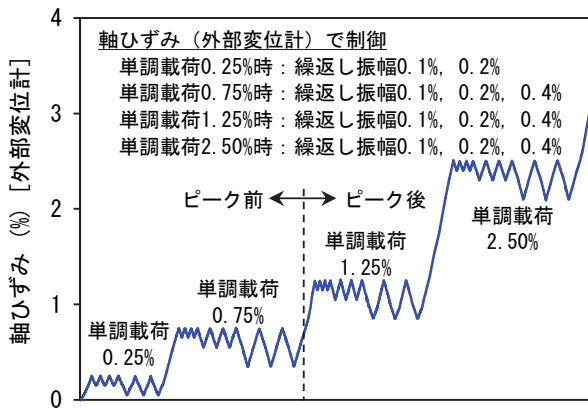


図-2 載荷条件

速度0.05%/min) の2通りを設定した。繰返し載荷を行うケースでは、単調載荷のピーク前後の各段階（軸ひずみ0.25%、0.75%、1.25%、2.50%）において、3サイクルの定ひずみ載荷⁵⁾を軸ひずみ振幅をステップごとに大きくして行った（軸ひずみ振幅0.1%、0.2%、0.4%）。なお、試験時の制御は外部変位計を元にした。図-2に外部変位計による試験中の軸ひずみ履歴を示す。

供試体には、左右側面に軸方向・周方向のひずみゲージを設置したほか、周囲4ヶ所に軸方向のギャップセンサーを設置して供試体の変状を計測した。

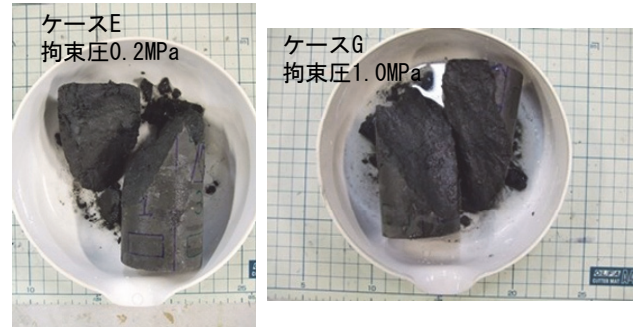


図-3 供試体の破壊状況

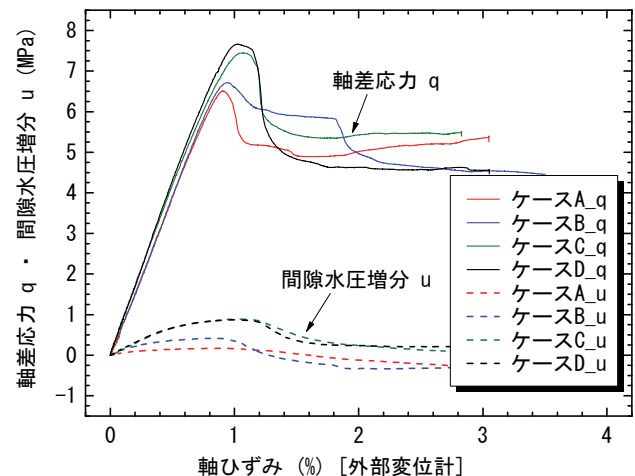


図-4 軸差応力、間隙水圧増分-軸ひずみ関係
(単調載荷)

3. 試験結果

(1) 軸差応力-軸ひずみ関係

図-3に供試体の破壊状況の一例を示す。また、図-4には、単調載荷の場合の軸差応力-軸ひずみ関係と、間隙水圧増分-軸ひずみ関係を示す。図より、間隙水圧増分は軸差応力のピーク後、減少に転じていることが確認できる。なお、繰返し載荷を行ったケースの結果も含めて算出したピーク強度定数は、有効応力表示で $\phi'=54.6^\circ$ 、 $c'=1.01\text{MPa}$ である。繰返し載荷を行う場合は、試験上の制約からひずみ速度を0.05%/minとしたが、単調載荷のみの場合の5倍程度の値であるため、変形・強度特性を

単調載荷のみの場合と比較することに関しては影響は少ないと考えられる。

図-5～図-7には、軸差応力、間隙水圧増分と軸ひずみの関係を拘束圧ごとに分けて示す。これらの図より、せん断破壊後のひずみ軟化過程で繰返し載荷を行う場合でも、繰返し載荷後は骨格曲線の延長上に戻っていることから、骨格曲線自体はあまり変化しないことが推測される。また、単調載荷のみのケースと比較しても、骨格曲線の形状や最終的な残留強度は概ね同一と考えられる。これらの性質は、低強度の人工軟岩を用いた検討でも同様の傾向となることが確認されている⁶⁾。

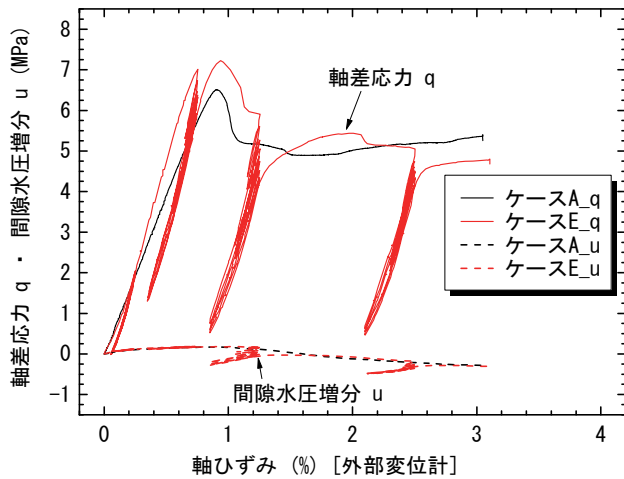


図-5 軸差応力，間隙水圧増分－軸ひずみ関係
(ケース A・E，拘束圧：0.2MPa)

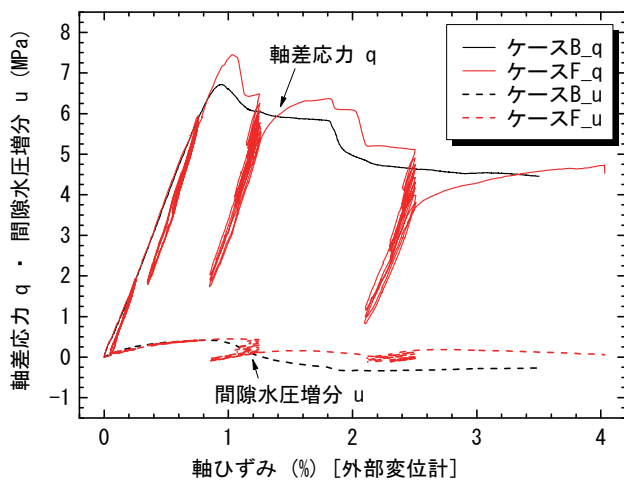


図-6 軸差応力，間隙水圧増分－軸ひずみ関係
(ケース B・F，拘束圧：0.5MPa)

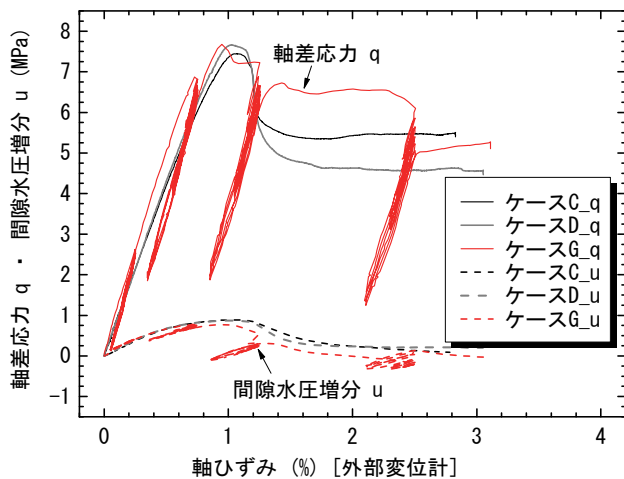


図-7 軸差応力，間隙水圧増分－軸ひずみ関係
(ケース C・D・G，拘束圧：1.0MPa)

(2) セン断破壊後の変形特性

図-8～図-10には，3サイクル定ひずみ载荷における3サイクル目の軸差応力－軸ひずみ関係から求めた等価ヤ

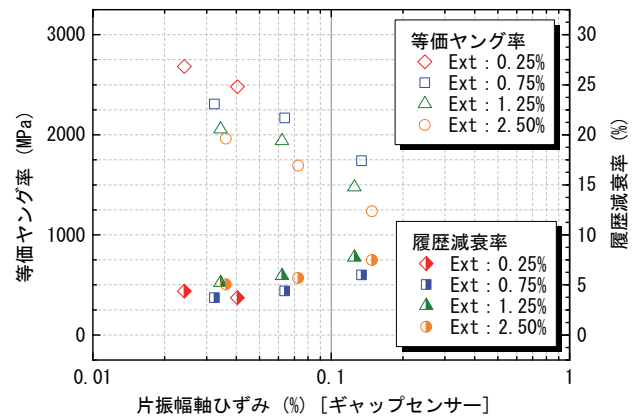


図-8 等価ヤング率，履歴減衰率－軸ひずみ関係
(ケース E，拘束圧：0.2MPa)

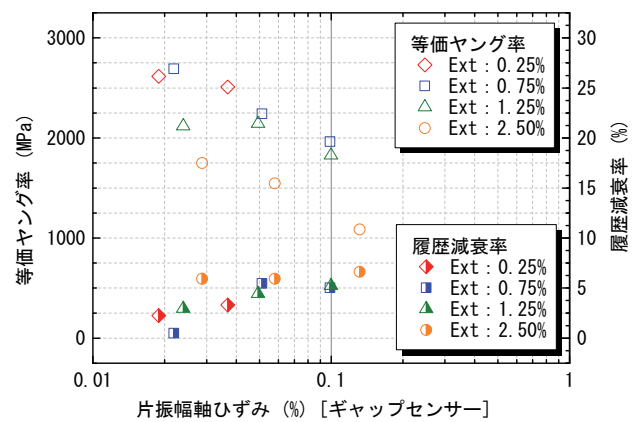


図-9 等価ヤング率，履歴減衰率－軸ひずみ関係
(ケース F，拘束圧：0.5MPa)

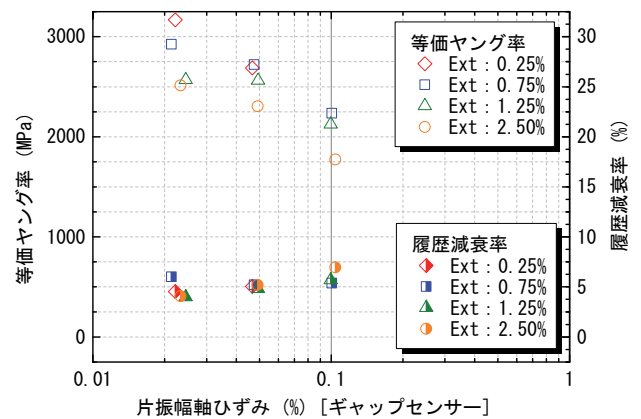


図-10 等価ヤング率，履歴減衰率－軸ひずみ関係
(ケース G，拘束圧：1.0MPa)

ング率と履歴減衰率をまとめて示す。図中の片振幅軸ひずみ，等価ヤング率および履歴減衰率は4個のギャップセンサーの平均値で整理しているが，ケースGについて

は4個のうち2個のギャップセンサーが供試体の変状の影響を明らかに受けていたため、これらを除外して整理を行った。なお、図において、凡例のExtは外部変位計で計測した単調载荷の軸ひずみの値を示している。

これらの図より、ある特定の単調载荷軸ひずみにおける3サイクル定ひずみ载荷では、既往の研究における堆積軟岩の変形特性¹⁾³⁾と同様に、片振幅軸ひずみが大きいほど等価ヤング率が小さく、履歴減衰率が大きいことが確認できる。また、単調载荷軸ひずみ（骨格曲線からの除荷時の軸ひずみ）が異なる場合についても、単調载荷軸ひずみが大きいほど等価ヤング率が小さく、履歴減衰率が大きい傾向が認められる。なお、ピーク前後（破壊ひずみは外部変位計による計測で1.0%程度）の変化はあまり顕著ではない。

4. まとめ

本研究では、モデル化に資する知見を得るため、堆積軟岩を用いた三軸試験を実施した。試験では、単調载荷を基本として、その载荷途中の各段階で変形特性を求めるための繰返し载荷を行った。得られた成果は下記の通りである。

- ・ ピーク後のひずみ軟化過程で繰返し载荷を行っても、軸差応力-軸ひずみ関係の骨格曲線の形状は単調载荷のみの場合とあまり変わらなかった。
- ・ ひずみ軟化過程における変形特性については、既往

の研究における堆積軟岩の変形特性と同様に、片振幅軸ひずみが大きいほど等価ヤング率が小さく、履歴減衰率が大きいことが確認された。また、骨格曲線からの除荷時の軸ひずみが大きいほど、等価ヤング率が小さく、履歴減衰率が大きい傾向が認められた。

今後はデータを蓄積するとともに、モデル化について検討し、破壊の影響を考慮する時刻歴非線形解析へ適用する予定である。

参考文献

- 1) 西 好一, 江刺靖行, 國生剛治: 振動载荷時における軟岩の動的強度-変形特性, 電力中央研究所研究報告, No.383050, 1985.
- 2) 越智健三, 金 有性, 龍岡文夫: ひずみ依存性と測定誤差を考慮した堆積軟岩の変形特性の検討, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.133-142, 1993.
- 3) 福元俊一, 吉田 望, 佐原 守: 堆積軟岩の動的変形特性, 日本地震工学会論文集, 第 9 巻, 第 1 号, pp.46-64, 2009.
- 4) 岡田哲実, 伊藤 洋: 岩盤の動的強度評価法の室内試験による検証, 電力中央研究所研究報告, No.N09029, 2010.
- 5) 吉田 望, 三上武子, 澤田純男, 規矩大義: 地盤の地震応答解析のための土の動的変形特性試験の提案, 第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.459-460, 2005.
- 6) 石丸 真, 岡田哲実, 河井 正, 風間基樹: 軟岩のせん断破壊後の変形特性に関する繰返し三軸試験, 第 48 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.627-628, 2013.

CYCLIC TRIAXIAL TESTS ON DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS AFTER SHEAR FAILURE OF SEDIMENTARY SOFT ROCK

Makoto ISHIMARU, Tetsuji OKADA, Akira SEKIGUCHI, Tadashi KAWAI and Motoki KAZAMA

Recently, it is necessary to accurately evaluate the stability of rock slopes and of the foundation site of important structures during major earthquakes. In this study, cyclic triaxial tests were conducted on a sedimentary soft rock to obtain data that can enable the modeling of deformation and strength characteristics after shear failure. In the tests, cyclic loadings for examining the deformation characteristics were carried out at each strain levels, before and after the peak load, in the process of monotonic loading. It was observed that the frame curve shape of stress-strain relationship in the case of monotonic and cyclic loadings was similar to the case of only monotonic loading.