

不連続面を有する風化花崗岩の 室内繰返し岩盤せん断試験(2) —大型の試料を用いた繰返し一面せん断試験—

澤田 喬彰^{1*}・吉原 諒¹・岡田 哲実²・石丸 真²・関口 陽³・野尻 慶介⁴

¹株式会社ダイヤコンサルタント地質解析事業部（〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3）

²一般財団法人電力中央研究所サステナブルシステム研究本部（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

³株式会社セレス（〒270-1165 千葉県我孫子市並木五丁目6番13号SECビル4階）

⁴関西電力株式会社 土木建築室（〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島3丁目6番16号）

*E-mail: ta.sawada@diaconsult.co.jp

近年、設計用地震動の増大に伴い、原子力発電所の基礎岩盤や周辺斜面の耐震性評価において、岩盤の繰返し変形特性や破壊履歴を考慮できる時刻歴非線形解析手法の開発が進められているが、不連続面を有する天然の岩盤を対象とした検証事例がほとんどなかった。そこで、本研究では、ブロックサンプリングした大型の試料を用いて室内にて繰返し载荷の岩盤せん断試験を実施し、解析の検証用データを取得した。その結果、得られたせん断強度は、過去に原位置で実施した単調载荷の岩盤せん断試験で得られた強度と同等であった。

Key Words :discontinuity, weathered granite, cyclic box shear test, shear strength, residual strength

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の発生後、重要構造物に対する地震動による設計荷重が大きく設定されるようになり、それを支持する基礎地盤の安定性評価にあたっては、より精緻な安定性評価手法と適切な物性値の設定が必要となってきた。そのような状況の中、原子力発電所の基礎岩盤や周辺斜面の耐震性評価においては、岩盤の繰返し変形特性や破壊履歴を考慮できる時刻歴非線形解析手法の開発と検証が進められている^{1,2)}。解析の検証に必要なデータのうち、不連続面を有する天然の岩盤に対しては検証事例がほとんどない。

そこで、既報告の軟岩の試験³⁾に続き、ブロックサンプリングした不連続面を有する風化花崗岩の試料を用いて、室内で繰返し载荷の岩盤せん断試験を実施した。

本論文では、試験法の適用性を確認するため、同試料を用いた室内三軸試験結果、および過去に同岩盤で実施した原位置岩盤せん断試験結果と比較した。

なお、同じ岩盤試料を用いた室内要素試験、本試験の画像解析、および本試験の数値解析の結果については、連番の別報^{4,5,6)}に示す。

2. 試験方法

(1) 試験装置

本試験装置は、せん断箱に供試体を設置し、垂直方向（2箇所）およびせん断方向（1箇所）の油圧ジャッキにより荷重を制御し、供試体をせん断するものである（図-1、図-2）。基本的には、一面せん断試験装置と類似のものであるが、せん断箱は独特の構造を有している。せん断箱の両側面には、供試体の破壊進展状況の観察と画像解析による変位の計測を目的としたガラス製の側面板を付属している。この側面板は可視化が容易なように分割をせず1枚板となっており、下箱と一緒にせん断方向に移動する構造となっている。また、ガラス面内側の供試体との接触面には厚さ 0.2mm のシリコンシートを挿入することで供試体との摩擦を低減した。

油圧ジャッキは、交番（両振り）の繰返し载荷を行うことが可能である。さらに、荷重制御と変位制御の切替えも可能である。せん断箱の上箱は球座を介して垂直力を制御する油圧ジャッキに接続され、下箱はリニアガイドに沿って滑らかに動作できる機構を備えている。この構造により、せん断方向の可動がスムーズかつ直線的となる。

供試体の花崗岩は、風化しており、割れ目には細粒物

質が含まれる。割れ目の間隔は3～10cm程度である。

(2) 計測機器

せん断箱に設置する外部変位計は、微小変形から大変形まで計測するために、試験の途中で変位計を切り替えて使用した。岩盤近傍の応力分布を得るため、供試体の上下面ではそれぞれを5分割、せん断方向では上下せん断箱のそれぞれ2箇所ずつ分割荷重計を設置した（図-3参照）。なお、すべての分割荷重計は、直方向と水平方向の2軸の計測が可能である。

供試体の側面には、破壊の進展データおよび供試体の変位を取得する目的で、画像解析用のマーカーを設置した⁵⁾。

(3) 試験条件

試験はHL-0～HL-4まで計5ケース実施した。垂直方向の荷重は、荷重レベルごとの変形特性を調べることと、

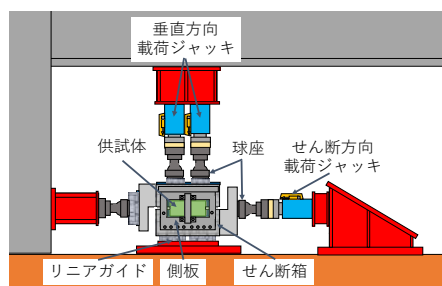


図-1 試験装置概要



図-2 試験装置写真

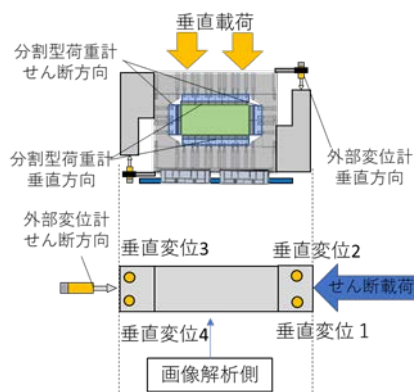


図-3 計測機器設置状況

供試体と載荷面のなじみをよくすることを目的として、段階荷重を載荷した。HL-0とHL-1では、図-4の定体積条件に示すように、垂直方向については、荷重制御によりステップ毎に載荷し、所定の応力に達した後は、変位一定制御を維持してせん断を載荷した。HL-2～HL-4では、図-4の定圧条件に示すように、垂直方向については、荷重制御によりステップ毎に載荷を実施し、所定の応力に達した後は、荷重一定制御を維持してせん断応力を載荷した。せん断応力の載荷は全てのケースで変位制御載荷とした。ただし、載荷に伴う残留変位を計測する目的で、変位制御で所定の波数を加えた後、残っているせん断応力をすべてのステップで0に戻した。試験で実施した載荷ステップを表-1～表-3に示す。

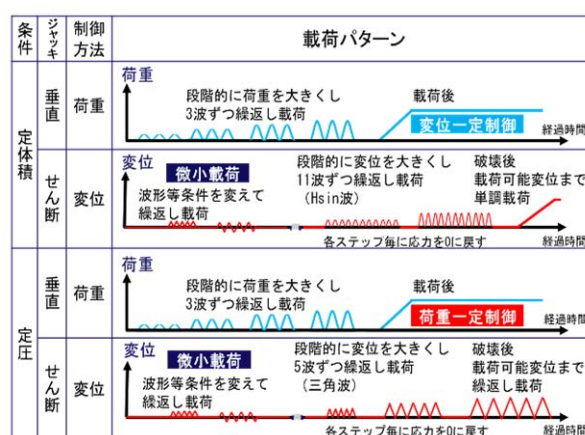


図-4 試験の載荷方法

表-1 HL-0とHL-1の載荷ステップ

HL-0					HL-1				
垂直応力载荷(荷重制御)									
荷重 (MN/m ²)	波数	周波数 (Hz)	波形	载荷速度 (MN/m ² /min)	荷重 (MN/m ²)	波数	周波数 (Hz)	波形	载荷速度 (MN/m ² /min)
0.10	3波	0.01	ハーバー サイン波	—	0.10	3波	0.01	ハーバー サイン波	—
0.20					0.20				
0.30					0.30				
0.40					—				
0.50	単調	—		0.60	0.40	単調	—		0.48
せん断応力载荷(変位制御)									
変位 (mm)	波数	周波数 (Hz)	波形	载荷速度 (mm/min)	変位 (mm)	波数	周波数 (Hz)	波形	载荷速度 (mm/min)
0.02	11波	0.1	サイン波	—	0.02	11波	0.1	サイン波	
0.02					0.02				
0.04					0.04				
0.16					0.16				
0.64					0.64				
1					1				
2					2				
4					4				
6					6				
8					8				
10					10(1回目)				
12					10(2回目)				
14					12				
16					14				
60			単調		—		60	40	
					50	単調	—		60

表-2 HL-2 と HL-3 の载荷ステップ

HL-2					HL-3				
垂直応力載荷(荷重制御)									
荷重 (MN/m ²)	波数	周波数 (Hz)	波形	載荷速度 (MN/m ² /min)	荷重 (MN/m ²)	波数	周波数 (Hz)	波形	載荷速度 (MN/m ² /min)
0.12	3波	0.01	ハーバー サイン波	—	0.05	3波	0.01	ハーバー サイン波	—
0.24					0.10				
0.36					0.15				
0.48					—				
0.60	単調	—	—	0.36	0.20	単調	—	—	0.24
せん断応力載荷(変位制御)									
変位 (mm)	波数	周波数 (Hz)	波形	載荷速度 (mm/min)	変位 (mm)	波数	周波数 (Hz)	波形	載荷速度 (mm/min)
0.02	5波	0.1	サイン波	—	0.02	5波	0.1	サイン波	—
0.02		—	三角波	0.12	0.02		—	三角波	0.12
0.04				0.48	0.04				0.48
0.16				1.92	0.16				1.92
0.64				7.68	0.64				3.4
1				12	2				
2				24	8				
4				24	16				
8				12	20				
12				6	30				
16	4.5			50					
20	3波	—	三角波	3.4	—	三角波	—		
30									
45									

表-3 HL-4 の载荷ステップ

HL-4				
垂直応力载荷(荷重制御)				
荷重 (MN/m ²)	波数	周波数 (Hz)	波形	载荷速度 (MN/m ² /min)
0.20	3波	0.01	ハーバー サイン波	—
0.40				
0.60				
0.80				
1.00	単調	—	—	1.2
せん断応力载荷(変位制御)				
変位 (mm)	波数	周波数 (Hz)	波形	载荷速度 (mm/min)
0.02	5波	—	三角波	0.12
0.02				0.48
0.08				1.92
0.32				7.68
1				12
4				24
16				24
32	3波	—	三角波	12
55				6

(4) 試験の手順

試験の手順は、以下のとおりである。

1) 供試体整形

供試体をせん断箱の寸法に合わせるために、ウォールソーを使用して、供試体を長さ 600mm×幅 300mm×高さ 270mm に切断し、グラインダーを用いて整形する。

2) 分割型荷重計の設置

前述のとおり、全ての分割型荷重計を所定の位置に設置する。

3) 供試体と下側せん断箱の接着

個々の分割型荷重計の隙間に接着剤の侵入を防ぐため、マスキングテープで養生し、受圧板に接着剤を塗布し供試体と接着する。

4) 供試体と上側せん断箱の接着

下側せん断箱と同様に、マスキングテープによる養生を行い、せん断箱の間に 20mm のスペーサーを設置し、上側せん断箱と供試体を接着する。

5) 装置組立

せん断箱の反力側とせん断载荷側に载荷板と球座を設置し、载荷側に载荷板を剛結する。

6) 画像解析用のマーカー設置

供試体の側面に画像解析用のマーカーを設置する⁵⁾。

7) 側面板の設置

せん断箱の側面両側に側面板を設置する。側面板の供試体と接するガラス面には、摩擦低減用のシリコンシートを側面両側に貼り付ける。また、分割型荷重計のケーブルは、側面板の取り出し穴から取り出す。

8) 計測用センサー・カメラ取付け

計測用センサーと治具をせん断箱に取付ける。画像解析用のカメラおよび供試体の変形状況撮影用のカメラを側面板の前に設置する。

9) スペーサーの取外し

4) で設置したスペーサーを外し、せん断箱上側の重量を供試体に载荷した状態にする。この荷重は試験結果の評価において、垂直荷重に加算した。

10) 垂直応力载荷

垂直応力の繰返し载荷を行い、ステップ毎に増大させ、所定の垂直応力まで载荷する。载荷後、変位計の値が安定するまで、荷重を保持する。

11) せん断方向油圧ジャッキ接続

せん断方向の油圧ジャッキを変位制御で動作させ、下側せん断箱の载荷板と球座を剛結する。

12) せん断応力载荷

せん断方向の繰返し载荷を表-1～表-3 の载荷ステップにより、最大荷重を確認するまで载荷する。

3. 試験結果

(1) 分割荷重計の計測結果

分割荷重計の計測結果により、供試体に载荷される荷重分布状況を確認した。分割荷重計の計測結果の一例 (HL-2) として、図-5 は、垂直载荷時の分割荷重計の計測結果を、図-6 は、せん断繰返し時のせん断荷重と垂直荷重の分割荷重計の計測結果を示す。

垂直载荷時の荷重分布は、垂直荷重の値が概ね均等な値となり、せん断载荷時の荷重分布は、垂直荷重が一か所に集中することはなかった。

せん断箱上側と下側それぞれに設置した分割荷重計の荷重について、垂直方向とせん断方向で合計値を算出し、ジャッキ荷重と比較した。垂直载荷した際のジャッキ荷重と分割荷重計の比較を図-7 に、せん断载荷した際の

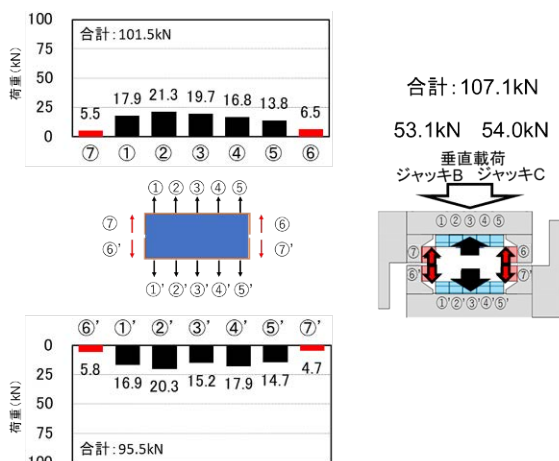


図-5 垂直載荷時の荷重分布状況(HL-2)

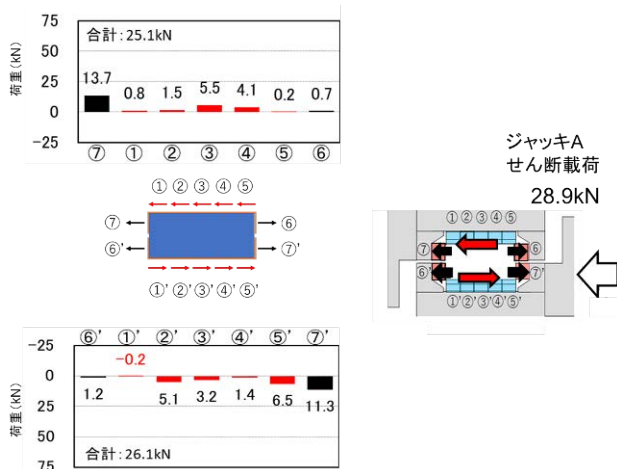


図-6 せん断載荷時の荷重分布状況(HL-2)

ピーク時のジャッキ荷重と分割荷重計の比較を図-8に示す。

垂直載荷時の分割荷重計の合計値は、HL-1 と HL-3 については、せん断箱の上下とジャッキ荷重が概ね等しい結果となっているが、HL-2、HL-4 は、ジャッキ荷重より分割荷重計の合計値が小さい結果となった。この要因として、硬岩の供試体に多く存在する既存の割れ目が影響し、垂直方向とせん断方向の荷重分布状況にばらつきが生じた可能性が考えられる。

せん断載荷時の分割荷重計の合計値は、HL-2、HL-3 は、せん断箱の上下とジャッキ荷重の合計値が概ね等しい結果となっているが、HL-0、HL-1、HL-4 は、ジャッキ荷重より分割荷重計の合計値が小さい結果となった。この要因として、せん断箱可動部のリニアガイドの摩擦等が考えられる。また、HL-0 と HL-1 は、垂直載荷を変位一定制御としているため、せん断荷重が増加するとともに、垂直荷重も増加しており、垂直載荷時と同様に、既存の割れ目の影響による、垂直方向とせん断方向の荷重分布状況のばらつきが生じた可能性が考えられる。

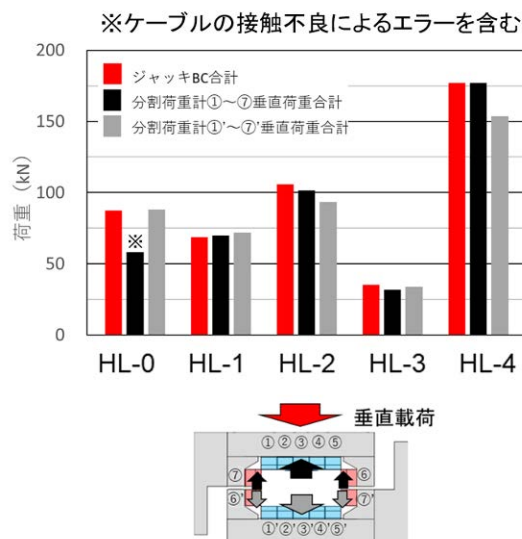


図-7 垂直応力載荷時の分割荷重計測結果

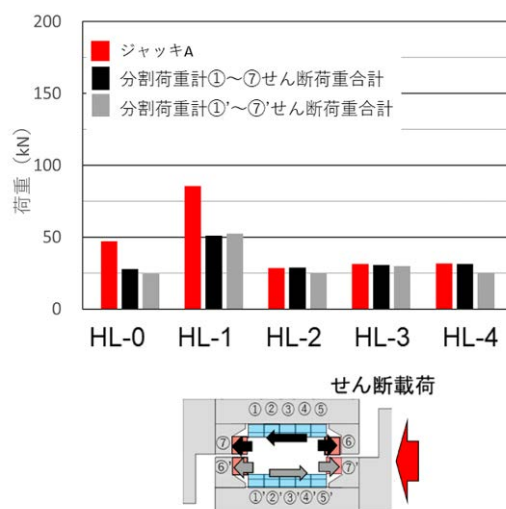


図-8 せん断応力載荷時の分割荷重計測結果

(2) せん断強度

今回の試験から得られたせん断強さと、三軸圧縮試験（供試体寸法：直径 50mm×長さ 100mm）の結果⁴⁾と同岩種・同岩級の岩盤で実施された過去の原位置岩盤せん断試験の結果（供試体寸法：600mm×600mm）を比較した。図-9 にせん断応力と垂直応力の関係を示す。なお、今回の試験結果は、ジャッキ荷重と分割荷重計の結果を並記した。

ジャッキ荷重の結果は、HL-2～HL-4 の結果は原位置岩盤せん断試験結果と概ね同等であった。ただし、HL-0 と HL-1 の値は、せん断試験結果を上回り、HL-1 は三軸圧縮試験と同程度の結果となった。一方、分割荷重計の結果は、すべての結果において、原位置岩盤せん断試験結果と概ね同様の結果となった。

次に、図-10 にジャッキ荷重と分割荷重計の結果からそれぞれ算出した地盤反力係数（＝せん断剛性）とせん断変位の関係を示す。なお、地盤反力係数は、せん断方

向の荷重応力とせん断方向変位量の比で算出しており、せん断方向の変形特性を示している。

ジャッキ荷重から得られた地盤反力係数は、HL-2～HL-4の値は概ね同等となり、HL-0とHL-1がそれらの値を上回る結果となった。分割荷重計から得られた地盤反力係数は、すべての結果が同程度となった。なお、せん断変位 0.04mm 以下の結果に多少のばらつきが見られたが、これは供試体に多く存在する既存の割れ目による影響等が考えられる。

以上の結果から、ジャッキ荷重の結果は、前述したせん断箱可動部のリニアガイドの摩擦等の影響等により、大きい値となったと見られ、供試体により近い位置で計測した分割荷重計の結果の方が、岩盤ブロックに載荷した真の応力値に近いと判断した。

(3) 破壊後供試体の状況

図-11～図-15 に試験前後の供試体状況の例を示す。なお、図は試験前の既存の割れ目を黒線で、試験後の破壊面を赤線で示している。

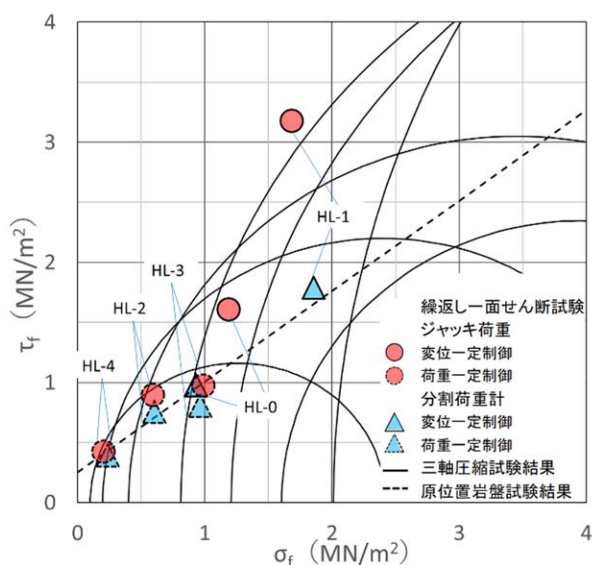


図-9 せん断応力と垂直応力の関係

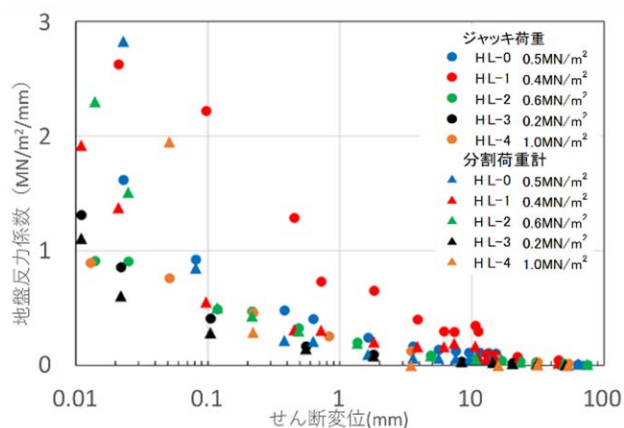


図-10 地盤反力係数とせん断変位の関係

破壊面は、すべての結果において、せん断面の両端部を発端に亀裂が進展し、供試体全体にせん断面に沿った破壊を確認した。破壊状況の傾向については、既存の割れ目の影響が大きく、明確な判断はできなかった。

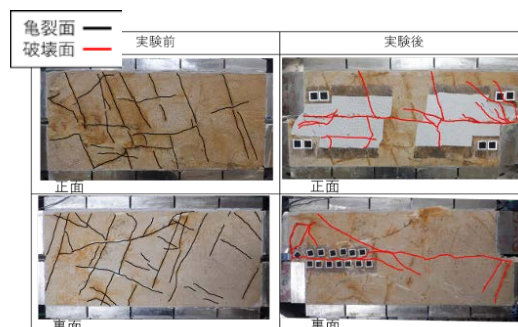


図-11 試験前後の供試体の状況(HL-0)

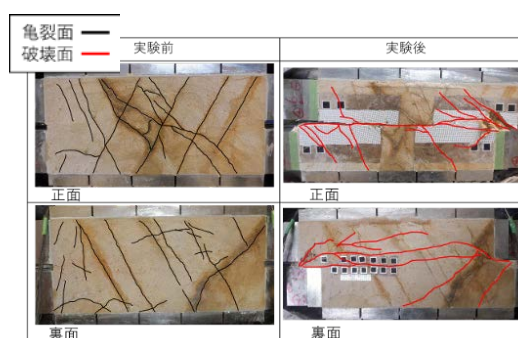


図-12 試験前後の供試体の状況(HL-1)

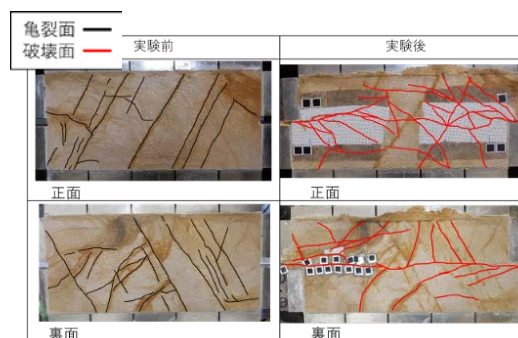


図-13 試験前後の供試体の状況(HL-2)

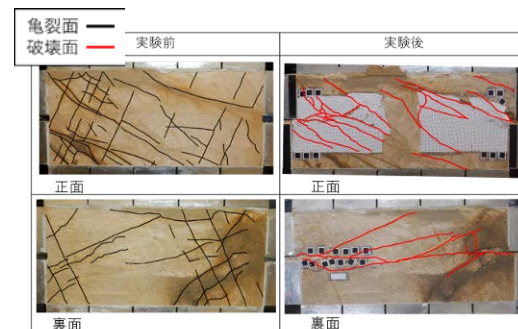


図-14 試験前後の供試体の状況(HL-3)

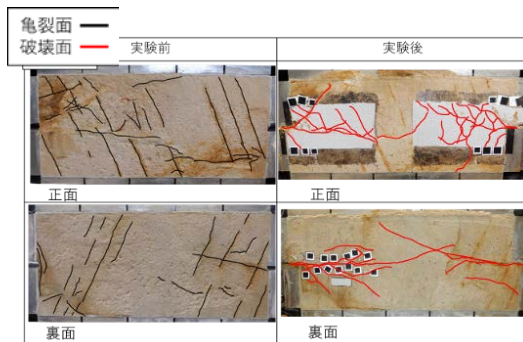


図-15 試験前後の供試体の状況(HL-4)

4. まとめ

今回、現地でサンプリングした大型の不連続面を有する試料を用いて、室内の繰返し一面せん断試験を実施した。その得られた結果を三軸圧縮試験結果、原位置岩盤試験結果と比較し、試験の適用性を検証した。その結果、以下のことが確認できた。

- ・分割荷重計により、試験時の供試体の荷重分布が計測でき、垂直方向載荷時のジャッキ荷重との整合性を確認した。
- ・ジャッキ荷重の結果と分割荷重計の結果が試験ケースにより異なる傾向を示したが、分割荷重計から得られたせん断強さは、過去の原位置せん断試験結果と概ね同等の値となった。また、これより、分割荷重計の結果の方が妥当である可能性が高いことが示された。
- ・破壊面は、すべての結果において、せん断面の両端部を発端に亀裂が進展し、供試体全体に沿った破壊を確認した。

今後は分割荷重計や画像解析のデータを詳細に分析していく予定である。

謝辞：本論文は電力9社、日本原子力発電（株）、電源開発（株）、日本原燃（株）による原子力リスク研究センター共通研究（2020年度）によって得られた成果である。試験実施に際しては、関西電力（株）横田克哉殿、関係者の皆様に御指導頂きました。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石丸真, 河井正：数値解析による不連続性岩盤斜面の地震時崩壊範囲の評価, 第14回岩の力学国内シンポジウム, 2017.
- 2) 石丸ほか：軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用, 土木学会論文集 C (地圏工学) Vol. 73, No. 1, 23-38, 2017.
- 3) 澤田ほか：サンプリングした軟岩ブロックの繰返し一面せん断試験, 土木学会年次学術講演会, 2020.
- 4) 中村ほか：不連続面を有する風化花崗岩の室内繰返し岩盤せん断試験(1)―各種要素試験による力学特性の評価―, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022
- 5) 関口ほか：不連続面を有する風化花崗岩の室内繰返し岩盤せん断試験(3)―画像解析による変形特性の評価―, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022
- 6) 鈴木ほか：不連続面を有する風化花崗岩の室内繰返し岩盤せん断試験(4)―有限要素法による再現解析―, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022

CYCLIC DIRECT SHEAR TEST FOR THE WEATHERED GRANITES WITH DISCONTINUITIES (PART 2)

—CYCLIC BOX SHEAR TEST FOR LARGE SAMPLE—

Takaaki SAWADA, Ryou YOSHIWARA, Tetsuji OKADA, Makoto ISHIMARU,
You SEKIGUCHI and Keisuke NOJIRI

Time history nonlinear analysis is expected to be a method for analyzing the cyclic deformation characteristics and failure history of rock mass. It has not been verified for natural rock with discontinuities. In this study, Data for verification of time history nonlinear analysis was obtained from Cyclic box shear tests. Shear strength of cyclic box shear test was around the same as direct shear test on rocks.