

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) —画像解析による岩盤の変位・変形の計測—

関口陽^{1*}・日高功裕²・澤田喬彰³・岡田哲実⁴・石丸真⁴・横田克哉⁵

¹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)

²西日本技術開発株式会社 (〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1丁目1番1号)

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

⁴一般財団法人電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

⁵関西電力株式会社 (〒530-8270 大阪市北区中之島3丁目6番16号)

*E-mail: sekiguchi@ceresco.jp

設計用地震動の増大に伴い、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。本研究では、時刻歴非線形解析の非線形モデルの検証を行うため、大型の岩盤ブロックを用いて岩盤せん断試験を実施した。岩盤せん断試験を境界値問題と捉えた場合、発揮される強度を求めるだけではなく、岩盤内部の変位・変形を知る必要があるが、不連続面を有する岩盤においてこれらの情報を知ることが容易ではない。そこで本論文では、試験中において岩盤の正確な変位・変形を計測することを目的として適用した二種類の画像解析手法の結果を示す。

Key Words : image analysis, deformation characteristics, weathered granite, cyclic box shear test

1. はじめに

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、本研究では、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³⁾。均質な堆積軟岩を対象として同様の試験を行った実績があり²⁾、この際には、岩盤内部のひずみについては、ひずみゲージを用いて計測を行った。しかしながら、今回対象とした風化花崗岩には多数の亀裂が存在し、ひずみゲージを貼り付けることができない。そこで、岩盤せん断試験のせん断箱の側面板にガラスを使用し、せん断箱の外側から複数のカメラにより画像を計測し、二種類の画像解析手法 (PTV 法³⁾、サンプリングモアレ法⁴⁾) により、岩盤内部の変位・変形を計測することを試みた。

2. 画像解析の測定

(1) せん断箱の構造

画像解析のために、せん断箱の両方の側面板はガラス板が取り付けられていて、下箱と一緒にせん断方向に移動する構造となっている (図-1)。ただし、補強のため中央部分にはリブが入っており、観察できない領域がある (図-2)。ガラス面の内側の供試体 (岩盤) との接触面にはワセリンを塗布した厚さ 0.2mm のシリコンシートを挿入し、供試体との摩擦を低減している。なお、シリコンシートは、ガラス越しの供試体が鮮明で、画像解析に支障がないものを選定した。

(2) 画像解析用カメラ収録システム

画像解析用カメラ収録システムの仕様を表-1 に、撮影の状況を図-1 に示す。このシステムは、カメラ、レンズ、スイッチングハブ、画像収録パソコン、制御パソコン、鉄製のカメラ台で構成される。比較的安価な汎用品で構成されており、目的に応じて、カメラの台数を増減できる。一括制御のため、撮影の開始と停止命令は、制御パソコンから画像収録パソコンを通じて同時に複数のカメラをコントロールできる利点を持つ。また、撮影

した画像は画像収録パソコンに保存される。

表-1 画像解析用カメラ収録システム

項 目	内 容
カメラ 8台	品名：Xic MC031MG-SY (Ximea 社製) サイズ：26×26×33mm, 重量：38g 撮影画素：2064画素×1544画素 (310万画素) フレームレート：1～122fps シャッター方式：グローバルシャッター レンズ：MK5014-C, 焦点距離 50mm (オプトアート社製)
画像収録 パソコン 8台	Jetson nano (NVIDIA 社製), OS:Linux CPU:ARM A57, GPU :NVIDIA Maxwell メモリ：4GB, ドライブ：256GB SSD
制御 パソコン 1台	Windows PC, OS: Windows10

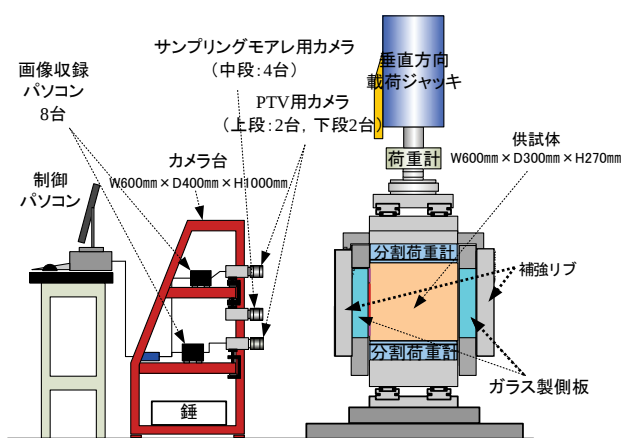


図-1 撮影の状況 (断面図)

(3) 画像解析の方法

画像解析で精度良く変位を計測するためには、被写体をできる限り大きく撮影する必要があります。そこで、画像解析用カメラ収録システムを使って、8台のカメラで分割して撮影した（図-2）。そのうち4台はPTV（Particle Tracking Velocimetry）による画像解析用で、残りの4台はサンプリングモアレによる画像解析用である。PTVについては、せん断箱の外部に取り付けた変位計のベッティングエラーを補正する目的で実施し、サンプリングモアレについてはせん断面近傍のひずみ分布を取得し破壊の進展状況を観察する目的で実施した。

PTVによる画像解析は、一定の時間間隔で連続的に撮影した画像を二値化し、追跡したいマーカーを指定して認識させ、マーカーの面積重心を計測しながら自動追跡して変位を算出する手法である³⁾。

サンプリングモアレによる画像解析は、計測対象物に規則性を有する格子シートを貼付け、変形前後の画像を重ね合わせることでモアレ縞を生成させる。このモアレ縞の輝度（濃淡）から、位相の変化を変位に変換し、撮

影した全画素の二次元変位分布を取得できる⁴⁾。

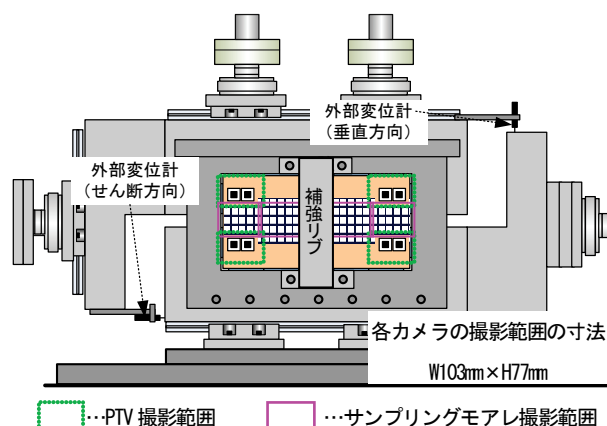


図-2 カメラの撮影位置 (正面図)

(4) 画像解析の変位精度の検証

画像解析から得られた変位の精度について検証を行った。精度検証では、岩盤せん断試験と同じ画像解析用カメラ収録システム（カメラ台を除く）、LEDライトを使用した。図-3に示す精度検証装置は、マイクロメーターとその固定台、カメラと雲台、スライドレールで構成される機器を使用した。なお、スライドレールはマイクロメーターとカメラの距離を任意に調整できる。マイクロメーターを固定する台とスライドレールはボルトで結合されていて、スライドレール上の雲台を固定した後は、マイクロメーターとカメラの距離は一定に保たれる構造になっている。精度の検証方法は、マイクロメーターの先端にPTV用の20mm×20mmのマーカーとサンプリングモアレ用の1.5mmピッチの格子シートを貼りつけた試験片を固定し、マイクロメーターのハンドルを回し、段階的に横方向に変位させ、画像解析の結果と比較した。また、撮影にはLEDライトを使用して試験面全体が均一な明るさになるようにした。カメラと試験片の距離は岩盤せん断試験と同等の800mmであり、この条件下での画像は1画素が約0.05mmに相当する。表-2にマイクロメーターの仕様を示す。

マイクロメーターとPTVの変位の関係を図-4に示す。計測回数は30点の値である。マイクロメーターとPTVの変位関係は近似直線の傾きが1に近く、良好な線形関係を示した。表-3に示すマイクロメーターで与えた変位量に対してPTVの標準偏差は0.005～0.010mmとなり、誤差は0.011～0.059mmとなった。これにより、測定範囲内での繰返し精度は最大誤差の0.059mmであることがわかる。

マイクロメーターとサンプリングモアレの変位の関係を図-5に示す。計測回数は104点の値である。マイクロメーターとサンプリングモアレの変位関係では近似直線の傾きが1で、良好な線形関係を示した。サンプリングモアレにおける標準偏差と誤差を表-4に示す。測定

結果によると標準偏差は 0.003～0.008mm となり、誤差の範囲は 0.005～0.012mm であった。これにより測定範囲内の繰返し精度は、最大誤差の 0.012mm であることがわかった。

これらのことから、PTV に比べ、サンプリングモアレの方が繰返し精度は良いことがわかる。サンプリングモアレは、格子模様の微細な変形をモアレ縞で表現することで、より大きな位相差として捉えることができ、高い精度で変位量を検出することができる。森本ら⁴⁾によると、格子シートのピッチの 1/100 ～1/1000 程度の精度で変位を計測することが可能とされており、本検証においても格子シートピッチの 1/100 程度の精度があることが確認された。

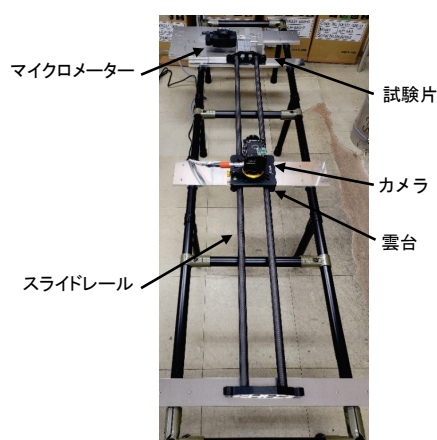


図-3 精度検証装置

表-2 マイクロメーターの仕様

項目	内容
品名	マイクロメーターNo164-161 (ミットヨ社製)
測定範囲	0～50mm (最小表示量 0.001mm)
器差	±0.002mm

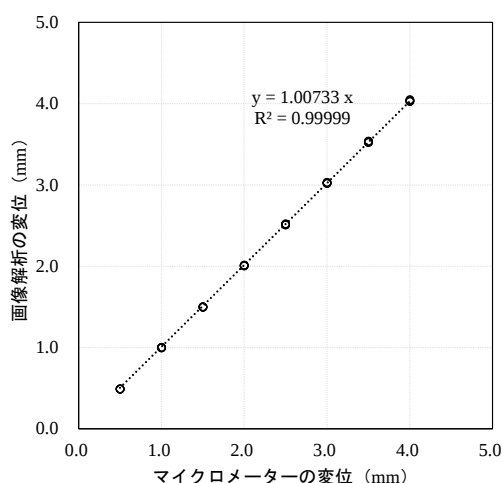


図-4 マイクロメーターとPTVの変位関係

表-3 PTVにおける標準偏差と誤差

マイクロメーター mm	画像解析				
	最小値 mm	最大値 mm	平均値 mm	標準偏差 mm	誤差 mm
0.500	0.482	0.498	0.490	0.005	0.018
1.000	0.983	1.009	0.997	0.006	0.017
1.500	1.489	1.510	1.500	0.005	0.011
2.000	1.997	2.023	2.010	0.007	0.023
2.500	2.497	2.529	2.515	0.008	0.029
3.000	3.007	3.038	3.023	0.008	0.038
3.500	3.508	3.549	3.532	0.010	0.049
4.000	4.018	4.059	4.038	0.010	0.059

サンプル数:各 30 点

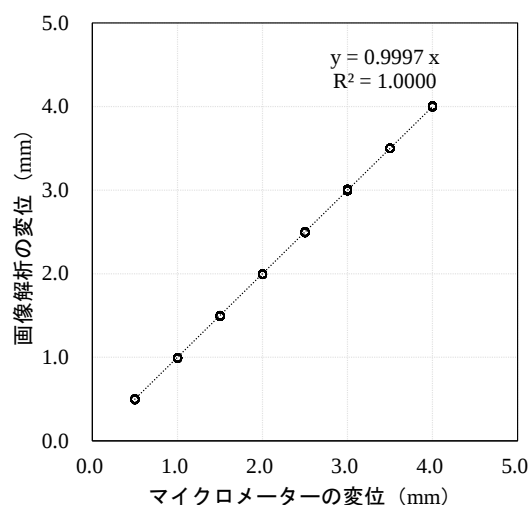


図-5 マイクロメーターとサンプリングモアレの変位関係

表-4 サンプリングモアレにおける標準偏差と誤差

マイクロメーター mm	画像解析				
	最小値 mm	最大値 mm	平均値 mm	標準偏差 mm	誤差 mm
0.500	0.494	0.504	0.498	0.004	0.006
1.000	0.988	0.996	0.992	0.003	0.012
1.500	1.489	1.501	1.493	0.005	0.011
2.000	1.993	1.999	1.995	0.003	0.007
2.500	2.491	2.502	2.497	0.004	0.009
3.000	2.992	3.011	3.002	0.008	0.011
3.500	3.498	3.505	3.500	0.003	0.005
4.000	3.995	4.009	4.003	0.006	0.009

サンプル数:各 104 点

3. 画像解析の結果

(1) PTV の結果

図-6 に岩盤せん断試験の垂直力載荷時における外部変位計によるせん断箱の垂直変位 d_{ext} と画像解析による垂直変位 d_{ima} の結果を示す。なお、垂直変位 d_{ima} は上下 2 カ所の PTV 用マーカーの相対変位の平均値である。横軸の HL-2, HL-3, HL-4 は岩盤せん断試験の試験

番号である。垂直応力が大きくなるに従い、 d_{h_ima} 、 d_{h_ext} ともに変位が大きくなることがわかる。しかし、 d_{h_ext} の方が明らかに大きく、供試体とせん断箱の境界部で大きく変形していることが示唆される。供試体とせん断箱の間には垂直・せん断の2方向の分割荷重計が配置され、供試体とは接着剤を用いて接着している。このことから、垂直変位 d_{h_ext} は、分割荷重計や接着剤の変形および供試体のベディングエラーとマーカーより外側の供試体内部にある亀裂の影響を大きく受けたと考えられる。

図-7 に岩盤せん断試験のせん断力載荷時における外部変位計によるせん断箱のせん断変位 d_{s_ext} と、画像解析によるせん断変位 d_{s_ima} の結果を示す。なお、 d_{s_ima} は左上の PTV 用マーカーと右下の PTV 用マーカーの相対変位である。横軸は d_{s_ext} 、縦軸は d_{s_ima}/d_{s_ext} である。せん断変位が大きくなるに従い、 d_{s_ima}/d_{s_ext} は 1 に近づく傾向がある。変位計のせん断変位は、垂直方向の圧縮変形後となるため、分割荷重計や接着剤の変形および岩盤のベディングエラーなどの影響が、垂直変位に比べると小さくなり、最大 3割程度変位を大きめに評価している可能性がある。

以上の結果より、岩盤せん断試験において岩盤の変位を計測する場合には、PTV による画像解析が有効である可能性が示された。

(2) サンプルングモアレの結果

図-8 には、サンプルングモアレによる岩盤せん断試験の垂直力載荷時の垂直方向のひずみを示す。なお、図中の横軸の①～⑥は、図-9 の位置に対応する。図-8 の凡例に示す「実験」とは、サンプルングモアレによる垂直ひずみの結果で、「解析」とは別途実施した非線形 FEM 解析の結果⁶⁾である。なお、実験の垂直ひずみは四角形要素 (①～⑥) の各接点の位置に対応するサンプルングモアレで得られた変位を用いて式 (1) で計算した。

$$\varepsilon_y = -\frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

ここで、変位量は u, v 、 x, y は平面座標である。

いずれのケースにおいても、実験の画像解析に比べて非線形 FEM 解析の供試体端部のひずみが小さく、かつ一様になっている。一方で、HL-2 と HL-3 では、供試体中心付近のひずみは、両者は概ね等しい。また、HL-2 では、実験の画像解析のひずみが④で大きく変形している。HL-4 では、実験の画像解析のひずみが⑥や①に近づくほど、かなり大きく変形している。これらは、初期から存在する不連続面の影響であると考えられる (図-10)。

図-11 には、サンプルングモアレによる岩盤せん断試験

のせん断力載荷時 (1mm, 2mm, 4mm のせん断変位時) のせん断ひずみの増分を示す。図-11 の凡例に示す「実験」とは、サンプルングモアレによる最大せん断ひずみの結果、「解析」とは別途実施した非線形 FEM 解析の結果⁶⁾である。実験の最大せん断ひずみは四角形要素 (①～⑥) の各接点の位置に対応するサンプルングモアレで得られた変位を用いて式 (6) で計算した。

$$\varepsilon_x = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = -\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + (\gamma_{xy})^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + (\gamma_{xy})^2} \quad (5)$$

$$\gamma_{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \quad (6)$$

いずれのケースにおいても供試体中心付近の評価位置⑥における両者のひずみは、概ね等しい。また、両者ともに中心部から端部側に進むにつれて、せん断ひずみが増える傾向は等しい。一方、①に近い端部のひずみは、実験の画像解析の方が小さくなっている。また、HL-2 では、垂直載荷時と同様に、実験の画像解析のひずみが④で大きく変形する傾向を示している。HL-3 では、非線形 FEM 解析のひずみが①と③で大きく変形している。実験の画像解析においても①で大きく変形しており、最終的な破壊形態からこの部分で引張り破壊が進展しており、この状況を画像解析が観察できている可能性が高い。

図-12 にサンプルングモアレによるせん断載荷時における最大せん断ひずみ分布図の一例 (HL-3) を示す。なお、図中の A～D はサンプルングモアレ用に設置した4台のカメラ画像で、B と C の間には補強用のリブがあり、撮影できないエリアとなっている。最大せん断ひずみは、各せん断変位の最大変位時の結果である。

せん断変位 1mm では、A の端部で 2～3%の最大せん断ひずみが確認された。D では 1%程度の最大せん断ひずみが確認できた。せん断変位 2mm では引張りによる亀裂の影響と考えられるせん断ひずみが見られ、せん断変位 8mm においては、C と D の中央部全域に 1～2%の最大せん断ひずみが広がっていることが確認された。

せん断変位 8mm 以上の載荷については、サンプルングモアレの格子シートの破れによって、画像解析が出来なくなった。

以上の結果より、岩盤せん断試験において岩盤の変形

(ひずみや破壊の進展)を計測する場合には、サンプリングモアレによる画像解析が有効である可能性が示された。

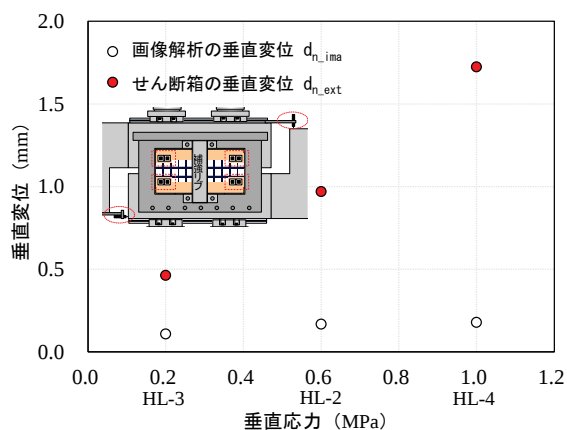


図-6 垂直力荷重時における垂直変位 $d_{n,ext}$ と垂直変位 $d_{n,ima}$

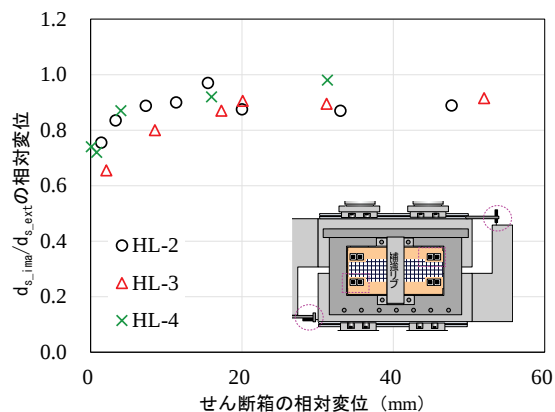


図-7 セン断力荷重時におけるせん断変位 $d_{s,ext}$ とせん断変位 $d_{s,ima}$

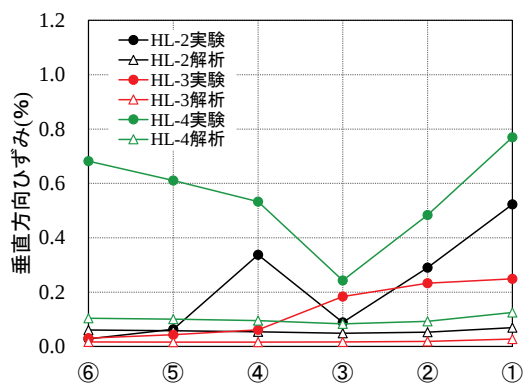


図-8 垂直荷重時の垂直ひずみ

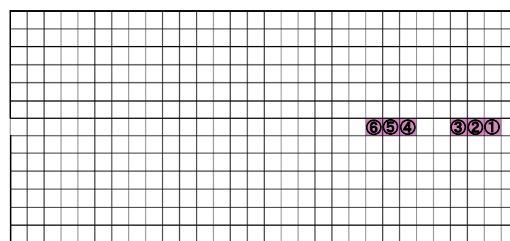


図-9 ひずみ分布評価位置

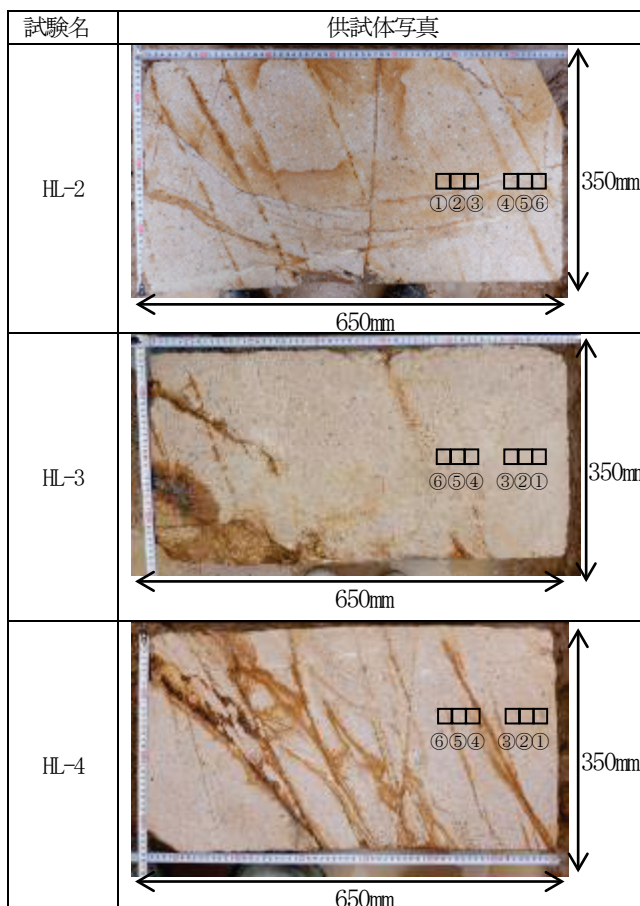


図-10 試験前の不連続面

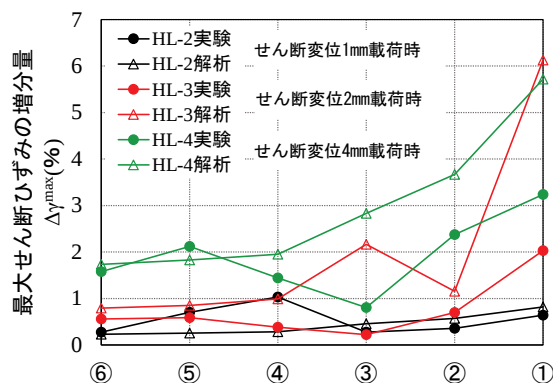


図-11 セン断荷重時の最大せん断ひずみの増分

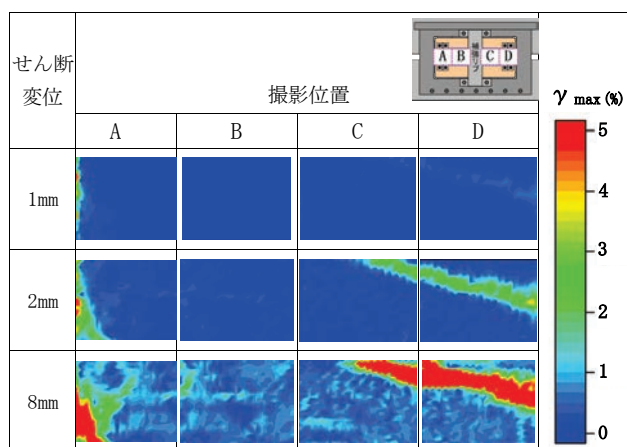


図-12 最大せん断ひずみ分布図 例 (HL-3)

4. おわりに

不連続面を有する風化花崗岩の供試体を用いて室内で繰返し载荷の岩盤せん断試験を実施し、岩盤の変位・変形を計測するため、画像解析の検討を行った。事前の精度検討の結果、サンプリングモアレ法は PTV 法と比較して、約 5 倍程度の繰返し精度があることがわかった。また、PTV 法により、せん断箱に取り付けた変位計よりも正確な変位を計測でき、サンプリングモアレ法により、通常は計測が困難な正確なひずみや破壊進展状況を計測できる可能性が示された。今後、さらに詳細な検討を行い、岩盤試験における画像解析の実用化を進めたい。

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）野尻慶介殿、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) 澤田喬彰, 吉原諒, 岡田哲実, 石丸真, 関口陽, 野尻慶介: 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—, 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022.
- 2) 澤田喬彰, 吉原諒, 日高功裕, 関口陽, 石丸真, 岡田哲実, 横田克哉, 松井伸明: 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.
- 3) 竹原幸生, 江藤剛治, 村田滋, 道奥康治: PTV のための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No.533, pp.107-126, 1996.
- 4) 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大: サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測, 真空, 54 巻 1 号, pp.32-38, 2011.
- 5) 中村良太, 関口陽, 岡田哲実, 石丸真, 日高功裕, 野尻慶介: 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)—各種室内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.
- 6) 落合丘悠, 鈴木知晃, 石丸真, 岡田哲実, 日高功裕, 横田克哉: 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 3) - MEASUREMENT OF DISPLACEMENT AND DEFORMATION OF ROCK MASS BY IMAGE ANALYSIS -

Akira SEKIGUCHI, Kosuke HIDAKA, Takaaki SAWADA, Tetsuji OKADA,
Makoto ISHIMARU and Katsuya YOKOTA

In this study, rock shear tests were conducted on large rock blocks to validate the nonlinear model of time history nonlinear analysis methods. When the rock shear test is considered as a boundary value problem, it is necessary to know the displacement and deformation inside the rock mass as well as the strength, but it is not easy to know these informations in the rock mass with discontinuities. In this paper, we present the results of two image analysis methods applied to accurately measure the displacement and deformation of rock masses during the test.