

# 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-

中村 良太<sup>1\*</sup>・関口 陽<sup>1</sup>・岡田 哲実<sup>2</sup>・石丸 真<sup>2</sup>・日高 功裕<sup>3</sup>・野尻 慶介<sup>4</sup>

<sup>1</sup>株式会社セレス（〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646 一般財団法人電力中央研究所内）

<sup>2</sup>一般財団法人電力中央研究所（〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646）

<sup>3</sup>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）

<sup>4</sup>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: nakamura@ceresco.jp

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必要性が高まっているが、解析手法や非線形モデルの検証では、これまで不連続面を有する岩盤を対象とした事例はほとんどなかった。そこで、本研究では、不連続面を有する風化花崗岩の試料を用いて、岩盤せん断試験により解析に用いる非線形モデルを検証する計画である。本論文では、解析の入力パラメータを確定するため実施した各種の室内試験の結果を示す。室内試験として、三軸圧縮試験、繰返し三軸試験、一軸引張り試験、一面せん断試験等を実施し、解析用の入力パラメータを確定するとともに、得られた各種試験結果に対して考察を加えた。

**Key Words :** discontinuity, triaxial test, direct tension test, box shear test, cyclic loading

## 1. はじめに

近年、設計用地震動の増大に伴い、原子力発電所の基礎地盤や周辺斜面の耐震性評価において、岩盤の破壊を考慮できる時刻歴非線形解析の開発・実用化が進んでいる。また、模型実験を対象とした時刻歴非線形解析の検証事例の蓄積が行われている<sup>1)</sup>。しかし、比較的均質な軟岩を対象とした検証の事例が多く、不連続面を有する天然の岩盤を対象とした検証の事例はほとんど見られない。そこで、不連続面を有する風化花崗岩の試料を用いて解析手法の検証実験として繰返し岩盤せん断試験を行

うにあたり、解析パラメータの取得を目的として表-1の通り、各種室内試験を実施した。強度特性を取得するために三軸圧縮試験と一軸引張り試験を実施し、繰返し変形特性を取得するために繰返し三軸試験を実施した。また、三軸圧縮試験において寸法効果の検討を行い、岩盤とせん断箱の境界面と、岩盤不連続面の繰返し一面せん断試験も実施した。最終的にこれらの実験結果に基づき、非線形解析の検証のための入力パラメータを決定した。

なお、検証用実験として位置づけられる、大型の室内繰返し岩盤せん断試験は同タイトルの連番の別報(2)(3)<sup>2)</sup>に、数値解析については、連番の別報(4)<sup>3)</sup>に示す。

表-1 室内試験一覧

| 試験項目                     | 供試体サイズ                                         | 試験数量       | 取得事項・目的                  |
|--------------------------|------------------------------------------------|------------|--------------------------|
| 三軸圧縮試験                   | φ 25, H 50mm<br>φ 50, H 100mm<br>φ 92, H 184mm | 15<br>(各5) | ・強度特性（せん断強度）<br>・寸法効果の確認 |
| 繰返し三軸試験                  | φ 50, H 100mm                                  | 7          | ・動的変形特性                  |
| 一軸引張り試験                  | φ 50, H 50mm                                   | 6          | ・引張り強さ                   |
| 岩盤と金属の境界部の<br>繰返し一面せん断試験 | W 100～200mm,<br>D 120mm, H 60mm                | 4          | ・岩盤とせん断箱の境界部の力学特性        |
| 岩盤不連続面の<br>繰返し一面せん断試験    | W 100～200mm,<br>D 120mm, H 60mm                | 3          | ・岩盤の亀裂部の力学特性             |

## 2. 対象岩盤

解析手法の検証実験として繰返し岩盤せん断試験を実施するにあたり、600mmのブロック中に多数の不連続面を有し、既往の岩盤せん断試験結果を保有しているCL級の風化花崗岩を対象とした。不連続面には細粒物質を含み、不連続面の間隔は30～100mm程度である。岩盤試料はEL.52mの斜面小段より、緩んだ表面部を剥ぎ取った後、ブロックサンプリングにより採取した。

## 3. 供試体成形方法

現地でブロック状（各辺 250mm）にサンプリングを行った試料を、各室内試験用に成形した。ブロックサンプリングはチェーンソーで側面を切断後、木枠で側面を保護し、木枠と岩盤との間を充填剤で埋めた。その後、上面を閉塞した後、下端を左右より切断した。

### (1) 円柱状供試体

三軸圧縮試験、繰返し三軸圧縮試験に用いる供試体は、油圧式のコアドリルによる成形を行った。試料は細粒分を含む不連続面が存在しており、不連続面を破損せずに成形する必要がある。その為、二重管構造かつ内管にスリーブが設置できるコアドリルビットを用いた。供試体が掘削後すぐにスリーブ内に収納されていく仕組みとなっており、掘削流体の接触が少ないことが特徴である。

### (2) 角柱状供試体

岩盤と金属の境界部の一面せん断試験、および岩盤不連続面の繰返し一面せん断試験に用いる角柱状供試体は、湿式岩石カッターで成形を行った。試料の表面のみにエポキシ系接着剤を塗布して試料の不連続面の分離を防ぎ成形作業を行った。

## 4. 供試体の含水条件

室内試験は可能な限り、別途実施する繰返し岩盤せん断試験<sup>3)</sup>の含水条件と一致させる事が望ましい。しかし、含水条件を調整することは困難であるため、供試体はサンプリング時点の含水条件を可能な限り維持することに留意した。含水状態に影響を与える作業は最低限に抑え、供試体は湿らせたウエスで被覆して保管した。室内試験直後に含水比の測定を実施した。その結果、含水比は4～8%、飽和度は41～82%程度のばらつきとなった。

## 5. 供試体の選定

室内試験に使用する供試体は、多様な角度、長さ、開口幅の不連続面が存在する。よって、目視によるスケッチ、超音波速度測定、X線CT撮影（図-1）で記録を行った。成形した供試体は全て、ある程度の不連続面を含むものである。湿潤保管や試験準備段階での剥離が懸念される、割れ目や充填物層を含むものを除き、供試体を選定した。

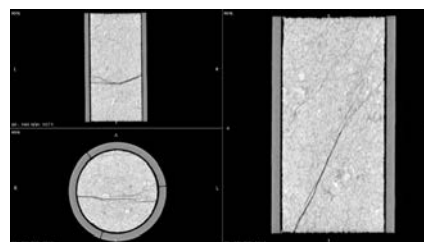


図-1 CT画像の一例（採用供試体）

## 6. 三軸圧縮試験

解析パラメータとなるせん断強度は、単調荷重の三軸圧縮試験により求めた。試験条件を表-2に示す。試験は、岩石の圧密排水(CD)三軸圧縮試験方法（JGS 2534-2009）に則り実施した。但し、供試体は自然含水の不飽和条件で試験を行った。ひずみの計測は、ひずみゲージ（ゲージ長：30mm）、および非接触式変位計（供試体高さの70%）により上下端部のベディングエラーを除いた平均的なひずみを計測した。

供試体のサイズは、寸法効果の影響を確認する目的で、直径25mm、直径50mm、直径92mmの三種類とした。供試体の高さは全て直径の2倍とした。

各供試体寸法の軸差応力-軸ひずみの関係を図-2に示す。外部変位計の結果はベディングエラーの影響により、ひずみを過大に計測する傾向がある。また、ひずみゲージと非接触式変位計の結果を比較すると、ひずみゲージのひずみが同等かやや小さい。計測間隔が大きいほど不連続面を含む可能性が高いためと考えられる。

最大せん断強さ、残留せん断強さを図-2に示す。最大せん断強さは、寸法が小さいほど強度が大きい傾向があるが、残留強度に明瞭な寸法効果は確認できなかった。最大せん断強さに寸法効果が見られることから、解析用

表-2 試験条件(三軸圧縮試験)

| 項目           | 条件                      |
|--------------|-------------------------|
| 試験方法         | CD                      |
| 载荷速度 (%/min) | 0.5                     |
| 有効拘束圧 (MPa)  | 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 |

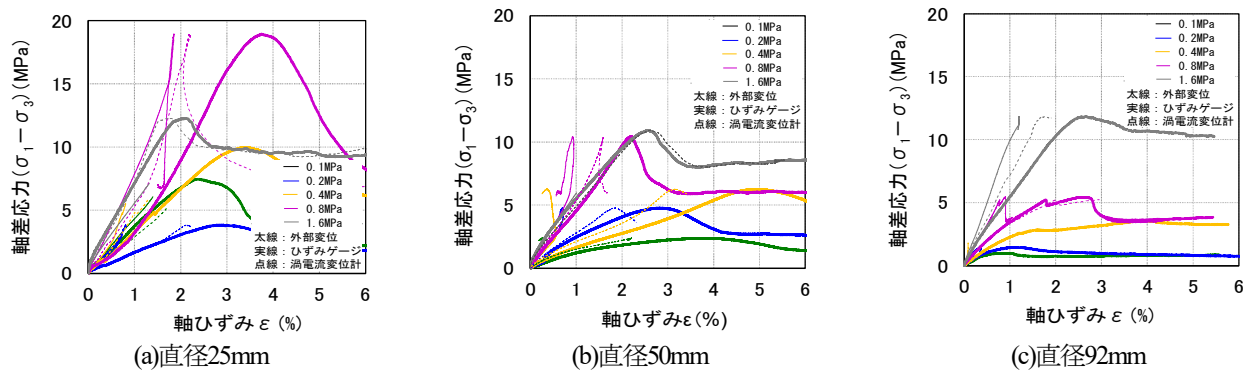


図-2 軸差応力-軸ひずみの関係

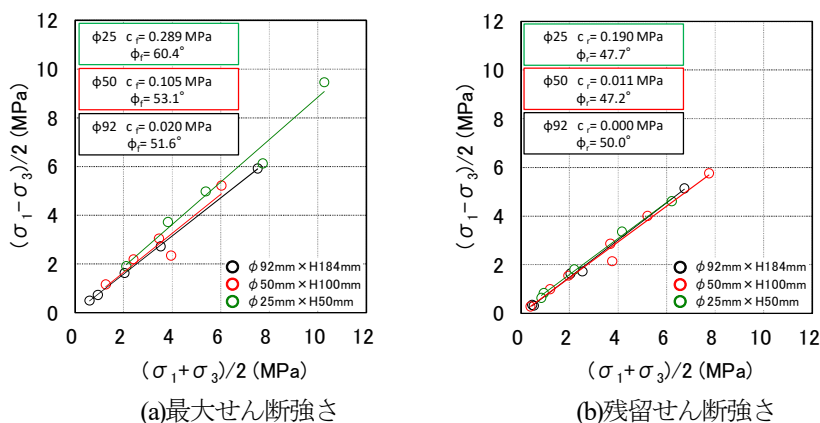


図-3 強度特性

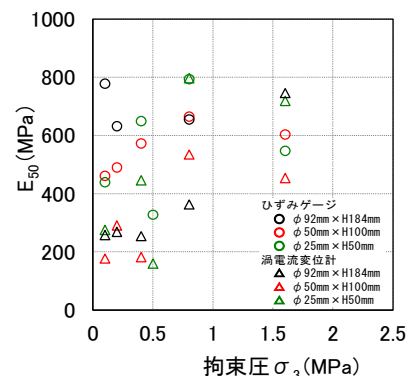


図-4 各供試体寸法のE<sub>50</sub>-拘束圧

物性値としては、解析要素の単位であるメッシュサイズ20mm×20mmの正方形<sup>3)</sup>の大きさに近い、直径25mmの結果を用いることとした。

各供試体寸法の、E<sub>50</sub>と拘束圧の関係を図-4に示す。E<sub>50</sub>においては、ひずみゲージの結果には拘束圧依存性が見られないが、非接触式変位計では拘束圧に応じてE<sub>50</sub>が増加する傾向が見られる。また、どちらの計測結果にも明瞭な寸法効果は見られない。よって、後述の変形特性を得るための繰返し三軸試験は、拘束圧依存性を考慮して非接触式変位計の計測結果を用いる。また、寸法効果は確認できなかったことから、標準である直径50mmの供試体を用いた。

## 7. 繰返し三軸試験

繰返し三軸試験により、繰返し変形特性を求めた。試験条件を表-3に示す。当試験は、「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法」(JGS 0542-2009)に則り実施した。但し、供試体は自然含水条件で試験を実施した。計測はひずみゲージ(ゲージ長:30mm)および非接触式変位計(高さの70%)により、供試体上下端部のベディングエラーを除いた平均的なひずみの計測

を実施した。

非接触式変位計で計測した等価弾性係数E<sub>eq</sub>及び履歴減衰率hと、片振幅軸ひずみ(ε<sub>a</sub>)<sub>SA</sub>の関係を図-5に示す。非接触式変位計の結果を用いた理由は、ベディングエラーの影響を受けずに、不連続面を含む変形特性を得るためである。

初期せん断弾性係数G<sub>0</sub>については、繰返し三軸試験の(ε<sub>a</sub>)<sub>SA</sub>=10<sup>-6</sup>までの結果を用いた。拘束圧依存性を考慮し、式-1の通り近似式を求め、式-2により初期せん断剛性率G<sub>0</sub>を求めた(図-6)。ポアソン比は、ひずみゲージの計測値から求まる平均値として0.18を用いた。

$$E = 1.26 \times 10^3 \cdot \sigma_m^{0.09} \quad (\text{式-1})$$

$$G_0 = E / (2 \times (1 + 0.18)) \quad (\text{式-2})$$

ここに、E:弾性係数(MPa), G<sub>0</sub>:初期せん断弾性係数(MPa)である。

表-3 試験条件(繰返し三軸試験)

| 項目         | 条件                                |
|------------|-----------------------------------|
| 試験方法       | CD                                |
| 入力波        | 正弦波                               |
| 周波数(Hz)・波数 | 0.1・11                            |
| 有効拘束(MPa)  | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 |

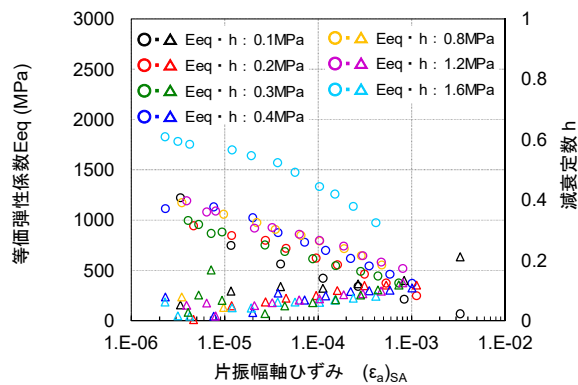


図-5 弾性係数及び履歴減衰率と片振幅軸ひずみの関係

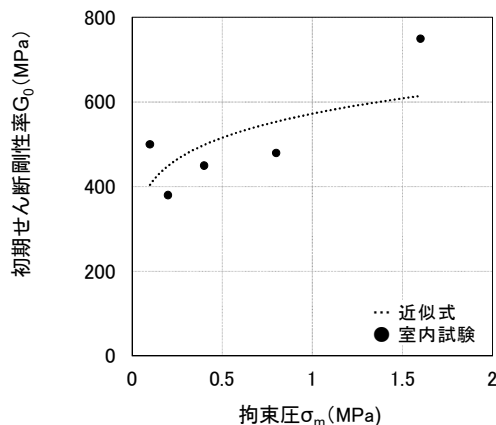


図-6 初期せん断剛性率と拘束圧の関係

## 8. 一軸引張り試験

一軸引張り試験の試験条件を表-4に示す。試験は、「岩石の一軸引張り試験方法」(JGS 2552-2015)に則り実施した。独自の仕様として、供試体の中心に直径8mmの孔を成形し、その孔へセンターガイドを通すこととした。センターガイドを油圧ジャッキで上昇させ、反力板に接触することで、供試体へ引張り荷重の载荷を行うことができる<sup>6)7)</sup>。計測は、非接触式変位計を用いた外部変位に加え、ひずみゲージ(ゲージ長: 30mm)による計測も実施した。

応力と軸ひずみの関係を図-7示す。外部変位計はベディングエラーや不連続面の影響を含むひずみが計測されるが、その影響が小さい結果も見られた。不連続面の影響を受け引張り強さのばらつきは多い。全試験結果の引張り強さの平均値として、 $\alpha=0.088\text{MPa}$ であった。

表-4 試験条件(一軸引張り試験)

| 項目           | 条件      |
|--------------|---------|
| 試験方法         | 中空引張り試験 |
| 载荷速度 (%/min) | 0.01    |

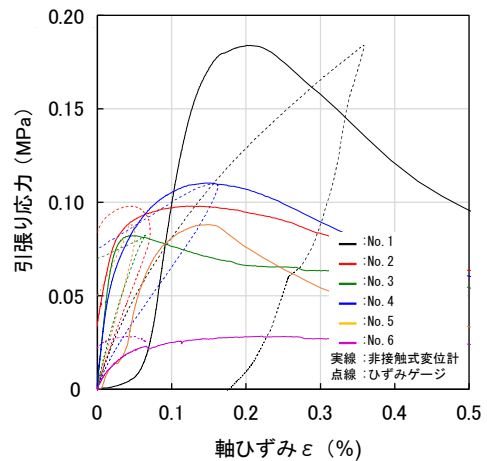


図-7 引張り応力と軸ひずみの関係

## 9. 岩盤と金属の境界部の一面せん断試験

別途実施した岩盤の繰返し岩盤せん断試験<sup>3)</sup>において、供試体とステンレス製せん断箱は接着剤により固定されている。数値解析では風化花崗岩とせん断箱の境界部を、JOINT要素としてモデル化する必要がある。このため、供試体とステンレスの接着部の繰返し強度・変形特性を得る目的で繰返し一面せん断試験を実施した。

一面せん断試験の試験条件を表-5に示す。試験は、「岩盤不連続面の一面せん断試験方法」(JGS 2541-2008)に則り実施した。但し、独自の仕様として、せん断载荷を繰返しとした。また、上箱側に風化花崗岩、下箱側にステンレス製のブロックを設置し、端面同士を接着した。せん断面を接着することで、接着面の変形特性およびせん断強さを求めた。側板は上下一体のガラス製であるせん断箱を使用し、試験中の標点を写真撮影することで画像解析を行い、境界面の変位を計測した。

### (1) 岩盤と金属の境界部の繰返し変形特性

岩盤とステンレスの境界面のせん断剛性率 $K_s$ 及び減衰定数 $h$ と、局所変位による片振幅せん断変位 $d_{local}$ の関係を図-8に示す。同じく $K_s$ 及び $h$ と外部変位による片振幅せん断変位 $d_{ext}$ の関係を図-9に示す。外部変位は、せん断箱に取付けた外部変位計2点の平均値を用いた。局所変位は、固定箱(上箱)と可動箱(下箱)で標点を各3点を参照し、可動箱の変位から固定箱の変位を減算した相対変位の平均値を用いた。今回は、せん断面の幅10mm

表-5 試験条件(岩盤と金属の境界部の一面せん断試験)

| 項目            | 条件                 |
|---------------|--------------------|
| 入力波           | 正弦波                |
| 周波数 (Hz) ・ 波数 | 0.01 ・ 11          |
| 垂直応力 (MPa)    | 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 |

の結果を表す。垂直応力0.2, 0.5MPaにおいて、せん断面外で破壊が生じた。これにより、局所変位の結果は0.1MPa, 1.0MPaの結果のみを示す。外部変位計の結果より拘束圧依存性が確認されたが、破壊面となり得る不連続面を有する供試体を除く等、選定段階での課題が残った。

## (2) 岩盤と金属の境界部の強度特性

ピーク強度時の強度定数は粘着力 $c_f=0.089\text{MPa}$ 、内部摩擦角 $\phi_f=56.3^\circ$ であった。また、残留強度時の強度定数は後述の表-6に示す非線形式を用いて、そのパラメータは $a=0.33\text{MPa}$ 、 $b=0.75$ であった。

## 10. 不連続面の一面せん断試験

別途実施した岩盤の繰返し岩盤せん断試験<sup>3)</sup>においては、不連続面が存在しており、この影響を検討するためには代表的な不連続面をJOINT要素としてモデル化する必要がある。このため、不連続面の力学特性を得るための試験を実施した。

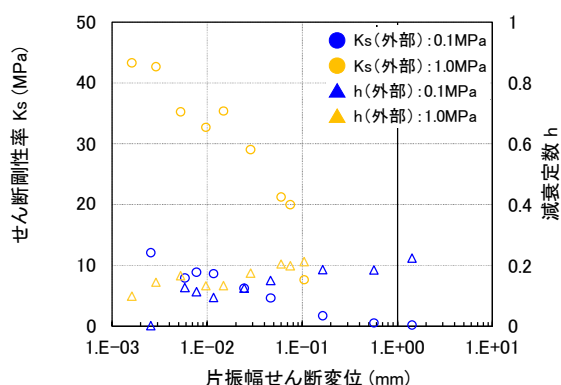


図-8 せん断剛性率及び減衰定数と片振幅せん断変位(局所変位)の関係

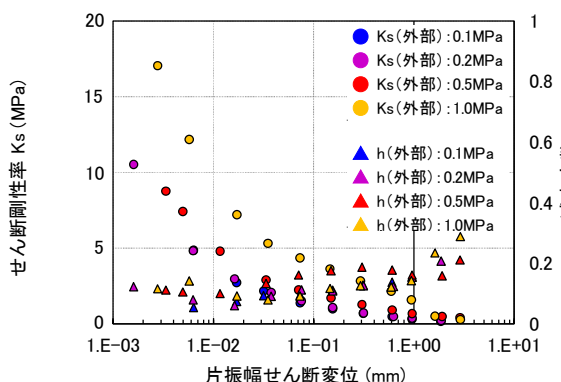


図-9 せん断剛性率及び減衰定数と片振幅せん断変位(外部変位)の関係

当試験の計測方法および载荷条件は、「9. 岩石と金属の境界部の一面せん断試験」と同様である(表-5)但し、不連続面については、人工的に切断し、研磨した状態のものを使用した。この理由は天然の不連続面の状態は多様であり、かつサンプリングが困難であったためである。

## (1) 不連続面の動的変形特性

不連続面のせん断剛性率 $K_s$ 、減衰定数 $h$ と局所変位による片振幅せん断変位 $d_{\text{local}}$ の関係を図-10に示す。同じく $K_s$ 及び $h$ と外部変位による片振幅せん断変位 $d_{\text{ext}}$ の関係を図-11に示す。局所変位は、せん断面の幅10mmの結果を表す。不連続面においても、いずれの計測結果から、拘束圧の依存性が確認された。しかし、今回検証を行う垂直応力においては、その影響は小さいものとし、最も近い垂直応力である、0.5MPaの結果を用いる方針とした。

## (2) 不連続面の強度特性

ピーク強度時の強度定数は粘着力 $c_f=0.048\text{MPa}$ 、内部摩擦角 $\phi_f=38.1^\circ$ であった。また、残留強度時の強度定数は、後述の表-6に示す非線形式を用いて、そのパラメータは $a=0.39\text{MPa}$ 、 $b=0.51$ であった。

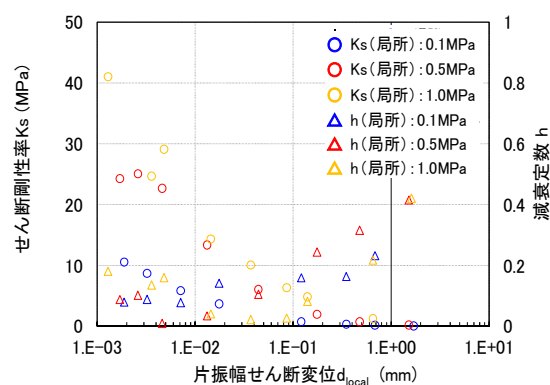


図-10 せん断剛性率及び減衰定数と片振幅せん断変位(局所変位)の関係

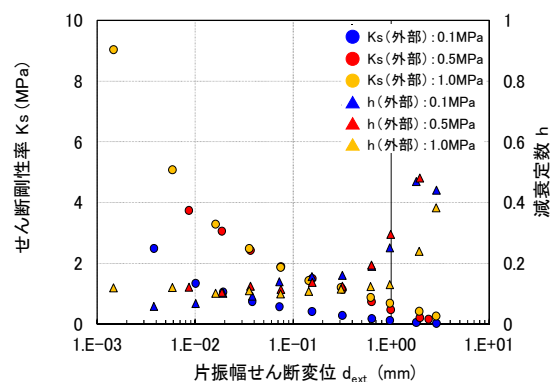


図-11 せん断剛性率及び減衰定数と片振幅せん断変位(外部変位)の関係

## 11. 解析用物性値

各室内試験と追加検討から得られた物性値を踏まえて、風化花崗岩の解析用物性値を表-6の通り定めた。繰返し変形特性の非線形曲線については、別報(4)<sup>9)</sup>に譲る。

表-6 解析用物性値一覧

| 風化花崗岩                                                |                                                     |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 湿潤密度                                                 | $\rho = 2.22 \text{ Mg/m}^3$                        |
| 弾性係数 $E = a \cdot \sigma_3^b$                        | $a = 1.26 \times 10^3 \quad b = 0.09$               |
| 最大せん断強度<br>$\tau_d = c_d + \sigma_m \cdot \tan \Phi$ | $c_d = 0.289 \text{ MPa} \quad \Phi = 60.4^\circ$   |
| 残留強度 $\tau_r = a_r \cdot \sigma_m^{b_r}$             | $a_r = 1.32 \quad b_r = 0.89$                       |
| 引張り強度                                                | $\sigma_t = 0.088 \text{ MPa}$                      |
| 岩石と金属の境界部                                            |                                                     |
| 最大せん断強度<br>$\tau = c_r + \sigma \cdot \tan \Phi_r$   | $c_r = 0.089 \text{ MPa} \quad \Phi_r = 56.3^\circ$ |
| 残留強度 $\tau_r = a \cdot \sigma^b$                     | $a = 0.33 \quad b = 0.75$                           |
| 岩石の亀裂                                                |                                                     |
| 最大せん断強度<br>$\tau = c_f + \sigma \cdot \tan \Phi_f$   | $c_f = 0.048 \text{ MPa} \quad \Phi_f = 38.1^\circ$ |
| 残留強度 $\tau_r = a \cdot \sigma^b$                     | $a = 0.39 \quad b = 0.51$                           |

## 12. おわりに

今回、解析に用いる非線形モデルを検証のための解析用の入力パラメータを確定する為、各種室内試験を実施した。その結果、以下のことが確認できた。

- ・寸法効果の影響により、直径25mmの試験結果を強度定数として用いた。動的変形特性については、直径50mmの繰返し三軸試験結果を用いた。
- ・岩石と金属の境界部および岩石の亀裂の力学特性を求めるため、繰返し一面せん断試験を行った。拘束圧依存

性が確認されたが、局所変位を画像解析で行う為には、せん断面外の不連続面を考慮するなどの課題が見られた。

**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。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) 石丸真ほか: 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) 澤田喬彰ほか: 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(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
- 4) 関口陽ほか: 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
- 5) 落合丘悠ほか: 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
- 6) 岡田哲実, 谷和夫: 原位置岩盤引張り試験方法及び試験装置, 特許第 5337004 号, 2009.
- 7) 岡田哲実ほか: 頁岩を対象とした原位置岩盤引張り試験法の検証, 第 50 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.495-496, 2015.

## CYCLIC DIRECT SHEAR TEST FOR THE WEATHERED GRANITES WITH DISCONTINUITIES (PART 1) -MECHANICAL PROPERTY BASED ON LABORATORY TESTS-

Ryota NAKAMURA, Akira SEKIGUCHI, Tetsuji OKADA, Makoto ISHIMARU,  
Kosuke HIDAKA and Keisuke NOJIRI

Time history nonlinear analysis that can be considered cyclic deformation property and failure history on rock mass is needed. However, there are few validation of the nonlinear analysis and model for rock mass with discontinuities. The purpose of this research is obtain the validation data using the cyclic direct shear test of the weathered granites with discontinuities. This paper shows some kind of laboratory test results for the analysis parameter. Triaxial compression test, cyclic triaxial test, direct tension test and cyclic box shear test are conducted to determine the parameter and the test results are discussed.