

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—

落合 丘悠^{1*}・鈴木 知晃²・石丸 真³・岡田 哲実³・日高 功裕⁴・横田 克哉⁵

¹株式会社アーク情報システム 数理解析部 (〒102-0076 東京都千代田区五番町4-2)

²株式会社アーク情報システム 計算技術開発部 (〒102-0076 東京都千代田区五番町4-2)

³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)

⁴西日本技術開発株式会社 施設開発部 (〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1丁目1番1号)

⁵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: ochiai.takahiro@ark-info-sys.co.jp

繰返し一面せん断試験の再現解析を行い、時刻歴非線形解析の適用性を確認した。試験には不連続面を有する風化花崗岩のブロックサンプリング試料を用いた。解析手法としては有限要素法を用い、室内試験結果を用いて解析用物性値を設定した。石丸らが提案する破壊進展を考慮した岩盤の材料非線形モデルを用いて、供試体を等価な連続体に置換し、平面ひずみ要素でモデル化した。破壊後の付加減衰として、不連続面のせん断破壊による履歴減衰の増加を陽にモデル化することで、マクロな視点において試験結果を再現できることを確認した。

Key Words : Discontinuous rocks, Cyclic direct shear test, Numerical Analysis, Finite element method

1. はじめに

近年、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^{1,2)}。模型実験を対象とした検証事例は蓄積されてきているものの、天然の不連続性岩盤を対象とした事例は少ない。本研究では、不連続面を有する風化花崗岩のブロックサンプリング試料を用いた繰返し一面せん断試験^{3,4)}の数値解析結果を示し、時刻歴非線形解析の適用性を検証した。

2. 解析手法

本研究で用いた材料非線形モデルについて、以下で述べる。なお、解析コードとしては、TDAPIIIを使用し、微小ひずみ理論に基づく有限要素法による繰返し一面せん断試験の再現解析を実施した。

本研究で対象としている時刻歴非線形解析では、慣性力や減衰力は考慮せず、復元力のみを考慮した静的解析

としている。

(1) 材料非線形モデル

材料非線形モデルには、石丸らにより提案されたひずみ依存性や破壊進展を考慮した岩盤のモデル²⁾を適用した。この材料非線形モデルでは、偏差成分に対する応力-ひずみ関係に多重せん断ばねモデルを採用している。

a) 骨格曲線

骨格曲線にはGHEモデル²⁾を採用した。多重せん断ばねモデルでは、仮想的な個々のばねのばね反力-変形量関係で材料の非線形性を考慮することになるが、便宜上、せん断応力-せん断ひずみ関係で記述する。骨格曲線の定義式は、式(1)に示す通りとする。ここで、 τ はせん断応力、 γ はせん断ひずみ、 G_0 は初期せん断弾性係数、 τ_{a0} は初期規準せん断強度とし、 $C_1(\gamma)$ と $C_2(\gamma)$ はそれぞれ骨格曲線を規定するパラメータ $C_1(0)$ 、 $C_1(\infty)$ 、 $C_2(0)$ 、 $C_2(\infty)$ 、 α 、 β から式(2)と式(3)により計算される補正係数である。

減衰特性としては石原らによる仮想の骨格曲線⁵⁾を適用した。定義式は式(4)に示す通りとする。ここで、 h_{max} は最大減衰定数、 G はその時のせん断ひずみにおけるせん断弾性係数、 β_1 は骨格曲線の形状を規定するパラメータをそれぞれ表す。

$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{\frac{1}{C_1(\gamma)} + \frac{1}{C_2(\gamma)} \cdot \frac{G_0 |\gamma|}{\tau_{a0}}} \quad (1)$$

$$C_1(\gamma) = \frac{C_1(0) + C_1(\infty)}{2} + \frac{C_1(0) - C_1(\infty)}{2} \cdot \cos\left\{\frac{\pi}{\alpha/(G_0 |\gamma|/\tau_{a0}) + 1}\right\} \quad (2)$$

$$C_2(\gamma) = \frac{C_2(0) + C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0) - C_2(\infty)}{2} \cdot \cos\left\{\frac{\pi}{\beta/(G_0 |\gamma|/\tau_{a0}) + 1}\right\} \quad (3)$$

$$h = h_{max} \cdot (1 - G/G_0)^{\beta_1} \quad (4)$$

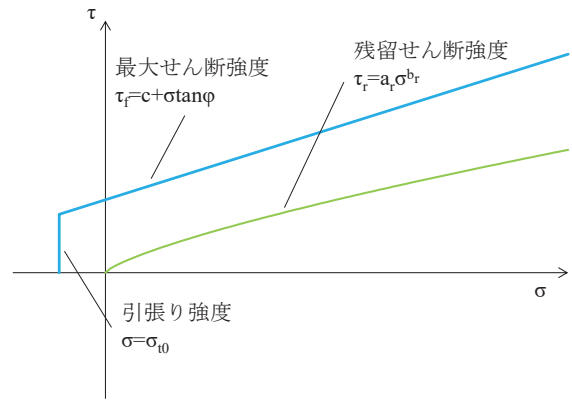


図-1 セン断強度と引張り強度

b) 破壊判定

最大せん断強度、残留せん断強度と引張り強度の模式図を図-1に示す。最大せん断強度を直線式で、残留せん断強度を指数関数式で定義する。

ここで、 τ_f は最大せん断強度、 c と φ は最大せん断強度の粘着力と内部摩擦角、 τ_r は残留せん断強度、 a_r と b_r は残留せん断強度を規定するパラメータ、 σ_{t0} は初期引張り強度をそれぞれ表す。ただし、図-1では圧縮側を正としている。

要素の負担する応力が最大せん断強度や引張り強度を超えると、せん断破壊や引張り破壊が生じる。本研究では、せん断破壊後のひずみ軟化は考慮せず、直ちに残留強度に低下させた。また、引張り破壊後の強度低下はしないものとした。これは、不連続性岩盤では、引張り側の応力状態で亀裂のかみ合わせがはずれると、せん断強度はゼロに低下するが、圧縮側に戻った際には、また元のかみ合わせに戻り、引張り破壊前のせん断強度を発揮するとの考えによる。

c) 応力再配分

せん断破壊や引張り破壊が生じた際は、図-2に示す方法で応力再配分を行う。なお、応力再配分後も主応力方向は不変と仮定する。対象要素に作用する外力と要素の負担する応力による内力との差分は、不釣り合い力として次ステップに引き継ぐ。

せん断応力がせん断強度を超える場合は、平均主応力を一定として、せん断応力が破壊後のせん断強度と等し

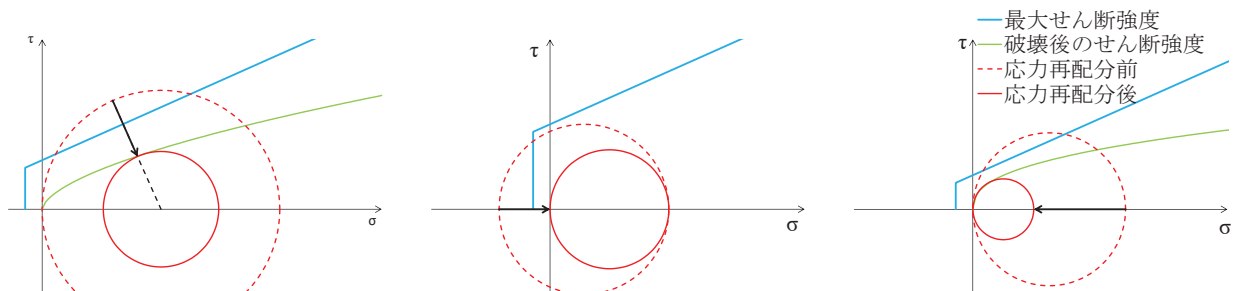
くなるようにモールの応力円を縮小する。

最小主応力（引張り側）が引張り強度を超える場合は、最大主応力（圧縮側）を一定として、最小主応力が破壊後の引張り強度と等しくなるようにモールの応力円を縮小する。モールの応力円を縮小した後も、せん断応力がせん断強度を超える場合は、最大主応力を一定として、せん断応力が破壊後のせん断強度と等しくなるようにモールの応力円を縮小する。

3. 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。不連続面を有する供試体を等価な連続体に置換し、平面ひずみ要素でモデル化した。解析対象は実寸大でモデル化し、FEMのメッシュサイズは20mm×20mmの正方形とした。せん断箱は剛梁要素でモデル化し、供試体とせん断箱の間にはジョイント要素を設けた。ジョイント要素は、供試体とせん断箱間のすべりと剥離をモデル化することを目的として設定した。せん断箱の拘束条件は繰返し一面せん断試験時の条件にあわせて、表-1に示す通りとした。



(a) セン断応力がせん断強度を超えた

(b) 最小主応力が引張り強度を超えた

(c) (b)後もせん断強度を超えている

図-2 余剰応力の配分方法

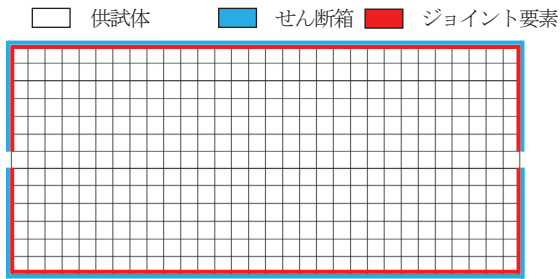


図-3 解析モデル

表-1 せん断箱の拘束条件

垂直力載荷時		せん断力載荷時	
上箱	下箱	上箱	下箱
鉛直ローラー	固定	鉛直ローラー	水平ローラー

(2) 解析ケース

繰返し一面せん断試験と同様に、まず垂直力を載荷し、次にせん断力を繰返し載荷した。

垂直力はせん断箱の上箱の左右上端に節点力として作用させた。作用させる垂直力としては、繰返し一面せん断試験で実施された条件のうち、0.2、0.6、1.0MPaの3ケースを対象とした。せん断力載荷については、垂直力載荷後の応力や変位を引継ぎ、実験で計測されたせん断変位を、せん断箱の下箱への強制変位として入力した。ただし、せん断力載荷時は、想定せん断面上の垂直応力の値が垂直力載荷後のまま、一定（荷重一定制御）となる

表-2 解析用物性値(供試体)

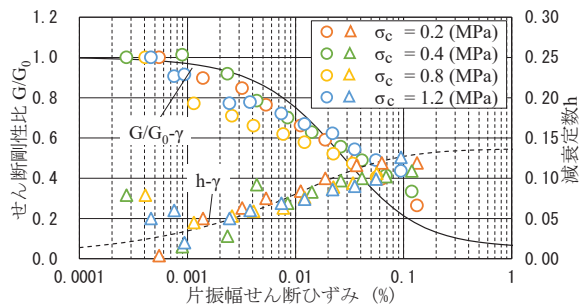
項目	設定値
初期せん断弾性係数 G_0 (kPa)	4.96×10^5
ポアソン比	0.18
最大せん断強度 τ_f (kPa)	$289 + \sigma \cdot \tan 60.4^\circ$
残留せん断強度 τ_r (kPa)	$2.74 \cdot \sigma^{0.89}$
引張り強度 σ_{t0} (kPa)	0.0
破壊後の付加減衰定数 H_f	0.0 または 0.30

表-3 解析用物性値(ジョイント要素)

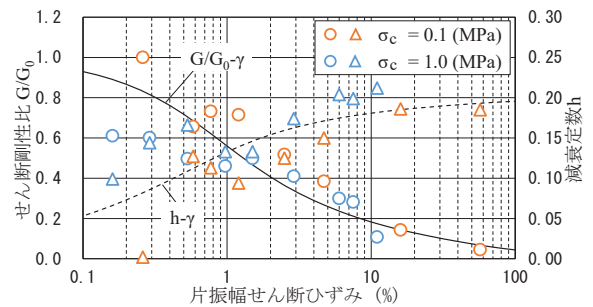
項目	垂直力 (MPa)	設定値
初期せん断弾性係数 G_0 (kPa)	0.2 0.6 1.0	1.60×10^4 2.90×10^4 4.30×10^4
ポアソン比		0.18
最大せん断強度 τ_f (kPa)		$88.7 + \sigma \cdot \tan 56.3^\circ$
残留せん断強度 τ_r (kPa)		$\sigma \cdot \tan 19.3^\circ$
引張り強度 σ_{t0} (kPa)		0.0

ように、垂直方向にも節点力を与えた。せん断力載荷後に、想定せん断面上のせん断力が0となるように荷重を加えて、そのときのせん断箱のせん断変位を残留変位とした。

また、各垂直応力下において、不連続面のせん断破壊による履歴減衰の増加を考慮するケースと考慮しないケースの2ケースを実施した。

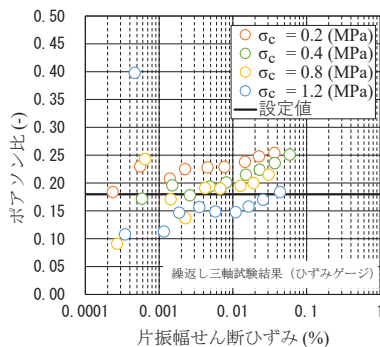


(a) 供試体

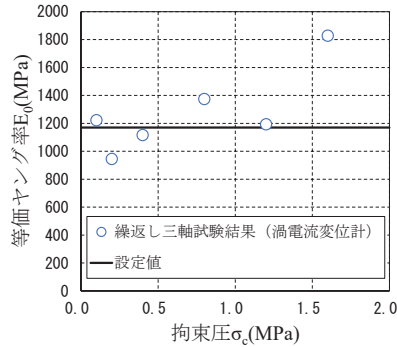


(b) ジョイント要素

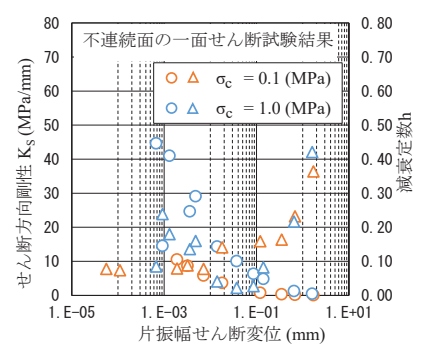
図-4 動的変形特性とフィッティング結果（垂直応力0.6MPa）



(a) ポアソン比



(b) 等価ヤング率



(c) 破壊後の付加減衰定数

図-5 各解析パラメータ設定根拠

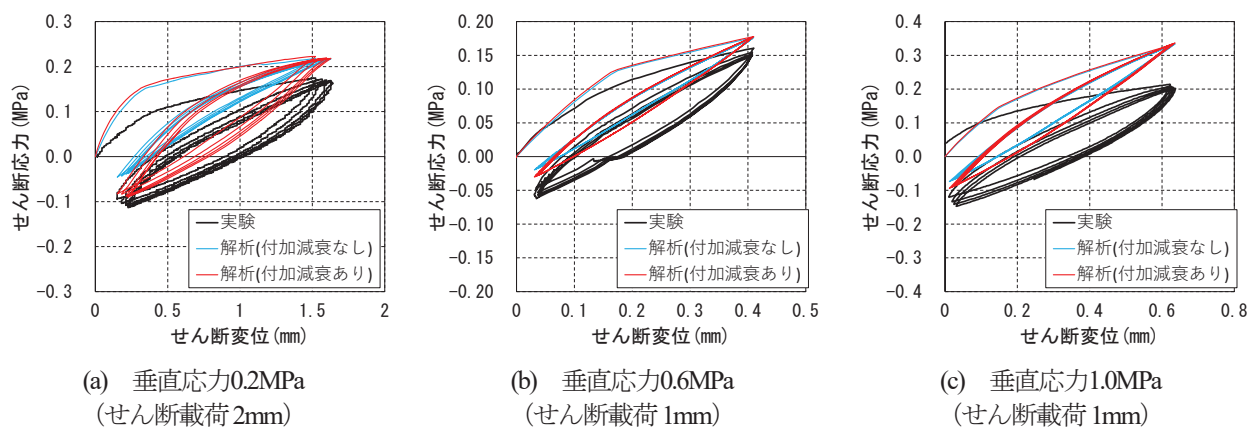


図-6 せん断応力-せん断変位 (せん断変位が小さい範囲)

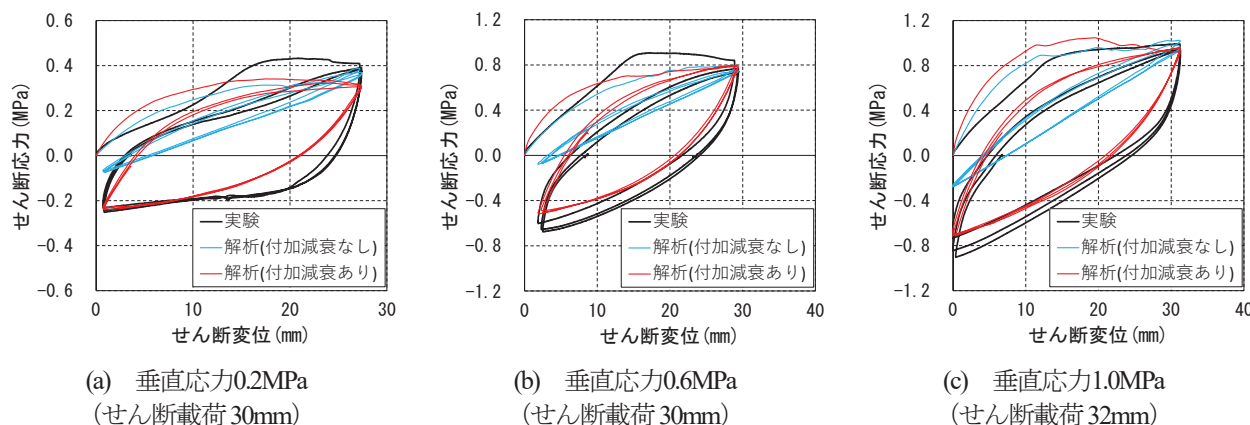


図-7 せん断応力-せん断変位 (せん断変位が大きい範囲)

(3) 解析用物性値

解析用物性値を表-2, 表-3, 図-4, 図-5に示す. 解析用物性値は, 別途実施された室内試験結果⁷⁾に基づいて設定した.

ポアソン比は, 繰返し三軸試験におけるひずみゲージの計測値から設定した. 拘束圧が高くなるにつれ, ポアソン比が小さくなる傾向はみられるが, ばらつきもあるため, 外れ値を除くすべての有効拘束圧の平均値を用いた (図-5(a)).

初期せん断弾性係数は, 同試験の非接触変位計で得られた微小振幅時の等価ヤング率を, 前述のポアソン比で換算して求めた. 有効拘束圧が1.6MPa以下の範囲では, 等価ヤング率の拘束圧に対する依存性は確認されなかったため, 有効拘束圧が1.6MPaより小さい範囲の等価ヤング率の平均値を用いた (図-5(b)).

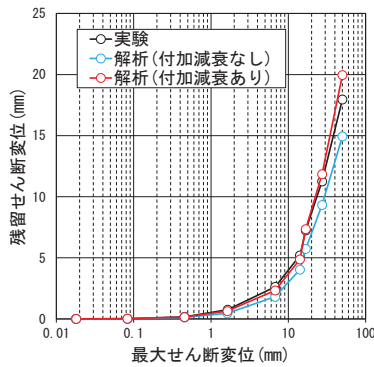
破壊前の動的変形特性については, 繰返し三軸圧縮試験結果 (非接触変位計) に基づいて設定した. 各解析ケースについて, それぞれの拘束圧に近い条件下における繰返し三軸圧縮試験結果を用いてパラメータを設定した. 代表として, 垂直力0.6MPaの破壊前の動的変形特性を図-4(a)に示す. 供試体の室内試験結果で得られた減衰定数は0.15程度を上限としているのに対し, 図-5(c)に示す不連続面の繰返し一面せん断試験で得られた減衰定数は

0.45程度にまで達している. この減衰定数の差は破壊に伴う減衰定数の増加と考えられるため, せん断破壊による履歴減衰の増加を考慮するケースでは, 破壊後の付加減衰定数として0.30を設定した.

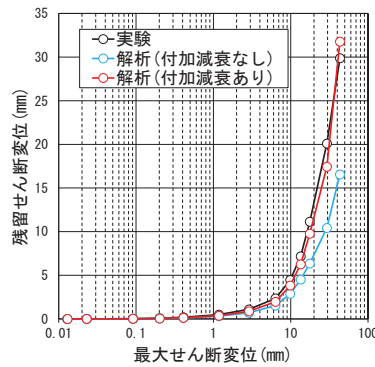
室内試験結果において, ひずみゲージと非接触変位計とは, 計測間隔が異なっている. ひずみゲージは, 非接触変位計に比べて, 計測間隔が小さいため, 比較的連続面を含んでいないと考えられる. 本研究では, 不連続面を有する供試体を等価連続体としてモデル化しているため, 基本的に非接触変位計の計測値を用いた. ただし, 非接触変位計では一方向のみのひずみを取得しているため, ポアソン比が得られていない. そのため, ポアソン比を設定する際は, ひずみゲージの計測値を用いた.

強度定数は, 寸法効果の影響を考慮し, FEMモデルのメッシュサイズに近い, 直径25mm×高さ50mmの供試体による単調载荷の三軸圧縮試験結果を用いた. なお, 引張り強度は亀裂の影響を考慮して, 保守的にゼロとした.

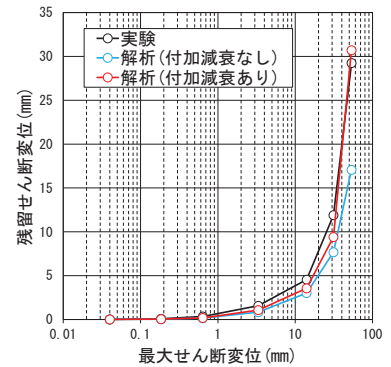
供試体とせん断箱間のすべりと剥離をモデル化したジョイント要素の解析用物性値を表-3に示す. ジョイント要素の動的変形特性および強度定数は, 図-4(b)に示す岩石と金属の境界部の繰返し一面せん断試験結果より定めた. 試験結果の微小振幅時のせん断剛性を初期せん断剛性とし, 垂直応力に対する依存性を考慮し, 解析ケースの垂直応力で線形補間して得られた値を解析に用いた.



(a) 垂直応力0.2MPa



(b) 垂直応力0.6MPa



(c) 垂直応力1.0MPa

図-8 残留変位

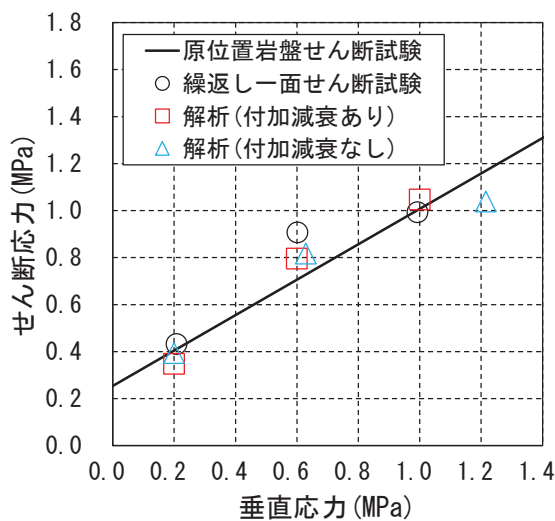


図-9 最大せん断強度

規準せん断ひずみは、各解析ケースの拘束圧を考慮して設定した。GHEパラメータは各解析ケースで共通とした。代表として、垂直力0.6MPaのジョイント要素の動的変形特性を図-4(b)に示す。また、このジョイント要素は、圧縮剛としている。

4. 解析結果

図-6と図-7にせん断力载荷時のせん断変位が小さい範囲と大きい範囲における、せん断応力-せん断変位の関係を実験結果と比較して示す。破壊後の付加減衰を付与したケースでは、履歴ループの面積や形状が実験結果とよく一致していることが確認できる。一方、付加減衰なしのケースでは、履歴ループの面積が著しく小さくなり、実験結果を再現できていない。

図-8に载荷ステップごとの残留変位を実験結果と比較して示す。破壊後の付加減衰を付与することで、実験結

果をよく再現できていることが確認できる。

図-9に最大せん断強度を繰返し一面せん断試験結果と比較して示す。付加減衰ありのケースと付加減衰なしのケースともに、解析結果は試験結果と概ね整合しており、最大せん断強度のみに着目すると、付加減衰の影響は確認できない。ただし、垂直応力1.0MPaにおける付加減衰なしのケースでは、想定せん断面上の垂直応力を一定に制御できなかった。また、図-9には同岩種・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結果もあわせて示している。それぞれの解析ケースにおいて、最大せん断強度については、原位置岩盤せん断試験結果と概ね整合した解析結果が得られていることを確認できる。なお、表-2に示す供試体の内部摩擦角は 60.4° となっているのに対し、原位置岩盤せん断試験では 37.0° となっている。このことは、せん断力载荷時に垂直応力の低下に伴い、せん断強度が低下した端部から破壊が進展するため、想定せん断面上で評価した場合の見かけの内部摩擦角が表-2に示す値よりも小さくなっていると考えられる。

5. まとめ

不連続面を有する風化花崗岩の繰返し一面せん断試験を対象に、有限要素法（等価連続体近似）に基づく非線形解析の適用性について検討した。

室内試験結果を用いて物性値を設定し、不連続面のせん断破壊による履歴減衰の増加を、破壊後の付加減衰として考慮することで、想定せん断面上に着目した供試体スケールのマクロな視点においては、実験結果を再現できることを確認できた。また、垂直力の異なる3ケースを実施することで、垂直力によらず実験結果をよく再現することができた。

繰返し一面せん断試験では、垂直力载荷後にせん断力

載荷を行っているが、せん断力載荷時に垂直応力が一定となるように垂直力載荷も同時に行っている。同様の条件下で解析を実施することで、実験結果と整合した最大せん断強度が得られることを確認できた。

各垂直応力のケースにおいて、最大せん断強度に達する時点で想定せん断面上のせん断ひずみは80%以上に達している。本研究では、微小ひずみ理論に基づく解析手法を使用しているため、より適用範囲の広い有限ひずみ理論も視野にいれて検討を行う必要も考えられる。

謝辞：本論文は北海道電力、東北電力、東京電力ホールディングス、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電、電源開発、日本原燃による原子力リスク研究センター共通研究（2018～2020年度）によって得られた成果である。本研究に際して、関西電力株式会社の松居伸明殿、株式会社セレスの関口陽殿、関係者の皆様に御協力いただきました。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) 石丸真，岡田哲実，中村大史，河井正，風間基樹：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，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.
- 4) 関口陽，日高功裕，澤田喬彰，岡田哲実，石丸真，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（3）—画像解析による岩盤の変位・変形の計測—，第48回岩盤力学に関するシンポジウム，2022.
- 5) Tatsuoka F. and Shibuya S. : Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, Proc. 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, 101-170, 1992.
- 6) Ishihara K., Yoshida N. and Tsujino S. : Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, Proc. 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 1, 373-380, 1985.
- 7) 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.

CYCLIC DIRECT SHEAR TEST FOR THE WEATHERED GRANITES WITH DISCONTINUITIES (PART 4)

— SIMULATION BY THE FINITE ELEMENT METHOD —

Takahiro OCHIAI, Tomoaki SUZUKI, Makoto ISHIMARU, Tetsuji OKADA,
Kosuke HIDAKA and Katsuya YOKOTA

In this study, Applicability of time history nonlinear analysis was confirmed, by the simulation of cyclic direct shear tests on rocks. The weathered granites with discontinuities were used for the tests. The simulation was done by the finite element method, physical characteristics for simulation were determined by the result of laboratory test. Rock configuration model suggested by Ishimaru et al. was used. Specimen was replaced equivalent continuum and modeled on the planar strain element. Considering additional damping after destruction, the simulation result consistent with tests from a macro perspective was obtained.