

風化花崗岩の繰返し一面せん断試験の数値解析

(株) アーク情報システム ○鈴木 知晃, 落合 丘悠

(一財) 電力中央研究所 日高 功裕, 関口 陽, 石丸 真, 岡田 哲実

関西電力(株) 横田 克哉, 松居 伸明

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, 天然の岩盤を用いた事例は少ない. 本論文では, 軟岩での事例³⁾に続き, 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⁴⁾の数値解析結果を示す.

2. 解析手法

解析コードとして TDAPIII を使用し, 石丸らが提案する破壊進展を考慮した岩盤の構成モデル^{2),3)}を組み込んで, 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. 本構成モデルの特徴を以下に列挙する. 詳細は文献を参照されたい.

- ・ 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.
- ・ 材料の異方性は考慮しない等方モデルである.
- ・ 骨格曲線に, 微小ひずみから最大せん断強度に至るまでの広いひずみ領域で実験値にフィッティング可能な, GHE モデルを採用している.
- ・ せん断破壊および引張り破壊を考慮している.
- ・ 破壊後の強度低下と余剰応力の再配分を考慮している.

3. 解析条件

1) 解析モデル

解析モデルを図-1 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. FEM メッシュは 20mm×20mm の正方形である.

せん断箱は剛体とし, 供試体とせん断箱の間にジョイント要素を設けた. 拘束条件を表-1 に示す.

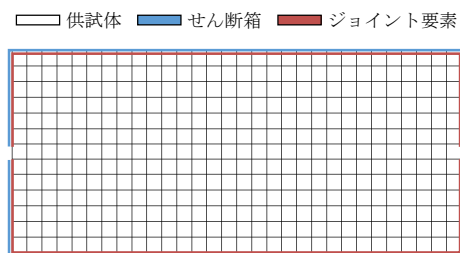


図-1 解析モデル

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) 解析用物性値

供試体の解析用物性値を表-2 に示す. 解析用物性値は, 別途実施された室内試験結果⁵⁾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. 初期せん断弾性係数は, 同試験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. 破壊前の動的変形特性については, 図-2 に示すとおり, 繰返し三軸圧縮試験結果(渦電流変位計)に基づいて設定した. 不連続面の破壊による履歴減衰の増加を考慮するケースとして, 破壊後の付加減衰定数に 0.30 を設定した. この値は, 不連続面の繰返し一面せん断試験で最大減衰定数が 0.45 となったことを根拠としている.

強度定数は, 寸法効果の影響を考慮し, FEM メッシュサイズに近い, 直径 25 mm×高さ 50 mm の供試体による単調載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. また, 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. ただし, 引張り破壊後は強度低下しないものとした. 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一旦外れ, 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. この点は軟岩での事例³⁾と異なる.

ジョイント要素の剛性(動的変形特性)および強度定数は, 岩石と金属部の繰返し一面せん断試験結果より定めた. ただし, 圧縮方向は剛としている.

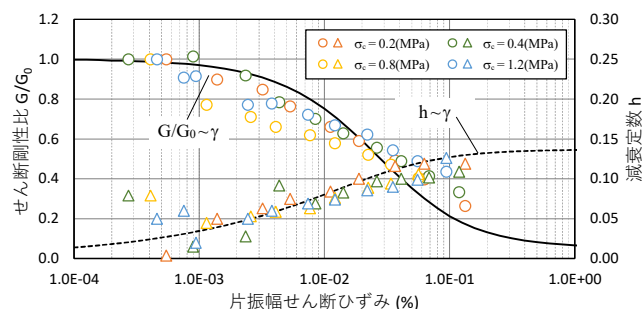


図-2 動的変形特性とフィッティング結果

キーワード 不連続性岩盤, 繰返し一面せん断試験, 数値解析, 有限要素法

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

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_t (kPa)	0.0
破壊後の付加減衰定数 H_r	0.0 または 0.30

3) 解析方法と载荷条件

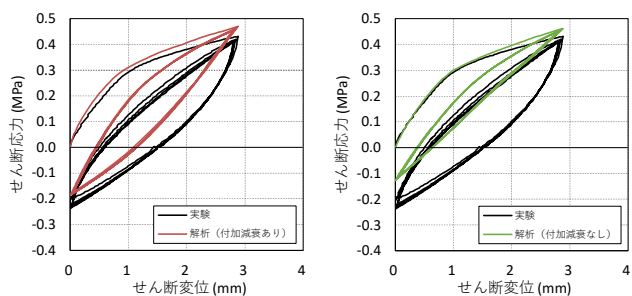
実験⁴⁾と同様に、まず垂直力を载荷し、次にせん断力を繰返し载荷した。垂直力はせん断箱の上箱の左上端に節点力として作用させた。せん断力载荷については、垂直力载荷後の応力や変位を引継ぎ、実験で計測されたせん断変位を、せん断箱の下箱への強制変位として入力した。ただし、せん断力载荷時は、想定せん断面上の垂直応力が一定(荷重一定制御)となるよう、垂直方向にも節点力を与えた。

4. 解析結果

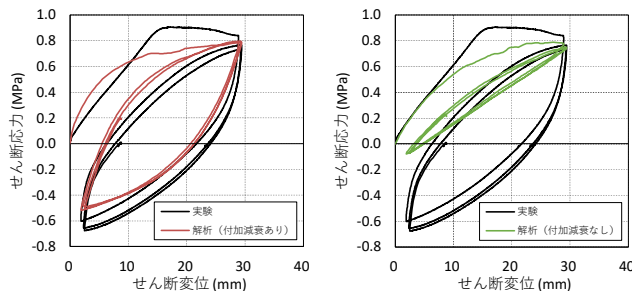
図-3 にせん断力载荷時のせん断力ーせん断変位の関係を実験結果と比較して示す。破壊後の付加減衰を付与したケース(同図左)では、履歴ループの面積や形状が実験結果とよく一致していることが確認できる。一方、付加減衰なしのケースでは、履歴ループの面積が著しく小さくなり、実験結果を再現できていない。

図-4 に载荷ステップごとの残留変位を示す。付加減衰を付与することで、実験結果を再現できていることが分かる。

図-5 に最大せん断強度を示す。解析結果は実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、付加減衰の有無による差は見られない。ただし、垂直応力 1.0 MPa で付加減衰なしのケースでは、垂直応力を一定に制御できなかった。



(a) せん断载荷 4mm



(b) せん断载荷 30mm

図-3 せん断力ーせん断変位(垂直応力 0.6MPa)

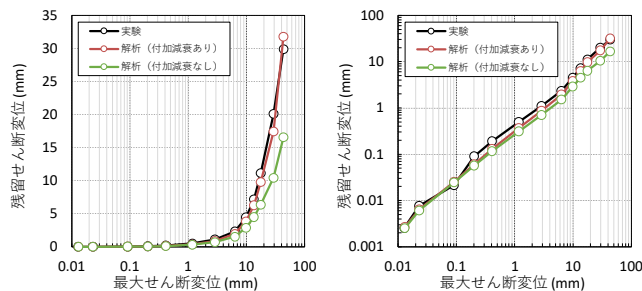


図-4 残留変位(垂直応力 0.6MPa)

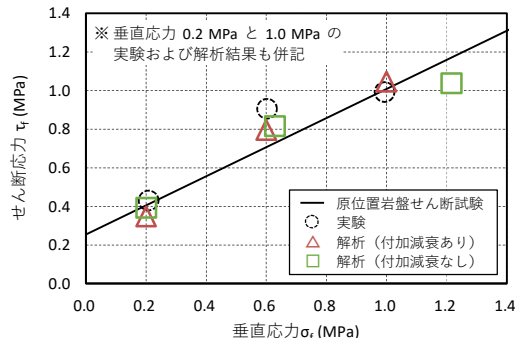


図-5 最大せん断強度

5. おわりに

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、マクロな視点において、実験結果を再現できることが確認できた。

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(2018~2020年度)によって得られた成果である。

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) 日高ほか: 天然の軟岩を対象とした繰返し一面せん断試験の数値解析, 土木学会年次学術講演会, 2020.
- 4) 澤田ほか: ブロックサンプリングした風化花崗岩の繰返し一面せん断試験, 土木学会年次学術講演会, 2021.
- 5) 岡田ほか: 風化花崗岩を用いた寸法の異なる三軸圧縮試験, 土木学会年次学術講演会, 2021.