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

(一財)電力中央研究所 〇日高功裕, 関口 陽, 石丸 真, 岡田哲実

- (株) セレス 中村良太
- (株) ダイヤコンサルタント 澤田喬彰
- 関西電力(株) 横田克哉,松居伸明

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^{1),2)}.解析手法の検証には,これまで人工岩を用いた遠心力載荷模型実験が用いられてきたが^{1),2)},天然の岩盤を対象とした検証事例は少なかった.そこで,本研究では,時刻歴非線形解析の検証用データを取得するため,サンプリングした大型の軟岩ブロックを用いて繰返し一面せん断試験を実施した.本報告では,要素試験より得られた解析物性値を用いて,繰返し一面せん断試験の数値解析を実施し,実験結果と比較した.

2. 要素試験

繰返し一面せん断試験用の軟岩ブロックと同じ場所 から採取した凝灰岩を用いて,繰返し三軸試験,平面ひ ずみ圧縮試験,一軸引張り試験を実施した.その結果を 表-1に示す.

項目	設定値 (試験方法)		
湿潤密度	ρ _t =1.59 Mg/m ³ (岩石の密度試験より)		
初期せん断弾性係数	G₀=197400 kN/m²		
σ≦400kN/m ²	(繰返し三軸試験)		
初期せん断弾性係数	G₀=3162・σ ^{0.69} kN/m ²		
σ≧400kN/m²	(繰返し三軸試験)		
最大せん断強度	a _f =34.9 b _f =0.53		
$\tau_f = a_f \cdot (\sigma + \sigma_t)^{b_f}$	(平面ひずみ圧縮試験,一軸引張り試験)		
最大せん断強度	c _f =820 kN/m ² φ _f =27.3°		
(参考値)	(平面ひずみ圧縮試験)		
残留強度	a=46.5 b=0.41		
_{て r} =a・σ ^b	(平面ひずみ圧縮試験)		
残留強度 (参考値)	c _r =503 kN/m ²		
引張り強度	σ _t =101 kN/m ² (一軸引張り試験)		

表-1 要素試験結果

3. 解析手法

解析モデル¹⁾は、2次元平面ひずみ状態において、多 重せん断ばねモデル³⁾に基づいて導出された応力-ひ ずみ関係に、剛性のひずみ依存性や破壊の影響を考慮 した材料非線形モデルを導入したものである.なお,多 重せん断ばねモデルのばねは等方としている.

破壊前の骨格曲線ついては、GHEモデル⁴⁾を用いる. 破壊後の骨格曲線についても破壊前同様、GHEモデル を用いるが、規準せん断強さ τ_a は破壊の程度に応じて初 期値 τ_{a0} から残留せん断強さ τ_r まで徐々に低下する.

引張り破壊後の強度低減については、破壊面の数に 応じてせん断強度および引張り強度を等方的に低減す る.具体的には、破壊面の角度を主応力面で規定した上 で、ある角度で分割した平面上(分割数 N)で破壊面の 数 $n_f \varepsilon$ 力ウントし、式(1)により τ_a を低減し、式(2) により引張り破壊の影響を考慮した引張り強度 σ_{tr} を 低減する.

$$\tau_{\rm a} = \tau_{\rm as} \cdot (1 - n_{\rm f}/N)^{\alpha_1} + \tau_{\rm r} \cdot \{1 - (1 - n_{\rm f}/N)^{\alpha_1}\}$$
(1)

$$\sigma_{\rm tr} = \sigma_{\rm ts} \cdot (1 - n_{\rm f}/N)^{\alpha_1} \tag{2}$$

ここに、 τ_{as} : せん断破壊の影響を考慮した規準せん 断強度、 α_1 : 引張り破壊後の強度低下調整パラメータ、 σ_{ts} : せん断破壊の影響を考慮した引張り強度である.

せん断破壊後の規準せん断強さ τ_{as} と引張り強さ σ_{ts} の モデル化については、ひずみ軟化の勾配を考慮し、せん 断ひずみの発生量に応じて、下記の式(3)、式(4)に より徐々に低下する.

$$\tau_{\rm as} = \tau_{\rm r} + \frac{(\tau_{\rm a0} - \tau_{\rm r})}{(A \cdot \gamma^p + 1)} \tag{3}$$

$$\sigma_{\rm ts} = \frac{\alpha}{(A \cdot \gamma^p + 1)} \tag{4}$$

ここに、 σ_{t0} :破壊前の引張り強度、 γ^{p} :せん断破壊 後の γ の最大値(せん断破壊時からの増分量),A:ひず み軟化係数である. A は $\tau_{as} \geq \sigma_{ts}$ の低下の傾きを決める パラメータであり、値が大きいほど $\tau_{as} \geq \sigma_{ts}$ が早く低下 する.

4. 繰返し一面せん断試験

実験の概要については別報⁴⁾に示す. No. S-L-1(初期 垂直応力 1.6MPa)のせん断力の載荷ステップを表-2に 示す. せん断変位振幅を徐々に大きくして最大せん断 応力を確認するまで載荷した.

キーワード 天然の軟岩,繰返し一面せん断試験,時刻歴非線形解析,せん断破壊,残留変位 連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所

	X 2	7 7	リハノノ・	<u> </u>
載荷	実験の載荷条件			波形
ステップ	内容	波数	載荷速度	100.712
Step06	せん断変位振幅0.005mm		1(Hz)	
Step07	せん断変位振幅0.005mm	11	0.1(Hz)	三角波片振り
Step08	せん断変位振幅0.005mm	3	0.01(Hz)	
Step09	せん断変位振幅0.005mm			三角波両振り
Step10	せん断変位振幅0.005mm			サイン波
Step11	せん断変位振幅0.005mm			
Step12	せん断変位振幅0.01mm			
Step13	せん断変位振幅0.02mm		11 0.1(Hz)	
Step14	せん断変位振幅0.04mm	11		
Step15	せん断変位振幅0.16mm			
Step16	せん断変位振幅0.64mm			ハーバー サイン波
Step17	せん断変位振幅1.00mm			7 T T M
Step18	せん断変位振幅2.00mm			
Step19	せん断変位振幅4.00mm			
Step20	せん断変位振幅8.00mm			
Step21	せん断変位振幅16.00mm			

表−2 載荷ステップ

5. 数値シミュレーションの概要

供試体については平面ひずみ要素を用いてモデル化 し、せん断箱については剛梁を用いてモデル化した(図 -1).供試体とせん断箱の境界については、せん断、引 張り方向において、供試体と同様の物性値のジョイン ト要素を設定した.また、圧縮方向においては、剛なジ ョイント要素を設定した.



図-1 解析モデル

実験と同様に,まず垂直力載荷を行い,次にせん断力 載荷を実施した.垂直力載荷については,実験による垂 直力の値をせん断箱の上箱の左右上端に節点力として 与えた.せん断力載荷については,垂直力載荷終了時の 応力や変位を引継ぎ,実験の変位を,せん断箱の下箱の 右端上部強制変位として与えた.ただし,いずれのケー スも加速度・速度を考慮せず,静的に載荷した.せん断 力載荷の各ステップ終了した後,残留変位量を実験と 解析で比較した.強度,剛性等の基本的な解析物性値を 表-3 に示す.

静・動ポアソン比		0. 39
初期せん断弾性係数	kPa	4. 450 × 10⁵
せん断強度(健全)	kPa	34.9 • $(\sigma + \sigma_t)^{0.53}$
せん断強度(残留)	kPa	46. 5 $\sigma^{0.41}$
引張り強度 $\sigma_{\rm t}$	kPa	101
分割数N		12
強度低減係数 α_1		0. 5
ひずみ軟化係数 A		30

表-3 解析物性值

6. 解析結果

図-2 に、せん断力載荷時のせん断応カーせん断変位 の関係を実験結果と比較して示す.実験結果と解析結 果を比較すると、せん断変位振幅が小さい時は、解析は 剛性を過大評価しているが,変位振幅が大きくなると, 実験結果と概ね同等程度であった.

図-3 に,残留変位を実験結果と比較して示す.いず れのケースにおいても,最大せん断強度以前での残留 変位については,実験とほぼ同等の結果となった.しか し,最大せん断強度後のステップ以降は解析結果の方 が実験結果より小さい結果となった.



7. おわりに

本検討の結果,最大せん断応力や最大せん断強度以 前での残留変位については実験結果と概ね同等の結果 が確認された.今後,他の実験ケースと合わせて,検討 を進める予定である.

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)による原子カリスク研究センタ 一共通研究(2019年度)によって得られた成果である。

参考文献

- 石丸・河井: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, Vol.73, No.1, 23-38, 2017.
- Towhata and Ishihara: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 1, pp. 523-530, 1985.
- 4) Tatsuoka and Shibuya: Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, Proc. 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 101-170, 1992.
- 5) 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.