

岩盤の破壊現象を対象とした3次元非線形構成モデルの開発と解析例

電力中央研究所 正会員 ○石丸 真
 電力中央研究所 正会員 小早川 博亮
 電力中央研究所 正会員 沢津橋 雅裕
 電力中央研究所 正会員 岡田 哲実

1. はじめに

近年、重要構造物の基礎岩盤あるいは周辺の岩盤斜面のリスク評価等において、非常に大きな地震を想定した安定性・安全性評価が求められている。このようなケースに対しては、従来の等価線形解析に基づくすべり安全率評価よりも、動的解析による変形・変位量に基づく評価が有効と考えられる。

本研究では、岩盤のせん断破壊および引張り破壊の影響を考慮した3次元非線形構成モデルの開発を行い、岩盤斜面の遠心力模型実験¹⁾を対象に試解析を実施した。

2. 3次元非線形構成モデルの概要

3次元多重せん断ばねモデルに基づいて導出された応力-ひずみ関係に、ひずみ依存性や破壊の影響を考慮した非線形構成モデルを開発した。非線形構成モデルの概要を以下に示す(圧縮を正とする、詳細は文献2)を参照)。

骨格曲線は、下記のGHEモデルを用いる(以下では、せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係で記述する)。

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

ここに、 G_0 ：初期せん断弾性係数、 τ_{a0} ：初期規準せん断強度、 $C_1(\gamma)$ と $C_2(\gamma)$ は補正係数である。一方、減衰特性は仮定の骨格曲線を導入し、最大減衰定数 h_{\max} を規定した以下のモデルに従うものとする。

$$h = h_{\max} \cdot (1 - G_R/G_0)^{\beta_1} \quad (2)$$

ここに、 G_R ：除荷点のひずみレベルにおけるせん断弾性係数、 β_1 ：減衰特性に関する調整パラメータである。

せん断破壊の判定は $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \geq \tau_f$ 、引張り破壊の判定は $\sigma_3 \leq \sigma_t$ とする。ここに、 τ_f ：ピークせん断強度、 σ_t ：引張り強度、 σ_1 ：最大主応力、 σ_3 ：最小主応力である。

破壊後はGHEモデルにおける規準せん断強度 τ_a (初期値 τ_{a0})が残留強度 τ_r に、引張り強度 σ_t がゼロに低下する。まず、引張り破壊については、本モデルでは引張り破壊面の数に応じて全方向の強度を一律に低減することを考える。すなわち、X-Z面およびY-Z面の解析領域をある角

度で分割(N ：分割数)し、主応力面の方向で規定した引張り破壊面が含まれる分割領域の数 n_f を履歴つきでカウントして、以下の式により τ_a と σ_t を徐々に低減する。

$$\tau_a = \tau_{as} \cdot \left(1 - \frac{n_f}{N}\right)^{\alpha_1} + \tau_r \cdot \left\{1 - \left(1 - \frac{n_f}{N}\right)^{\alpha_1}\right\} \quad (3)$$

$$\sigma_t = \sigma_{ts} \cdot \left(1 - \frac{n_f}{N}\right)^{\alpha_1} \quad (4)$$

ここに、 α_1 ：引張り破壊後の強度低減に関する調整パラメータ ($0 \leq \alpha_1$)、 τ_{as} ：せん断破壊の影響を考慮した規準せん断強度、 σ_{ts} ：せん断破壊の影響を考慮した引張り強度である。分割数 $N=1$ の場合、引張り破壊後は直ちに $\tau_a = \tau_r$ 、 $\sigma_t = 0$ となる。一方、 $\alpha_1 = 0$ の場合は $\tau_a = \tau_{as}$ 、 $\sigma_t = \sigma_{ts}$ となり、引張り破壊による強度低減は考慮しない。

せん断破壊の影響を考慮した τ_{as} および σ_{ts} は、せん断破壊後のひずみ軟化の勾配を考慮し、せん断破壊後のひずみの発生量に応じて、以下の式により徐々に低減する。

$$\tau_{as} = \tau_r + \frac{\tau_{a0} - \tau_r}{A \cdot \gamma^p + 1} \quad (5)$$

$$\sigma_{ts} = \frac{\sigma_{t0}}{A \cdot \gamma^p + 1} \quad (6)$$

ここに、 σ_{t0} ：初期(破壊前)の引張り強度、 γ^p ：最大せん断ひずみ γ_{\max} 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。ひずみ軟化係数 A は、 τ_{as} と σ_{ts} の低下の傾きを定めるパラメータであり、値が大きいかほど強度低減が早く、 $A=0$ の場合はせん断破壊による強度低減は考慮しない。

応力再配分の方法は下記の通りである。

- せん断破壊に対して、平均主応力固定でせん断強度に接するまでモールの応力円を縮小。
- 引張り破壊に対して、最大主応力固定で最小主応力=引張り強度 σ_t までモールの応力円を縮小。この処理の後でもせん断強度を超えている場合は、最小主応力固定でせん断強度に接するまでモールの応力円を縮小。
- 作用外力と応力から算定した内力の差(不釣合力)を作用。

キーワード 岩盤、動的解析、破壊、ひずみ軟化、応力再配分

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部

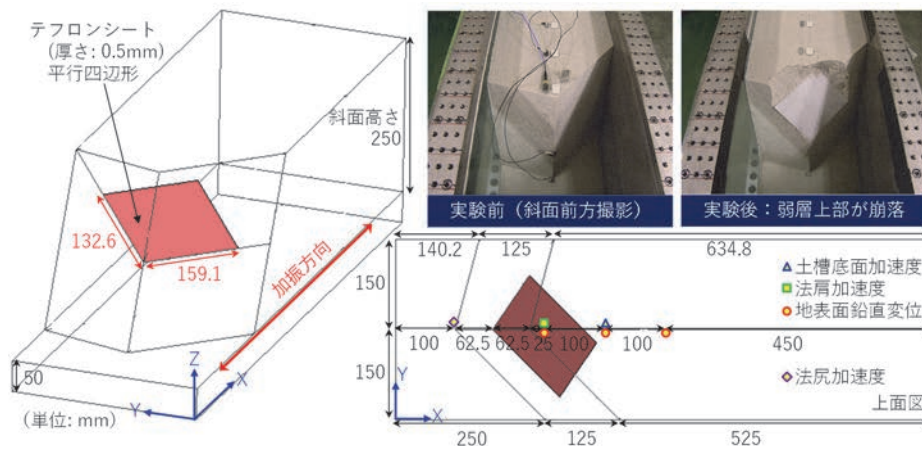


図-1 弱層を有する凸型斜面模型¹⁾

表-1 物性値とパラメータ

	人工岩	弱層
単位体積重量	20.3kN/m ³	20.6kN/m ³
ピーク強度	$c_p=226.6\text{kN/m}^2$ $\phi_p=39.4^\circ$	$c_p=0.0\text{kN/m}^2$ $\phi_p=24.5^\circ$
残留強度	$a=3.05, b=0.77$ $\ast a \cdot \sigma_m^b$	$c_r=0.0\text{kN/m}^2$ $\phi_r=17.9^\circ$
引張り強度	-57.6kN/m ²	0.0kN/m ²
初期せん断弾性係数	666000kN/m ²	3230kN/m ²
ポアソン比	0.33	0.49
解析モデル	8節点アイソパラメトリック要素	ジョイント要素
ひずみ軟化係数	A=300	-
引張り強度低減	N=12, $\alpha_1=0.25$	-

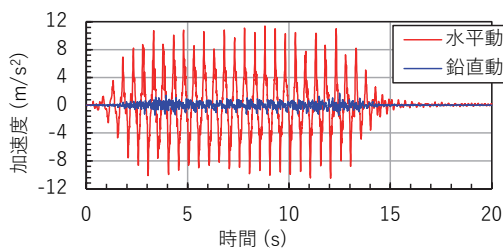


図-2 土槽底面加速度（鉛直動は振動台のロッキングにより発生，実物換算値）

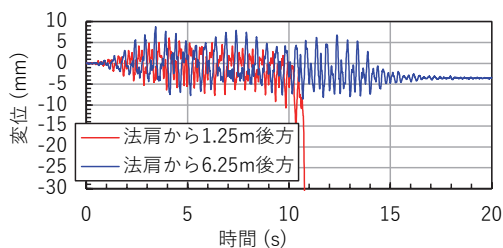


図-3 斜面模型天端の鉛直変位（実物換算値）

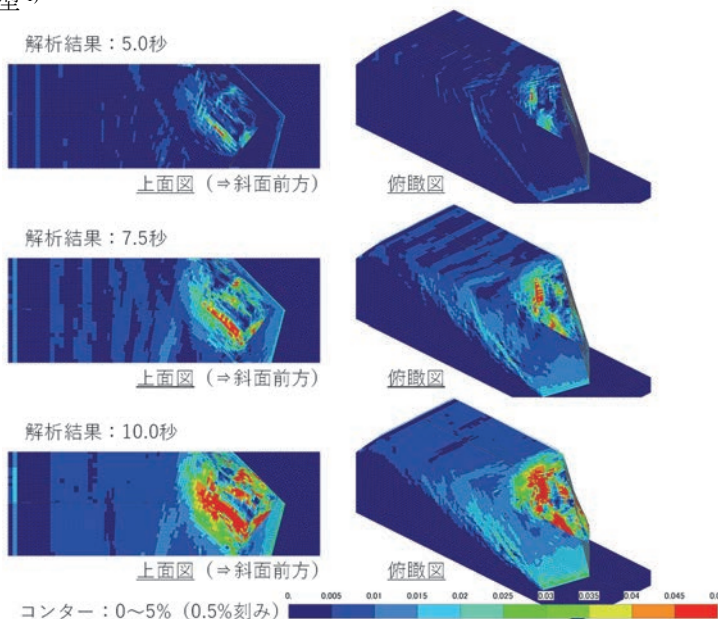


図-4 最大せん断ひずみ分布（変形倍率 10 倍）

3. 弱層を有する凸型斜面の動的遠心力模型実験¹⁾

実験に用いた斜面模型を図-1に示す。斜面模型は人工岩と厚さ0.5mmのテフロンシート（弱層を模擬）で作製した。表-1には、それぞれの物性値を示す。遠心加速度50G場で、振動数100Hz（実物換算2.0Hz、以降は実物換算値で示す）の正弦波20波（前後に各4波のテーパつき）を、加振ステップごとに加速度振幅を段階的に大きくして入力した（入力は水平1方向のみ）。図-2および図-3に、斜面模型が崩壊した加振ステップの土槽底面加速度と、法肩周辺の鉛直変位をそれぞれ示す。また、実験後の斜面模型の様子を図-1に示す。これらより、7～8秒付近から弱層上部が脆性的に崩落したことが確認できる。

4. 遠心力模型実験を対象とした解析例

遠心力模型実験の数値解析は、表-1に示した物性値を用いて、TDAPIII クラスタ版に2章の構成モデルをユーザー非線形モデルとして組み込んで実施した。数値解析においては、自重解析後、加振履歴を考慮せず、斜面模型が崩壊した加振ステップの加速度波形（図-2）を入力した。図-4に、解析結果として最大せん断ひずみ分布を示

す。5秒経過時から、弱層上端部付近の斜面天端において大きなひずみが発生し、7.5秒経過時では弱層上端部直上に、直線状に4.5%を超えるひずみが発生している様子が確認できる。その後、10秒経過時では弱層上部が滑り落ちており、実験の崩壊形状を概ね再現できている。ただし、現状ではまだ変位量等の定量的な評価には至っていないため、今後、破壊後の強度特性に関するパラメータの見直しを含めて、より詳細に検討を行う予定である。

5. おわりに

本研究では、3次元多重せん断ばねモデルに基づいて導出された応力-ひずみ関係に、岩盤の破壊の影響を考慮した非線形構成モデルを開発した。今後、妥当性確認事例の蓄積と、必要に応じて改良を行う予定である。

謝辞 数値解析の実施に際し、(株)アーク情報システム殿にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 石丸真, 小早川博亮, 沢津橋雅裕, 平賀健史: 弱層を有する凸型斜面の地震時挙動を対象とした動的遠心力模型実験, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 162-167, 2022. 2) 土木学会原子力土木委員会・地盤安定性評価小委員会: 原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>2020年度版, 3.4節, 2021.