

せん断破壊・引張破壊を考慮した動的解析用地盤モデルの提案

鹿島建設(株) 正会員 沖見 芳秀

1. はじめに

原子力発電所の基礎地盤や周辺斜面の地震時安定性は、等価線形解析を用いたすべり安全率評価により検討されるが、地盤の破壊状況によっては、静的非線形解析等により進行性破壊が生じないことを確認することが求められている¹⁾。静的非線形解析は応答加速度から求めた等価震度を静的に作用させるため安全側評価となるが、より合理的に評価するためには、地盤のせん断破壊・引張破壊を考慮した時刻歴非線形解析を用いることが考えられる。しかし、せん断破壊・引張破壊を伴う動的な地盤特性・挙動については必ずしも明確にはなっていない。本報では、既往の安定性評価で用いられる解析用地盤物性値のみを用い、破壊を進展しやすくすると言う意味で、できるだけ安全側に評価することに重点を置いた動的解析用地盤モデルの提案と基礎的検討として静的非線形解析との比較を示す。

2. 地盤モデルの概要

提案する地盤モデルは、せん断剛性のひずみ依存性を考慮したマルチスプリングモデル²⁾³⁾に骨格のせん断強度とは別に設定したせん断破壊条件を適用したせん断履歴モデルとコンクリート分野の解析で用いられる回転ひび割れモデル⁴⁾の考え方を援用した引張破壊モデルを組み合わせたモデルである。

1) せん断剛性のひずみ依存性のモデル化

マルチスプリングモデルは、任意方向に単純せん断を考えた多重せん断バネモデル⁵⁾に、減衰調整した Masing 則⁶⁾を適用したモデルである。Iai ら²⁾³⁾

は液状化を対象とし骨格曲線として HD モデルを用

いているが、多様な地盤に対応するため、土砂～軟岩用に GHE モデル⁷⁾、中硬岩用にバイリニアモデルを用いる。表 1 に各モデルのせん断バネの力-変位関係を示す。バネの強度 Q_v と規準ひずみ γ_v は、Iai ら²⁾³⁾と同様に最大せん断剛性とひずみ ∞ 時のせん断応力から設定する。なお、バイリニアモデルの場合、履歴減衰を調整するため履歴曲線には双曲線モデルを用いる。

表 1 せん断バネモデル

HD	GHE	BILINEAR
$\frac{\gamma_i/\gamma_v}{1 + \gamma_i/\gamma_v } \cdot Q_v$	$\frac{\gamma_i/\gamma_v}{1/c_1 + 1/c_2 \cdot \gamma_i/\gamma_v } \cdot Q_v$	$\min(\gamma_i/\gamma_v , 1.0) \cdot \text{sign}(\gamma_i) \cdot Q_v$
	γ_i はバネの変位 c_1, c_2 は GHE モデルの変数	

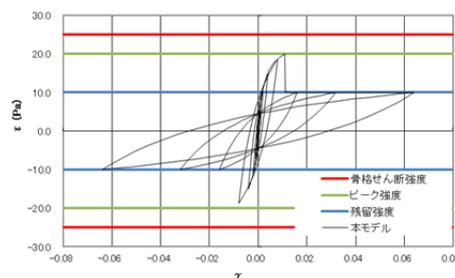


図 1 せん断破壊履歴例

2) せん断破壊のモデル化

最大せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 関係から求められるせん断強度と安定性評価で用いられる静的強度とは一般に整合しない。そこで、骨格のせん断強度とは別にせん断破壊条件を設定し、ピーク強度に達すると直ちに残留強度まで応力解放が生じるようにモデル化する。せん断破壊後は、マルチスプリングモデルで算定された応力 σ_M に、平均応力を維持しモール円半径を $1/\alpha$ に縮小するマトリクス $M(\alpha)$ を乗じせん断破壊後の応力を求める。ここで α は履歴変数となる。図 1 にせん断破壊を伴う履歴例を示す。実地盤ではせん断破壊後に徐々にひずみ軟化すると考えられること、本モデルではせん断破壊後も設定した履歴減衰特性が維持されることから破壊が進展しやすい保守的なモデル化と言える。

3) 引張破壊のモデル化

引張破壊のモデル化として、塑性論に基づいたテンションカットオフが挙げられるが、地震動のような交番

キーワード せん断破壊, 引張破壊, マルチスプリングモデル, GHE モデル, 時刻歴非線形解析
 連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株) 土木設計本部 TEL 03-6229-6797

ひび割れモデルは、主ひずみと主応力が共軸であると仮定し、主ひずみに応じて、ひび割れ方向が変化するモデルである(図2参照)。現実のひび割れをモデル化してはいないが、梁のせん断破壊では概ね安全側評価となることが知られている。提案モデルでは、引張破壊後は引張応力を負担しないモデルの構築を主眼に、応力とひずみが非共軸の場合にも適用できるように拡張する。主応力が引張強度を越えた場合、仮想ひび割れを導入し、ひずみをひび割れひずみと母岩ひずみに加算分解する。ひび割れ直交方向応力が0かつひび割れひずみが引張の条件の下、ひびわれ面のせん断ひずみ・せん断応力が0となるように、ひび割れの方向とひずみを反復的に求める。このモデル化により、引張方向剛性が0で、引張直交方向は母岩剛性となる異方性モデルとなる。なお、引張破壊後は、安全側評価のため引張強度を0に再設定する。

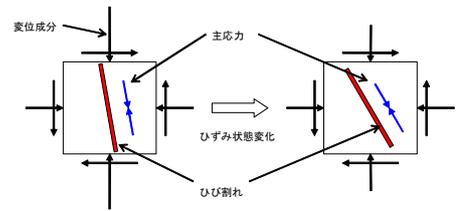


図2 回転ひび割れモデルの概念図

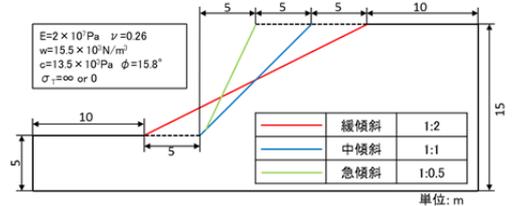


図3 斜面モデル

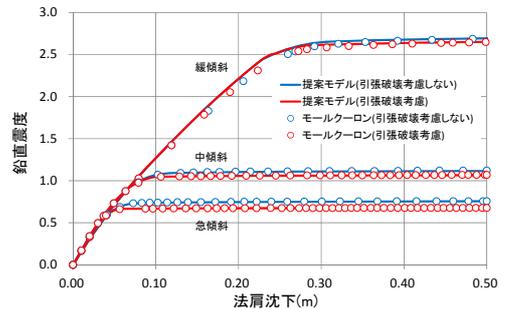


図4 鉛直震度-法肩沈下関係

3. 静的非線形解析との比較

提案モデルを複合非線形解析システム SLAP⁸⁾(鹿島建設開発)に組み込み、修正モールクーロンモデルを用いた弾塑性静的非線形解析との比較を行う。図3に示した3モデルを対象とし、鉛直震度を漸増させる斜面安定問題で比較する。修正モールクーロンモデルは、ダイレイタンスが生じない非関連流れ則を用いる。提案モデルは、比較のためピーク強度=残留強度とし、バイリニアモデルを線形範囲で用いモールクーロン条件によるせん断破壊モデルを使用する。図4に鉛直震度と法肩沈下関係、図5に例として急傾斜モデルで引張破壊を考慮した場合の最大せん断ひずみ分布を示す。いずれのケースでも提案モデルと静的非線形解析は整合した結果が得られることが分かる。

4. おわりに

地盤のせん断破壊・引張破壊を考慮した時刻歴非線形解析のための地盤モデルの提案を行った。提案モデルは、「多様な地盤に対応できるマルチスプリングモデル」、「破壊条件によるせん断破壊モデル」、及び「回転ひびわれモデルの考え方を援用した引張破壊モデル」を組み合わせたモデルで、破壊を進展しやすくするという意味で、できるだけ安全側に評価することに重点を置いた地盤モデルである。基礎的検討として静的非線形解析との比較を行い、ダイレイタンスを考慮しない修正モールクーロンモデルと整合する結果が得られることを示した。今後は動的非線形問題への適用性を検討する予定である。

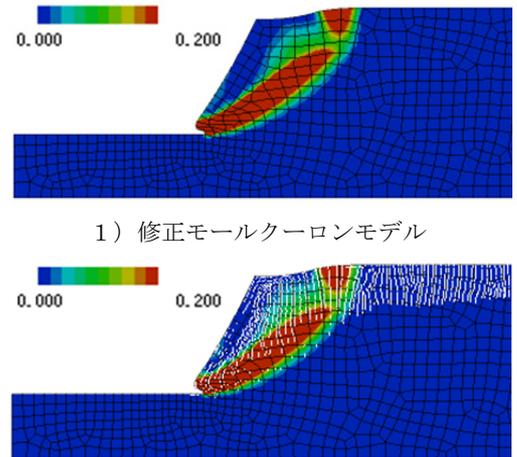


図5 最大せん断ひずみ分布
引張破壊考慮 変形倍率2倍

参考文献 1)原子力規制委員会:基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド, 2013. 2)Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. :Strain space plasticity model for cyclic mobility, 港湾技術研究所報告, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990. 3)Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. :Parameter identification for a cyclic mobility model, 港湾技術研究所報告, Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990. 4)Rots, J.G. :Computational Modeling of concrete fracture, Dissertation, Delft University of Technology, 1988. 5)Towhata, I. and Ishihara, K. :Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc.5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.1, pp.523-530, 1985. 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, pp.373-380, 1985. 7)龍岡文夫, 澁谷啓:地盤材料の広い範囲のひずみでの応力・ひずみ関係式について, 第26回土質工学研究発表会, pp.537-540, 1991. 8)沖見芳秀, 右近八郎:複合非線形フレーム解析システムの開発, 土木学会誌, Vol.80, No.1, pp.14-17, 1995.