Material Point Method を用いた岩盤斜面模型の地震時大変形解析

鉄道総合技術研究所	正会員	○阿部慶太	正会員	篠田昌弘
原子力安全基盤機構	正会員	村田雅明	正会員	中村英孝
電力中央研究所	正会員	河井 正		
日本大学	正会員	中村 晋		

1. はじめに

筆者らは、原子力施設周辺斜面の地震時安定性評価の高度化を目的に、一連の材料試験、振動台実験および 数値解析的検討を行っている.本報は、数値解析的検討の一環として行ったメッシュフリー法の一種の Material Point Method¹⁾(以後, MPM)による地震時斜面の大変形解析の検討結果について示すものである.斜面弱層 の構成則として排水条件下でもひずみ軟化を表現できる上・下負荷面モデルを適用し、表層の有無、弱層勾配 を変えた斜面模型に対して地震時の大変形挙動をどの程度再現可能か検討した.

2. MPMの概要

1995年に Sulsky らにより提案された MPM はメッシュフ リー法の一種の Particle in Cell 法であり,連続体を粒子群で モデル化する一方,各計算ステップにおいて,粒子群裏に設 けた背面格子群で微小変形理論に基づき有限要素法(以後, FEM)と同様にひずみ増分計算を行うものである(図-1参照). FEM への適合性が良い,微小変形理論に基づく既往の構成則 が容易に適用できる,ディリクレ型境界条件が明確に表現で きる等の利点があり,近年,特に大変形問題が多い地盤工学 に関わる現象への適用が進められている.

3.構成則の概要と逆解析による解析パラメータの同定

前述したように、本研究では上・下負荷面モデルを弱層の 構成則として用いた.図-2 に構成則の概要を示す.SYS Cam-clay モデル^{2),3)}を基本として降伏曲面に大野ら⁴⁾の EC モデルを適用し、大ひずみ時の除荷領域での弾性剛性を累積 ひずみに応じて低下させたモデルである.解析パラメータは 図-3 に示すフローに従い決定した.具体的には、はじめに上・ 下負荷面モデルで弱層材料の三軸圧縮試験結果の同定を行い 初期パラメータの決定を行う.そのパラメータを用いて滑落 を起こす実験ケースの再現解析を行い、実験で見られた挙動 を再現可能か検討する.再現不可の場合、滑落の挙動を表現 できるまで解析パラメータを変更する.その後、進行的変形



を起こす実験ケースの再現解析を行い,実験で見られた挙動が再現可能か検討する.再現可能であると判断で きた場合,滑落,進行的変形ともに表現可能な解析パラメータとなる.図-4 に初期と最終的に導出した解析 パラメータで得られた三軸圧縮試験の再現解析結果,表-1 に解析パラメータを示す.これらの結果より,最 終的に得られた解析パラメータは三軸圧縮試験結果に対し,強度が小さく,軟化しはじめるひずみが小さいこ とが分かる.このことは,斜面崩壊時における大ひずみかつ高速せん断が生じる状態では,静的な状態で載

キーワード 斜面,地震時変形,MPM,上・下負荷面モデル 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (財)鉄道総研 基礎・土構造 TEL042-573-7261 荷された三軸圧縮試験結果に比べ異 なる応力ひずみ関係を示す可能性が あることを示している.ただし,その 詳細は実験的側面からの検討が必要 であると考えられる.

4. 解析結果

図−5 に崩壊後の実験, 解析結果を示 す. 弱層には最終的に得られたパラメ ータによる上・下負荷面モデル,表層 には弾完全塑性モデル,基盤層には弾性モデル を適用した.弱層勾配に応じた崩壊挙動を一律 の解析パラメータにより表現できている(図 -5(a), (b)). また, 表層が無い場合に見られ たのり尻付近の崩壊もその傾向を表現できて いる (図-5(c)). なお, 崩壊に至るまでの最大 せん断ひずみの発達は、のり肩とのり尻から発 達しており,実験で見られた傾向と同様である ことを確認している.ただし,のり肩付近を見 ると、テンションクラックの発生に伴う自立し た地盤形状を表現できていない.これは、適用 した構成則では、大ひずみ域で粘着力ゼロの限 界状態線に達しているため自立した状態を表 現できなかったためと考えられる. 今後, 限界 状態も含めた検討が必要であると考えられる.

5. まとめ

斜面の振動台実験の再現解析を行い MPM と 上・下負荷面モデルを用いた地震時斜面の大変 形解析への適用性について検討した. 今後は, 今回得られた知見と課題を下に詳細検討を進 める予定である.

参考文献

1) Sulsky, D., Zhou, S.J. and Schreyer, H. L.: "Application of a particle-in-cell method to solid mechanics," *Computer Physics Communications*, Vol. 87, pp.236-252, 1995. 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.; Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000. 3) Hashiguchi, K. (1978): Plastic constitutive equations of granular materials, Proc. of US-Japan Seminar on Continuum Mechanics and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials (Cowin, S.C. and Satake, M. eds.), Sendai, JSSMFE, pp.321-329. 4) 大野進太郎, 飯塚敦, 太田 秀樹: 非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデ ル, 応用力学論文集, Vol.9, pp.407-414, 2006.



解析パラメータ 表-1 初期パラメ 最終的に得られ - 4 たパラメータ 圧縮係数の初期値 0.05 0.05 圧縮係数の最小値 0.1 0.01 膨張係数の初期値 0.001 0.001 0.008 膨張係数の最大値 0.008 0.214 ポアソン比 0.214 破壞応力比 1.2 1.2 正規降伏面と上負荷面の相似中心の相 0.35 0.5 们比 下負荷面の発展則の係数の初期値 20.0 20.0 下負荷面の発展則の係数の低減パラメ 2.0 1.0 - 4 上負荷面の発展則の係数の初期値 0.5 0.5 回転硬化の発展則の初期値 20.0 20.0

図-4 弱層材料の三軸圧縮試験の再現解析結果



(a) 弱層勾配 45 度の滑落を起こすケース



(b) 弱層勾配 35 度の進行的変形を起こすケース



(c) 弱層勾配 35 度で表層無しのケース図−5 振動台実験の再現解析結果(崩壊後)