

2次元、3次元有限要素解析による 斜面の進行性破壊に関する研究

岐阜大学(院) ○叶 冠林 岐阜大学 八嶋 厚、張 鋒
ライト工業 池村 猛 福井県庁 山本 幸一

1. 本研究の目的

過圧密粘土地盤や軟岩地盤を掘削して切土斜面を形成した後、長時間経過してから切土斜面が突然崩壊する被害が報告されている。このような斜面崩壊は、進行性破壊現象によるものと考えられている。しかし、過去の進行性破壊の研究では、2次元有限要素解析(以下、2次元FEMと称す)しか行っておらず、また、構成式にもカムクレイ型の降伏規準を用いていたことから、せん断強度の過大評価が懸念されていた。そこで本研究では、土のせん断強度を適切に表現するために、軟岩を対象とした足立・岡が提案したひずみ硬化-軟化型弾塑性構成式¹⁾(以下、Originalモデルと称す)に基づき、正確に中間主応力の影響を考慮することができる松岡・中井破壊規準²⁾とtij概念³⁾を導入し、修正ひずみ硬化-軟化型モデル(以下、修正モデルと称す)を誘導した。そして、水-土連成解析有限要素法を用いて修正モデルに基づいた3次元、2次元のシミュレーションを行った。以上の解析結果を比較することで、実岩盤斜面の進行性破壊のメカニズムについての検討を行った。

2. 研究内容

進行性破壊現象は、間隙水圧の変化等による時間依存特性にひずみ軟化特性が加わることによって生じる現象と考えられており、掘削地盤等の長期不安定性の要因であると考えられている。尾崎⁴⁾は前述の時間依存特性を、地盤内部に存在する間隙水圧の時間的変化に伴う、有効応力状態の変化に起因するという考えに基づき、Originalモデルを用いた有限要素解析により、切土斜面の進行性破壊をシミュレートした。

1999年9月22日の台風17号にともなう集中豪雨によって、東海北陸自動車道切土斜面では、段階的な斜面大崩壊が発生した。その後実施されたJHの詳細な調査により、いくつかの破壊要因が挙げられ、その中で特に注目した要因は「豪雨による地下水位の急激な上昇が考えられる」である。この要因が間隙水圧の変化による時間依存特性の原因にあるとすれば、上述した切土斜面の斜面大崩壊は、それにひずみ軟化特性が加わって、進行性破壊が生じたと考えられる。

以上のことから、豪雨によって斜面の地下水位が上昇した場合を想定し、尾崎が考案した水-土連性の弾塑性有限要素解析法により、東海北陸自動車道切土斜面の進行性破壊のシミュレーションを行う。なお本研究では、初期応力場は自重応力場とし、地下水位はボーリング調査により得られた水位を、解析の初期地価水位として設定した。

3. 修正モデル

カムクレイ型の降伏規準では軸対称状態($\sigma_2 = \sigma_3$)と考えているため、降伏曲面は π 面上において正円で表されることが一般的に認識されている。しかし、 π 面上の載荷応力経路のLade角度 θ が0で無い場合、カムクレイ型の降伏規準では土のせん断強度を過大評価してしまう。つまり、一般応力状態における土の応力-ひずみ関係を表現するためには、中間主応力(σ_2)の影響を厳密に表現することが非常に重要である。

本研究では、軟岩を対象としたOriginalモデルに基づき、正確に中間主応力の影響を考慮することができる松岡・中井破壊規準とtij概念を導入し、修正モデルを誘導した。

4. 水-土連成有限要素解析

時間依存特性を間隙水圧の時間的変化によるものとして進行性破壊を考察する場合、固体層(土粒子骨格)と流体層(間隙水)の挙動を連成させた水-土連成解析を行う必要がある。

赤井・田村⁵⁾は、特にダイレイタンスーなどの土質材料に固有の特性が、飽和粘性土の圧密挙動に及ぼす影響を重視してBiotの多次元圧密方程式⁶⁾とRoscoeらの構成式⁷⁾を組み合わせた有限要素法による新しい解析手法を提案した。

本解析では尾崎と同様に、赤井・田村の手法に基づいて、間隙流体が非圧縮性の水のみと仮定した理想的な飽和地盤を考え、2次元・3次元水-土連成の有限要素解析の定式化を行った。また、全水頭を未知数として解析を行った。

5. 解析に使用するモデル地盤

東海北陸自動車道(美濃IC~美並IC間)切土斜面を、図1の(a)、(b)の様に簡略化したモデルで種々の解析を行った。(a)のスケールは、横 300m、高さ 263m(頂上まで)、奥行き 280m で拘束条件は底面が鉛直・水平方向固定、側面が水平方向固定、さらに、地表面のみを排水境界面とする。(a)の中央断面である(b)のスケールは、高さ 280m、幅 225m で拘束条件は底面が鉛直・水平方向固定、側面が水平方向固定、さらに、地表面のみを排水境界面とする。修正モデルに基づいた3次元・2次元FEMでは、深度に応じて強風化岩盤を3層に分けた。これは、地表面からの深さと要素に生じる拘束圧の関係を考慮したためである。

6. 解析手順

解析に必要な材料定数を表1に示す。これをもとに、重力場における弾性解析により初期有効応力を計算する。次に豪雨による地下水位の上昇を表現するために、地下水位以上の地盤において、地表面の全水頭を引き上げる。ただし、それぞれの時間増分は2.00秒/stepで、解析ステップ数は3次元FEMで5725step、2次元FEMで4426stepである。

図2の(a)、(b)に、修正モデルに基づいた平面ひずみ条件と三軸条件における圧縮試験と伸張試験の理論解を示した。なお、伸張試験では軸差応力が負値になったため、軸差応力-せん断ひずみ関係の縦軸には軸差応力の絶対値を用いた。(a)、(b)を比べると、平面ひずみ条件のほうが圧縮・引張強度共に大きくなった。これは、平面ひずみ条件では一方向の変位を拘束しているため、三軸圧縮条件よりも圧縮・引張強度共に大きくなったのだと考えられる。

7. 解析結果

図3に、両者の塑性せん断ひずみの分布図を示した。両者を比較すると、2次元FEMの結果では、解析内での斜面崩壊が発生した時間が40分程度短く(約30%減)、発生した最大塑性せん断ひずみが約1.8%になり、約42%大きくなった。これは、2次元FEMでは平面ひずみ条件で解析しているため、膨張の場合は、奥行き方向の拘束により奥行き方向の拘束圧が減少したことが原因だと考えられる。

図4では、解析内での斜面崩壊時間における、3次元FEMのせん断帯の形成状況を3次元的に表した。斜面崩壊部分の断面を並べることで、滑落斜面の範囲を視覚的にわかりやすく捉えることができた。

図5と図6に、両者の代表的な破壊要素の力学的挙動を示した。両者とも、ひずみ軟化の挙動を示し、応力履歴経路が残留強度線に触れたため、破壊したことが確認できた。また、解析終了時間にひずみ速さが急速に発達したため、要素レベルからも斜面が滑ったことを確認できた。体積ひずみは解析初期で体積膨張を起こし、3次元FEMの破壊要素3669ではそのまま膨張し続けたが、2次元FEMの破壊要素0153では最終的に体積圧縮を起こした。これは、時間経過とともに徐々に斜面上部が下へと移動することで圧縮力を受けたことが原因だと考えられる。過剰間隙水圧については、両者とも正の過剰間隙水圧が発生した。

8. 結論と今後の課題

1. 水-土連成の3次元FEMを行い、進行性破壊現象を確認することができた。
2. 水-土連成の3次元FEMと、2次元FEMの結果から、定性的に進行性破壊現象を予測できたが、2次元FEMでの解析開始から斜面崩壊発生までの実時間が短くなった。
3. コンクリートブロックの目詰まりによる地下水位上昇が、斜面崩壊を発生させた原因の一つと考えられているが、本研究ではこの原因に基づいた段階的な斜面崩壊を再現することができなかった。
4. 実地盤を対象とする場合は、力学試験を多く行い、正確な材料定数を入手することが必要である。

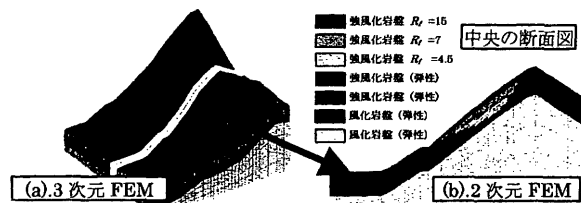


図1 解析メッシュモデル

表1 材料定数

パラメータ	材料名	強風化岩盤(D級)	風化岩盤(CL~CM級)
ヤング率: E (MPa)		98.1	294.3
ポアソン比: ν		0.333	0.250
単位体積重量: γ (kN/m ³)		25.60	15.70
透水係数: k (m/s)		1.00E-08	1.00E-08
ひずみ硬化パラメータ: G		100.00	100.00
塑性ポテンシャルパラメータ: σ_{90} (MPa)		9.81	19.62
塑性ポテンシャルパラメータ: b (MPa)		0.981	1.962
応力比-ダイレイタンスパラメータ: a		1.00	
残留時ダイレイタンス勾配: D_f		-0.30	
残留強度パラメータ: R_f		1層目 15.00 2層目 7.00 3層目 4.50	0.00
応力履歴パラメータ: t			0.05

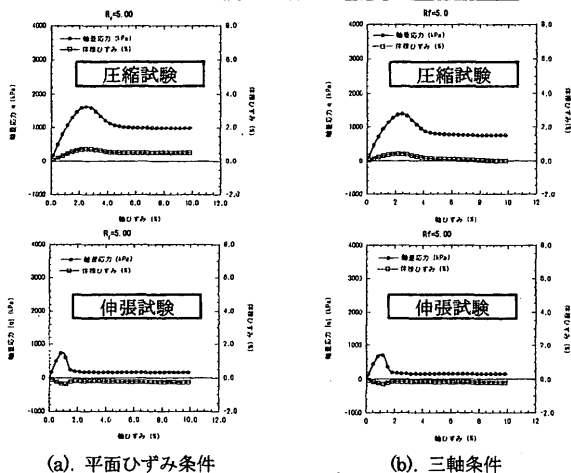


図2 理論解(修正モデル)

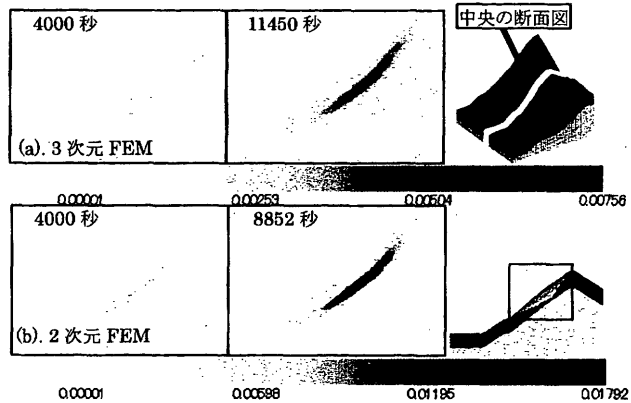


図3 塑性せん断ひずみの分布図

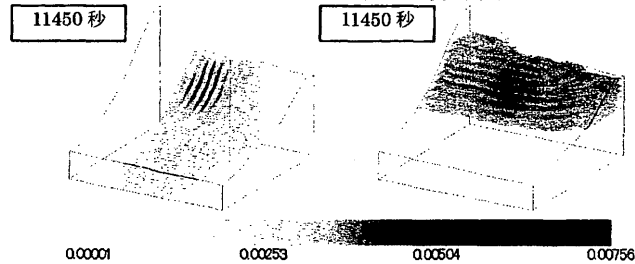


図4 3次元的な塑性せん断ひずみの分布図(3次元FEM)

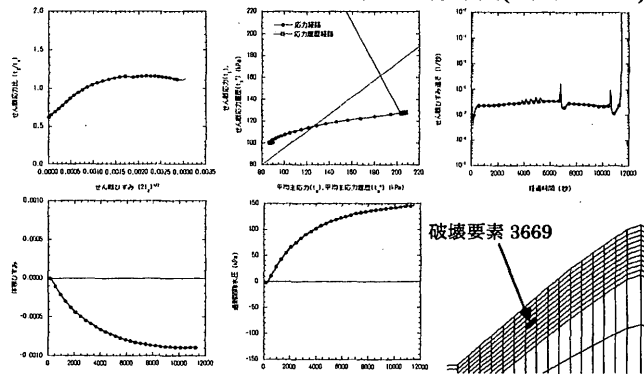


図5 破壊要素3669の力学的挙動(3次元FEM)

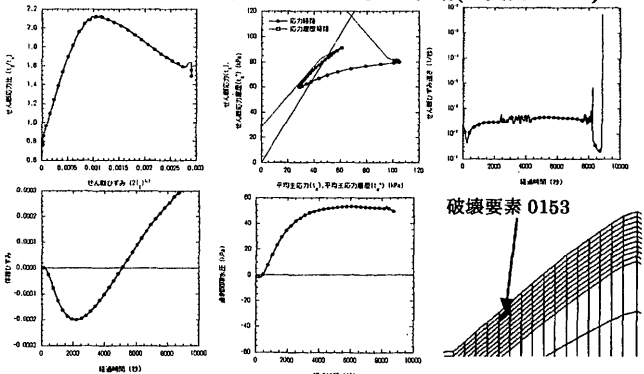


図6 破壊要素0153の力学的挙動(2次元FEM)

9. 参考文献

1. 足立 紀尚・岡 二三生: 軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式, 土木学会論文報告集, No.445, pp.9-16, 1992.
2. Matsuoka H. and Nakai T, Stress-strain relationship of soil based on the SMP, Proc., Specialty Session 9, 9th ICSMFE, pp.153-162, 1977.
3. Nakai T. An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp 119-137, 1989.
4. 尾崎 仁美: ひずみ軟化型モデルに基づいた水-土連性解析による切土斜面の進行性破壊に関する研究, 京都大学修士論文, 1999.
5. 赤井浩一, 田村 武: 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, 土木学会論文報告集, No. 262, pp. 95-104, 1978.
6. Biot, M. A: General theory of three dimensional consolidation, Journal of applied physics, Vol.12, pp.155-164, 1941.
7. Roscoe, K.H., Scofield, A.N. and Thirairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical, Géotechnique, Vol.15, No.2, pp.211-214, 1965.