

地下水位と連動した斜面変動を再現するための簡易な弾粘塑性解析

群馬大学 正会員 若井 明彦

防災科学技術研究所 正会員 酒井 直樹

1. はじめに

斜面が崩壊に至るまでの地表面の変位速度は、斜面内の地下水位と強い相関性を有する。こうした現象の再現に粘塑性モデルを用いる場合、塑性ポテンシャルにある定係数を乗じてひずみ速度の大きさを操作するのが簡便である(例えば, Ishii et al., 2012)。本研究では、斜面の全体安全率の変化と観測された移動速度との間の経験則を提案した既往の知見(菅原, 2003)を手がかりに、塑性ひずみ速度の大きさが塑性化の進行度の関数となるような定式化を採用し、ひずみ速度をきめ細かく制御できる弾粘塑性解析法を提案する。

2. 解析モデル

降伏時に生ずる塑性ひずみ成分がすべて粘塑性成分であると仮定すると、塑性ポテンシャル g に基づく流れ則は、単位時間あたりの塑性ひずみ増分として、次式で定義される。ここに、 λ は有効応力に応じて変化する関数とする。

$$\dot{\epsilon}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \tag{1}$$

“地すべり移動速度が全体安全率の n 乗に反比例する”という観測(菅原, 2003)に基づき、すべり面の各位置の局所安全率 $F_{s,local}$ がその位置で生じうるひずみ速度を規制すると仮定すると、八面体せん断ひずみ $\dot{\gamma}_{max}$ の単位時間当たりの増分は、以下のように上限値を有することになる。

$$\dot{\gamma}_{max} \leq \frac{\dot{\alpha}}{F_{s,local}^n} \tag{2}$$

$F_{s,local}$ は有効応力で定義される局所安全率である。 $\dot{\alpha}$ (時間の-1乗の次元)と n (無次元)は、それぞれ粘塑性ひずみ速度の大きさを規定するパラメータであり、観測結果に基づいて同定される。局所安全率は各時刻で更新されるが、その際、後述の「粘塑性抵抗力」相当の内力成分を加味したせん断応力によって局所安全率を算定するため、通常の弾塑性 FEM と異なり、 $F_{s,local}$ の値は 1.0 を大きく下回ることが有り得ることになる。

一方、斜面の安定性を FEM で評価する場合、系の自重を作用させて全体剛性行列に基づく釣合い計算を行うが、例えば、塑性化に起因する要素間の残差力を修正 Newton-Raphson 法による反復演算で処理するのであれば、時間とともに増加するひずみ(式(1))の大きさは、すべての要素で常に式(2)を満足しなくてはならない。そこで、各要素が式(2)を満足するために少なくとも発揮しなくてはならない見かけの粘塑性抵抗力(の最小値)を各時刻で要素毎に計算し(式(1)の λ の値を逆算したことに相当する)、これを全体剛性行列に基づく釣合い計算の内力項に加算することにした。

以上の手続きを各時刻において実行し、残差力の配分収束を確認した後に次の時刻に進むという時刻歴計算を行うことで、地下水位の変動に応じてひずみ速度が変化する機構解析を実現した。次章にその動作検証の一例を紹介する。

3. 動作検証

解析対象とする二次元斜面の諸元を有限要素分割とともに図-1に示す。簡単化のため、斜面を構成する土は均質であると仮定した。解析に用いた土の材料パラメータを表-1に示す。提案モデルの動作確認のため、粘塑性特性を操作するための二種類のパラメータ($\dot{\alpha}$ と n)を3通りに変化させた各ケースを実施した。

表-1 解析に用いた材料パラメータ。

Case :	1	2	3
ヤング率 E (kN/m ²)	1.0 × 10 ⁴		
ポアソン比 ν	0.30		
粘着力 c' (kN/m ²)	3.0		
せん断抵抗角 ϕ' (deg)	35.		
ダイレイタンシー角 (deg)	0.		
$\dot{\alpha}$ (s ⁻¹)	0.0001		0.0003
n	20	0.1	20
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18.		

キーワード 斜面, 地下水位, 粘塑性, 有限要素法

連絡先 (TEL 0277-30-1624, 群馬県桐生市天神町 1-5-1 群馬大学大学院理工学府)

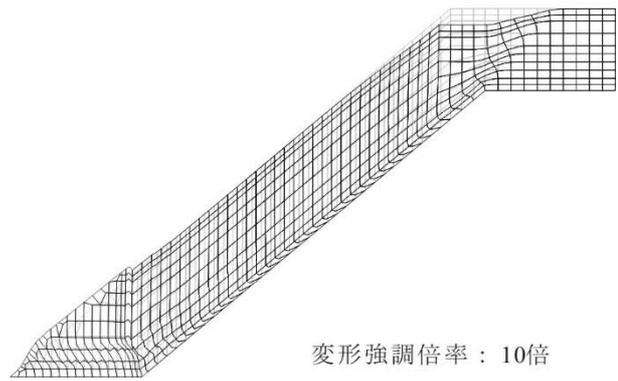
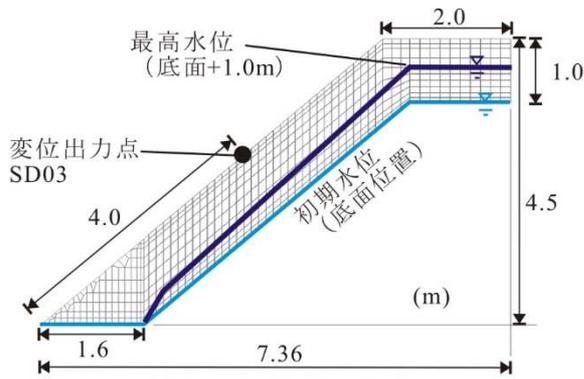


図-1 解析対象とした二次元斜面の諸元 . 図-2 結果の一例 (Case 1 ; 5,400 秒後の変形) .

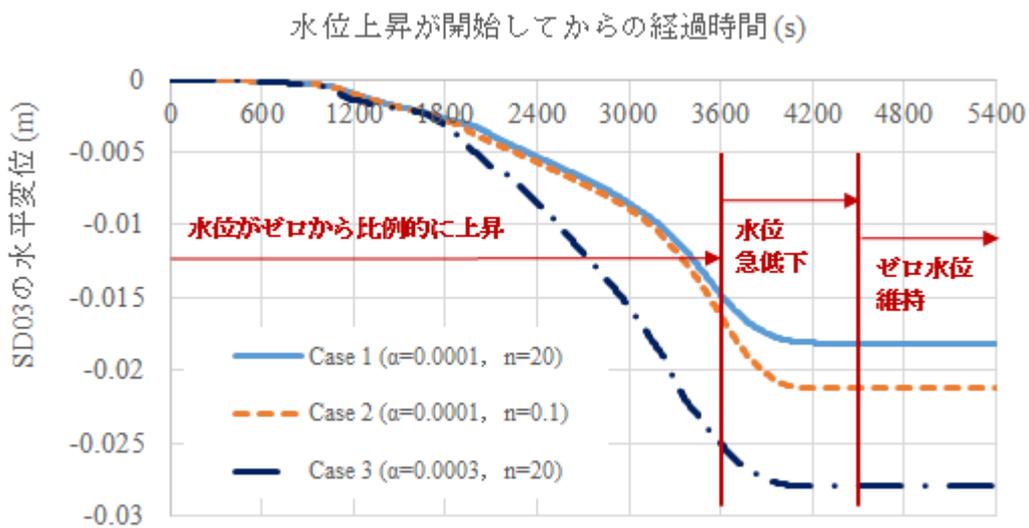


図-3 各ケースにおける SD03 位置の地表面の水平変位 (負値は図-1 の左方) の時刻歴 .

図-1 中には水平変位の時刻歴を出力した点 (SD03) も記した。初期の地下水位は斜面の底面と一致していると仮定し、3,600 秒をかけて最大底面から 1m の高さ (斜面上端位置で) まで比例的に上昇するものとした。その後、900 秒間に水位は底面位置まで急に低下し、以降 900 秒間水位変動のない状態を仮定して計算を継続した。表-1 の Case 1 の場合の最終状態 (5,400 秒後) での残留変形状 (変形を 10 倍に強調) を図-2 に示す。地下水の上昇した部位でせん断変形が卓越して、斜面が滑動しようとしていることがわかる。

図-3 は Case 1, 2, 3 それぞれの表面 SD03 位置における水平変位の時刻歴である。パラメータを調整することにより、蓄積される変位量の大きさや速度ならびに変位量の急増するタイミング等を種々に操作できることが確認された。

4. まとめと謝辞

今後、斜面の模型実験ないし実例の観測結果などに基づいて、提案手法の有効性を検証する予定である。本解析の準備にあたり群馬大学大学院生の亀山ひろみさんと学生の小谷健太君には大変お世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献

Ishii, Y., Ota, K., Kuraoka, S. and Tsunaki, R. (2012): Evaluation of slope stability by finite element method using observed displacement of landslide, Landslides, Vol. 9, Issue 3, pp 335-348.
菅原紀明 (2003): クリープ性地すべり斜面の安全率と地表の移動速度 (文献レビューとそれによる帰結), 応用地質技術年報, No.23, pp.1-18 .