

岩盤斜面の最小すべり安全率発生時刻の推定の試み

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○齋藤 溪太 正会員 井上 和真
大成建設株式会社 正会員 羽場 一基 正会員 渡辺 和明

1. はじめに

岩盤斜面における地震時の最小すべり安全率が発生するすべり線(臨界すべり線)の探索方法の一つとして、最適化手法を用いる方法がある。特に、FEM 解析を用いた非円弧の臨界すべり線探索手法として、遺伝的アルゴリズムを用いた手法¹⁾や粒子群最適化法を用いた手法²⁾が提案されており、動的解析への適用も検討されている。しかし、動的解析では得られた全時刻歴の応力算定結果についてすべり線探索を行う必要があるため、膨大な計算コストを要することが課題の一つとして挙げられる³⁾。本研究では、すべり線探索の計算コストの削減を目指し、最小すべり安全率の発生時刻を入力加速度時刻歴の情報から特定できないか、種々の評価指標の適用性を検討する。具体的な評価指標として、入力加速度パワーの時間的な変動に着目した累積パワー曲線の変化率と、斜面のすべり現象を一質点系の応答に代表させて評価をする加速度応答時刻歴スペクトルを提案した。簡易な斜面モデルを対象に、FEM 解析から得られる最小すべり安全率時刻とこれら評価指標によって抽出される時刻を比較し、それぞれの適用性を検証する。

2. 最小すべり安全率決定時刻推定のための評価指標

(1) **累積パワー曲線の変化率**：すべり土塊の瞬間的な力のつり合いがすべり安全率に寄与すると仮定し、慣性力が大きく働く時刻に着目する。そこで、入力加速度が持つ時間的なパワーの変化を捉えるため、累積パワー曲線の傾きを考える。累積パワー曲線は全継続時間の入力加速度パワーに対する特定の時間帯までに入力された加速度パワーの割合を示す。図1に本研究で用いるランダム位相を持つ模擬地震動、図2に累積パワー曲線の変化率を示す。

(2) **加速度応答時刻歴スペクトル**：地震動の周期特性と、その応答値を表現する評価指標として、応答スペクトルがある。応答スペクトルは、様々な固有周期を持つ弾性1質点系振動子に地震動を入力し、その最大応答値を対応する固有周期にプロットして表現されるが、応答の時刻に関する情報は失われてしまう。本研究では、大きな加速度応答が発生する時刻に着目し、固有周期、応答加速度比、時刻の3つの情報を、カラーマップを用いて可視化した加速度応答時刻歴スペクトルを適用する(図3)。ここでは、各固有周期の1質点系振動子の応答値の時間変化をカラーマップとして表現する。なお固有周期ごとに最大応答値で各応答値を正規化し、大きな応答値の発生時刻を明確にした。

3. 評価手法の適用性検討

図4に示すような簡易な斜面モデルを対象に、図1に示す入力地震動を用いた線形FEM解析を行い、代表的な想定

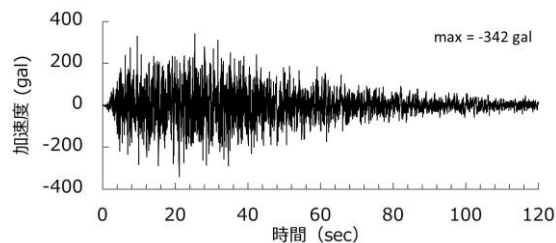


図1 入力地震動

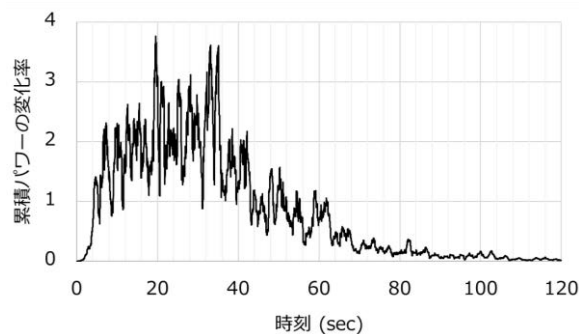


図2 累積パワー曲線の傾き(移動平均 1.0sec)

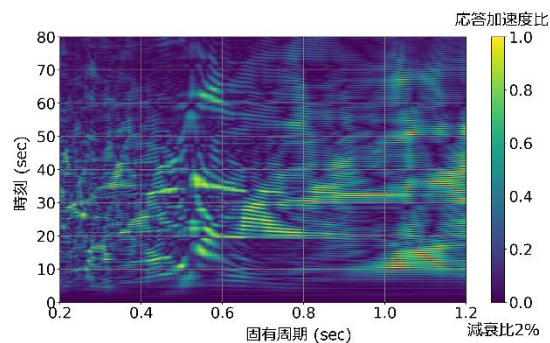


図3 加速度応答時刻歴スペクトル

キーワード 斜面安定 すべり安全率 臨界すべり線 最小すべり安全率時刻
連絡先 〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580 番地 TEL 027-254-9180 (内線)

すべり線におけるすべり安全率を算出する。斜面モデルは均質地盤とし、側方および底面は粘性境界とする。また、物性値は単位体積重量 $\gamma=16.5\text{kN/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu=0.4$ 、減衰比 $h=0.02$ とする。せん断波速度を200, 400, 600 m/sの3ケースとする。最小すべり安全率時刻は200, 400, 600 m/sそれぞれのケースで、33.68, 25.65, 25.57secとなった。これらについて提案した評価指標の適用性を検討する。

(1) **累積パワー曲線の変化率**：累積パワー曲線の変化率に対して、斜面の2次元FEM解析で得られた最小すべり安全率時刻をプロットしたものを図5に示す。累積パワー曲線の変化率は入力加速度の時刻に着目し、最小すべり安全率時刻はFEM解析における応答の時刻に着目していることから、累積パワー曲線の変化率と最小すべり安全率時刻は入力と応答の時間遅れが発生している。この時間遅れによる評価誤差は、最大0.5秒程度であり、評価指標として適用できる可能性がある(表1)。

(2) **加速度応答時刻歴スペクトル**：斜面部の代表的な固有周期を、法肩とその直下50m(斜面高さ)の地点間の伝達関数から定める。一例として、 $V_s=600\text{m/s}$ のケースの伝達関数を図6に示す。ここで、振幅倍率の大きい3つを固有振動数の代表とする。図7に $V_s=600\text{m/s}$ の加速度応答時刻歴スペクトル(減衰比2%, 応答加速度比0.8以上の時刻を抽出)の結果を示す。固有周期0.285secにおいて、加速度応答時刻歴スペクトルで抽出される時刻と最小すべり安全率が一致していることが確認できる。3ケースの最小すべり安全率時刻に対して、加速度応答時刻歴スペクトルから抽出された時刻の誤差は表1に示す。 V_s が小さい場合に誤差が大きくなるが、概ね発生時刻を抽出できていると考えられる。

5. まとめ・今後の課題

累積パワー曲線の変化率と加速度応答時刻歴スペクトルは、いずれも剛性が小さい場合に評価精度が落ちるものの、概ね岩盤のような剛性の大きな斜面の最小すべり安全率の発生時刻の推定への適用できる可能性がある。今後は、多様な斜面形状やすべり線形状を持つケースに対する検討を行い、適用限界の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Li, Y. C., Chen, Y. M., Zhan, T., Ling, D. S. and Cleall, P.: An efficient approach for locating the critical slip surface in slope stability analysis using a real-coded genetic algorithm, Canadian Geotechnical Journal, Vol.47, No.7, pp.806-820, 2010.
- 2) 篠原魁, 羽場一基, 渡辺和明, FEM解析を用いた地盤安定性評価における臨界すべり線探索法の開発, 日本地震工学会論文集, 第21巻, 第5号, pp13-26, 2021.
- 3) 高柳秀秋, 小早川博亮, 岡田哲実, 石丸真: 3次元斜面におけるすべり面探索手法を用いた最小すべり安全率算出の効率化に関する提案, 令和2年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, CS11-03, 2020.

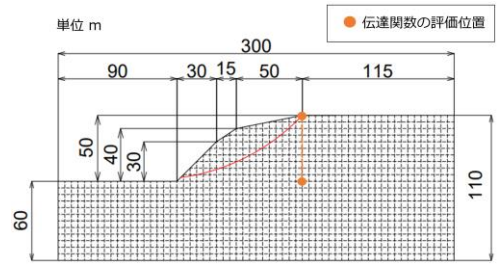


図4 斜面モデルの形状とすべり線

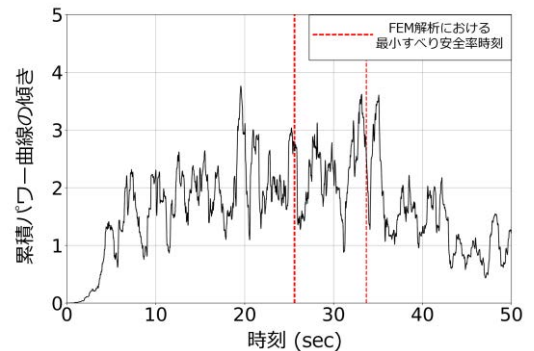


図5 累積パワー曲線の変化率(移動平均1.0sec)と最小すべり安全率時刻

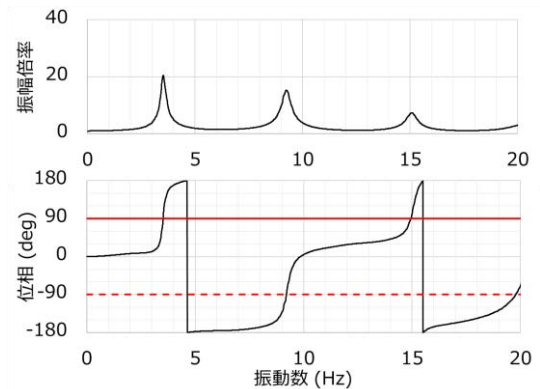


図6 $V_s=600\text{m/s}$ における法肩とその直下(50m)における伝達関数

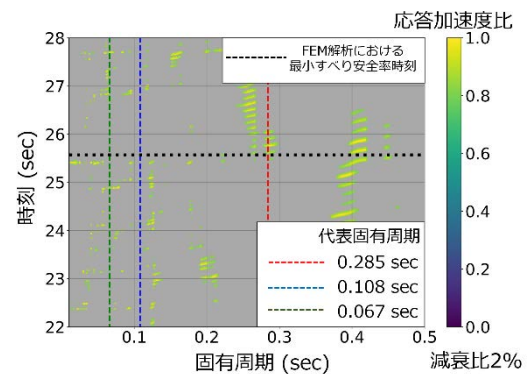


図7 $V_s=600\text{m/s}$ における加速度応答時刻歴スペクトル

表1 累積パワー曲線の変化率と加速度応答時刻歴スペクトルの誤差

せん断波速度 (m/s)	誤差(sec)	
	累積パワー曲線 の変化率	加速度応答時刻歴 スペクトル
200	0.52	0.75
400	0.38	0.23
600	0.30	0.04