

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

(株)メイテック 正会員 ○高柳 秀秋
 (一財)電力中央研究所 正会員 小早川 博亮
 正会員 岡田 哲実
 正会員 石丸 真

1. はじめに

従来、原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の地震時安定性については、2次元解析による検討が行われてきた。しかし、この評価手法では斜面奥行きが均一断面として取り扱われるため、複雑な形状をした実斜面でのすべり安全率を評価することはできない。そこで、3次元応力状態に対し、すべり面を遺伝的アルゴリズムで自動作成し、最小すべり安全率を示すすべり面を検出できるすべり面探索ツールを開発してきた¹⁾。このツールは特定時刻の応力状態を与えれば、最小すべり安全率を示すすべり面を検出できるが、時刻歴データを解析するためには、計算コストが膨大となり、実用的ではない。そこで、このツールを用いて効率よく最小すべり安全率、時刻、すべり面を求める方法を検討した。

2. 効率のよいすべり面探索の提案

時刻歴データから最小すべり安全率が発生する時刻を特定できれば、すべり面探索ツールを用いた効率的な探索が可能となるため、その時刻を絞り込む方法を考えることとした。地震時の動的解析を実施する場合、解析結果として斜面の加速度や変位が算定されるため、すべり土塊を代表する点の加速度や変位に着目すれば、斜面の最小すべり安全率を示すすべり面が発生する時刻では、それらの値は斜面がすべる方向への特徴的な値を示すと考えられる。そこで、すべり土塊を代表する点として斜面法肩位置を選び出し、その加速度や変位の軌跡図(オービット図)を描き、最大応答となった時刻近傍のすべり面探索を行うことで最小安全率すべり面を算出できると考えた。

3. 検討方法

最初に、簡易な斜面モデル(図-1)の動的解析を行い、得られた全時刻歴の応力状態に対しすべり面探索ツールを用いてすべり面探索を行う。次に、2.に示した方法ですべり面探索を行う。両者を比較することで提案の方法による探索の可能性を検討する。水平入力地震動を図-2に示す。水平の2/3の大きさの加速度を鉛直入力地震動とした。

4. 計算結果と考察

(1) 全時刻歴に対するすべり面探索

地震動が継続する全時刻歴について、すべり面探索ツールによって評価した最小すべり安全率の経時変化を図-3に示す。この安全率は、各時刻の応力状態に対してすべり面探索ツールを適用した結果であり、それぞれの時刻で異なるすべり面の最小すべり安全率を示している。最小すべり安全率は0.62で、その時の時刻は12.73秒である。この安全率を示すすべり面を図-4に示す。斜面の広い範囲にわたって崩壊するすべり面が探索されていることがわかる。なお、計算の時間刻みは0.01秒、継続時間は20秒であり、合計2,000個の応力状態に対する探索結果であり、1CPUでの計算時間は約3,000時間であった。

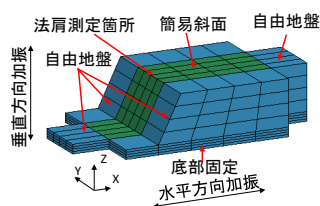


図-1 簡易斜面 FEM モデル

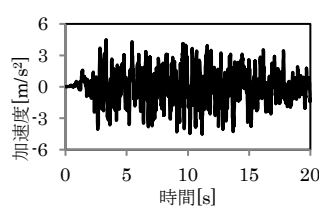


図-2 入力加速度 (水平動)

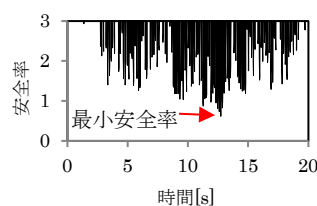
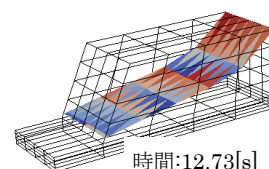


図-3 最小安全率の経時変化



安全率:0.62
 図-4 安全率最小のすべり面

キーワード：安定解析, 斜面, 3次元有限要素法, 地震応答, すべり面探索

連絡先：〒270-1194 我孫子市我孫子 1646 E-mail: abtemp39@criepi.denken.or.jp

(2) 提案法によるすべり面の探索

斜面法肩の加速度オービットを図-5に、変位オービットを図-6に示す。加速度は水平成分が主で、垂直方向にも水平成分の1/3程度の応答が認められた。変位は水平成分が主であり、垂直成分は極わずかであった。各オービット図ですべり土塊の移動方向は、加速度は正、変位は負であり、その方向の最大値を図中に「○」で示す。このタイミングは同時（12.73秒）であり、この時、(1)と同じ最小安全率を示した。これより、提案法によるすべり面探索が可能であることがわかった。

1周期毎の応答値の最大を算定し、おのおの安全率との関係を、図-7（加速度）、図-8（変位）に示す。図-7に示す最大加速度が大きくなるに従いすべり安全率が小さくなる線形関係が認められるが、バラつきも大きい。このため応答加速度では、すべり土塊のすべり安全率との大小関係を必ずしも適切に表現できていない可能性がある。図-8に示す最大変位とすべり安全率も線形関係を示し、加速度の関係に比べてバラつきが小さい。従って、斜面法肩の変位をもとにすべり面の探索を実施する方が好ましいと考えられる。

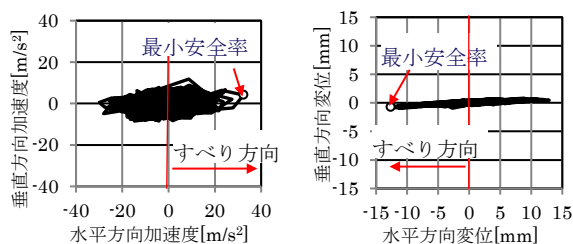


図-5 加速度オービット

図-6 変位オービット

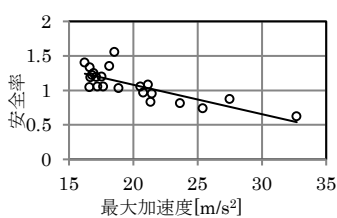


図-7 最大加速度と安全率

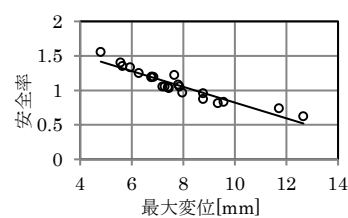


図-8 最大変位と安全率

5. 動的遠心力模型実験の事前検討への適用

図-9に示す斜面模型（実規模斜面高さ12.5m、勾配1:0.5）に対し、遠心加速度50Gの遠心力場において加振実験を計画した。加振実験に先立ち、斜面模型が遠心力载荷過程において崩壊しないか、また、加振時に、斜面崩壊を発生させることが可能かを事前検討するために、提案法によるすべり面探索を実施した。模型斜面はセメント系の材料を用い、斜面模型中腹にテフロンシートで不連続面を設けた。入力加速度は、水平加速度（最大12.7m/s²）、垂直加速度（最大3.4m/s²）の人工地震波を用いた。すべり面探索によって得られたすべり面を図-10に示す。この時のすべり安全率は3.61秒で1.0を大幅に下回り、加振実験によって斜面崩壊が発生することが示唆された。同図に、実際の加振実験で得られた模型斜面の崩壊の様子を示す。実験ではテフロンシートで模擬した不連続面の斜面内部の端部から模型上方へ延びる破壊が確認された。このすべり面の形状と、図-10に示したすべり面は厳密には一致していないものの、すべり面の範囲をある程度推定できていることから、提案法によるすべり面探索が可能であると考えられる。

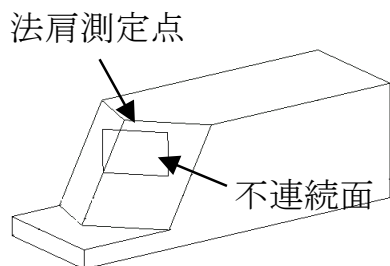
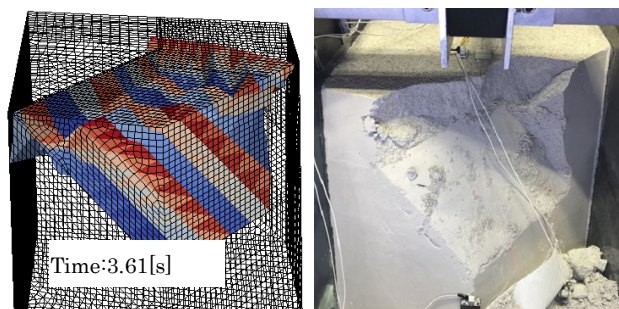


図-9 模型斜面



探索すべり面

試験崩壊斜面

図-10 探索すべり面と試験崩壊斜面

6. まとめ

すべり面探索ツールを用いて時刻歴データから斜面の最小すべり安全率を効率よく求めることができる見通しを得た。今後は実際の模型斜面に対する実験の解析を行って、提案法の適用性を検証する。

参考文献 1) 岡村航, 三橋裕太, 小早川博亮, 高柳秀秋, 岡田哲実 (2017): 3次元有限要素法によるすべり面探索手法の提案とその検証, 第72回土木学会年次学術講演会講演概要集, VII-023, pp. 45-46.