

限界加速度を用いた斜面の損傷確率の算定法

東電設計（株） 正会員 ○吉田 郁政
 東電設計（株） 正会員 秋吉 良樹
 東電設計（株） 正会員 北爪 貴史

1. はじめに

構造物の安全性照査、評価において確率手法を用いた定量的安全性評価に対する必要性が認識されるようになり、原子力発電所のような重要構造物についても確率的安全性評価の必要性が議論されるようになってきた。地震時年損傷確率を求める場合、外力側の地震危険度曲線と耐力側の損傷度曲線をそれぞれ求め、両者の数値積分によって算定することが一般的である。本報告では重要構造物周辺斜面の地震時安定性問題を対象として、限界加速度の考え方¹⁾を用いたモンテカルロシミュレーション（以下、MCS と略記する）による効率的な損傷度曲線及び損傷確率の算定法を論じる。

2. 限界加速度の効率的算定法

限界加速度を斜面の安全率が1.0を下回る最小の基盤加速度と定義する。本研究では式(1)に示すように安全率を動的FEM解析で求めた滑動力と抵抗力の比で定義する。

$$F_s = \min_t \left| \frac{R_d(t, A_{max}) + R_s}{S_d(t, A_{max}) + S_s} \right| \quad (1)$$

ここに、 A_{max} ：基盤加速度(gal)， R_s ：初期応力状態における抵抗力， S_s ：初期応力状態における滑動力， $R_d(t, A_{max})$ ：振幅レベル A_{max} の時に得られる抵抗力， $S_d(t, A_{max})$ ：振幅レベル A_{max} の時に得られる滑動力，である。限界加速度は、多くの加速度レベルに対して動的解析を行い安全率が1.0を下回る基盤加速度を調べれば求められるが大変計算時間がかかる。そこで、式(1)について動的滑動力、動的抵抗力が加速度レベルに比例すると仮定して、安全率を1.0から逆算して限界加速度を求めることとした。物性のひずみ依存性がなければ厳密に算定できるが、振幅レベルが変化することによりひずみ依存物性も変化し発生する応力も非線形に変化するため繰り返し計算が必要となる。そこで、地盤物性のひずみ依存性を考慮する方法として等価線形化法を想定し、図-1に示すようにひずみ依存性の考慮のためと基盤加速度算定のための繰り返し計算を同時に行うこととした。いくつかの試計算によると通常の等価線形化解析の繰り返し計算と大差ない繰り返し回数で収束している。

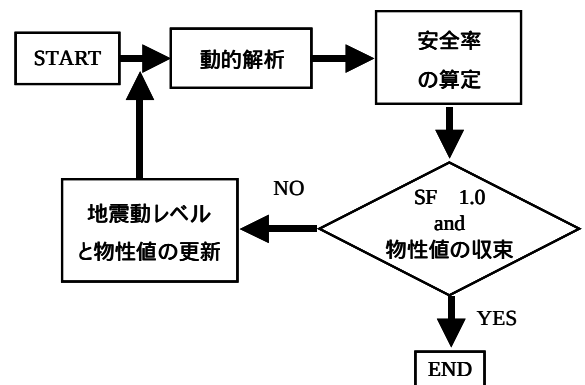


図-1 物性のひずみ依存性と限界加速度に関する繰り返し計算

3. 限界加速度を用いた損傷確率の算定

損傷度曲線はある加速度レベル z よりも小さな地震動で損傷する確率を表しており、その一階微分は限界加速度の確率密度関数 $f_R(z)$ に相当する。限界加速度を R 、ある期間に発生する最大加速度の大きさを S で表し、両者は互いに独立で同時密度分布が $f_S(s)f_R(r)$ で表されるとすると、損傷確率 $P_f = P(R < S)$ は地震危険度曲線 $1-F_S(z)$ と限界地震動指標の密度関数 $f_R(z)$ を用いて式(2)で求めることができる。さらに、図-2に示すようにMCSによって密度関数 $f_R(z)$ に従う限界加速度のサンプル z_i を n 個発生させると、式(2)から明らかなように損傷確率 p_f は式(3)で算定される。

$$p_f = \int_0^\infty \int_0^\infty f_S(s) f_R(r) ds dr = \int_0^\infty (1 - F_S(r)) f_R(r) dr \quad (2)$$

$$p_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - F_S(z_i)) \quad (3)$$

キーワード 損傷確率，モンテカルロシミュレーション，斜面，地震時安定性

連絡先 〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計（株）地盤・構造部 TEL 03-4464-5525

4．数値計算例

検討に用いたモデル，すべり線を図-3に，各層の地盤物性値を表-1に示す．A層～D層のせん断弾性係数(G)および減衰定数(h)はせん断ひずみ(γ)に関する依存性を有するものとし，標準的な特性($G/G_0 \sim \gamma$ 関係， $h \sim \gamma$ 関係)を与えた．また入力地震動としてはタフト波（1952年 Kern County 地震，S69E成分）を用いた．以上の条件で試行回数100回のラテン方格法によるMCSを実施し，図-4に示す損傷度曲線を算定した．さらに，損傷度曲線と図-5に示す4地点の地震危険度曲線から年損傷確率を式(3)より算定した．求められた損傷確率をまとめて図-6に示す．

5．まとめ

限界加速度に関するMCSを行うことにより比較的少ない計算労力で損傷確率の算定を行うことができた．今後は強度設定の考え方やすべり安全率の定義と損傷確率の関係について検討を行う予定である．

参考文献

- 1) 吉田郁政，鈴木修一：限界地震動指標を用いた損傷確率の効率的な算定方法，構造工学論文集，pp.201-206，2003

表-1 地盤物性値一覧

地盤物性値	A層	B層	C層	D層	基盤	変動係数
単位体積重量 (kN/m^3)	17.5	17.5	16.5	16.0	16.0	0.05
粘着力 (kN/m^2)	15.0	50.0	100.0	600.0	-	0.40
内部摩擦角 ($^\circ$)	10.0	30.0	30.0	35.0	-	0.10
初期せん断弾性係数 ($\times 10^3 \text{kN/m}^2$)	40	71	152	261	408	0.25
ポアソン比	0.45	0.45	0.42	0.42	-	-

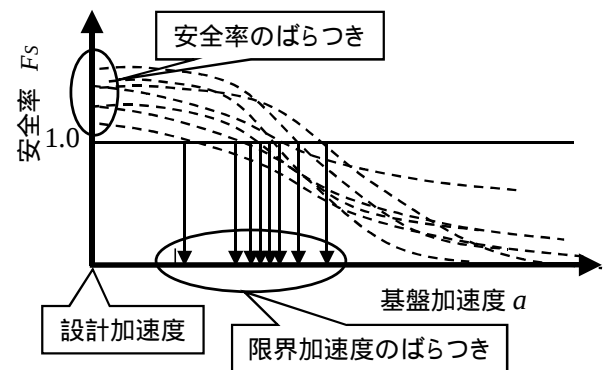


図-2 提案法による損傷度曲線の算定

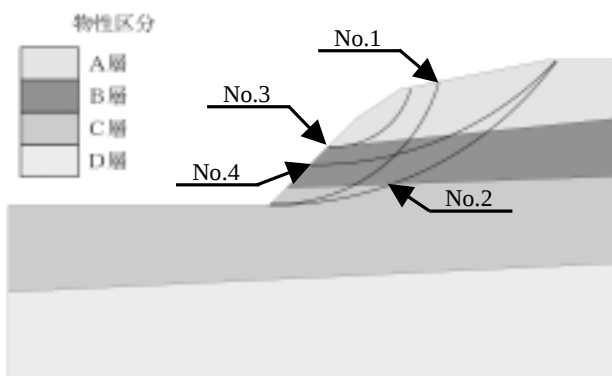


図-3 モデルの層区分および想定すべり線

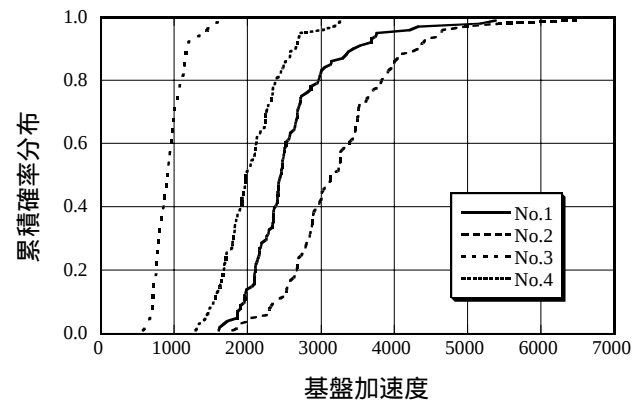


図-4 MCS によって算定された損傷度曲線

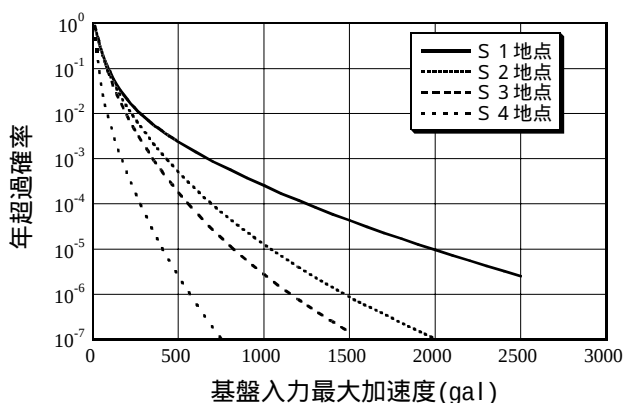


図-5 地震危険度曲線

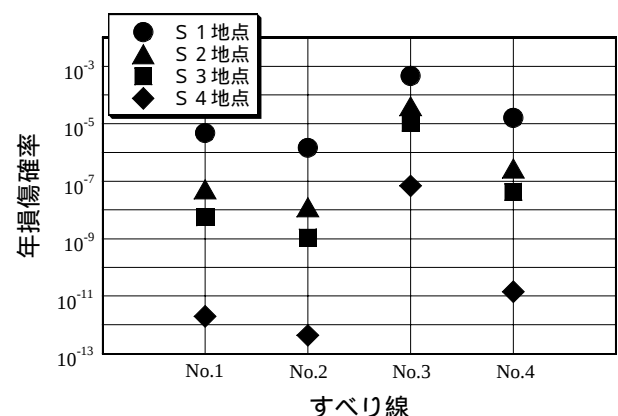


図-6 各すべり線の年損傷確率