

シェイクダウン定理に基づく 地盤の振動特性を考慮した土構造物の動的安定解析

防災設計工学研究室 沖田 尚子
指導教官 大塚 悟

1. はじめに

従来、地震などの動的荷重に対する土構造物の安定性の評価は、時刻ごとに変化する地震加速度を静的荷重に置き換えて土構造物に作用させる震度法によって行われてきた。震度法は簡便に解が得られる反面、地盤材料や地震波の特徴を省略しているため、実際現象では生じている地震波の減衰、共振現象や地盤材料のひずみ依存性について考慮することができない。

そこで本研究ではシェイクダウン定理を地震のように繰り返し荷重の方向や大きさが変化するものにも適用できるように拡張した。さらに、せん断強度の低減係数を用いて動的安全率を定義し、有限要素法を用いた斜面の安定解析プログラムを開発した。これによって地震の時刻歴情報や、特定の振動数の時には安全率が非常に小さくなるような共振現象を表現することができる。さらに今回は、地盤の動的応答特性の非線形性や有限要素法における仮想境界（エネルギー伝達境界・粘性境界）の設定、規則波と不規則波の違いなどについて安定解析を行い、安全率への影響を調べた。

2. シェイクダウン定理に基づく動的安定解析

シェイクダウン定理は2つの塑性定理（上・下界定理）を基礎とし、荷重荷方向・大きさの繰り返し変化に対する物体の応答が最終的に弾性応答に落ち着くか否かによって物体の破壊を判定することができる。斜面の動的安全率はせん断強度低減係数を用いて慣用的に表現され（図1）、解析においては斜面の崩壊する際の極限值を用いて（全体）安全率を評価している。

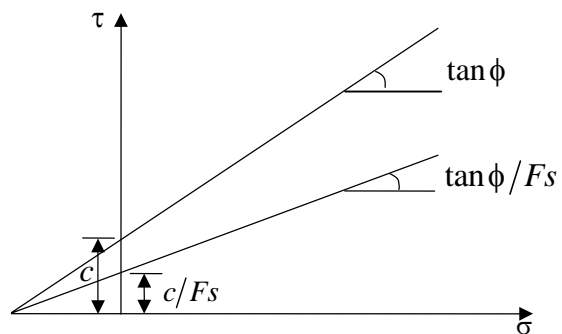


図1：動的安全率の定義

3. 仮想境界の境界条件について

有限要素法では、地盤をある有限な範囲で切り取って解析を行うため、境界面の取り扱いが非常に重要となる。特に地震波を入力するような解析では、その解析範囲内でエネルギーが閉じ込められてしまい、正確な解を得られていない可能性がある。そこで本研究では図2に示すように、地盤モデルの側面にエネルギー伝達境界を、底面に粘性境界をそれ

それぞれ設定し、境界条件による誤差問題を解決するよう試みた。

エネルギー伝達境界とは、仮想境界上に生じる応力を未知の仮想境界上の節点変位で表して運動方程式を立てて計算を行うもので、解析領域からの逸散波を考慮する効果がある。

一方粘性境界はモデルの最下層に減衰層を作り、全体系の減衰マトリックスに粘性境界マトリックスを加える事によって逸散波のエネルギーを吸収する働きがある。

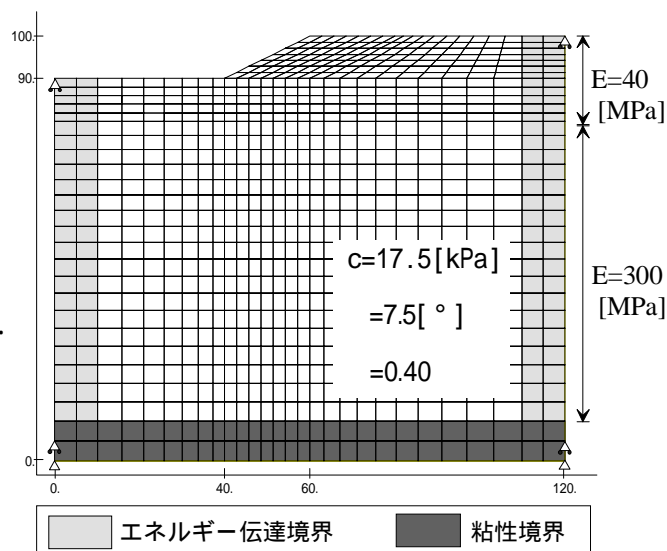


図 2：解析に用いた地盤メッシュと土質定数

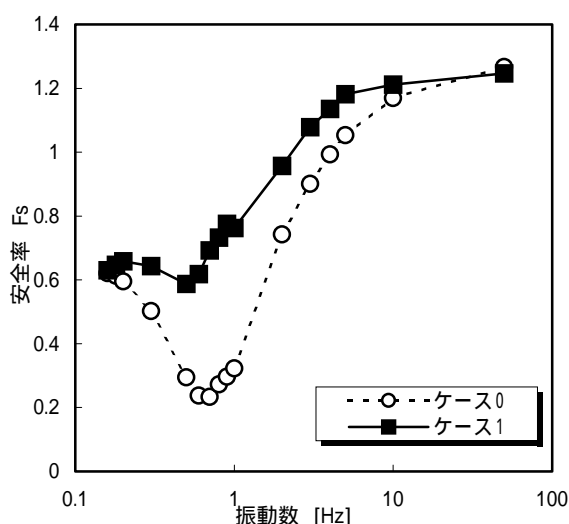


図 3：仮想境界を考慮した安定解析結果

解析には最大加速度 200[gal]の正弦波をモデル下部に水平に入力した。入射波の振動数を 0.1[Hz]～10[Hz]まで変化させ、仮想境界を設定しない場合(ケース0)と設定する場合(ケース1)とで安全率の変化を比較した。結果を図3に示す。

図3より、ケース0よりケース1の方が全体的に安全率が大きくなり、共振点が左にシフトしている。これは、エネルギー伝達境界及び、粘性境界によって地盤の振動特性の中の減衰項が増加し、地盤の固有周期が長周期側にずれたためである。

共振点の安全率からもわかるように、ケース1の方がより現実的な値を得ている。

4. 地盤材料のひずみ依存性

実際の地盤は、それ自身に生じているひずみ振幅によって性質を変える。今回は、図4に示すような、せん断弾性係数と減衰定数にひずみ依存性を有する地盤材料を解析するにあたって、等価線形化法を用いて繰り返し計算を行い、地震応答を求めた。比較のために表1に示す2ケースを考えた。

2ケースとも、その他の土質定数には先の図2と同じものを使用した。解析結果を図5に示す。

表 1 : 解析ケース

	仮想境界	ひずみ依存性	備考
ケース 2	あり	なし	減衰定数 $h=10[\%]$ (一定)
ケース 3	あり	あり	図 4 に示すひずみ依存性を考慮

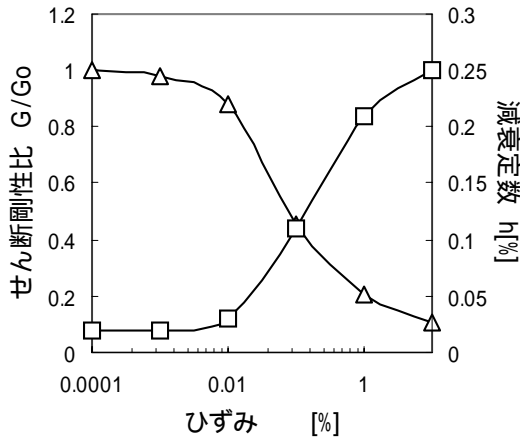


図 4 : 材料のひずみ依存性

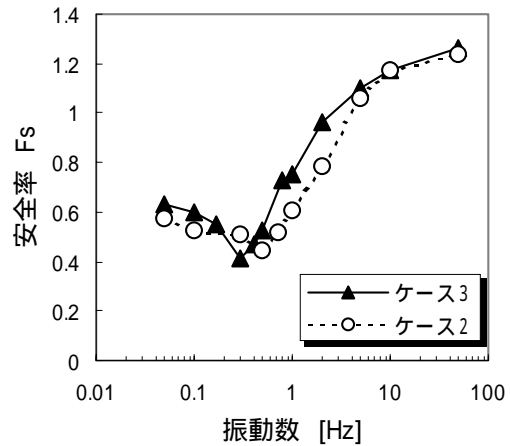


図 5 : 解析結果

図 5 より、ケース 3 はケース 2 に比べて共振点が左にシフトしている。これはひずみ依存性を考慮した事によって、常にひずみ振幅によって地盤の性質が書き換えられ、地盤の固有周期が変化しているためである。今までは、ひずみに関係なく一定の値を用いて計算を行っていたが、その値には明確な基準がなく、不透明な部分が多い。今回のようにひずみ依存性を考慮することによって、より精度の高い現実的な解析が期待できる。

5. 入力波と安全率の関係

表 2 不規則波

	最大加速度 [gal]
神戸 (95)	796
エルセントロ (40)	326
八戸 (94)	183
安芸灘 (01)	136
呉 (01)	67
長岡 (02.2.2)	25

次に、入力波に実際の地震波を用いて、不規則波による安定解析を行う。今までは入力波として正弦波を用いていたが、実際の地震波は加速度や周期が時刻ごとに変化する不規則波である。表 2 のような過去の地震における加速度データをいくつか用意した。

解析には実際の加速度データをそのまま使用したものと、最大加速度を 200[gal] に統一し、地震の規模を問わず、波形のみを用いたものという 2 ケースを計算した。図 6 はその解析結果で、左から最大加速度の大きい順に並んでいる。

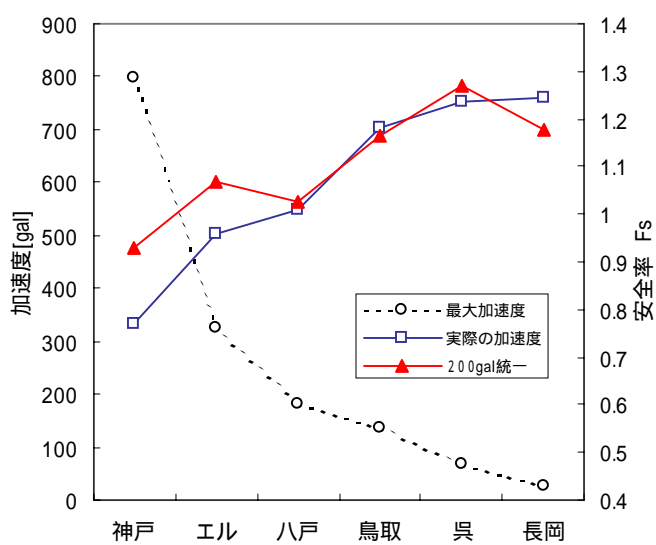


図6：不規則波に対する安全率への影響

図6より、実際の加速度データを用いた解析では、最大加速度が大きくなるに従って安全率は減少するという、順当な数値を得ることができた。次に地震波の最大加速度を統一した場合は、所々で安全率の逆転が見られた。これは、シェイクダウン解析によって加速度履歴の影響が考慮されているからである。

6. まとめ

震度法を拡張し、より現実に近い解析をするために、シェイクダウン定理と動的安全率の定義を用いた解析方法の適用性を確認した。

解析には有限要素法を用い、仮想境界にはエネルギー伝達境界と粘性境界を設定することによって振動エネルギーを吸収し、共振点付近ではより現実的な解を得ることができた。

さらに、実際の地盤はひずみ振幅によってその性質を変えることから、減衰定数とせん断剛性比のひずみ依存性を考慮し、不明確な入力値を取り除くことができた。

また、実際の地震の加速度データを用意し、最大加速度をすべて同じにした場合の安定解析を行うことによって、入力波の波形による安全率への影響を調べた。また、実際の加速度データを用いてシェイクダウン定理による安定解析によって得られた安全率と震度法によって得られた安全率を比較し、加速度履歴を考慮した解析法の有為性を確認した。

参考文献

- (1) Simatupang, P.T. (2000): Study on the stability of Earth structures based on Shakedown theorem: 長岡技術科学大学, 博士論文.
- (2) 三船尚樹 (2001): 地盤の振動特性を考慮した斜面の耐震安定解析に関する研究: 長岡技術科学大学, 修士論文.
- (3) 土木学会編 (1989): 地震動・動的特性; 技報堂.
- (4) 土木学会編 (1989): 動的解析の方法; 技報堂.