

三次元地形における地震応答解析 (FEM) 結果の評価手法に関する一考察

吉田 力*・片平 大暉*・樋上 広篤*・櫻井 稜太*

A Consideration of Evaluation Methods for the Results of Seismic Response Analysis (FEM) in Three-Dimensional Topography

Chikara Yoshida *, Daiki Katahira *, Hiroshige Higami *, Ryota Sakurai *

* 大日本ダイヤコンサルタント株式会社 北海道支社 Dia Nippon Engineering Consultants Co.,Ltd.,
2-13-2 Kita10-jonishi Kita-ku,Sapporo-shi, Hokkaido 001-0010Japan. E-mail: yoshida_chikara@dcne.co.jp,
katahira_daiki@dcne.co.jp , higami_hiroshige@dcne.co.jp, sakurai_ryota@dcne.co.jp

キーワード： FEM, 地震応答解析, 三次元地形

Key words： FEM, Seismic Response Analysis, Three-Dimensional Topography

1. はじめに

近年、我が国では大規模な地震災害が頻発しており、南海トラフ巨大地震等のリスクを見据えた防災・減災対策の高度化が急務となっている。特に山間部のインフラや都市近郊の造成宅地においては、三次元的な地形特性に起因する局所的な揺れの増幅や斜面崩壊が深刻な問題となっている。

これまで多用されてきた二次元断面による簡略化解析では、これら複雑な地形効果を的確に評価することは困難であり、対策の過小評価や非効率な投資を招く懸念があった。

このような課題に対し、有限要素法を用いた三次元地形の地震影響解析は、三次元地形特有の地震波の集中現象や複合的な地滑り挙動を再現・予測できる有効な技術として重要性を高めている(佐々木, 2013)。本論文では、頻発する近年の地震災害への対応という観点から、三次元有限要素解析結果における評価手法として有効と考えられる要素と判断基準、さらに今後の展望について述べる。

2. 技術概要

2.1 地震応答解析技術の概要

地震応答解析技術とは、「過去の地震波」や「想定される地震動」を地形モデルに入力し、地盤や構造物がどのように揺れ、変形し、破壊するかをコンピュータ上で予測評価する技術である。耐震評価の妥当性を検証し、被害を予測するための重要な根拠である。解析技術は、主に「次元数(空間)」と「材料の特性(挙動)」の2軸で分類される。

2.2 「空間の次元数」による分類と特徴

① 一次元解析

地盤を水平な無限の層と仮定し、地震波が真下から真上へ伝わる挙動のみを計算する。計算負荷が極めて低く、揺れやすさを迅速に評価が、複雑な地形は考慮できない。

② 二次元解析

奥行き形状が長い同一断面形状モデルの解析に適した手法。一次元より破壊状態を把握し易く実務に使用実績が多いが、三次元的な波動伝播効果は考慮できない。

③ 三次元解析

地形、地層、構造物を三次元要素として解析する手法である。尾根での揺れの増幅やねじれを伴う複雑な崩壊挙動を

考慮できるがモデル作成と計算に時間と費用が掛かる。

2.3 「材料の特性(挙動)」による分類と特徴

① 線形解析 (Linear)

構造物や地盤をバネと扱い、強い力を加えても元に戻ると仮定して計算する手法である。計算がシンプルで高速であるが、地震影響の評価には適していない。

② 等価線形解析 (Equivalent Linear)

発生した最大変形(ひずみ)に見合った剛性と減衰でパラメータを修正して繰り返し計算する手法である。強い地震による液状化や土砂崩れは扱えない。

③ 非線形解析 (Non-linear)

地震の進行に伴い、材料がひび割れ崩壊していくプロセスをリアルタイムで追従計算できる手法である。地震時の崩壊状態を予測できるが、計算が極めて複雑である。

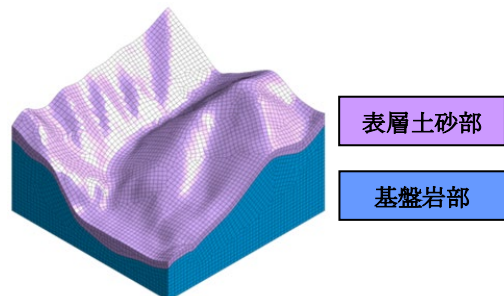
2.4 現代のトレンドと課題

現在の地震応答解析は、「三次元×地震応答解析(動的非線形解析)」へとシフトしている傾向にある。背景としてPCの高性能化により、従来は困難であった大規模な要素の解析が可能になったこと。さらに UAV や LiDAR 計測による高精度な三次元地形データの取得技術の進展が挙げられる。

3. 三次元地形における地震応答解析

3.1 解析モデルと各種定数

PCの高性能化が進んだと言えども、実際の解析時間を考えると通常の検討業務では、1日(24h)程度で解析が終了することが望ましく、現状では、30万要素程度が実用的である。



第1図 地形モデル

解析モデルは、予測崩壊部を網羅した範囲となるように、三次元形状を 250m×250m×160m とし、5m の六面体メッシュを基本として、地層は基盤岩部と表層土砂部に分けた解析モデルを作成した。使用物性値を第 1 表に示す。

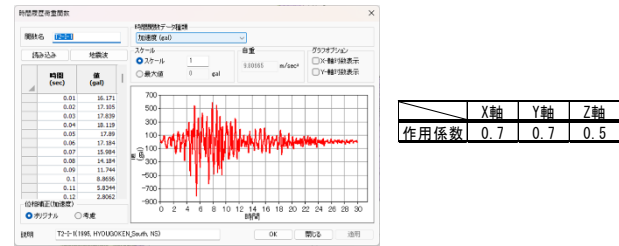
第 1 表 使用物性値

	物性値						
	ポアソン比 ν	ヤング率 E(kN/m ²)	単位体積重量 γ(kN/m ³)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 φ(°)	引張強度 σ _t (kN/m ²)	材料減衰 減衰比 h
表層土砂部	0.3	420000	19	300	25	20	0.02
基盤岩部	0.3	7500000	25	500	40	500	0.02

拘束条件とダンパー要素を考慮し、側面には自由地盤および自由地盤ダンパーを底版には底面ダンパーを設置した。

3.2 作用地震波形と作用係数

入力波形としては、道路橋示方書Ⅱ-I-1 の波形を三方向(X 軸東西, Y 軸南北, Z 軸上下)で係数低減し作用させた。



第 2 図 作用地震波形と作用係数

4. 評価項目と判断基準

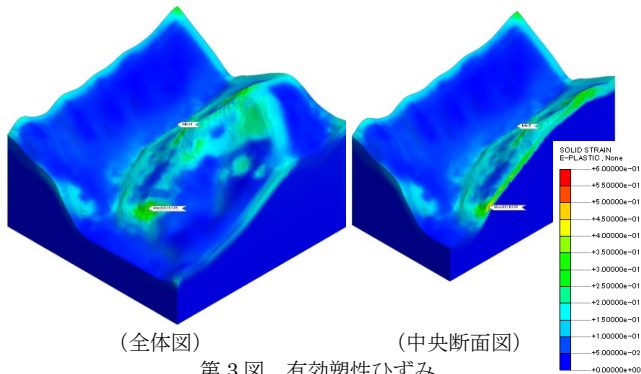
4.1 地震応答解析における評価項目

地震波形の影響は、解析要素が相互に異なる動きをした結果として要素内部の状態に表れた現象である。特に以下の項目に着目した。

- ①有効塑性ひずみ：微小な破壊による不可逆性のひずみ
- ②相 対 変 位：部位ごとの差分変位
- ③加 速 度：瞬間的な変動エネルギー

4.2 有効塑性ひずみ

突出尾根部を含む斜面の基盤岩盤と表層土砂部の境界に30%以上の有効塑性ひずみの発生が確認された。

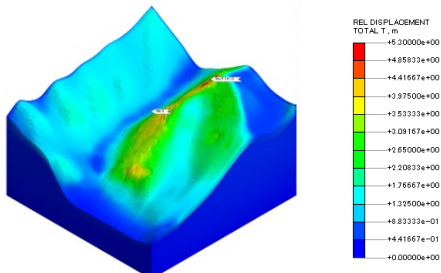


第 3 図 有効塑性ひずみ

突出した尾根部に有効塑性ひずみが生じる結果となった。

4.3 相対変位

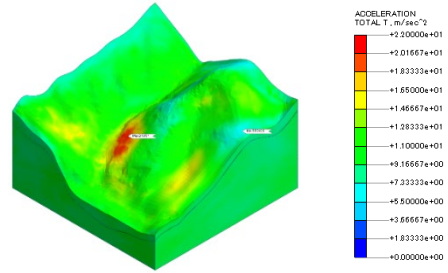
突出尾根部に合成相対変位が増大した。左側谷部の変位が小さく突出尾根部が最大約 5.2m 変位を示した。



第 4 図 相対変位

4.4 加速度

突出尾根部に約 2000gal の非常に大きな加速度が生じた。周辺部分の 700gal に比べて約 3 倍の増幅が確認された。



第 5 図 加速度

4.5 有効塑性ひずみによる判断基準

塑性ひずみの増加は、地盤物性の持つ力学的耐力を超過した外力が作用した結果であり、地盤物性に变化が生じていると考えられている(日外, 2016)。せん断ひずみの範囲は、ひずみレベル

- 0.01%未満：弾性
- 0.01%以上～1.0%未満：弾塑性
- 1.0%以上：破壊

本検討モデルでは、30%以上の有効塑性ひずみが基盤岩盤と表層土砂部の境界に発生しており、境界部を境に不安定化が進行すると判断した。相対変位および加速度の値も不安定化の進行評価の妥当性を否定しない結果となった。

5. 考察

地盤の有限要素法解析では、局所安全率による評価が一般的であるが、地震による斜面崩壊は、地震直後に発生する場合と、ある程度の時間経過後に発生する場合がある。局所安全率のみでの評価では、地震直後の評価は可能であるが、不安定化の兆候までは評価していない。

そのため、物性の変化状態を不安定化評価に活用することにより、崩壊予兆の見落としを防ぐことを考慮した。物性変化の状態を把握し評価できる要素として、有効塑性ひずみを採用した。ひずみレベル値から物性変化を推定する指標があるため、評価要素として適していると判断した。

有効塑性ひずみは、外力が除荷された後も残留し、その後に作用する外的要因によってさらに累積するため、物性変化の進展を評価できる可能性にも期待している。

6. まとめ

岩盤崩壊の原因として風化・劣化による亀裂の進展が挙げられている(日外, 2011)。一般に風化・劣化は、時間経過による物性変化として理解されているが、その要因となる事象は多岐にわたり、外力による微小な破壊も風化・劣化を加速させる要因の一つである。特に大規模な地震による影響は非常に大きいと考えられる。

本評価手法は地震動による不安定化の評価手法であるが、今後、この考えを発展させ、作用外力による風化・劣化の進行を評価する手法の確立を目指したい。

文 献

佐々木靖人, 浅井健一, 日外勝仁, 江口貴弘『ゆるみ岩盤の安定性評価法の開発』土木研究所 (2013 年)
 日外勝仁, 江口貴弘, 佐々木靖人『FEM を用いた進行性ゆるみ岩盤の解析モデル化方法と評価の流れ』公益社団法人土木学会 (2016 年)
 日外勝仁, 伊東佳彦, 佐々木靖人『岩盤斜面崩壊事例分析に基づく崩壊形態と崩壊分離面の関係』日本応用地質学会 研究発表会講演論文集 (2011 年)