

動的弾塑性 F E Mによる宅地盛土の耐震性能照査のための一考察 (その2 緩傾斜宅地の液状化)

正会員 若井 明彦\*  
正会員 二木 幹夫\*\*  
正会員 鈴木 智貴\*\*\*

地震 斜面 宅地  
崩壊 残留変位 有限要素法

はじめに

宅地変状が大規模な場合、盛土の一部が地震中に急激な強度低下を起こした可能性がある。強度低下の機構は何通りか考えられるが、地下水位の高い地区で疑われるのは砂質土層の液状化<sup>1)</sup>である。

本稿では、比較的緩い傾斜を有する宅地が液状化により変状する場合を想定して、砂の液状化特性を考慮した変形照査を行う際の留意点について考察を行う。また、震度法による安全率との関係についても検討を進める。

解析条件

解析対象は Fig.1 のような緩傾斜 (一様な勾配 5/100, 傾斜部分の水平長 100m) の仮想盛土斜面である。地盤は 10m 厚さのゆるい砂質土層であり、簡化のため、同層下部は工学的基盤とした。下端に水平地震力 (Fig.2 の加速度時刻歴) を入力して、残留変形性状を調べた。

土の構成モデルに、鶴飼・若井による簡易繰返し载荷モデル<sup>3)</sup> (UW モデル) を用いた場合 (Case A) と、液状化を考慮するために拡張したモデル<sup>1)</sup> (UW 軟化モデル: 非排水条件・全応力解析) を用いた場合 (Case B) の 2 通りについて解析を行った。Case A については、液状化による強度低下を考慮するため、あらかじめ小さな  $c$  を与えるとともに、 $c$  を変えながらパラメトリック・スタディを実施した。材料パラメータを Table 1 にまとめる。

残留変位と安全率の関係 (解析結果)

Case A のパラメトリック・スタディにおいては、 $c$  を一定とすると、 $c$  が大きくなるほど耐震性は向上する。一連の解析結果で得られた、斜面上における残留変位量 (水平・鉛直の合成分) の最大値  $\delta$  を縦軸に、その時の安全率  $F_s$  (ただし水平震度係数  $k_h=0.25$ ) を横軸にプロットしたものが Fig.4 である。 $F_s$  算定には、FEM により震度法 LEM と同様の安定計算を実現する SSRFEM<sup>4)</sup> を採用した。同図の  $F_s=0$  (鉛直座標軸上) 位置には、Case B で得られた結果を  $\delta$  でプロットした。

Case A の一連の結果を見ると、安全率  $F_s$  が 0.6 程度以下になると残留変位量が増加し始めている。これを関連研究<sup>2)</sup>の各ケースと比較すると、残留変位の増加し始める

$F_s$  の値は本ケースの方が小さい。すなわち、緩傾斜斜面に対して液状化を主因とする変状を考える場合、予め低減させた強度定数を用いて震度法 LEM で計算した  $F_s$  は、現象を危険側に評価してしまう可能性がある。

液状化特性を構成モデルに取り入れた場合 (Case B)

Table 1 各 Case の材料パラメータ

Case	材料パラメータの概要
A	$E=95,000$ ( $V_s=137\text{m/s}$ , $N=5$ を想定) $\phi=3^\circ$ ( $c$ を変化させた一連の解析) 他は関連研究 <sup>2)</sup> に同じ。
B	$E=95,000$ ( $V_s=137\text{m/s}$ , $N=5$ を想定) $\phi=30^\circ$ , $c'=0^\circ$ . 軟化パラメータ: Fig.3 のように設定. 他は関連研究 <sup>2)</sup> に同じ。

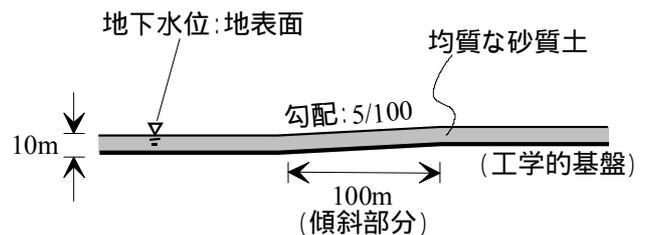


Fig.1 解析対象とした緩傾斜の仮想斜面

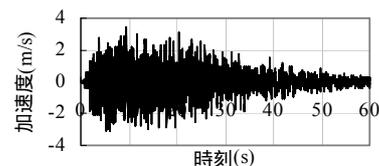


Fig.2 入力地震波形 (水平加速度)

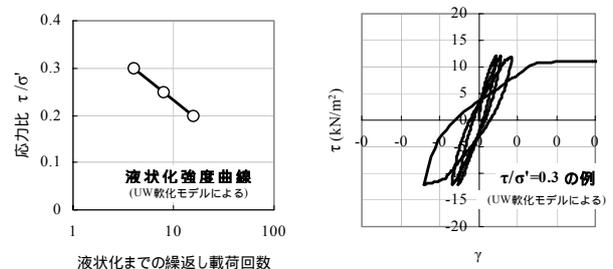


Fig.3 砂の液状化特性の例 (左図: 文献<sup>5)</sup>を再現)

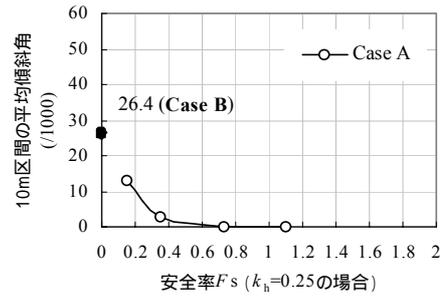
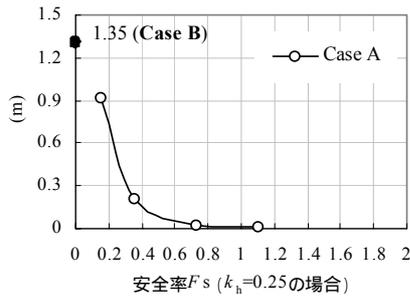


Fig.4 斜面上の最大残留変位  $\delta$  と安全率 . Fig.5 10m 区間平均傾斜角の最大値と安全率 .



Fig.6 地震後の残留変形状 (傾斜部分を拡大): Case B .

に得られた結果は、Case A で極めて小さな強度を仮定した場合 (図中の曲線の左端) よりさらに大きな変位量を与えた。砂層が完全に液状化してしまうと、せん断抵抗がほぼゼロのまま残留変位が急激に累積していくので、地盤の残留変位量を適切に予測するためには、砂の液状化特性を考慮したモデル化が望まれる。地下水位がより低い場合、砂の密度がより高い場合では液状化に対する抵抗度が高く、変位はより小さな結果となるであろう。

#### 残留傾斜角と安全率の関係 (解析結果)

関連研究<sup>2)</sup>の後半で示した「斜面上の 10m 区間での平均傾斜角度」に着目し、その最大値を縦軸にプロットしたものが Fig.5 である。Fig.4 と同様の傾向が見られる。なお、Fig.5 に示されている残留傾斜角の大きさ ( $\delta=0.5m$  程度で残留傾斜角 10/1000) は、同程度の  $\delta$  が生じている関連研究<sup>2)</sup>のケース (その中の勾配の緩い斜面のケース) の結果と比較すると、大きく異なった値ではない。

#### 全体の変形状 (解析結果)

Case B の場合の斜面全体の变形形状を Fig.6 に示す。地盤全体が側方流動的な塑性变形をしている。関連研究<sup>2)</sup>で紹介したような斜面勾配がより大きい場合は肩周辺の変位・傾斜が特に顕著であったが、このような緩い斜度かつ長大な宅地の液状化被害の場合、甚大な地盤変状が広く斜面全域に及ぶ可能性のあることが示唆された。ただし、地震時に液状化の可能性のある地層が、このように宅地全域に厚く堆積していることは稀である。適切な地盤調査等に基づく地盤構造のモデル化が必須である。

#### まとめ

今回の解析では、地下水位を地表面に仮定するという厳しい条件を設定したが、動的弾塑性 FEM により実際の宅地盛土の地震時残留変形解析を行う場合、地盤構造と地下水位の空間的推定<sup>1)</sup>は極めて重要である。表面波探査・ボーリング調査・SWS・造成履歴等から総合的に推定される地盤構造と地下水位をもとに FEM 解析のためのモデルを構築し、現場採取土 (できれば不攪乱試料) の室内試験もしくは適切な経験則を参照した材料パラメータに基づき、動的弾塑性 FEM を実施することで、適切に造成宅地の耐震性能照査を行うことができる。これにより、地下水位低下と盛土材料の力学特性の改善 (締固め、改良等) など、必要な液状化対策が可能となるであろう。

#### 参考文献

- 1) 若井明彦, 清水直道, 田村昌仁, 林宏一 (2006): 緩傾斜宅地の地震時残留沈下に関する解析的考察, 第 3 回地盤工学会関東支部研究発表会 (Geo-Kanto 2006) 講演集, pp.61-66 .
- 2) 若井明彦, 二木幹夫, 川端宏和 (2007): 動的弾塑性 FEM による宅地盛土の耐震性能照査のための一考察 (その 1 斜面の残留変位と安全率), 2007 年度日本建築学会大会 (九州) 学術講演会 講演概要集 (印刷中) .
- 3) Wakai, A. and Ugai, K. (2004): A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, Soils and Foundations, Vol.44, No.4, pp.83-97 .
- 4) 地盤工学会編 (2003): 弾塑性有限要素法がわかる, 地盤技術者のための FEM シリーズ, pp.151-160.
- 5) 石原研而 (1976): 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp.196-199 および pp. 252-253.

\* 群馬大学大学院工学研究科 准教授

\*\* (財)ベターリビング 筑波建築試験センター 所長

\*\*\* 群馬大学大学院生

\* Dept. Civil and Environmental Eng., Gunma University

\*\* Center for Better Living

\*\*\* Graduate student of Gunma University