強非線形領域における水平動の加速度増幅に 対する飽和度の影響評価

田中 宣多¹·上田 恭平²

¹正会員 京都大学研究員(非常勤) 防災研究所(〒611-0011京都府宇治市五ケ庄) E-mail: tanaka.yoshikazu.5m@kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ケ庄) E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

地滑りや地震時の液状化といった複雑な地盤挙動を高精度に評価するために,地盤材料に関する構成モ デルや数値解析手法が提案されている.しかし,地盤の強非線形領域における地盤増幅率は十分に明らか になっていない.さらにそれに対する飽和度の影響もよく分かっておらず,危険側の評価となっている可 能性がある.そこで本研究では,地盤の強非線形領域を対象に,地表面の最大応答加速度に対する飽和度 の影響を明らかにするために,有効応力解析を実施した.解析の結果,液状化の伴わない非線形解析にお いて地表面最大加速度は,飽和度の影響を受けなかった.一方,液状化を伴う非線形解析において地表面 最大加速度は,飽和度の影響を受ける.特に,急な間隙水圧の上昇を伴う条件で,地表面最大加速度に対 する飽和度の影響が最も大きくなる.

Key Words: partially saturated ground, effective stress analysis, non-linear analysis, accerelation

1. はじめに

地滑りや地震時の液状化といった複雑な地盤挙動を高 精度に評価するため、これまでに数多くの地盤材料の構 成モデルおよび数値解析手法が提案されている.地盤災 害の評価法は、詳細法と設計でよく用いられる簡易法が ある.詳細法に分類される有効応力解析では、複雑な非 線形性や飽和度の影響を考慮することができる.一方、 簡易法に分類される地盤増幅率の評価では、これまでに 数値解析的な検討^{1,2}と観測記録^{3,4}に基づく検討が行わ れてきたが、水圧が変動するレベルの複雑な非線形性や 飽和度の影響は考慮されていない.現在の地盤災害の予 測法は、大地震に対応した評価となっていない可能性が ある.

地盤災害のリスクを評価する際に,詳細法では非線形 性や飽和度を組み込むことでリスク評価が可能であるが, 簡易法を用いて地盤挙動の予測を行う場合,地盤物性の 非線形性や飽和度の影響をどのように組み込んでリスク 評価を行うか検討する必要がある.特に,大地震時には 地盤材料の非線形性の影響が無視できなくなり,強非線 形領域での地盤物性に対する飽和度の影響を定量的に評 価しておくことは,今後の地盤災害対策を考える上で非 常に重要となる.

非線形地盤に対する飽和度の影響については、粘弾性 モデルを用いた解析の場合、水平震動は飽和度の変化に 影響を受けないことが分かっている^{5,0}.しかし、間隙 水圧による地盤の非線形では、間隙水圧の変動が飽和度 の影響を受ければ、液状化を伴う強非線形領域における 地盤増幅率に対する飽和度の影響は無視できないと考え られる.そこで本研究では、地盤の強非線形領域を対象 に数値解析を、飽和地盤および不飽和地盤において行い、 地表面の応答加速度を検討する.本研究によって、地盤 災害リスク予測におけ飽和度の影響を評価することを試 みる.

2. 有効応力解析の概要

(1) 土柱モデル

解析で使用する地盤のモデル化は、深さ 16 m の水平 成層地盤の一部を切り取った土柱モデルとする.解析に 用いる有限要素メッシュは、計 130節点 64 要素で構成さ れている.メッシュ寸法は、縦横 0.25 m の正方形とした (図-1).自由地盤を模擬するため、側方は循環境界に 設定した. すなわち,同一高さに位置する節点ペアの x 方向,y方向自由度が,それぞれ同一であると仮定した. メッシュ底面は節点自由度を拘束し,固定境界とした. 解析は,地盤の非線形性および飽和度の影響をみるため に,飽和度が Sr=100%の飽和地盤と Sr=97%の不飽和地 盤を用いて実施した.入力波は,テーパー付き正弦波 (1Hz),神戸波(NS)を用いた(図-2).

(2) 簡易三相系解析

地盤の構成則はひずみ空間多重せん断モデル[¬]を用いた.解析では、上田ら[®]によって飽和度が比較的高い砂 質系の不飽和地盤の地震時挙動に対して、サクションを ゼロと仮定し、液体と気体の混合体の等価な体積弾性係 数を用いる簡易三相系解析の適用が示されている.本研 究では、飽和度 Sr = 97%という飽和度の高い条件を対象 とし、式(1)を用いることで、簡易的に不飽和土の挙動 を評価する.

$$\frac{1}{K_{\rm P}} = \frac{S_r}{K_{\rm f}} + \frac{1 - S_r}{K_{\rm a}} \tag{1}$$

ここに、 S_r : 飽和度、 K_p : 等価体積弾性係数、 K_r : 間隙 水の体積弾性係数、 K_a : 間隙空気の体積弾性係数である.

非線形解析における地表面応答加速度に対す る飽和度の影響

地盤物性は、N4.5、5.0、5.5、9.0、10、11、13.5、15、 16.5 の計 9 地盤を用いた.各々の地盤物性は、簡易設定 法 ⁹を用いることで、N値、有効上載圧、細粒分含有率 から初期せん断剛性、初期せん断剛性に対する平均有効 応力を求めることができる.ここで行う解析は、地盤の ひずみによる非線形が、飽和度の影響を受けるのか明ら かにするために、液状化を考慮してない.よって液状化 パラメータは用いていない.

正弦波を入力した場合,N4.5 地盤,N5.0 地盤,N5.5 地 盤の地表面最大応答加速度は,飽和条件において1.59 m/s²,1.56 m/s²,1.49 m/s²を示し,飽和度97条件において 1.59 m/s²,1.56 m/s²,1.49 m/s²を示した(図-3).地表面最 大応答加速度は,飽和度低下による影響を受けなかった. N9.0 地盤,N10 地盤,N11 地盤,N13.5 地盤,N15 地盤, N16.5 地盤においても同様に飽和条件と飽和度97条件の 地表面最大応答加速度は同じ値であった.

神戸波を入力した場合,N4.5 地盤,N5.0 地盤,N5.5 地 盤の地表面最大応答加速度は,飽和条件において44.2 m/s²,38.7 m/s²,36.8 m/s²を示し,飽和度97条件において 44.2 m/s²,38.6 m/s²,36.8 m/s²を示した.N9.0 地盤,N10 地 盤,N11 地盤,N13.5 地盤,N15 地盤,N16.5 地盤におい ても飽和条件と飽和度97条件の地表面最大応答加速度



図-3 非線形解析における飽和地盤 PGA と St97 地盤 PGA の 比較

は同じ値であった.地表面最大応答加速度は,飽和度低 下による影響を受けなかった.よって,地盤のひずみ依 存の構成則を用いると,液状化を考慮しない場合,地表 面最大応答加速度は飽和度低下の影響を受けない.

液状化を考慮する地盤における地表面応答加 速度に対する飽和度の影響

(1) 地表面応答加速度の比較

解析では、珪砂7号(相対密度 60%)を地盤物性 ⁸と して用い、入力波は振幅を調整することで、過剰間隙水 圧比の変化に差が生じ、地表面応答加速度の変化を調べ る.ここでの解析では、間隙水圧の変動が飽和度の影響 を受けるのか明らかにするために、液状化を考慮する. 正弦波の振幅は 0.1 m/s², 0.5 m/s², 1.0 m/s², 2.0 m/s², 10 m/s², 15 m/s² に調整した.神戸波の振幅は、0.1, 0.5, 1.0 倍に調整した.

正弦波と神戸波を入力したときの飽和地盤とSr97地盤 の地表面最大応答加速度の比較を図-4 に示す.入力波 0.1 m/s², 0.5 m/s², 1.0 m/s², 2.0 m/s²では,Sr97地盤の方が, 飽和地盤よりも最大応答加速度は大きくなった.一方で, 入力波 10 m/s², 15 m/s²では,飽和地盤の方が,Sr97地盤 よりも最大応答加速度は大きくなった.神戸波を入力し たときの飽和地盤とSr97地盤の地表面最大応答加速度の 比較をみると,入力波 0.1 倍では,Sr97地盤の方が,飽 和地盤よりも最大応答加速度は大きくなった.一方で, 入力波 0.5, 1.0 倍では,飽和地盤の方が,Sr97地盤より も最大応答加速度は大きくなった.

過剰間隙水圧比の変化をみると、入力振幅が小さい場合は、間隙水圧の上昇はゆっくりとしている(図-5,図



図-4 神戸波入力レベル毎の地表面 PGA の比較



図-5 正弦波入力レベル毎の過剰間隙水圧比の比較



図-6 神戸波入力レベル毎の過剰間隙水圧比の比較

-6). 正弦波と神戸波で地表面最大加速度の比較に傾向 の差が生じるのは、間隙水圧の変化に差があるためと考 えられる.入力振幅が小さい場合では、負のダイレイタ ンシーが卓越しており、不飽和化で負のダイレイタンシ ーが低減されて加速度は大きくなる.入力振幅が大きい 場合では、正のダイレイタンシーの影響が出て、不飽和 化で正のダイレイタンシーが抑制されることで加速度は 小さくなる.

(2) 神戸波における伝達関数の比較

神戸波は、複数成分波を含む任意波であり、どの成分 波の振幅は大きく、どの成分波の振幅が小さいのかを知 ることは地震波の性質を把握する上で重要である. 有限 フーリエ係数から求まる振幅を地震波の継続時間を乗じ たフーリエ振幅スペクトルを入力0.1倍、入力0.5倍、入 力 1.0倍について求め、飽和地盤と Sr97 地盤で比較する. フーリエ振幅比は、土柱モデルの地表面および底面にお いて. 地表面出力のフーリエスペクトルを底面出力のフ ーリエスペクトルで除して求める. このフーリエ振幅比 を伝達関数とし、飽和地盤および不飽和地盤の地表面加



図-7 神戸波入力レベル毎の伝達関数の比較

速度に対する飽和度の影響を調べる(図-7).

入力 0.1 倍の場合, 伝達関数は高周波成分を主にもつ. 伝達関数の周波数 0-0.5Hz, 1-2Hz の領域では, 飽和地盤 と Sr97 地盤に差はみられない. 0.5-1.0Hz の領域では, 飽 和地盤の方が大きい値となる.入力 0.5 倍の場合, 伝達 関数は, 1-2Hz の領域では飽和地盤と Sr97 地盤に差は見 られない. 0-1Hz の領域では飽和地盤と Sr97 地盤に差が みられた.特に 0.3Hz 付近では飽和地盤が大きな値とな る.入力 1.0 倍の場合, 伝達関数は低周波成分が多くを 占める.特に, 0-0.5Hz の領域で飽和地盤の方が大きく なった.

5. まとめ

本研究は、地盤の強非線形領域を対象に、飽和地盤お よび不飽和地盤の地表面応答加速度に対する飽和度の影 響を明らかにするために、有効応力解析を行った.不飽 和地盤は、Sr97 地盤とした.非線形解析において地表面 最大加速度は、飽和地盤と不飽和地盤の違いはなく、飽 和度の影響をうけない.液状化が起こる地盤の強線形領 域において地表面最大加速度は、飽和度の影響を受ける. 地表面最大加速度は、入力波が小さいとき、不飽和地盤 の方が飽和地盤よりも大きくなった.一方で入力波が大 きいとき、飽和地盤の方が不飽和地盤よりも大きくなっ た.また、入力波が一定の振動数の場合と、任意の振動 数の場合で地表面最大加速度に対する飽和度の影響程度 は異なる.特に、入力レベルが大きく、急な間隙水圧の 上昇を伴う場合は、飽和地盤と不飽和地盤における地表 面加速度の差は大きくなった.

謝辞:防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net 強震記録を使用しました. ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 内山泰生,翠川三郎:地震記録および非線形応答解 析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価,日本建 築学会構造系論文集,571,87-93,2003.
- 野上雄太,坂井公俊,室野剛隆,盛川仁:表層地盤 と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地盤増 幅率の評価,土木学会論文集A1(構造・地震工学), 68(1),191-202,2012.
- 山口亮,翠川三郎:観測記録に基づく地盤増幅率の い非線形特性のモデル化,日本地震工学会論文集, 14(1),2014.
- 4) 池田孝,加藤研一,石田寛:地震観測記録に基づく 地盤増幅率の非線形性のモデル化,日本地震工学会 論文集,18(2),2018.
- Yang, J.: Frequency-dependent amplification of unsaturated surface soil layer, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 132(4), 526-531, 2006.
- Chen, W., Mou, Y., Xu, L., Wang, Z. and Lio, J.: Frequency-dependent dynamic behavior of a poroviscoelastic soil layer under cyclic loading, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 44, 1336-1349, 2020.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, 32(2), 1-15, 1992.
- と田恭平,白可,井合進:不飽和水平成層地盤の地 震時挙動に対する簡易三相系解析の適用性,土木学 会論文集 C,74(2),130-143,2018.
- 9) 三上武子,小堤治,中原知洋,井合進,一井康二: 液状化解析プログラム FLIP のパラメータの簡易設定 法(再訂版)の構築,第46回地盤工学研究発表会, 2011.

(Received September4, 2020) (Accepted,)

EVALUATION OF THE EFFECT OF SATURATION FOR HORIZONTAL ACCELERATION IN STRONGLY NONLINEAR REGION

Yoshikazu TANAKA, Kyohei UEDA

Constitutive models and numerical analysis methods for ground materials have been proposed in order to evaluate the complicated ground behavior such as landslides and liquefaction during earthquakes with high accuracy. However, the ground amplification factor in the nonlinear region of the ground has not been sufficiently clarified. Furthermore, the effect of saturation on it is not well understood, and there is a possibility that it will be evaluated on the dangerous side. Therefore, in this study, effective stress analysis was conducted to clarify the effect of saturation on the maximum response acceleration of the ground surface in the strongly nonlinear region of the ground. As a result of the analysis, the maximum acceleration of the ground surface was not affected by the degree of saturation in the nonlinear analysis without liquefaction. On the other hand, the maximum acceleration of the ground surface is affected by saturation. Especially, the effect of saturation on the maximum ground surface acceleration becomes the largest under the condition that the pore water pressure suddenly rises.