地盤の非線形性を考慮した地盤増幅と平均 S 波 速度の関係に対する液状化の影響

田中 宣多¹·上田 恭平²

¹正会員 京都大学研究員 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(Corresponding Author)

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

巨大地震に対する構造物の耐震設計や補強を考える上で,工学的基盤面と地表面の地盤増幅を適切に評価することが重要である.地盤増幅の簡易評価手法は,数値解析手法や観測記録に基づく手法に大別できる.地盤剛性の低下に伴う地盤の非線形性は,ひずみレベルの増加によるものと間隙水圧の増加によるものに分けられる.しかし,観測記録だけでは両者に起因する地盤の非線形性を完全に分離することはできない.本研究は,地盤の非線形性を考慮した加速度・速度増幅に対する液状化の影響を調べるために有効応力解析を実施した.地盤増幅は,平均S波速度を用いて整理することで,間隙水圧の増加に起因する地盤剛性低下の影響を示した.

Key Words: Effective stress analysis, Non-linear analysis, Amplification factor, Acceleration, Velocity

1. はじめに

巨大地震に対して、構造物の耐震設計や補強といった 防災、減災対策の立案が取り組まれている.その際に重 要となることは、工学的基盤面に対する地表面の地盤増 幅を適切に評価することである.地盤増幅の簡易的な評 価手法は、数値解析的な検討と観測記録に基づく検討が 取り組まれてきた.その中でも、広域での地震動強さの 分布推定を地盤の平均S波速度を用いて行う手法が観測 記録に基づくものの一つとして知られている.藤本・翠 川¹は、観測記録から地盤特性を抽出することを目指し て地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係式の回帰係数 に相当する値を、距離減衰式を導出することなく、同一 の地震において近接する2つの観測点で得られた記録の みから直接的に求める手法を提案した.

地盤剛性の低下に伴う地盤の非線形性は、ひずみレベ ルの増加に起因するもの(以下,"ひずみ非線形")と 間隙水圧の増加に起因するもの(以下,"液状化非線 形")に分類でき、地盤増幅に影響する.しかし、現場 の観測記録に基づく検討では、ひずみ非線形と液状化非 線形で地盤増幅は異なることは分かるが、過剰間隙水圧 が増幅に及ぼす影響は十分に分かっていない.本研究の 目的は、地盤の非線形性を考慮した地盤増幅に対する液 状化の影響を明らかにすることである.本研究では、数 値解析的検討として有効応力解析を実施した.

2. 有効応力解析

(1) 土柱モデル

解析で用いる地盤モデルは、水平成層地盤の一部を切 り取った土柱モデルとする.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.地盤物性は、高知県高知市および南国 市の地盤を対象とし、地盤増幅の地域性に着目した.

入力波は、観測波を使用し、1993年釧路沖地震,1995 年兵庫県南部地震,2000年鳥取西部地震,2003年三陸南 地震,2003年十勝沖地震,2004年新潟中越地震,2007年 新潟中越沖地震,2007年能登半島地震,2008年岩手北部 地震,2011年東北地方太平洋沖地震(5観測点分), 2016年熊本地震(4観測点分)の計19波を用いた.地盤 の構成則は、ひずみ空間多重せん断モデル³を用いた. 地盤のモデルパラメータは、N値,有効上載圧および細 粒分含有率に基づき簡易的に設定した³. 地盤の非線形 性の検討は、ひずみ非線形性と液状化非線形性に条件を 分けて解析を行った.

(2) 地盤情報

地盤情報は、こうち地盤情報公開サイトおよびK-NET から高知県高知市および南国市周辺の柱状図を用いて定 義した. 地盤サイトは、KOC7、岡豊、前浜、大そね、 浜改田、大津、国分の計7地盤とした. 液状化層は、土 質データに基づいて設定した. 液状化層の層厚は、 KOC7で6m、岡豊で10m、前浜で5.3m、大そねで1.0 m、浜改田で1.75m、大津で19.3m、国分で0.5mとなっ た.

本研究は、地盤深さ 30m の平均 S 波速度 AVS(30)を以下の式を用いて算定した.

$$AVS(30) = \frac{30}{\sum V_s} \tag{1}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
(2)

ここに Vsはせん断波速度 (m/s) , G はせん断弾性係数 (kN/m^2) , ρ は密度 (g/cm³) を意味する.本研究では, 密度 ρ は 2.0 g/cm³ とする.各実地盤での AVS(30)は, KOC7 で 188 m/s, 岡豊で 169 m/s, 前浜で 232 m/s, 大そね で 248 m/s, 浜改田で 219 m/s, 大津で 164 m/s, 国分で 232 m/s となった.

3. 地盤増幅の解析手法

有効応力解析結果は、藤本・翠川の検討方法 ¹を参考 にして整理を行った. 翠川らの検討 ⁴により、地盤増幅 (*AF*)と地表から深さ *d*までの地盤の平均 S 波速度 *AVS(d)*の関係について、以下の回帰式が明らかとなって いる.

$$\log AF = a + b \cdot \log AVS(d) \tag{3}$$

ここに、*a*および*b*は回帰係数である.距離減衰式を介 して求めた地盤増幅には地盤特性だけでなく、震源特性 や伝播経路特性の影響が含まれている可能性が言及され ている.本研究では、地盤増幅を入力波と地表面応答の フーリエ振幅比で定義する.地盤増幅を以下の式で表す.

$$AF' = PGM_{surface} / PGM_{input}$$
(4)

ここに, *AF*': 地盤増幅, *PGM*_{suface}: 地表面の応答加速 度もしくは応答速度のフーリエ振幅, *PGM*_{input}: 入力波 (加速度, 速度) のフーリエ振幅とする. フーリエ振幅 は, 振動数 1.0 Hz から 2.0 Hz までを対象とした. 地盤増幅(AF)の対数が AVS(d)の対数とともに単調減少 すると仮定すれば、(3)式の回帰係数 b (勾配) は、次式 (5)と示す.本研究では、深さ30mの平均S波速度AVS(30) を用い、藤本・翠川の提案式 ¹⁾を参考にして、基準とな る深さにおける平均S波速度は600 m/s とする.

$$b = -\log AF / \log(600 / AVS(30))$$
 (5)

回帰係数*a*は,地盤増幅*AF*が1.0の地盤における平均S 波速度 *AVS(d)*erにより変化する相対的な値であり, *AF*=1.0, *AVS(d)*=*AVS(d)*erを代入することで以下の式で表 される.

$$a = -b \cdot \log AVS(d)_{ret} \tag{6}$$

(6)式を(3)式に代入すると(7)式が得られる.

$$\log AF' = b \cdot \log(AVS(d) / AVS(d)_{ref})$$
(7)

本研究では、解析によって得られた地表面応答速度を 用いて、地表面の最大せん断ひずみを求めた.解析結果 にもとづく最大せん断ひずみと勾配 b の関係を整理する. 地盤の平均 S 波速度に基づく地盤増幅の推定手法を用い ることで、地盤増幅が間隙水圧の上昇に受ける影響を調 べることができる.

4. 加速度増幅

KOC7 地盤における加速度増幅に関する最大せん断ひ ずみと勾配 b の関係を図-1 に示す. KOC7 地盤の勾配 b は、すべての入力波で液状化非線形条件(LIQ)の方が ひずみ非線形条件(NL)に比べて大きい値となった. この結果は、加速度増幅は、ひずみ非線形条件の方が、 液状化非線形条件よりも大きくなることを意味する.

大そね地盤における加速度増幅に関する最大せん断ひ ずみと勾配 b の関係を図-2 に示す.大そね地盤の勾配 b は,KOC7 地盤と同様に,ほとんどの入力波に対して液 状化非線形条件(LIQ)の方がひずみ非線形条件(NL) に比べて大きい値となった.一方で,液状化非線形条件 (LIQ)の方が非線形条件(NL)に比べて小さい値とな る入力波は,2011年東北地方太平洋沖地震であった.

この時の大そね地表面における最大せん断ひずみは, 液状化非線形条件(LQ)で 0.031, ひずみ非線形条件 (NL)で 0.032 となった.大そね地盤が東北地方太平洋 沖地震を受けたとき,間隙水圧増加に起因する地盤剛性 低下の影響がひずみ増加によるものよりもわずかに大き くなったためである.

大そね地盤と KOC7 地盤の AVS(30)を比較すると、大 そね地盤は KOC7 地盤よりも AVS(30)の値は大きく、地 盤剛性が高いことから、大そね地盤の勾配 b は液状化非 線形条件とひずみ非線形条件ともに、負の値となったと 考えられる.

5. 速度増幅

KOC7 地盤における速度増幅に関する最大せん断ひず みと勾配 bの関係を図-3に、大そね地盤における速度増 幅に関する最大せん断ひずみと勾配 bの関係を図-4に示 す.最大せん断ひずみと勾配 bの関係は、ひずみ非線形 (NL)と液状化非線形(LIO)に分けて示した。

KOC7 地盤の勾配 b は、液状化非線形条件で0付近に 分布し、ひずみ非線形条件で-1付近に分布した.地盤剛 性低下が、間隙水圧の増加に起因して起こる場合、地表 面の応答速度は、基盤面での入力速度とほとんど同じで あることを意味する.同様の傾向が、岡豊、前浜、大津 でも見られた.大そね地盤の勾配 b は、液状化非線形と ひずみ非線形ともにすべて負の値となり、分布は重なる 部分もあった.同様の傾向が国分、浜改田でも見られた. 大そね地盤の平均 S 波速度は、KOC7 地盤よりも大きく、 液状化層の層厚も 1.0 m と小さいことから、大そね地盤 の剛性は KOC7 地盤よりも高く、液状化非線形とひずみ 非線形の速度増幅に差が表れにくいと考える.

6. まとめ

本研究は、実地盤を対象に有限要素法を用いた解析を 実施した.地盤増幅は、液状化の影響を以下のように受 けることを明らかにした.データ整理は、観測記録に基 づく提案式^Dのデータ整理手法を参考にした.

(1)加速度増幅は、平均 S 波速度が 188 m/s と比較的 地盤剛性の低い地盤では、間隙水圧増加に起因する地盤 剛性低下の影響は大きく、加速度増幅は液状化非線形条 件の方がひずみ非線形条件よりも小さくなった.

一方で、地盤剛性の高い地盤で間隙水圧の増加に起因 する地盤剛性低下の影響は小さく、加速度増幅は液状化 非線形条件の方がひずみ非線形条件よりも大きくなった.

(2) 液状化層の層厚が6mほどある地盤における地盤 剛性低下が間隙水圧の増加に起因して起こる場合,地表 面応答速度は基盤面での入力速度とほとんど同じであっ た.また,地盤剛性が維持される場合,液状化非線形と ひずみ非線形の速度増幅結果には,差が表れにくいこと が示された.

謝辞:防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net 強震記録, 気象庁 JMA 強震データ,こうち地盤情報公開サイトを 使用しました.ここに記して謝意を表す.

参考文献

1) 藤本一雄,翠川三郎:近接観測点ペアの強震記録に







図-2 加速度増幅に関する最大せん断ひずみと勾配 bの 関係(大そね地盤)



図-3 速度増幅に関する最大せん断ひずみと勾配 bの 関係(KOC7 地盤)



図-4 速度増幅に関する最大せん断ひずみと勾配 bの 関係(大そね地盤)

基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係,日本地震工学会論文集,第6巻,第1号,pp.11-22,2006.

- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soil and Foundations, 32(2), 1-15, 1992.
- 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(最訂版)の構築、第46回地盤工学研究発表会、 2011.
- 2) 翠川三郎,松岡昌志,作川孝一:1987年千葉県東方 沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性 の評価,日本建築学会構造系論報告集,No.442,pp. 71-78,1992.

(Received ?) (Accepted ?)

Effect of liquefaction on the relationship between amplification and average shear-wave velocity considering the non-linearity of the ground

Yoshikazu TANAKA and Kyohei UEDA

Planning of disaster prevention and mitigation is being undertaken such as seismic design and reinforcement of stuructures against huge earthquakes. It is important to properly evaluate the amplification between the engineering foundation surface and the ground surface. Simple evaluation methods for the amplification can be broadly divided into the numerical analysis methods and the methods based on the observation records. The non-linearity of the ground with the decrease of the ground rigidity shows different ground amplification with the increase of the strain level and the increase of the pore water pressure. However, it is not clear from the observation records alone why the amplification behaves differently. In this study, the effective stress analysis was carried out to clarify the effect of the liquefaction on the acceleration and velocity amplification considering the non-linearity of the ground. Amplification behaved differently between acceleration and velocity amplification.