

B-03

ランダム振動論に基づく非線形地盤增幅特性評価法の改良

19T0235Y 篠田 麻衣
指導教員：関口 徹

1. 研究背景·目的

建築基準法では告示スペクトルと呼ばれるものが規定されているが、応答スペクトルであるため位相情報がない。そのため詳細な地震応答解析では、種々の位相を仮定して実行する必要がある。これを解決する方法として、位相のランダム性を確率的に評価できるランダム振動論を周波数領域で解析する等価線形解析に適用した手法がある¹⁾。このランダム振動論に基づく等価線形解析(以後、RVT)では、時刻歴波形を用いることなく解析が可能であるため、計算コストを抑えることができる。しかし RVTにおいて重要な要素である Peak Factor(以後、PF)が弾性体を前提とした理論であるため、非線形化した地盤の振動問題に適応できるか不明である。

そこで本研究では、より詳細な解析ができる時刻歴応答解析の直接積分法と RVT の結果を比較し、非線形化した地盤にも適応できるように RVT の改良方法を検討する。

2. ランダム振動論による最大値の算出

ランダム振動論における初通過理論によれば、ある平均 0 の定常確率過程 $X(t)$ の継続時間 T_d における最大値は、その確率過程の標準偏差 σ_X とピークファクター $PF(T_d)$ を用いて次式で与えられる。

$$X_{\max} = PF(T_d) \cdot \sigma_X \quad (1)$$

PF には厳密解は存在しないが、Vanmarcke²⁾や Davenport³⁾などによって近似解が提案されている。本研究ではこの 2 種に加え、文献¹⁾で提案された $PF(T_d) = 3.0$ と固定したものと、海外で用いられている MK-Koul によるもの⁴⁾、Der- Kiureghian が Davenport の PF を修正したもの⁵⁾の計 5 種類(PF_{Van} , PF_{Dav} , $PF_{3.0}$, PF_{MK} , PF_{AD-DK})の PF を後述する最大せん断ひずみの評価に用いた。

式(1)のうち、確率過程 $X(t)$ の標準偏差 σ_X はパーセンタイルの定理より、次式で与えられる。

$$\sigma_x = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega} \quad (2)$$

ここに、 $G(\omega)$ は $X(t)$ のパワースペクトル密度である。

3. 最大せん断ひずみの評価

地盤の非線形性を考慮する等価線形解析では各層の最大せん断ひずみを評価する必要がある。告示スペクトルから逆変換した入力のパワースペクトル密度と、重複反射理論によるせん断ひずみの伝達関数を用いて表層地盤内の j 層のせん断ひずみのパワースペクトル密度 G_{yj} を求める。せん断ひずみ応答の時刻歴

を定常確率過程とみなすと、パーセヴァルの定理より、せん断ひずみの標準偏差は式(2)で与えられる。したがって j 層の最大せん断ひずみは、式(1)より求めることができる。本研究では、RVT でこれを求める際には前述の 5 種の PF を用いて検討した。なお、パワースペクトル密度から応答スペクトルを求める際に、文献¹⁾と同様に Rosenblueth の PF を使用した。

この最大せん断ひずみを用いて、時刻歴波形を用いる地盤応答解析プログラム SHAKE と同様に等価線形解析の収斂計算を行うことで非線形地盤增幅特性を評価する。

4. 改良方法

4-1 FDEL の適応

等価線形解析 SHAKE には高振動数成分の増幅を過小評価するという問題がある。それを解決するため周波数依存の減衰を与える手法(以下、FDEL)が杉戸ら⁶⁾により提案されている。FDEL ではひずみの小さい高振動数成分で減衰も小さくなり、その結果高周波数成分の増幅が大きくなる。したがって RVT に FDEL を適応すると、この高振動数成分の増幅が RVT で用いるパワースペクトル密度の積分値を大きくし応答の結果に影響を与えることになる。

4-2 PFへの補正係数の導入

図1に解析に用いた地盤モデルを示す。siteAは比較的硬質な地盤、siteBは軟弱な地盤である。

図2に示す両地盤モデルの中間層、最下層における各PFと主要動継続時間の関係をそれぞれ示す。SHAKEと直接積分の結果は、異なる主要動継続時間の波形を用いてそれぞれ計算した対象層のせん断ひずみの時刻歴応答からPFに相当するものを求めたものである。せん断ひずみが比較的小さい中間層においては直接積分に PF_{Van} などが近い値となっている。一方で、せん断ひずみの最も大きくなる最下層において

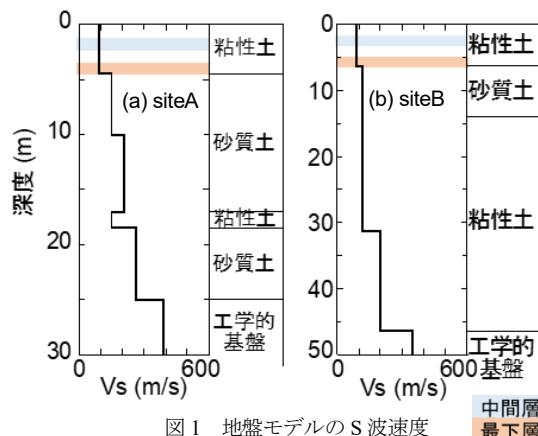


図1 地盤モデルのS波速度

て直接積分とは値が大きく離れている。その原因として直接積分は土のせん断剛性や減衰の時々刻々の変化を表現できるのに対して、RVT はそのような現象を表現できないからだと考えられる。以後、5種類の PF のうち PF_{Van} を用いた結果のみを示す。

図 3 に siteA,B の各層における PF の比(直接積分法/RVT)と最大せん断ひずみの関係を、主要動継続時間 $T_d = 5, 10, 20, 40$ 秒と設定した場合について示す。主要動継続時間によって違いはあるが、RVT の最大せん断ひずみが 0.5%程度未満においては PF の比は 1 に近いが、0.5%を過ぎると徐々に大きくなっている。そこで、赤線で示したように最大せん断ひずみが 0.5%までは 1 のまま変化させず、0.5%以降最大せん断ひずみが 2%の時に 1.3 をとするような補正係数を設定し、それを PF にかけることによって補正を行った。

図 4, 5 に補正係数を導入した RVT と導入しない RVT により求めた最大せん断ひずみの深度分布と地表面の加速度応答スペクトルを siteA,B についてそれぞれ示す。ここでは入力の告示波の主要動継続時間を $T_d = 10$ s と設定した場合について示しており、比較のために同じ継続時間を有する模擬地震波 10 サンプルの平均値を用いた直接積分法の結果も併せて示す。最大せん断ひずみについては、比較的硬質地盤である siteA において、補正後の方が第一層(深度 0~4.5m)は過大評価されているが、第二層の最下層(深度 10m 付近)で対応が良くなる結果となった。一方で、軟弱地盤である siteB においては、第二、三層の最下層(それぞれ深度 14, 31m 付近)での直接積分法との対応が良くなる結果となった。

応答スペクトルについては、直接積分法との長周期でのピーク周期(siteA,B でそれぞれ 1 秒、3 秒付近)の対応がよくなっている。さらに、FDEL を適応させたことで、SHAKE の課題である高振動数成分の増幅の過小評価が改善されている。

5.まとめ

RVT の改良方法として FDEL を適応し、さらに PF に最大せん断ひずみに応じた補正係数を掛け合わせる方法を検討した。その結果、以下の知見が得られた。
 • 改良方法では、硬質・軟弱地盤のどちらも最大せん断ひずみの直接積分法との差異は小さくなり、地表の応答スペクトルのピーク周期もより近づいた。

参考文献

- 1) 岡野創・酒向裕司：表層地盤による応答スペクトルの増幅率の評価法の提案、日本建築学会技術報告集、第 19 巻、第 41 号、pp. 45-52, 2013.2
- 2) E. H. Vanmarcke : Properties of spectral moments with applications to random vibration, Journal of EM2, ASCE, Vol.98, pp425-446, 1972.4
- 3) A. G. Davenport : Note on the distribution of the largest value of the maximum of a random function, Proc.roy,1956
- 4) Maharaj K. Kaul : Stochastic Characterization of Earthquakes through Der Kiureghian : A Response Spectrum Method for Random Vibration Analysis of MDOF Systems, JEESD, Vol.9, pp.419-435, 1981
- 5) 杉戸真太・合田直義・増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察、土木学会論文集、No. 493 / III-27, pp.49-58, 1994.6
- 6) their Response Spectrum, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.6, pp.497-509, 1978.

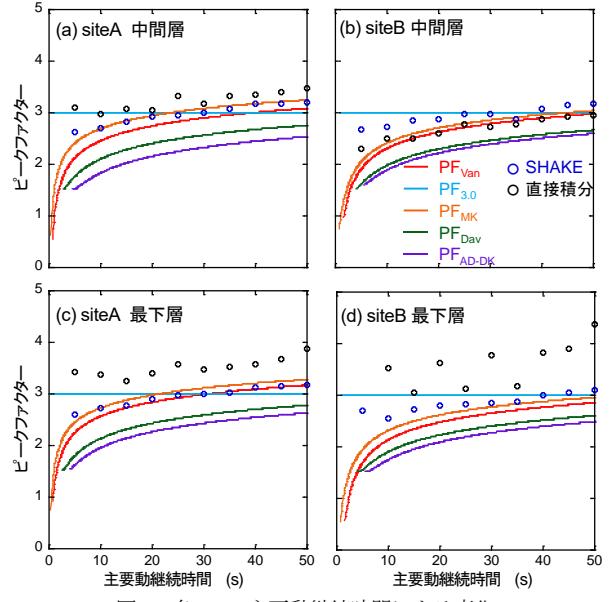


図 2 各 PF の主要動継続時間による変化

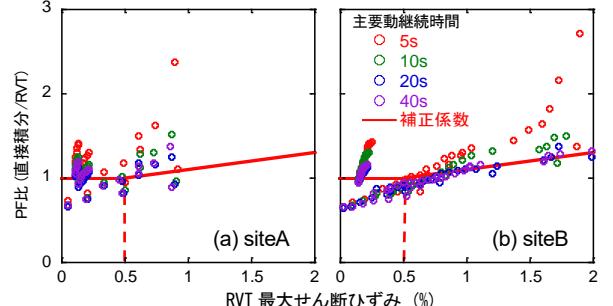


図 3 RVT と直接積分の PF の比の最大せん断ひずみによる変化

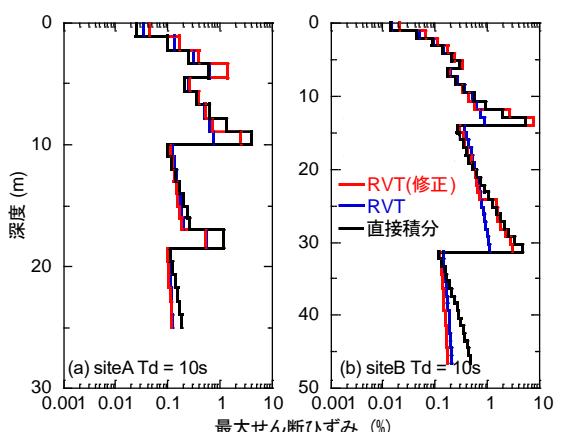


図 4 最大せん断ひずみの深度分布

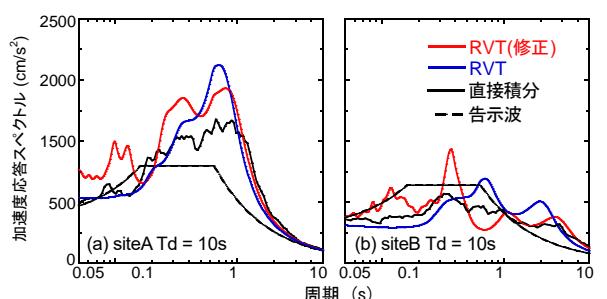


図 5 加速度応答スペクトル