

# 非線形地盤増幅特性評価におけるランダム振動論の適応性検討

17T0265W 三浦麻加  
指導教員：関口 徹

## 1. 研究背景・目的

現在、原子力発電所のような重要な建物の設計では、表層地盤の地震応答解析において、土の非線形性をより詳細に表現できる直接積分法が用いられるため、建築基準法の告示で規定されている工学的基盤上の応答スペクトル(以下、告示スペクトル)をもとにそれに適合するような基盤上の時刻歴波形(告示波)を作成して解析を行っている。しかし、この方法では告示スペクトルに位相の情報がなく、設定する位相によって無数に時刻歴波形が作成できてしまい多くの地震波で解析する必要がある。原子力発電所などの建設前の実現可能性の検討などでは、ある程度の精度を保つつつ、できるだけ簡略化した解析法の需要がある。

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等価線形解析に適用した手法がある<sup>1)</sup>。先行研究<sup>2)</sup>では、従来の等価線形解析プログラム SHAKE とランダム振動論を用いたものの結果を比較したが、より詳細な解析ができる直接積分法との比較はされていない。

そこで本研究では、より詳細な解析ができる直接積分法とランダム振動論を等価線形解析に適用した手法の結果が異なる条件やそのメカニズムを考察する。

## 2. 解析手法

### 2-1 ランダム振動論

ランダム振動論とは、地震動を確率過程として扱い、確率的手法を用いて地震動の不規則性を表現することで地震応答を評価するものである。

ランダム振動論による最大値はある平均値 0 で継続時間  $T_d$  の定常確率過程  $X(t)$ において、その確率過程の標準偏差  $\sigma_x$  とピークファクター  $PF(T_d)$  を用いて次式で与えられる。

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

$PF(T_d)$  に厳密解は存在しないが、近似解がいくつか提案されている。今回の解析では Vanmarck<sup>3)</sup> の  $PF(T_d)$  を使用する。式(1)のうち確率過程の標準偏差  $\sigma_x$  はパーセヴァルの定理よりそのパワースペクトル密度から求めることができる。解析で使用する主要動の継続時間は有効継続時  $T_e$ <sup>4)</sup>を使用する。

### 2-2 修正 GHE モデル

今回直接積分法では修正 GHE モデル<sup>5)</sup>を用いて検討する。GHE とは、General Hyperbolic Equation モデルの略で双曲線を一般化した構成則のことであり、土の変形特性を忠実に表現し、せん断強度の概念も取り入れることのできるモデルである。修正 GHE モデルは骨格曲線に GHE モデルを用い、履歴法則は Masing 法則を改良することによって任意の動的変形特性を設

表 1 修正 GHE モデルのパラメータ

|                | 砂質土  | 粘性土  |          | 砂質土  | 粘性土  |
|----------------|------|------|----------|------|------|
| C1(0)          | 1.00 | 1.00 | C1(1)    | 0.60 | 0.60 |
| C1( $\infty$ ) | 0.08 | 0.65 | C2(1)    | 0.60 | 0.60 |
| C2(0)          | 0.50 | 1.10 | $\alpha$ | 1.18 | 1.29 |
| C2( $\infty$ ) | 1.00 | 1.00 | $\beta$  | 2.35 | 0.77 |

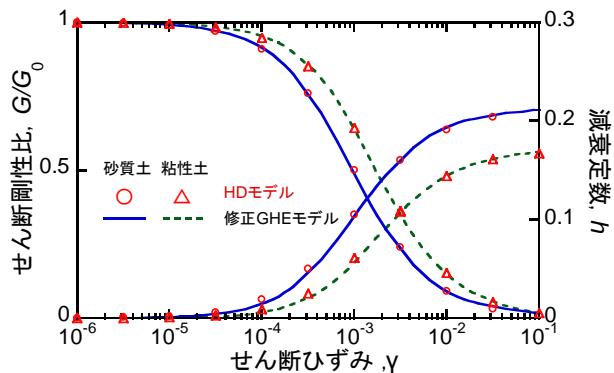


図 1 土の動的変形特性

定できる。表 1 と図 1 に示すのは今回の解析で用いた砂質土と粘性土のパラメータと動的変形特性で、従来の室内試験結果の経験式である HD モデルに適合するように設定した。

今回の解析ではこの GHE モデルによる直接積分法、ランダム振動論を等価線形解析に適用した手法(以下、RVT)と従来の等価線形解析である SHAKE の 3 つの結果を比較し、検討する。

## 3. 解析結果

図 2 に設定した地盤モデルを示す。siteA は比較的硬質な地盤、siteB は  $V_s=130\text{m/s}$  の軟弱な粘性土が 17.7m 堆積している地盤である。

図 3 に各層の最大せん断ひずみの深度分布を示す。硬質地盤、軟弱地盤とともにすべての手法において大きな違いは見られない。

図 4 に地表面の応答スペクトルを示す。siteA の硬質地盤では手法による大きな違いは見られない。siteB の軟弱地盤では、地盤の非線形化の影響を受けて周期 1.0s 付近において RVT と SHAKE の応答が直接積分法と比べ大きな応答となった。

図 5(b),(c)に SHAKE により得られた地表面応答と基盤入力波の加速度時刻歴をそれぞれ示す。図 5(a)にはそれらを用いて求めた地表面／基盤のランニングスペクトル比を示す。SHAKE は周波数応答解析であり、剛性は変化しないため時間によらず常に周期 1.0s 付近に鋭いピークが見られる。

図 6 に直接積分法により得られたランニングスペクトル比と加速度時刻歴を図 5 と同様に示す。主要動付近では周期 1.5s 付近、その後 0.8s 付近にピーク周期が見られ、大きく変化している。主要動付近では地盤の非線形化(剛性低下)の影響を受けてピーク周期が長くなっているが、その時間内においても剛性が細かく変化しており特定の周期だけが増幅されるということがないため鋭いピークは見られないと考えられる。そして、揺れが小さくなると初期剛性に戻るため、SHAKE と同様にピーク周期が鋭くなっている。以下のことが、直接積分法において周期 1.0s 付近の応答が小さくなった原因と考えられる。

#### 4. 結論

ランダム振動論に基づいた等価線形解析と、より詳細な解析ができる直接積分法による地盤の地震応答解析を行い、せん断ひずみの深度分布と地表面の応答を比較した。その結果、以下の知見が得られた。

- 軟弱地盤において、せん断ひずみに大きな変化は見られなかったが、地表の応答スペクトルの卓越周期には違いがみられた。それは、等価線形解析では時間によらず剛性が一定であるのに対して、直接積分法では剛性が時々刻々と変化していることが影響していると考えられる。

#### 参考文献

- 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 卷, 第 41 号, pp. 45-52, 2013.2
- 桐山拓斗: ランダム振動論に基づく地盤増幅特性の評価, 千葉大学卒業論文, 2020
- E. H. Vanmarcke : Properties of spectral moments with applications to random vibration, Journal of EM2, ASCE, Vol.98, pp425-446, 1972.4
- 大崎順彦: 新・地震動スペクトル解析入門, 鹿島出版会, p. 201, 1994
- 澁谷啓, 龍岡文夫, 安部文洋, KIM Y-S, PARK C-S : 地盤材料の広い範囲のひずみでの応力・ひずみ関係, 26 回地盤工学研究発表会, 1991.6

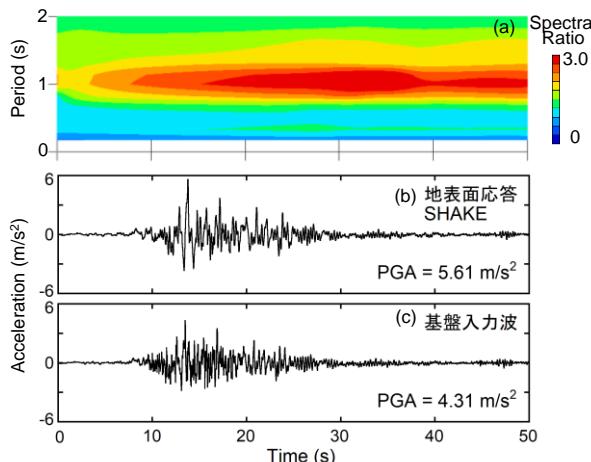


図 5 地表面／基盤のランニングスペクトル比と加速度時刻歴(SHAKE)

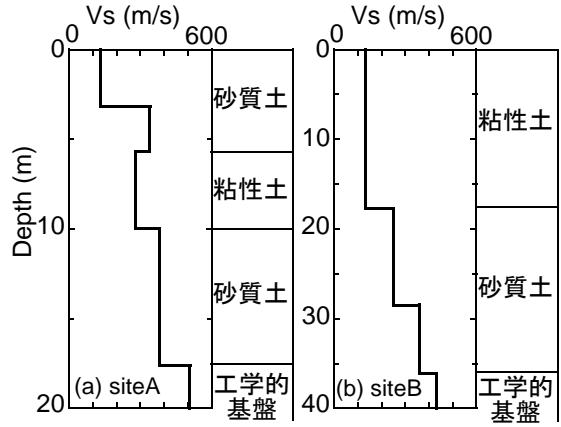


図 2 地盤モデルの S 波速度

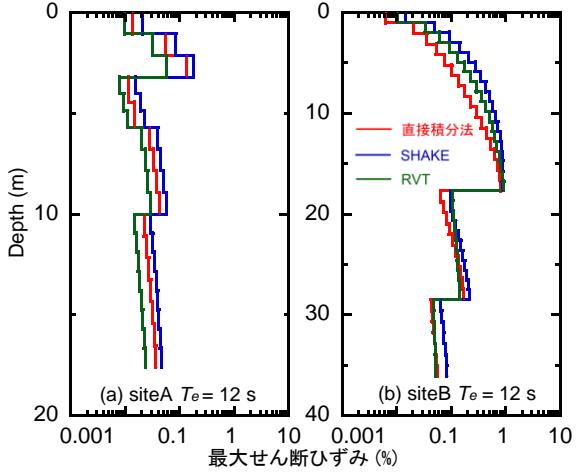


図 3 最大せん断ひずみの深度分布

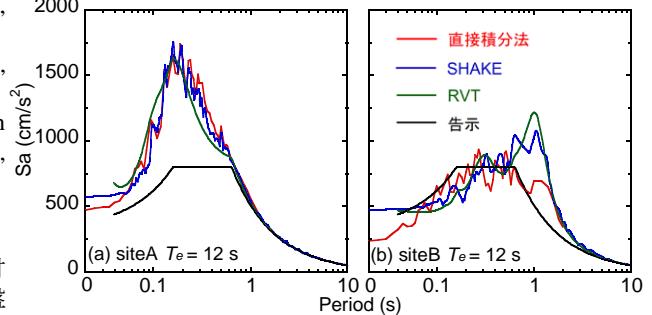


図 4 地表面の応答スペクトル

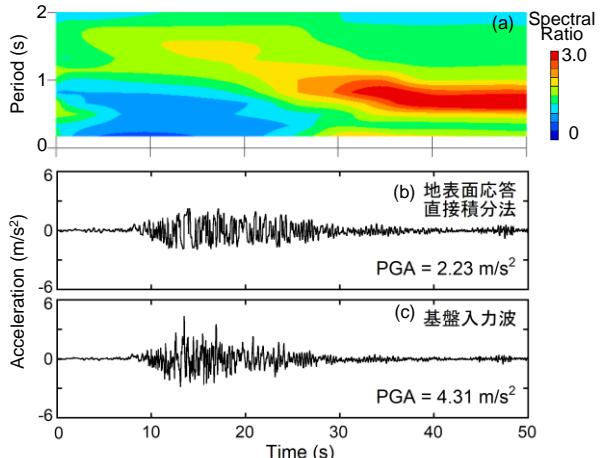


図 6 地表面／基盤のランニングスペクトル比と加速度時刻歴(直接積分法)