# 成層地盤の一次卓越周期における地震動増幅率の評価法

# CALCULATION METHOD OF SEISMIC MOTION AMPLIFICATION RATIO CORRESPONDING TO FUNDAMENTAL PERIOD OF LAYERED SOIL PROFILES

# 張 海仲\*, 齊藤 隆典\*\*, 趙 衍剛\*\*\* Haizhong ZHANG, Takasuke SAITO and Yan-Gang ZHAO

Seismic motion amplification ratio corresponding to fundamental period,  $Gs_1$ , is a very important factor used for evaluating site effects. In this paper, a new method for computing  $Gs_1$  of a layered soil profile is proposed. In this method, layered shear wave velocity profile is replaced with an equivalent linearly varying profile. Subsequently, based on analytical solution for  $Gs_1$  of the deposit with linearly varying shear wave velocity profile, an equation to estimate the  $Gs_1$  of a ctual layered soil deposit is proposed. To demonstrate the validity of this development,  $Gs_1$  of 68 representative soil profiles are evaluated, it is shown that the results by the proposed method agree well with those by the wave propagation method. Moreover, free field response spectrum of 4 soil profiles are evaluated using the proposed method for  $Gs_1$ , then, the obtained results are compared with those by program SHAKE. It also can be observed that results by the proposed method agree well with those by program SHAKE.

Keywords: layered soil profile, seismic motion amplification ratio, wave propagation method, linearly varying shear wave velocity profile 成層地盤, 地震動増幅率, 波動理論法, 線形的に変化するせん断波速度

## 1. はじめに

表層地盤は地震動に大きく影響を与えるため、表層地盤特性を耐 震設計に取り組むべきことが従来より認識されている。表層地盤特 性は解放工学的基盤面での地震動に対する地表面地震動の増幅効果 と考えられる。この表層地盤による地震動増幅効果が一次元波動理 論により評価されることが多い<sup>1-2)</sup>。しかし、一次元波動理論に基づ く方法はプログラムを使う上でより専門的な知識が必要となるため、 実務的な耐震設計で使用するのは難しい。実務で地盤特性を評価す るには、地盤特性を代表的に表せるパラメータを用いるより簡便な 方法が望ましい。地盤一次卓越周期における地震動増幅率は入力地 震動と表層地盤が共振する状態の地震動増幅効果を表し、一般に地 盤伝達関数の最大値と対応し、地盤特性を表す重要なパラメータで ある。そこで、多くの研究 3-7)では、一次卓越周期とそれにおける増 幅率を用いる表層地盤特性の簡便評価法が提案されている。また、 2000年の改正建築基準法に導入された限界耐力計算法では、一次卓 越周期とそれに対する増幅率をパラメータとして、表層地盤による 地震動の増幅効果を評価する簡便法が採用された 3。本研究では、 この方法を告示法と呼ぶ。

一次卓越周期における地震動増幅率 Gs1を評価するのは、多層か らなる表層地盤を等価均一的な1層地盤に置き換え、等価1層地盤 の増幅率 Gs1を用いて評価する方法が多用されている<sup>3-6</sup>。しかしな がら、林ら<sup>5</sup>は、表層多層地盤を1層地盤に置換することで増幅率 Gs1を過小評価する場合がある事を指摘した。また、井上ら<sup>6</sup>は表層 多層地盤を1層地盤に近似することで増幅率 Gs1の算定では、地盤 構造が複雑な場合に増幅率を過小評価することを指摘した。古山田 ら<sup>n</sup>は、多層地盤の増幅率 Gs<sub>1</sub>を計算する方法を提案したが、この 方法は地盤モデルの設定の際に、地盤の層分割数によって増幅率 Gs<sub>1</sub>の評価結果が大きく変化して任意性が生じてしまうために、実 務設計への適用が難しい<sup>6</sup>。

実際の地盤では、地表面から深くなるに従い、せん断波速度が増加するのが一般的である。従って、成層地盤の増幅率 Gs1を簡単に評価するため、表層地盤の成層せん断波速度を均一である等価な 1層に置換するより、線形的に増加するせん断波速度に置換するほうが合理的と考えられる。そこで、本論文では、成層地盤の一次卓越周期における増幅率 Gs1の計算法に着目し、表層地盤の成層せん断波速度を線形的に増加するものに置換することで、増幅率 Gs1を評価する方法を提案する。

本論文の構成を以下に記述する。先ず、2 章でせん断波速度が線 形的に増加する表層1層地盤と工学的基盤からなる2層地盤につい て、一次卓越周期に対する増幅率 Gs1の計算式を誘導する。そして、 3 章で、多層成層地盤について、表層地盤の成層せん断波速度を線 形的に増加するものに置換し、2 章の提案式を用いて、増幅率 Gs1を 評価する方法を提案する。また、この提案方法の妥当性を確認する ため、強震観測網(K-NET, KiK-net)<sup>8)</sup>から任意に 68 箇所の多層地盤を 選択して、提案法の検証を行う。4 章では、提案法の限界耐力設計 法への適用性を確認するため、提案した増幅率 Gs1計算法を用いて、 4 箇所の地盤の地表面加速度応答スペクトルを算出し、それと SHAKE<sup>9</sup>による計算結果を比較して、検討を行う。

\*\*\* 神奈川大学工学部建築学科 教授・博士 (工学)

Graduate student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University.M.Eng Assistant Professor, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng. Professor, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.

<sup>\*</sup> 神奈川大学工学部建築学科 大学院生・修士(工学)

<sup>\*\*</sup> 神奈川大学工学部建築学科 助教・博士 (工学)



Fig.1 Single layer soil on bedrock with linearly varying shear wave velocity profile

#### 2. せん断波速度が線形的に増加する地盤モデル

本論文で成層地盤の一次卓越周期に対する地震動の増幅率 Gs<sub>1</sub>を 評価するには、表層地盤の成層せん断波速度を線形的に増加するも のに置き換えることで、増幅率 Gs<sub>1</sub>を評価する。そのため、本章で は、まず、表層地盤のせん断波速度が線形的に増加する地盤につい て、増幅率 Gs<sub>1</sub>の計算式を誘導する。

# 2.1 一次卓越周期における増幅率 Gs1

図1に示すようなせん断波速度が線形的に増加する表層地盤と工 学的基盤からなる2層地盤を考える。表層地盤のせん断波速度 V(z) が地表面からの深さzとの関係を次式で表す。

$$V(z) = V_0(1 + k\frac{z}{H}) \tag{1}$$

ここで、V<sub>0</sub>は地表面でのせん断波速度、H は表層地盤の厚さ、k は せん断波速度の変化率を表す定数である。

図1に示す地盤の一次卓越周期における増幅率Gs1を求めるため、 先ず、この地盤の伝達関数を求める。地盤減衰を考慮しない一次元 地盤の運動方程式は、次のように表せる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} (G(z) \frac{\partial u}{\partial z})$$
(2)

ここで、 ρ は表層地盤の密度、u は表層地盤の変位、G(z)は表層地 盤のせん断弾性係数を表し、次式で定義される。

$$G(z) = \rho V(z)^2 \tag{3}$$

地盤全体が一定の円振動数 ω を持つ調和振動をしているとすると、 式(2)により、露頭工学的基盤面での地震動に対する地表面地震動の 伝達関数は次式のように与えられる<sup>10</sup>。

$$Tr(\omega) = \frac{1}{\frac{2m\cos\theta + \sin\theta}{2m\sqrt{1+k}} + \frac{ia\omega H\sqrt{1+k}}{kV_0m}\sin\theta}$$
(4)

ここで、

$$m = \sqrt{\left(\frac{\omega H}{kV_0}\right)^2 - 0.25} \tag{4-a}$$

$$\theta = m \ln(1+k) \tag{4-b}$$

$$a = \frac{\rho V_0}{\rho_B V_B} \tag{4-c}$$

 $\rho_{B}, V_{B}$ はそれぞれ工学的基盤の密度、せん断波速度である。iは虚数 単位である。

式(4)に示す地盤伝達関数の一次卓越周期に対する値は地震動増 幅率 Gs<sub>1</sub>であり、一次卓越周期を式(4)に代入することで求められる。 せん断波速度が線形的に増加する表層地盤と剛的な工学的基盤から

なる2層地盤の一次卓越周期T<sub>0</sub>は次式から求められる<sup>10</sup>。

 $2m_0\cos\theta_0+\sin\theta_0=0$ 

ここで、

$$m_0 = \sqrt{\left(\frac{\omega_0 H}{kV_0}\right)^2 - 0.25}$$
(5-a)

 $\theta_0 = m_0 \ln(1+k) \tag{5-b}$ 

ω<sub>0</sub> は地盤卓越周期 T<sub>0</sub> に対する円振動数である。T<sub>0</sub> は式(5)から直接
 得ることは出来ないが、数値計算法又は簡略式<sup>12)</sup>で求めることが出
 来る。

既往の文献<sup>11-12</sup>により、工学的基盤の剛性が地盤卓越周期に対す る影響が無視できるため、式(5)による一次卓越周期 T<sub>0</sub>が弾性工学的 基盤からなる地盤にも適用できると考えられる。そこで、式(5)を式 (4)に代入すると、式(4)の分母の実数項は0になり、一次卓越周期に おける増幅率 Gs<sub>1</sub>は次式のように与えられる。

$$Gs_1 = \frac{1}{\frac{a\omega_0 H \sqrt{1+k\sin\theta_0}}{kV_0 m_0}} \tag{6}$$

式(6)は地盤減衰を無視して得られたものである。実は地盤減衰は増幅率 $Gs_1$ に大きな影響を与えるため、地盤減衰を考慮しなければならない。均一的な表層1層地盤と工学的基盤からなる2層地盤について、減衰を考慮した増幅率 $Gs_1$ の計算式は次式のように提案された<sup>3</sup>。

$$Gs_1 = \frac{1}{a + 1.57 \, h} \tag{7}$$

ここで、*a* は表層地盤と工学的基盤のインピーダンス比、*h* は地盤 減衰定数である。

この2層地盤の増幅率の計算式(7)を参考に、図1に示す地盤について、地盤減衰を考慮した一次卓越周期における増幅率 Gs1の計算式を近似的に次式のように提案する。

$$Gs_{1} = \frac{1}{1.57h + \frac{a\,\omega_{0}H\,\sqrt{1+k}\,\sin\,\theta_{0}}{kV_{0}m_{0}}} \tag{8}$$

式(8)での減衰項(1.57h)を式(7)と同じように設定することで、せん断 波速度が均一になる時(kが0になる)、増幅率の計算式(8)と式(7)は 一致する。また、この提案式の計算精度は次節で検討する。

#### 2.2 提案式の計算精度の確認

2.1 節で提案した増幅率  $G_{S_1}$ の計算式(6)と(8)の計算精度を確認す るため、図1に示す地盤のパラメータを広範囲に変化させ、検証を 行う。式(4)と(8)より、増幅率に影響する地盤のパラメータはH、 $V_0$ 、 k、a、hの5つである。しかし、Hと $V_0$ は $H/V_0$ の形で同時に表さ れるため、実際に増幅率に影響するのは $H/V_0$ である。また、実際の 地盤で工学的基盤のせん断波速度は表層地盤に比べ大きい場合が多 いため、本検証は条件 $V_B > V_0(1+k)$ を満たす地盤を対象とする。

先ず、地盤減衰を考慮しない増幅率 Gs1の提案式(6)の計算精度を 確認するため、式(4)と式(6)による結果を比較したものを図 2 に示 す。式(4)で表す地盤伝達関数による結果が理論値と考え、細い実線 で表し、提案式による結果が太い破線で表す。いずれの場合でも提 案式(6)による結果は理論値とよく対応することが分かる。また、地 盤減衰を考慮した提案式(8)の計算精度を確認するため、提案式(8)に



Fig. 2 Verification of the formula (6) for undamped  $Gs_1$  of the soil profile of Fig.1

よる値と理論値を比較したものを図3に示す。せん断波速度V(z)を 複素数せん断波速度 $V(z)\sqrt{1+2hi}$ に置き換えて、地盤減衰を考慮し た理論値が式(4)により計算される。図3により、提案式(8)による結 果は減衰定数が大きくなるに連れて、誤差が大きくなるが、減衰定 数が 0.16になっても、最大誤差が 4.5%ぐらいであり、提案式の計 算精度が高いと考えられる。

### 3. 成層多層地盤

# 3.1 成層多層地盤の増幅率 Gs1の計算法

既往の研究<sup>3-7)</sup>では、多層地盤の増幅率 Gs<sub>1</sub>を評価するには、図4(a) に示すように、成層せん断波速度を均一的な1層に置き換えしたモ



Fig. 4 Illustration of the concept of replacing layered shear wave velocity profile, (a) with an equivalent constant profile, (b) with an equivalent lineally varying profile.



Fig. 3 Verification of the formula (8) for damped  $Gs_1$  of the soil profile of Fig.1

デルを用いることが多い。しかし、実際の地盤では、地表面から深 くなるに従い、せん断波速度が増加するのが一般的である。そのた め、成層せん断波速度を均一的な1層に置換するより、図4(b)に示 すように、線形的に増加するものに置換するほうが合理的と考えら れる。そこで、本章では、成層せん断波速度を線形的に変化するも のに置換し、2章で誘導した増幅率 Gs1計算式(8)を用いて、成層多 層地盤の増幅率 Gs1を評価する方法を提案する。

成層せん断波速度を線形的にモデル化するため、表層各層地盤の 中点での深さとせん断波速度  $(z_i, V_i)$  を回帰点とし、最小二乗法に より、式(1)で表す線形モデル関数に回帰する。具体的に、各層の観 測値  $(z_i, V_i)$ と式(1)による理論値 $(z_i, V(z_i))$ の残差の平方和を最小とす るように、式(1)に表す線形モデル関数の係数 k、 $V_0$ を決める。各層 の観測値と理論値の残差  $D_i$ は次式で与えられる。

$$D_i = V_i - V_0 (1 + kz_i)$$
(9)

そして、N層地盤の残差の平方和Dは次式で与えられる。

$$D = \sum_{i=1}^{N} D_i^2 \tag{10}$$

また、最小二乗法により、残差の二乗和を最小とするように、Dを それぞれ *k、V*<sub>0</sub>について偏微分したものを 0 と置く。

$$\frac{\partial D}{\partial k} = 0 \quad , \frac{\partial D}{\partial V_0} = 0 \tag{11}$$

式(11)により、式(1)に表す線形モデル関数の係数 k、V<sub>0</sub>が次式のよう に与えられる。

$$k = \frac{(m_3 - m_1 m_2)H}{m_2 m_4 - m_1 m_3} \tag{12}$$

$$V_0 = \frac{m_3}{m_1 + m_4 k / H}$$
(13)



Fig. 5 Shear wave velocity of multi-layer soil profiles over engineering bedrock used for analysis.



(a) Comparison of results calculated by proposed method with those by SHAKE





Fig. 6 Verification of the proposed method for G<sub>s1</sub> of multi-layer soil profile on bedrock



Fig.7 Comparison of fundamental periods of the original layered soil profiles, with those of the equivalent linearly varying soil profiles obtained by the proposed method



Fig.8 Comparison of amplification ratios  $Gs_1$  by SHAKE with those by the proposed method, in which fundamental period of the equivalent linearly varying soil profile is used

従って、式(1)、(12)と(13)により、成層せん断波速度が線形的に変化 するものに置換できる。

更に、既往の方法  $3 \delta$  用いることで、表層等価 1 層地盤の密度  $\rho_{eq}$  と減衰  $h_{eq}$  はそれぞれ次式で計算される。

$$\rho_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{N} H_i \rho_i}{\sum_{i=1}^{N} H_i}$$
(14)

$$h_{eq} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} h_i E_i}{\sum\limits_{i=1}^{N} E_i}$$
(15)

ここで、 $h_i$  は各層の減衰定数、 $E_i$ は表層地盤の各層の最大弾性歪エ ネルギーである。

提案法では、表層地盤のせん断波速度だけを線形的に変化するものに置換するが、工学的基盤のせん断波速度 V<sub>B</sub>は変化させずに、実際のせん断波速度を使用する。

最終的に、式(12)~(15)を式(8)に代入することで、成層多層地盤の 増幅率 Gs<sub>1</sub>が計算できる。

#### 3.2 適用性の検討

3.1 節で提案した増幅率 Gs1 計算法の実地盤への適用性を確認す るため、強震観測網(K-NET, KiK-net)<sup>8)</sup>から 68 箇所の多層地盤を選択 して、検討を行う。この 68 箇所の地盤は、すべてせん断波速度が 400m/s 以上の硬い層まで達している。K-NET からの 10 箇所の地盤 については、深さ 20m までしか検層されていないため、400m/s 以上 の硬い地層が 5m 以上になるかどうか確認できなかった。よって、 本検討では、これらの地盤について、400m/s 以上の硬い地層が 5m 以上であると仮定する。また、すべての地盤を成層地盤とみなし、 文献 14)に基づいて 3 種類の地盤に分類した。図 5 に各種地盤のせ ん断波速度をそれぞれ示す。この図より、幅広い深さ、せん断波速 度分布を持つ地盤が本検証に含まれることが分かる。KiK-net から 選んだ地盤は単位体積重量が示されていないため、近似的に、文献 <sup>13)</sup>を参考に、粘性土が 15.68(KN/m<sup>3</sup>)、砂質土が 18.62 (KN/m<sup>3</sup>)、工学 的基盤のせん断波速度が 400~800(m/s)の場合が 19.60(KN/m<sup>3</sup>)、 800(m/s) 以上の場合が 21.56(KN/m3)を採用した。ここで、入力地震 動による地盤の非線形を考慮しないため、地盤減衰定数が一律に 0.02 を採用した。また、選択した 68 箇所地盤の初期一次卓越周期が 0.05sから1.72sとなり、文献14)による3種類地盤をカバーできる。

提案法と一次元波動理論(ここで、SHAKE プログラムを使用する) による結果の比較を図 6(a)に示す。提案法による結果の平均誤差は 9.7%程度であり、提案法と一次元波動理論による結果がほぼ対応す ることが分かる。分析した地盤の 91%は、提案法による計算誤差が 20%を超えない範囲に収まった。また、告示法と一次元波動理論に よる結果の比較を図 6(b)に示す。告示法による結果の平均誤差は 17.2%である。多数の地盤ついて、告示法による結果の誤差が 20% を超え、一次元波動理論による結果から大きく外れることが分かる。 また、殆どの地盤について、告示法による結果が小さく評価される ことが分かる。図 6(a)と図 6(b)を比較して見ると、提案法が多層地 盤の増幅率 Gs1をより精度よく評価できることが分かる。

提案法では等価な1層地盤に置換した後に地盤一次卓越周期も変 化する。この変化を調べるため、元の成層地盤の卓越周期と置換し た地盤の卓越周期を比較したものを図7に示す。この図より、96% 程度の地盤は、卓越周期の変化が15%を超えない範囲に収まった。 よって、提案法を用いて等価1層地盤に置換することが、卓越周期 の変化に及ぼす影響は小さいことが分かる。

提案法で増幅率 Gs1を計算する際に、先ず地盤の一次卓越周期を 決める必要がある。図 6(a)の縦軸に示す増幅率 Gs1 は元の成層地盤 の卓越周期を用いて計算された結果である。提案法で等価1層地盤 に置換することで、卓越周期の変化が増幅率 Gs1 に対する影響を調 べるため、置換した構造の卓越周期を用いて増幅率 Gs1 を再計算し た。得られた結果と一次元波動理論による結果を比較したものを図 8 に示す。提案法による結果の平均誤差は 8.0%程度であり、一次元 波動理論による結果とほぼ対応することが分かる。分析した地盤の 93%は、提案法による計算誤差が 20%を超えない範囲に収まった。 この精度は図 6(a)に示す結果の精度とほぼ一致する。これらのこと により、提案法で増幅率 Gs1 を求める際に、元の成層地盤と置換し た地盤の一次卓越周期、どちらを用いても、計算結果に対する影響 は小さいことが分かった。

#### 4 提案法の限界耐力設計法への適用性の検討

限界耐力設計法<sup>15</sup>では、工学的基盤上での加速度応答スペクトル S<sub>0</sub>が与えられ、地盤特性を表す地盤増幅係数 Gs を掛け合わせるこ とで、建物の入力加速度応答スペクトル Sa を求める方法が採用さ れている。地盤増幅係数 Gs は一次卓越周期 T<sub>1</sub>とそれに対する増幅 率 Gs<sub>1</sub>、二次卓越周期 T<sub>2</sub> とそれに対する増幅率 Gs<sub>2</sub>を用いて、次式 で計算される。

$$Gs = \begin{cases} Gs_2 \frac{T}{0.8T_2} & T \le 0.8T_2 \\ \frac{Gs_1 - Gs_2}{0.8(T_1 - T_2)}T + Gs_2 - 0.8 \frac{Gs_1 - Gs_2}{0.8(T_1 - T_2)}T_2 & 0.8T_2 \le T \le 0.8T_1 \\ Gs_1 & 0.8T_1 \le T \le 1.2T_1 \\ \frac{Gs_1 - 1}{1.2T_1} - 0.1 \frac{T}{T} + Gs_1 - 0.8 \frac{Gs_1 - 1}{1.2T_1} - 0.1 \times \frac{1}{1.2T_1} & 1.2T_1 \le T \end{cases}$$

$$(16)$$

本章で提案法の限界耐力設計法への適用性を確認するため、提案 法を用いて地表面での加速度応答スペクトルを算出し、SHAKE に よる計算結果と比較することで、検討を行う。SHAKE は実用性が 高い解析手法であり、適用性が既往研究より確認された<sup>16</sup>。

#### 4.1 解析条件

本提案法の限界耐力設計法への適用性を確認するため、地表面で の加速度応答スペクトルの計算例を取り上げる。具体的に、地盤増 幅係数 Gs の計算に用いる増幅率 Gs1 を提案法で計算し、地盤卓越 周期を井上らのによる固有値解析法で求める。増幅率 Gs2 を既存の 告示方<sup>15)</sup>で計算する。地盤各層の非線形は、井上らのによる方法か ら求めた各層のせん断歪みにより評価する。また、計算した地盤増 幅係数 Gs は工学的基盤面で与えられた加速度応答スペクトルを掛 け合わせることで地表面での加速度応答スペクトルを算出する。解 析に使う地盤モデルは文献17)を参考に、地盤のS 波速度と土質特 性を図9に示す。土の非線形特性は文献18)に示した曲線を用いる。 なお、分割は層厚 lm とし、線形時の減衰定数は全層一律0.02 とす る。SHAKE に用いる入力地震動は極めて稀に発生する地震動レベ ルの標準加速度応答スペクトルに適合した模擬波10 波とし、解放 工学的基盤波として設定する。模擬波の継続時間は120秒間とし、 位相特性は乱数位相を用いた。

# 4.2 解析結果

4箇所の地盤を解析することより、各層の有効せん断歪が1%以下 となっており、等価線形法の適用範囲以内になっている。増幅率 Gs1 提案法を用いて算出した地表面加速度応答スペクトルと SHAKE る 結果の比較を図 10 に示す。Site-1 と Site -2 について、提案法と SHAKEによる結果は概ね対応することが見られる。Site-3 と Site-4 では、提案法が一次卓越周期における応答スペクトルをよく評価す ることが分かるが、1 次卓越周期より小さい部分は大きく評価する ことになっている。これは、増幅係数の1 次卓越周期以外の設定に よる影響と考えられる。また、告示法<sup>3</sup>、井上ら<sup>60</sup>の方法による地表 面加速度応答スペクトルも図 10 に重ねて示す。Site-2、Site-4 では、 二つの方法による一次卓越周期における応答スペクトルが SHAKE による結果と概ね対応できるが、インピーダンスが大きく変化する 層を含む Site-1 と Site-3 について、二つの方法とも一次卓越周期













Fig. 10 Comparison of free field acceleration response spectrum of the multi-layer soil profiles calculated by different methods

における応答スペクトルを過小評価することが分かる。

二次卓越周期に対する増幅率 Gs2 については、上述した三つの方 法とも既存法 10を用いたため、得られた二次卓越周期における応答 スペクトルもほぼ同じになる。既存法による二次卓越周期における 応答スペクトルを SHAKE による結果と比較することで、既存法は Site1~Site3 の応答スペクトルを精度よく評価でき、Site4 の応答 スペクトルを若干過大評価して安全側となるため、既存法の精度は 十分であると考えられる。また、増幅率 Gs2 に関しては、更なる検 討が必要であり、今後の課題であると考えている。

# 5 まとめ

多層地盤の一次卓越周期における地震動増幅率 Gs<sub>1</sub>の計算法を提案した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) せん断波速度が線形的に増加する表層地盤と工学的基盤からなる2層地盤について、一次卓越周期に対する地震動増幅率 Gs1の計算式を提案した。また、提案式が一次元波動理論による結果と比較することで提案式の計算精度を確認した。
- (2) 多層成層地盤について、表層地盤の成層せん断波速度を線形的 に増加するものに置換することで、増幅率 Gs1を評価する方法 を提案した。また、68 箇所の地盤を解析することで、提案法の 実地盤への適用性を確認した。
- (3) 増幅率 Gs1 提案法の限界耐力設計法への適用性を確認するため、 増幅率 Gs1 の提案法を用いて、4 箇所地盤の地表面加速度応答 スペクトルを算出した。また、SHAKE による結果と比較検討 を行い、この適用性を確認した。
- (4) 告示法による一次卓越周期における地盤増幅率を過小評価することにより、地表面加速度応答スペクトルを過小評価する場合があることが確認できた。

#### 参考文献

- H.Afra, A. Pecker: Calculation of free field response spectrum of a nonhomogeneous soil deposit from bed rock response spectrum, Soil dynamic and earthquake engineering 22, pp.157-165,2002
- 2) 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41号,pp.47-52,2013.2
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課他編集:2001 年版限界耐力計算法の計算 例とその解説,2001.3
- 4) 三浦賢治,古山田耕司,飯場正紀:応答スペクトル法による表層地盤の 非線形増幅特性の解析法,日本建築学会構造論文集,539 号,pp.57-62,2001.1
- 5) 林康裕,森井雄史,鬼丸貞友,吉川正隆:限界耐力設計法における地盤 増幅係数評価に関する研究,日本建築学会構造論文集,567 号,pp.41-46,2003.1
- 井上和歌子,林康裕,新井 洋,中井正一,飯場正紀:表層地盤による地震 動増幅率評価法に関する研究,日本建築学会技術報告集,第 32 号,pp.107-112,2010.2
- 7) 古山田耕司,宮本欲司,時松孝次,三浦賢治:応答スペクトル法を用いた 液状化地盤の応答解析と杭応力評価,日本建築学会技術報告集,第 19 号,pp.67-72,2004.6
- 8) 防災科学技術研究所 強震観測網(K-NET, KiK-net) http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE -A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No.

EERC72-12, ERC, 1972.12

- J. X. ZHAO: Estimating modal parameters for a simple soft-soil site having a linear distribution of shear wave velocity with depth, Earthquake engineering and structural dynamics, VOL. 25, pp.163-178,1996
- S. K. SARMA: Analytical solution to the seismic response of visco-elastic soil layers, Geotechnique 44, No. 2, pp.265-275,1994
- 12) K. V. Vijayendra, Sitaram Nayak, S. K. Prasad: An Alternative Method to Estimate Fundamental Period of Layered Soil Deposit, Indian Geotech J 45(2),pp.192-199.DOI 10.1007/s40098-014-0121-7,2015.6
- 13) 境有紀,津野靖士,工藤一嘉,壁谷澤寿海:改正建築基準法の解放工 学的基盤波を想定した表層地盤増幅特性の簡便評価法,日本建築学会 構造論文集,565号,pp.73-78,2003.3
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, p.32, 2012.3
- 15) 建築物の構造関係技術基準説明書編集委員会:2007年版建築物の構造関係技術基準解説書 2007.8
- 16) 吉田 望:実用プログラム SHAKE の適用性,軟弱地盤における地震動増 幅シンポジウム発表論文集, pp.14-31,1994.10.1
- 17) 日本建築学会編:建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震 設計, pp.65-72, 2006.2
- 古山田耕司,宮本裕司,三浦賢治:多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性,第38回地盤工学会研究発表会,pp.2077-2078,2003