

一次卓越周期における地震動増幅率の簡便評価法

SIMPLE CALCULATION METHOD OF SEISMIC MOTION AMPLIFICATION RATIO
CORRESPONDING TO FUNDAMENTAL PERIOD

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, G_{S1} , is a very important factor used for evaluating site effects. In this paper, a simple procedure for evaluating G_{S1} of layered soil profiles is proposed. Firstly, a theoretical formula for G_{S1} of a two-layer soil profile on elastic bedrock, is developed. For a multi-layer soil profile, the multiple soil layers are approximately replaced by equivalent two layers, then G_{S1} of the multi-layer soil profile can be estimated by that of the equivalent two-layer soil profile on bedrock. To demonstrate the validity of this development, G_{S1} of 68 representative soil profiles are evaluated, it is shown that the results by the proposed procedure agree well with those by the wave propagation method. Moreover, applying the proposed method for G_{S1} , free field response spectrum of 4 soil profiles are evaluated, and compared with the results by program SHAKE, good agreement between results by the two methods is observed.

Keywords: layered soil profile, seismic motion amplification ratio, wave propagation method

成層地盤, 地震動増幅率, 波動理論法

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、2004年の建築物荷重指針・同解説¹⁾や多くの研究^{2,3)}では、一次元波動理論による地盤伝達関数を用いて、この地震動の増幅効果を評価している。しかし、地盤伝達関数を用いるこれらの方法はコンピュータとプログラムが必要となり、煩雑な計算方法と考えられる。実務的な耐震設計に取り入れる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簡便法が望ましい。地盤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ピークと対応し、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⁴⁻⁸⁾では、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、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⁴⁾。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 G_{S1} を評価するのは、多層か

らなる表層地盤を等価 1 層地盤に置き換え、等価 1 層地盤の増幅率 G_{S1} を用いて評価する方法が多用されている⁴⁻⁷⁾。しかしながら、林ら⁶⁾、並びに井上ら⁷⁾は、表層多層地盤を 1 層地盤に近似することで増幅率 G_{S1} の算定では、地盤構造が複雑な場合に増幅率の計算精度が良くない事を指摘した。古山田ら⁸⁾は、多層地盤の増幅率 G_{S1} 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 G_{S1} 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⁷⁾。

そこで本論文では、成層地盤の一次卓越周期における地震動増幅率 G_{S1} に着目し、新たに簡便な計算法を提案する事を目的とする。本論文での構成を以下に記述する。先ず、2 章で表層 2 層地盤と工学的基盤からなる 3 層地盤の伝達関数を誘導し、それに基づいて、3 層地盤の一次卓越周期に対する地震動増幅率 G_{S1} の計算式を提案する。3 章で多層地盤の場合(工学的基盤を含む、3 層以上)、一次卓越周期に対する増幅率 G_{S1} の計算法を提案する。具体的に、多層地盤を近似的に 3 層地盤に等価し、2 章で提案した 3 層地盤の計算式を用いて多層地盤の増幅率 G_{S1} を評価する。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)⁹⁾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

* 神奈川大学大学院工学研究科 大学院生・修士(工学)

** 神奈川大学工学部建築学科 助教・博士(工学)

*** 神奈川大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

Grad. Student, Graduate School of Eng., Kanagawa University, M. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.

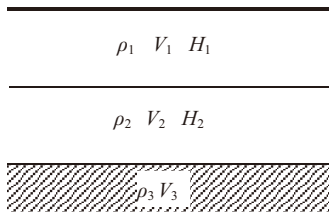


Fig.1 Two-layer soil profile on bedrock

力設計法への適用性を確認するため、提案した多層地盤の増幅率 G_{S1} 計算法を用いて、4 箇所の地盤の地表面での加速度応答スペクトルを算出し、それと SHAKE¹⁰⁾による計算結果を比較して、検討を行う。

2. 3 層地盤の地震動増幅率 G_{S1}

既往の研究⁴⁻⁸⁾では、多層地盤の増幅率 G_{S1} を評価するには、表層多層地盤を等価 1 層地盤に置き換えたモデルを用いることが多い。等価 1 層地盤のせん断波速度と密度は、層厚で重み付けた各層のせん断波速度と密度を平均して算出されるため、表層地盤のインピーダンスが不均一になるに従い、平均による増幅率 G_{S1} の計算誤差が大きくなることが容易に想像される。また、既往の研究⁶⁻⁸⁾より、表層地盤内にインピーダンスが大きく変化する層が含まれる地盤において、等価 1 層地盤モデルを用いた方法では、増幅率 G_{S1} を過小評価することが指摘されている。そのため、増幅率 G_{S1} の過小評価を招く主な原因としては、先述の平均による計算誤差が考えられる。そこで、本研究では、インピーダンスが大きく変化する地層を平均計算することを避けるため、表層地盤インピーダンスのコントラストが一番大きい層境界で表層多層地盤を 2 層地盤に等価する。また、等価した表層 2 層地盤と工学的基盤からなる 3 層地盤について、3 層地盤の増幅率 G_{S1} の計算式を用いて評価する。本章では、まず、3 層地盤の増幅率 G_{S1} 計算式を提案する。

2.1 一次卓越周期における地震動増幅率 G_{S1}

図 1 に示す 3 層地盤の一次卓越周期における増幅率 G_{S1} を求めるため、地盤伝達関数を求める必要がある。

一次元成層地盤の運動方程式は、次のように表せる。

$$\rho_m \frac{\partial^2 y_m}{\partial t^2} = G_m \frac{\partial^2 y_m}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$G_m = G_{m0} (1 + 2ih_m) \quad (2)$$

ここで、 m は層番号(三層地盤の場合 $m=1,2,3$)、 y_m は第 m 層の変位、 ρ_m は第 m 層の密度、 G_{m0} は第 m 層のせん断弾性係数、 h_m は第 m 層の減衰定数、 i は虚数単位、 x は第 m 層の上面からの深さである。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して、式(1)の解である第 m 層地盤の変位とせん断力は、それぞれ次式で与えられる。

$$y_m(x, t) = U_m e^{i\omega(t+x/V_m)} + D_m e^{i\omega(t-x/V_m)} \quad (3)$$

$$\tau_m(x, t) = i\omega\rho_m V_m (U_m e^{i\omega(t+x/V_m)} - D_m e^{i\omega(t-x/V_m)}) \quad (4)$$

ここで、 U_m 、 D_m はそれぞれ第 m 層地盤の上昇波と下降波の振幅を表す未定係数で、 V_m は第 m 層地盤のせん断波速度と表し、次式で定義される。

$$V_m = \sqrt{\frac{G_m}{\rho_m}} \quad (5)$$

地表面でのせん断力は 0、 $\tau_1(0, t) = 0$ より

$$U_1 = D_1 \quad (6)$$

また、 m 層と $m+1$ 層の連続条件、

$$\begin{cases} y_m(H_m, t) = y_{m+1}(0, t) \\ \tau_m(H_m, t) = \tau_{m+1}(0, t) \end{cases} \quad (7)$$

より、

$$\begin{cases} U_{m+1} = \frac{1}{2}[(1+a_m)U_m e^{i\omega t/H_m} + (1-a_m)D_m e^{-i\omega t/H_m}] \\ D_{m+1} = \frac{1}{2}[(1-a_m)U_m e^{i\omega t/H_m} + (1+a_m)D_m e^{-i\omega t/H_m}] \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 H_m は第 m 層地盤の厚さである。

そして、式(6)と(8)により、工学的基盤面での上昇波の振幅が次式のように与えられる。

$$U_3 = U_1 \{ (\cos C_1 \cos C_2 - a_1 \sin C_1 \sin C_2) + i(a_1 a_2 \sin C_1 \cos C_2 + a_2 \cos C_1 \sin C_2) \} \quad (9)$$

ここで、

$$C_m = \frac{\pi T_m}{2T\sqrt{1+2ih_m}} \quad T_m = \frac{4H_m}{V_m} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

a_m は m 層と $m+1$ 層地盤のインピーダンス比と表し、次式で定義する。

$$a_m = \frac{\rho_m V_m}{\rho_{m+1} V_{m+1}} \quad (10)$$

従って、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。

$$H_2(\omega) = \frac{U_1 + D_1}{2 \times U_3} = \frac{1}{(\cos C_1 \cos C_2 - a_1 \sin C_1 \sin C_2) + i(a_1 a_2 \sin C_1 \cos C_2 + a_2 \cos C_1 \sin C_2)} \quad (11)$$

式(11)に示す地盤伝達関数の一次卓越周期における値は地震動増幅率 G_{S1} であり、一次卓越周期を式(11)に代入すれば求められる。無減衰表層二層地盤と剛的な工学的基盤からなる 3 層地盤の一次卓越周期 T_0 は次式から求められる¹¹⁾。

$$\tan \frac{\pi T_1}{2T_0} \tan \frac{\pi T_2}{2T_0} = \frac{\rho_2 H_2 T_1}{\rho_1 H_1 T_2} \quad (12)$$

既往の文献¹²⁻¹³⁾より、工学的基盤の剛性が地盤卓越周期に与える影響は無視できるため、式(12)による一次卓越周期 T_0 が弾性工学的基盤からなる 3 層地盤にも適用できると考えられる。そこで、とりあえず、地盤減衰を無視して、式(12)を式(11)に代入すると、式(11)の分母の実数項は 0 になり、3 層地盤の一次卓越周期における地震動増幅率 G_{S1} は次式のように与えられる。

$$G_{S1} = \frac{1}{a_2 \left| \sin \frac{\pi T_1}{2T_0} \cos \frac{\pi T_2}{2T_0} + \cos \frac{\pi T_1}{2T_0} \sin \frac{\pi T_2}{2T_0} \right|} \quad (13)$$

式(13)は地盤減衰定数を無視して得られたものであるが、実際には、地盤減衰定数は増幅率 G_{S1} に大きな影響を与えるため、地盤減衰定数を考慮しなければならない。表層 1 層地盤と工学的基盤からなる

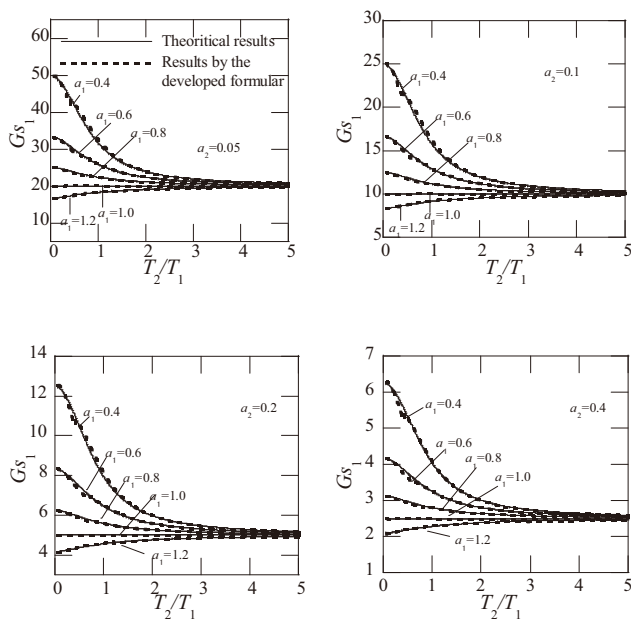


Fig. 2 Verification of the formula (13) for undamped G_{S1} of the two-layer soil profile on bedrock

2層地盤について、減衰定数を考慮した増幅率 G_{S1} の計算式が次式のように提案された⁴⁾。

$$G_{S1} = \frac{1}{a + 1.57h} \quad (14)$$

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。

ここで、2層地盤増幅率の計算式(14)を参考にして、地盤減衰定数を考慮した3層地盤の一次卓越周期における地震動増幅率 G_{S1} の計算式を近似的に次式のように提案する。

$$G_{S1} = \frac{1}{a_2 \left| a_1 \sin \frac{\pi T_1}{2T_0} \cos \frac{\pi T_2}{2T_0} + \cos \frac{\pi T_1}{2T_0} \sin \frac{\pi T_2}{2T_0} \right| + 1.57 h_{eq}} \quad (15)$$

ここで、 h_{eq} は二層地盤の等価減衰定数であり、文献4)を参考にして、次式で計算される。

$$h_{eq} = \frac{\sum h_i \omega_i}{\sum \omega_i} \quad (16)$$

ここで、 h_i は各層の減衰定数、 ω_i は表層地盤の各層の最大弾性歪エ

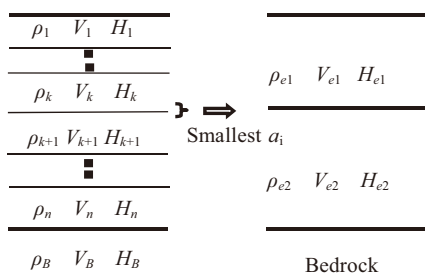


Fig. 4 Illustration of the concept of replacing a multi-layer soil profile on bedrock by an equivalent two-layer soil profile.

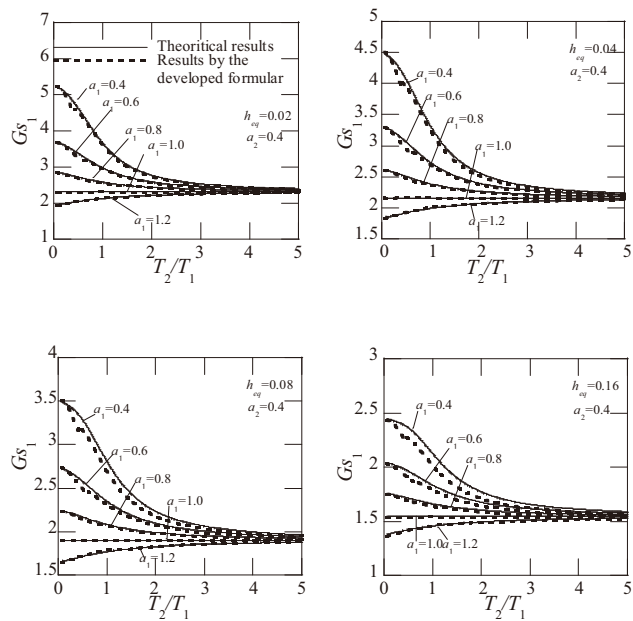


Fig. 3 Verification of the formula (15) for damped G_{S1} of the two-layer soil profile on bedrock

ネルギーである。式(15)により、表層2層地盤が1層地盤になる時に($V_1=V_2, \rho_1=\rho_2, h_1=h_2=h$)、3層地盤と2層地盤の増幅率 G_{S1} の計算式、式(15)と式(14)が一致する。

2.2 提案式の検証

2.1節で提案した増幅率 G_{S1} の計算式(13)と(15)の計算精度を確認するため、地盤のパラメータを広範囲に変化させる3層地盤を用いて、検証を行う。具体的に、式(12)、(13)と(15)を分析することで、増幅率 G_{S1} に影響するパラメータは a_1 、 a_2 、 T_2/T_1 と h_{eq} であることが分かる。 a_1 は表層二層地盤のインピーダンス比であり、逆転層の場合($a_1>1$)を考慮して、 a_1 を0.4から1.2までに変化させる。 a_2 は表層二層目の地盤と工学的基盤のインピーダンス比であり、工学的基盤のインピーダンスがより大きい場合が多いため、 a_2 を0.05から0.4までに変化させる。 T_2/T_1 は表層二層目と一層目地盤の卓越周期の比であり、広範囲に0から5までに変化させる。 h_{eq} は等価地盤減衰定数であり、経験的に0.02から0.16までに変化させる。

まず、地盤減衰を考慮しない増幅率 G_{S1} の提案式(13)の計算精度を確認するため、式(13)と式(11)による結果を比較したものを図2に示す。式(11)で表す地盤伝達関数による結果を理論値として、細い実線で表し、提案式による結果を太い破線で表す。この図より、いずれの場合も提案式(13)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(15)の計算精度を確認するため、式(15)と式(11)による理論値を比較したものを図3に示す。提案式(15)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5%程度であり、提案式の計算精度が高いと考えられる。

3. 多層地盤の地震動増幅率 G_{S1}

3.1 多層地盤の増幅率 G_{S1} の計算法

実際の建物敷地の地盤は3層とは限らず、多層となる場合が多い。

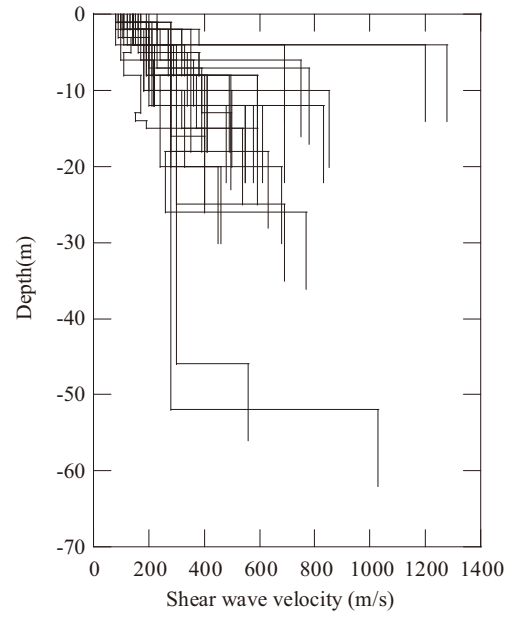
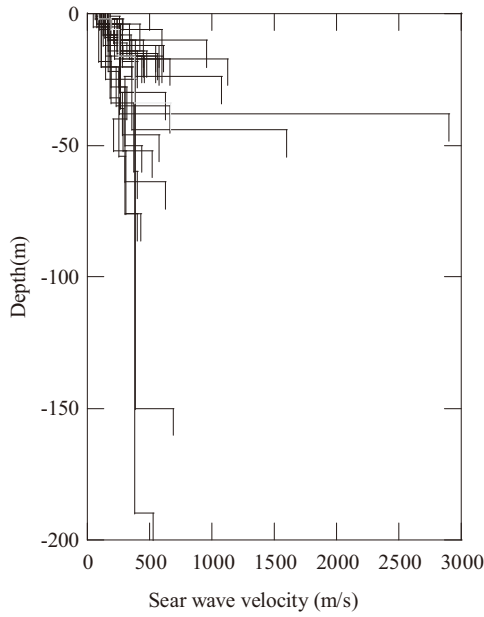
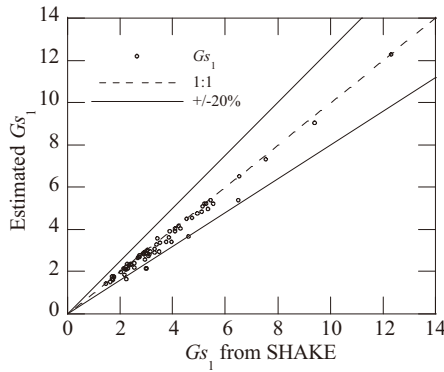
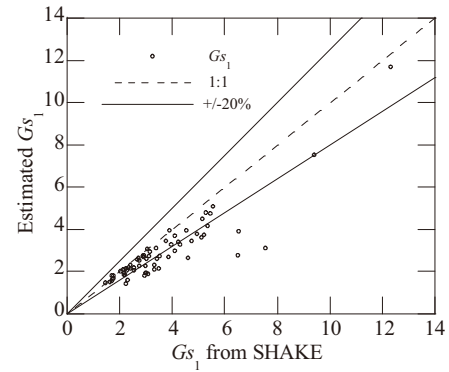


Fig. 5 Shear wave velocity of multi-layer soil profiles on bedrock used for analysis



(a) Comparison of results calculated by proposal and SHAKE



(b) Comparison of results calculated by Code method and SHAKE

Fig. 6 Verification of proposed method of G_{s1} for multi-layer soil profiles on bedrock

そこで、本節では、より一般的な観点、多層地盤の場合の一次卓越周期に対する増幅率 G_{s1} の評価法を提案する。先述の通り、既往の研究⁴⁻⁸⁾では、多層地盤の増幅率 G_{s1} を評価するには、表層多層地盤を等価 1 層地盤に置き換えしたモデルを用いることが多い。等価 1 層地盤のせん断波速度と密度は、それぞれ各層で平均して算出されるため、表層地盤のインピーダンスが不均一になるに従い、平均による増幅率 G_{s1} の計算誤差が大きくなる。本研究では、インピーダンスが大きく変化する地層を平均計算することを避けるため、図 4 に示すような多層地盤に対して、表層地盤インピーダンスのコントラストが一番大きい、即ち、式(10)による地層のインピーダンス比が最小となる層境界で表層多層地盤を 2 層に近似する。逆転層の時には、層間インピーダンス比を式(10)の逆数で計算する。等価 2 層地盤のせん断波速度、 V_{e1} 、 V_{e2} をそれぞれ次式で計算する。

$$V_{e1} = \frac{\sum_{m=1}^k V_m H_m}{\sum_{m=1}^k H_m} \quad (17)$$

$$V_{e2} = \frac{\sum_{m=k+1}^n V_m H_m}{\sum_{m=k+1}^n H_m} \quad (18)$$

また、等価二層地盤の密度、 ρ_{e1} 、 ρ_{e2} をそれぞれ次式で計算する。

$$\rho_{e1} = \frac{\sum_{m=1}^k \rho_m H_m}{\sum_{m=1}^k H_m} \quad (19)$$

$$\rho_{e2} = \frac{\sum_{m=k+1}^n \rho_m H_m}{\sum_{m=k+1}^n H_m} \quad (20)$$

ここで、 k と $k+1$ 層目地盤のインピーダンス比が表層地盤の層間インピーダンス比の最小値、 n は表層地盤の総層数である。

そして、等価 2 層地盤と工学的基盤からなる 3 層地盤の増幅率 G_{s1} が、3 層地盤増幅率 G_{s1} の提案式(15)を用いて計算できる。

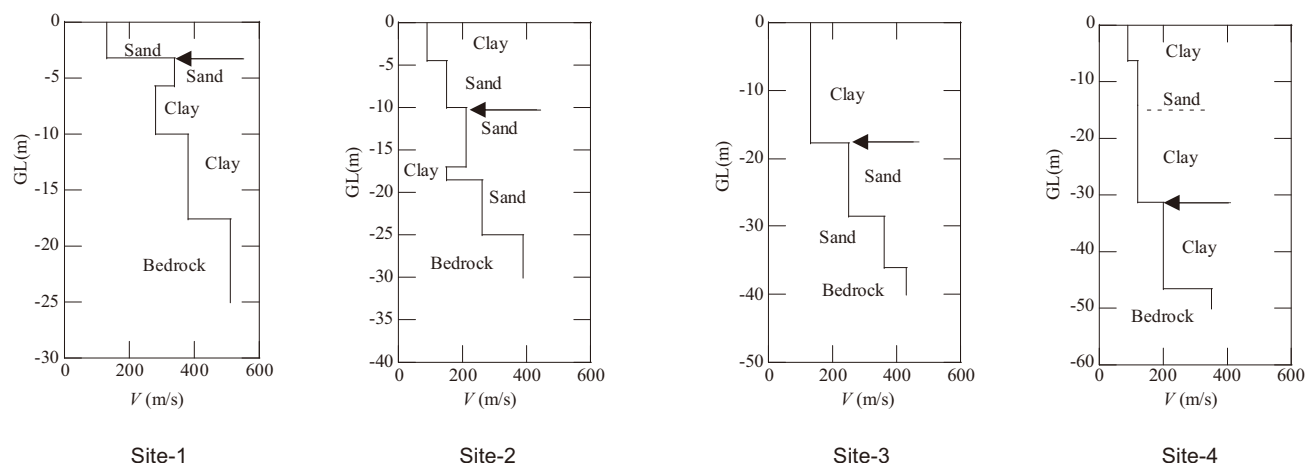


Fig. 7 Shear wave velocity of multi-layer soil profiles on bedrock used for analysis

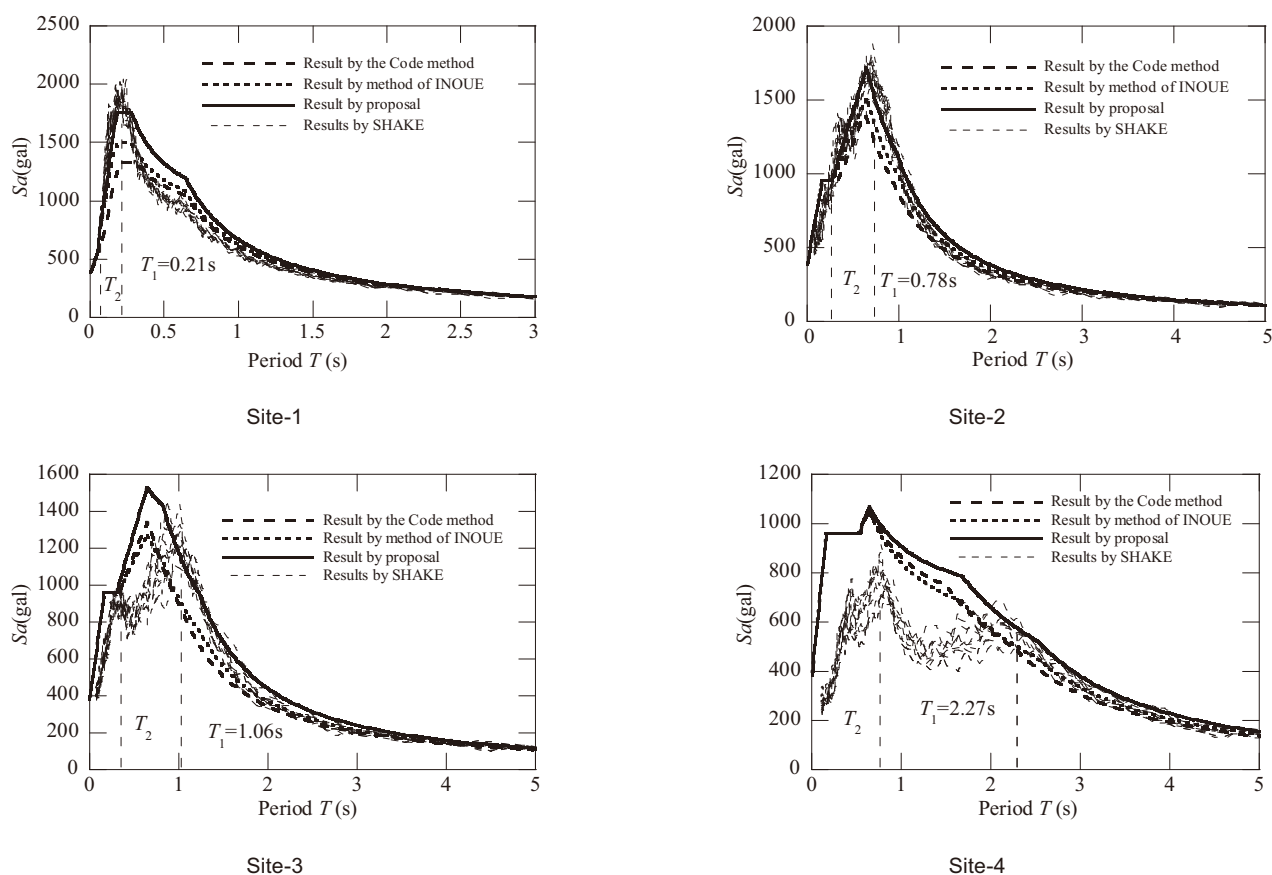


Fig. 8 Comparison of free field acceleration response spectrum of the multi-layer soil profiles calculated by different methods

実際の地盤では、インピーダンスが大きく変化する地層が数層含まれる場合もあるが、提案法は表層地盤インピーダンスのコントラストが一番大きい地層の境界で表層多層地盤を2層地盤に等価することで、平均計算による誤差を最大限に避けることができ、合理的な方法と考えられる。

3.2 適用性の検討

前節で提案した多層地盤に適用可能な増幅率 G_{s1} の計算法について、そ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)⁹⁾から任意の68箇所の多層地盤を選択して、検討を行う。

選択した地盤を成層地盤とみなし、それら地盤のせん断波速度を図5に示す。また、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14)を参考に、粘性土が $15.68(\text{KN}/\text{m}^3)$ 、砂質土が $18.62(\text{KN}/\text{m}^3)$ 、工学的基盤のせん断波速度が $400\sim 800(\text{m}/\text{s})$ の場合が $19.60(\text{KN}/\text{m}^3)$ 、 $800(\text{m}/\text{s})$ 以上の場合が $21.56(\text{KN}/\text{m}^3)$ を採用した。選択した68箇所の地盤について、SHAKEによる初期一次卓越周期は 0.05s から 1.72s となり、文献15)による3種類地盤をカバーできる。ここで、入力地震動による地盤の非線形性を考慮しないため、地盤減衰定数には一律に 0.02 を採用した。

提案法を用いて、増幅率 G_{S1} を計算する前に、インピーダンス比が最も小さい層境界で表層地盤を 2 層に分割する必要がある。選択した 68 箇所の地盤を分析することで、全ての地盤はインピーダンス比が最小となる層境界が唯一であり、表層地盤の分割位置が明確であることが分かった。インピーダンス比が同一の層境界が複数あり、それと同時に、これらのインピーダンス比が最小値となる地盤が理論的には想像できるが、現実的には極めて少ない。そこで、分割位置に関しては、提案法は実地盤に適用できる明確な方法と考えられる。

提案法と一次元波動理論(ここで、SHAKE プログラムを使う)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がわずか 5.7%程度であり、提案法と一次元波動理論による結果がよく対応することが分かる。分析した地盤の 94%について、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が 17.2%程度である。多数の地盤について、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乖離していることが分かる。提案法と告示法、両方とも多層地盤の増幅率 G_{S1} を過小評価する場合があるが、図 6 の(b)と(a)を比較して見ると、提案法が増幅率 G_{S1} をより精度よく評価できることが分かる。

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¹⁶⁾では、工学的基盤上での加速度応答スペクトル S_0 が与えられ、地盤特性を表す地盤増幅係数 G_s 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 S_a を求める方法が採用されている。地盤増幅係数 G_s は一次卓越周期 T_1 とそれに対する増幅率 G_{S1} 、二次卓越周期 T_2 とそれに対する増幅率 G_{S2} を用いて、次式で計算される。

$$G_s = \begin{cases} G_{S2} \frac{T}{0.8T_2} & T \leq 0.8T_2 \\ \frac{G_{S1} - G_{S2}}{0.8(T_1 - T_2)} T + G_{S2} - 0.8 \frac{G_{S1} - G_{S2}}{0.8(T_1 - T_2)} T_2 & 0.8T_2 \leq T \leq 0.8T_1 \\ G_{S1} & 0.8T_1 \leq T \leq 1.2T_1 \\ \frac{G_{S1} - 1}{\frac{1}{1.2T_1} - 0.1} \frac{1}{T} + G_{S1} - 0.8 \frac{G_{S1} - 1}{\frac{1}{1.2T_1} - 0.1} \times \frac{1}{1.2T_1} & 1.2T_1 \leq T \end{cases} \quad (21)$$

本章では、増幅率 G_{S1} の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ている¹⁷⁾。

4.1 解析条件

増幅率 G_{S1} の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計算する。具体的に、地盤増幅係数 G_s の計算に用いる増幅率 G_{S1} を提案法で計算し、地盤卓越周期を井上ら⁷⁾による固有値解析法で求める。地盤各層の非線形性は、井上ら⁷⁾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 G_s は工学的基盤面と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。解析に用いた地盤モデルは文献 18)で示されているモデルと同様とし、図 7 にそれら地盤の S 波速度と

土質特性を示す。土の非線形特性は文献 19)に示した曲線を用いる。なお、分割は層厚 1m 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。提案法を用いて増幅率 G_{S1} を計算する前に、表層地盤を 2 層に分割する。分割の層境界を図 7 中に矢印で示している。増幅率 G_{S1} 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 による結果の比較を図 8 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分かる。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していることが見受けられるが、1 次卓越周期より小さい領域を過大評価する結果になっている。これは、増幅係数 G_s の 1 次と 2 次卓越周期の間の設定による影響と考えられる。具体的に、式(21)で 1 次及び 2 次卓越周期の変動幅がそれぞれ $\pm 20\%$ 、 -20% に設定され、更に 1 次と 2 次固有周期の間の増幅係数 G_s が直線近似されている。しかし、理論的に、地盤の 1 次及び 2 次固有周期の間の地震動増幅率は谷になるため、上述した設定により地震動増幅が過大に評価されている。同じことが他の研究²⁰⁻²¹⁾にも指摘された。

また、告示法⁴⁾、井上ら⁷⁾の方法による地表面加速度応答スペクトルも図 8 に重ねて示す。これらの方法による一次卓越周期における応答スペクトルを提案法による結果と比較することにより、いずれの地盤に対しても、提案法の方がより精度よくなることが分かる。特に、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、提案法の精度がよくなることが顕著である。

二次卓越周期に対する増幅率 G_{S2} については、上述した三つの方法とも既存法¹⁶⁾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になるため、既存法の精度が十分と考えられる。また、増幅率 G_{S2} に関しては、更なる検討が必要と考え、今後の研究にしたいと思う。

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 G_{S1} 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) 表層 2 層地盤と工学的基盤からなる 3 層地盤の伝達関数を誘導し、それに基づいて、3 層地盤の一次卓越周期に対する地震動増幅率 G_{S1} の計算式を提案した。また、提案式を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) 多層地盤の増幅率 G_{S1} を評価するため、多層地盤を 3 層地盤に近似し、3 層地盤の増幅率 G_{S1} 計算式を用いて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について確認した。
- (3) 多層地盤の増幅率 G_{S1} の提案法について、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、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) 提案法を既存法と比較して検討することにより、提案法が一次卓越周期における地盤増幅率 G_{s1} をより精度よく評価できることが分かった。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説 pp.461-470,2004
- 2) Afra H., A. Pecker: Calculation of free field response spectrum of a non-homogeneous soil deposit from bed rock response spectrum, Soil dynamic and earthquake engineering, 22, pp.157-165, 2002
- 3) 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
- 4) 告示 1457, 2007 年改訂
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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, 32 号, pp.107-112, 2010.2
- 8) 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, 19 号, pp.67-72, 2004. 6
- 9) 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/> (参照 2016.3.20)
- 10) Schnabel P.B., J. Lysmer and H. B. Seed: SHAKE -A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC72-12, ERC, 1972. 12
- 11) Madera GA: Fundamental period and amplification of peak acceleration in layered systems. Research Report R 70-37, June. Cambridge, MA: MIT Press; 1970
- 12) SARMA S. K.: Analytical solution to the seismic response of visco-elastic soil layers. Geotechnique, No. 2, pp.265-275, 1994
- 13) Vijayendra, K.V., Sitaram Nayak, S. K. Prasad: An Alternative Method to Estimate Fundamental Period of Layered Soil Deposit. Indian Geotech J, 2, pp.192-199, 2015
- 14) 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
- 15) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 5 耐震設計編, p.32, 2012.3
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 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, 2003.7
- 20) 泉洋輔, 三浦賢治: 限界耐力計算における基礎入力動評価の合理化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 616 号, pp.57-65, 2007.6
- 21) 三浦賢治: 表層地盤の増幅, 「限界耐力計算の現状と課題ワーキンググループ報告一」, 日本建築学会・構造委員会・耐震構造性能評価法検討ワーキンググループ, pp.177-180, 2004.8

SIMPLE CALCULATION METHOD OF SEISMIC MOTION AMPLIFICATION RATIO
CORRESPONDING TO FUNDAMENTAL PERIOD*Haizhong ZHANG^{*}, Takasuke SAITO^{**} and Yan-Gang ZHAO^{***}*^{*} Grad. Student, Graduate School of Eng., Kanagawa University, M. Eng.^{**} Assist. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.^{***} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa University, Dr. Eng.

It has long been recognized that the effect of local site on ground motion should be considered in the seismic design of structures. Site effects are generally considered as amplification of seismic motion from bedrock surface to surface of soil sediment. Many studies¹⁻³⁾ estimate the site effects by a transfer function of the specific site, based on one-dimensional wave propagation theory. However, these methods using the transfer function to estimate site effects are so complicated, that usually computer programs are necessary. For practical seismic design, a simple method that using representative parameters to characterize site effects is desirable. The first peak of the transfer function G_{s1} corresponding to resonance that occurs at site fundamental period, usually is the maximum amplification ratio of seismic motion. G_{s1} is very important information for understanding the amplification characteristic of local site, and has already been used as a factor to estimate site effects in many studies⁴⁻⁸⁾.

Assessment of G_{s1} for layered soil profile has been focused on in many studies. A simple method for practical engineering has been developed in Japanese Seismic Code⁴⁾, in which, G_{s1} is evaluated by approximating a multi-layer soil profile to an equivalent single layer by weighted averaging the soil shear wave velocity and density. However, it has been reported the method underestimates G_{s1} in many cases⁶⁻⁷⁾. Some improvements have been proposed by Koyamada⁸⁾, investigations have shown that the accuracy of this method can still hardly be accepted in engineering design⁷⁻⁸⁾. Therefore, method of evaluating G_{s1} with both simplicity and high accuracy is necessary to be developed for practical engineering.

In this paper, a simple procedure for evaluating G_{s1} of a layered soil profile is studied. Firstly, a theoretical formula for G_{s1} of a two-layer soil profile on elastic bedrock, is developed. For a multi-layer soil profile, the multiple soil layers are approximately replaced by equivalent two layers, then G_{s1} of the multi-layer soil profile can be estimated by that of the equivalent two-layer soil profile on bedrock. To demonstrate the validity of this development, G_{s1} of 68 representative soil profiles are evaluated, it is shown that the results by the proposed procedure agree well with those by the wave propagation method. Moreover, applying the proposed method for G_{s1} , free field response spectrum of 4 soil profiles are evaluated, and compared with the results by program SHAKE, good agreement between results by the two methods is observed.

The conclusions of this study can be drawn below.

- 1) Equation for G_{s1} of a two-layer soil profile on bedrock is derived based on the transfer function of the two-layer soil profile. And, the validity of the derived equations are checked using a series of two-layer soil profiles considering a wide range of parameters.
- 2) For a multi-layer soil profile, a simplified procedure for approximating multiple soil layers to equivalent two layers is developed. Then, G_{s1} of a multi-layer soil profile can be estimated by that of the equivalent two-layer soil profile on bedrock. To demonstrate the validity of this development, G_{s1} of 68 representative soil profiles are evaluated, it is shown that the results by the proposed procedure agree well with those by the wave propagation method.
- 3) To check the applicability of the proposal for the design method in Japanese Seismic Code⁴⁾, free field response spectrum of 4 soil profiles are evaluated applying the proposed method for G_{s1} . Good agreement between the results by proposal and those by program SHAKE is observed.
- 4) By comparing G_{s1} calculated by the proposed method with those by current methods, it is found that the accuracy of the proposed method is better.

(2016年6月25日原稿受理, 2016年12月28日採用決定)