

地盤の非線形性を考慮した 表層地盤の簡易な地震時挙動評価手法

井澤 淳* 坂井 公俊*
小島 謙一* 室野 剛隆**

A Simple Evaluation Method for the Seismic Behavior of the Surface Ground
in Consideration of Non-Linearity of Soil

Jun IZAWA Kimitoshi SAKAI
Kenichi KOJIMA Yoshitaka MURONO

The seismic behaviour of the surface ground is greatly influenced by the non-linearity of soil, such as shear strength, degradation of shear stiffness with an increase in shear strain and so on. The simple evaluation method prescribed in the present seismic design standard, however, cannot consider the non-linearity of soil because only initial shear wave velocity, V_s , is used. This paper proposes a modified simple evaluation method, which is composed of two procedures. One is to select a ground classification for determining a design acceleration spectrum using the strength index of the whole surface ground, K_f . The other is to determine the vertical distribution of horizontal displacement by a mode analysis using V_{smp} , which is a shear wave velocity modified in consideration of the impedance ratio of each layer composing the surface ground. It was confirmed that the proposed method can give adequate result having almost the same accuracy as that obtained from non-linear dynamic ground response analysis.

キーワード：地盤の非線形性、弾性加速度応答スペクトル、地盤変位、モード解析

1. はじめに

構造物の耐震設計では、構造物が建設される地点での表層地盤の挙動を評価し、構造物に作用する慣性力と地盤変位を設定して応答値を算定する必要がある。L2地震のような大規模地震を想定した場合、強い非線形性を示す地盤の変形特性の影響が大きくなるため、適切に評価する必要がある。このため、平成24年に改訂された鉄道構造物等設計標準 耐震設計¹⁾ (以降、耐震標準)では、地盤の非線形性にGHE-Sモデル^{2) 3)}を用いた逐次非線形動的解析により表層地盤の地震時挙動を評価し、慣性力と地盤変位を算定することを原則している。しかしながら、延長の長い鉄道路線では数多くの構造物を設計する必要があるため、実務的には簡易な手法が採用されることが多い。これは、慣性力については地盤の固有周期 T_g を元に分類した地盤種別毎に用意されている設計弾性加速度応答スペクトルやその適合波を用い、地盤変位についてはモード解析によって算定する手法であるが、いずれの手法も地盤の初期せん断剛性 G_0 ($=\rho V_s^2$, ρ : 密度, V_s : 初期せん断弾性波速度)のみを用いており、地震時の変形に伴う地盤の剛性低下を考慮出来ない。ま

た、特に強い非線形性を生じると想定されるG6、G7地盤に該当する軟弱地盤については、地盤の固有周期 T_g のみでは設計弾性加速度応答スペクトルの設定が難しいため、耐震標準において標準的な設計応答スペクトルが示されていない。また、モード解析による地盤変位の算出方法についても、軟弱地盤層における急激な変位の増加等の評価出来ないなどの問題がある。

本研究は、構造物の耐震設計において地盤の非線形性の影響を適切に判断でき、かつ実務的な設計手法の確立を目的とする。そこで、従来から用いられている地盤種別による弾性加速度応答スペクトルの設定手法やモード解析による地盤の変位分布算定手法を踏襲しながら、地盤の非線形性を簡易に評価可能な表層地盤の地震時挙動評価法の検討を行った。

2. 従来手法の課題

2.1 弾性加速度応答スペクトルの分類における課題

耐震標準では、表1に示すように地盤の固有周期 T_g を用いた地盤種別の分類が示されており、G2～G5地盤については図1に示すような設計弾性加速度応答スペクトルが用意されている。ここで、表層地盤の固有周期 T_g は、表層地盤の厚さ、初期せん断波速度 V_s 、湿潤単

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター

表1 T_gによる地盤種別分類

固有周期 T _g (s)	地盤種別	備考
—	G0	岩盤
—	G1	基盤
~ 0.25	G2	洪積地盤など
0.25 ~ 0.50	G3	普通地盤
0.50 ~ 0.75	G4	普通~軟弱地盤
0.75 ~ 1.00	G5	軟弱地盤
1.00 ~ 1.50	G6	軟弱地盤
1.50 ~	G7	極めて軟弱地盤

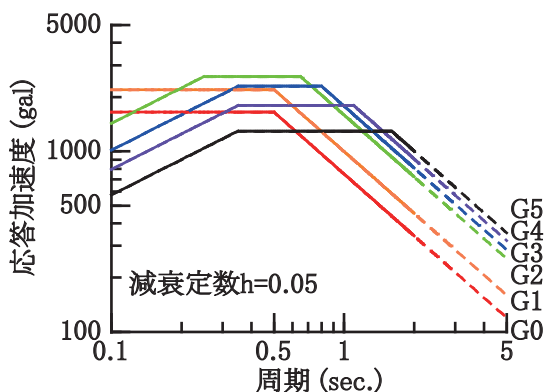
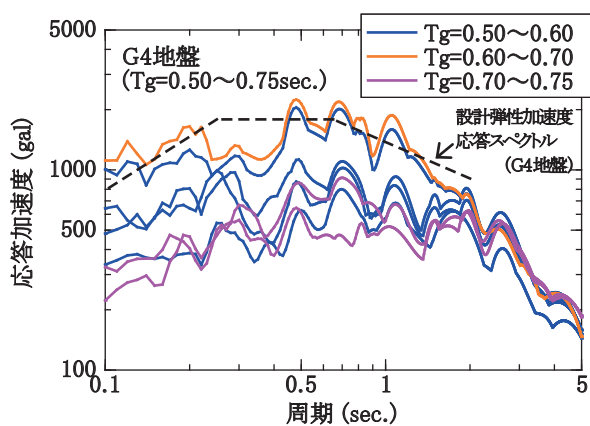


図1 耐震標準に示されている設計弾性加速度応答スペクトル

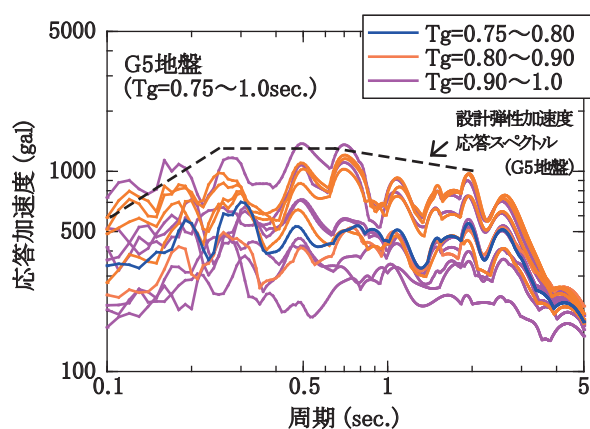
位体積重量に基づいて固有値解析等から求めるが、地盤の変形特性を考慮した指標としては V_s のみである。一方、設計弾性加速度応答スペクトルは、G2～G5地盤に該当する数種類の地盤に対して地盤の非線形性にGHE-Sモデルを用いた逐次非線形動的解析を実施して地表面地震動の弾性加速度応答スペクトルを算出し、地盤種別毎の弾性加速度応答スペクトル群を概ね包絡するように設定されている。図2にG4、G5地盤に対する逐次非線形動的解析から得られた地表面波形の弾性加速度応答スペクトル群を耐震標準に示されている設計弾性加速度応答スペクトルとともに示すが、大きなばらつきを有していることがわかる。さらに軟弱なG6、G7地盤についてはよりばらつきが大きくなり、包絡するスペクトルの精度は非常に低いものとなる。なお、図2では T_g の大きさ毎に3つに分類し、色分けして表示しているが、それでも分布幅は広く、 T_g を細かく分類するだけではこの問題を解決できないことも分かる。L2地震のような大規模地震を対象とする場合、地盤は大きくせん断されて剛性低下が顕著となるが、前述の通り T_g の算定では V_s しか考慮していないため、せん断により地層毎に異なる剛性低下、すなわち非線形性を詳細には考慮できないことが原因である。

2.2 地盤変位分布の算定における課題

杭基礎を始めとする深い基礎や開削トンネルなどの地中構造物の地震時挙動は、周辺地盤の変形により大きな



(a) G4地盤



(b) G5地盤

図2 GHE-Sモデルを用いた非線形動的解析から求めた弾性加速度応答スペクトル (G4、G5地盤)

影響を受けるため、地盤変位の影響を適切に評価して設計する必要がある。したがって、耐震標準では地盤と構造物の相互作用を適切に考慮可能な一体型モデルを用いた動的解析法による応答値の算定を原則としている。ただし、一般的な構造物で地震作用を等価な静的荷重に置き換えることが可能な場合には静的解析法を用いてよいとされており、実務的には応答変位法が採用されることが多い。しかし、応答変位法の適用においても、地盤変位分布を適切に算定する必要がある。これは地盤の非線形動的解析を実施することで算出が可能であるが、一般的には図3に示すようなモード解析による手法により簡易に評価する場合が多い。

この手法では、まず地盤のせん断弾性係数 G_0 を用いて、地表面最大変位量を1とした固有振動モードを求める。次に、地表面最大変位 a_g を耐震標準に示されている T_g との関係式により算出して固有振動モードに地表面最大変位を乗じることで、地盤の水平変位の鉛直方向分布を得る。ここで用いる a_g の算定式は、地盤の非線形性にGHE-Sモデルを用いたL2地震動に対する地盤の非線形動的解析結果の統計的処理から求めたものであり、ひずみレベルに依存した地盤の剛性低下を考慮して

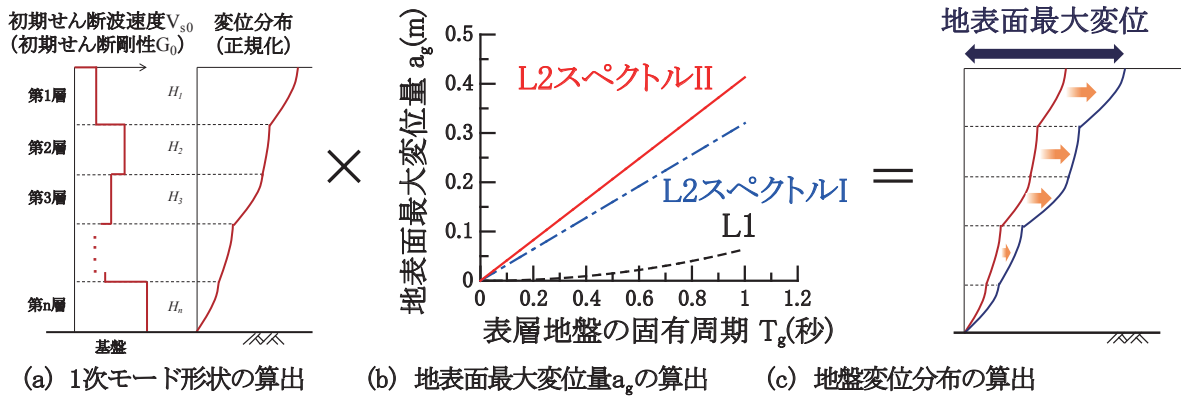


図3 従来のモード解析による地盤変位分布の算定方法の概念図

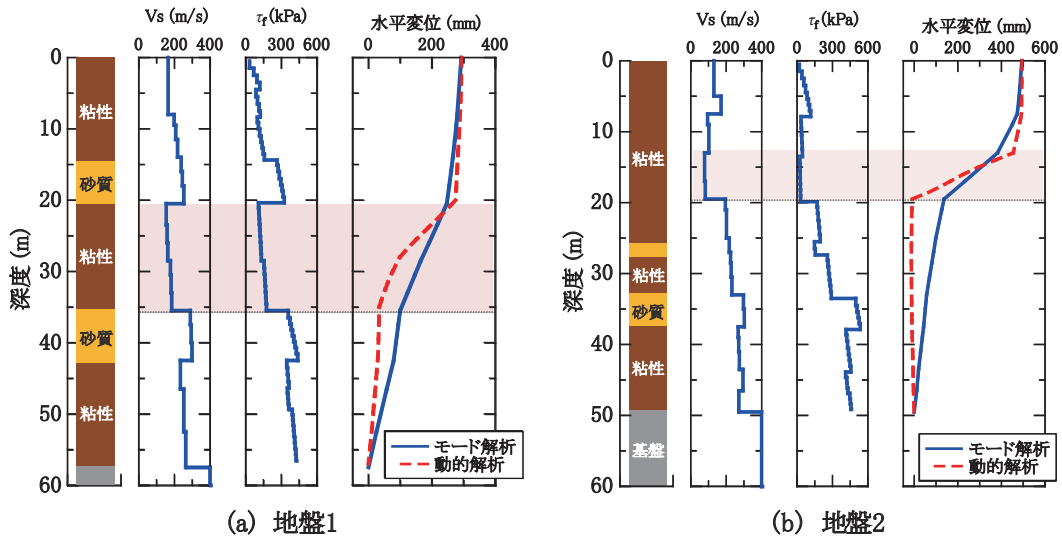


図4 モード解析と非線形動的解析から得られる地盤変位分布の比較

いる。それに対して、固有振動モードは V_s と密度 ρ を用いて求めたものであり、ひずみレベルに依存した地盤の非線形性を考慮できていない。図4にモード解析と逐次非線形動的解析を用いた L2 スペクトル II 地震動に対する地盤変位の算定結果の比較を示すが、モード解析ではせん断強度 τ_r の小さい層での地盤変位の急増箇所を特定できないことが分かる。深い基礎や地中構造物では、このような地盤の急変箇所が地震時挙動に大きく影響を与える可能性があるため、これら適切に評価する必要があるが、非線形性を詳細に考慮できない V_s のみを用いて評価することは難しい。

3. 表層地盤の簡易な地震時挙動評価手法

前章で示したように、表層地盤の地震時挙動を適切に評価する場合、 V_s や T_g 以外の指標を用いる必要がある。また、地盤は場所に応じて層厚や層構成も異なる。ここでは、地盤の非線形性と層厚・層構成の影響を簡易かつ適切に考慮可能な慣性力と地盤変位の算定手法について述べる。

3.1 地盤の非線形性を考慮した設計スペクトルの設定方法

(1) 地盤の非線形性を考慮した設計スペクトルの設定
坂井ら⁴⁾は、複雑な構成を有する表層地盤を等価な1自由度モデルに置き換えたモデルによる地盤挙動の評価手法を提案している。図5にその概念図を示すが、地盤全体を対象に静的非線形解析を実施し、地盤の非線形性や層構成の影響を考慮して、地盤全体系を対象とした荷重～変位関係を算定して構築するモデルである。この地盤の等価1自由度モデルを用いた地盤応答解析の結果は、詳細な1次元多層モデルを用いた地盤応答解析の結果と概ね一致することが確認されている⁴⁾。また、坂井ら⁵⁾はこの地盤全体系の静的非線形解析の結果から、地盤の固有周期 T_g と規準変位 δ_r (変位 δ ～せん断剛性比 G/G_0 関係において、 $G/G_0=0.5$ となる点での変位) を用いることで、地盤全体系の強度に関連する指標として K_f (以降、地盤強度比) を式(1)のように表現できることを示している。

$$K_f = \frac{1}{T_g^2} \times \delta_r \quad (1)$$

特集：防災技術

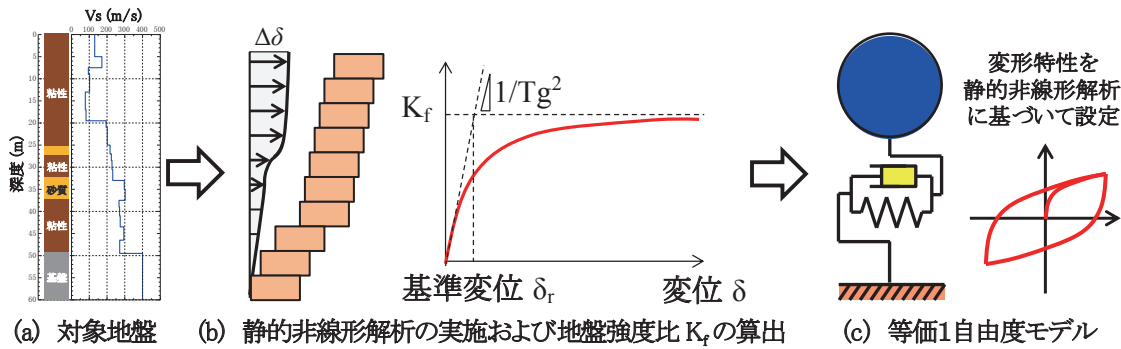


図5 地盤強度比 K_f と地盤の等価1自由度モデルの概念図

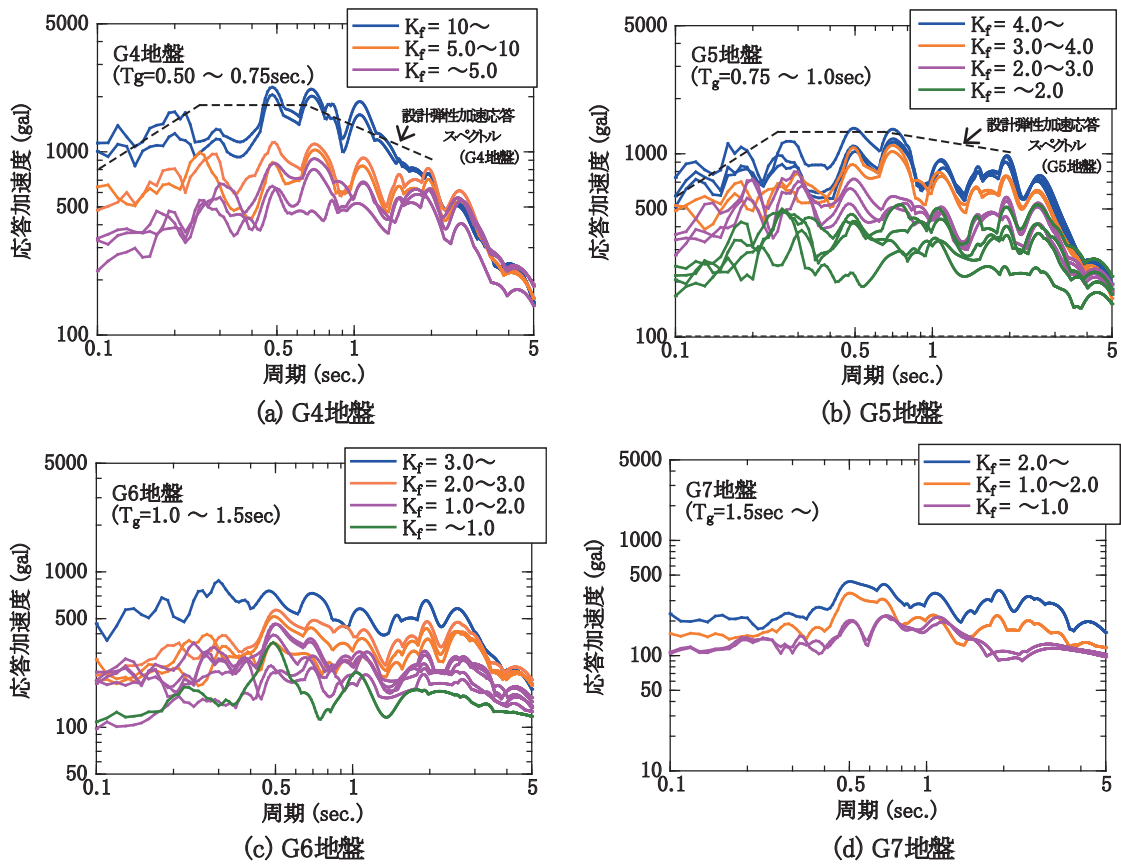


図6 地盤強度比 K_f を用いた弾性加速度応答スペクトルの細分類の例

なお、基準変位 δ_f を求めるには表層地盤全体系の静的非線形解析を実施する必要があるが、式(2)に示すように地盤の拘束圧（重量）と土質区分を考慮した基準変位 δ_f の算定式を用いて簡易に算出することも可能である⁵⁾。

$$\log \delta_f = \alpha \cdot \log \gamma - \beta \quad (2)$$

γ : 単位面積当りの地盤全体の重量 (kN/m²)

$$\alpha = 1.15 + 0.17\kappa \quad \beta = 2.77 + 0.57\kappa$$

$$\kappa = \frac{2}{D^2} \int_0^D \lambda dx$$

D : 深度, $\lambda=0$: 粘性土の場合, $\lambda=1$: 砂質土の場合

ここで、一般的に土要素のせん断強度 τ_f は、初期せん断剛性 G_0 と規準ひずみ γ_r を用いて式(3)のように表される。

$$\tau_f = G_0 \times \gamma_r \quad (3)$$

このせん断強度 τ_f は、地盤中の単一要素を取り出した場合に上層に伝えることのできる最大荷重であり、地表面応答の上限値とも関連が深いことが指摘されている^{例えは6) 7)}。一方、式(1)と式(3)を比較すると、地盤強度比 K_f は質量1、せん断剛性 $G_0=4\pi^2/T_g^2$ 、基準変位 δ_f となる土要素のせん断強度を算定していることに相当する。したがって、地盤強度比 K_f は、地盤全体系が地表位置に伝えることのできる力（地表面地震動）の上限値と密接に関連していると考えられ、耐震設計において地盤を分類する際の有効な指標とすることが期待できる。

図6にG4～G6地盤に該当する数種類の地盤の動的

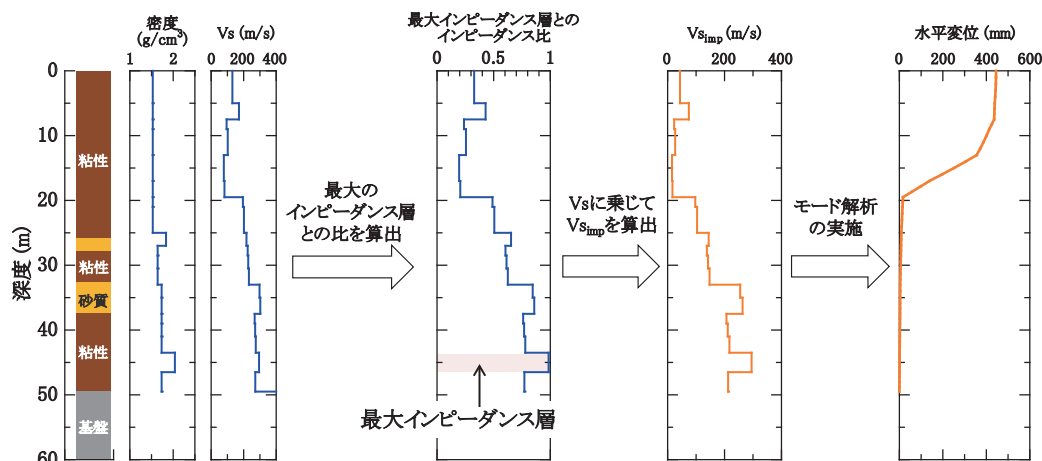


図7 インピーダンス比を考慮した $V_{s_{imp}}$ を用いたモード解析法の手順

解析を実施して得られた地表面での弾性加速度応答スペクトルを、地盤強度比 K_f を用いて細分類化した例を示す。これより、 T_g のみで分類した同一地盤種別内ではばらつき大きい弾性加速度応答スペクトル群を、地盤強度比 K_f を用いることで同程度の応答を示すいくつかの細かいスペクトル群に細分類できることが分かる。このような検討を基に弾性加速度応答スペクトル群を概ね包絡するスペクトルを設定することで、 T_g と K_f を用いて非線形性を考慮した設計弾性加速度応答スペクトルの設定が可能となる。

(2) 地盤強度比 K_f を用いた設計スペクトルの設定方法

上記の結果を踏まえて、 T_g および K_f を用いた地盤種別による設計スペクトルの設定方法およびそれらを実際に適用する際の設計スペクトルの選定方法を以下にまとめる。

①設計スペクトルの設定方法

- Step1: 地盤情報を収集し、非線形動的解析より地表面での弾性加速度応答スペクトルを求める。
- Step2: 各地盤の静的非線形解析を実施し、地盤の地盤強度比 K_f を求める。
- Step3: Step1 で得られた弾性加速度応答スペクトル群を T_g を用いて従来の地盤種別に分類した後、各地盤種別内で地盤の地盤強度比 K_f を用いていくつかのスペクトル群に細分類化する。
- Step4: Step3 で細分類化した地盤種別毎の弾性加速度応答スペクトル群を概ね包絡する設計弾性加速度応答スペクトルを設定する。
- Step5: 必要に応じてスペクトル適合波や所要降伏震度スペクトルを作成する。

②適用する設計スペクトルの選定方法

- Step1: 建造物の建設地点の地盤調査結果を用いて T_g を求め、耐震標準に示す地盤種別に分類する。

Step2: 地盤の静的非線形解析を実施した上で K_f を求め、地盤種別内で細分類化した地盤種別を割り当てる。ただし、実務上は式 (1) および式 (2) により K_f を求めて地盤種別を分類してもよい。

Step3: 分類された地盤種別毎に、①で設定した設計弾性加速度応答スペクトル、所要降伏震度スペクトル等を用いて地盤、構造物に作用する慣性力の影響を評価する。

本手法を適用することで、従来と同等の地盤情報を基に、地盤の非線形性を考慮した慣性力の簡易な設定が可能となる。

3.2 地盤の非線形性を考慮したモード解析による変位分布の算定方法

井澤ら⁸⁾は、従来のモード解析法に改良を加え、ひずみレベルに依存した地盤の剛性低下を考慮可能なモード解析による地盤変位分布の算定方法を提案している。しかしながら、この手法ではモード解析により算定される各層のひずみレベルに応じてせん断剛性を低下させながら繰り返しモード解析を実施する必要があること、地盤の動的解析と同等の地盤情報が必要になるなど、実務的には煩雑な手法であった。そこで、地盤の変形しにくさを表す指標の一つである地盤のインピーダンスを考慮したモード解析による地盤変位分布の算定手法を検討した。インピーダンスは地盤の密度 ρ (g/cm^3) と初期せん断弾性波速度 V_s (m/s) との積で求められ、インピーダンス自体には地盤の非線形性は加味されていないが、地震時に生じる地盤変位分布には何らかの影響を与えらる。そこで、以下の手順で対象地盤中のインピーダンスの分布を考慮して地盤の変位分布を算出する手法を検討した (図7)。

- Step1: 対象地盤の各層のインピーダンスを求め、イン

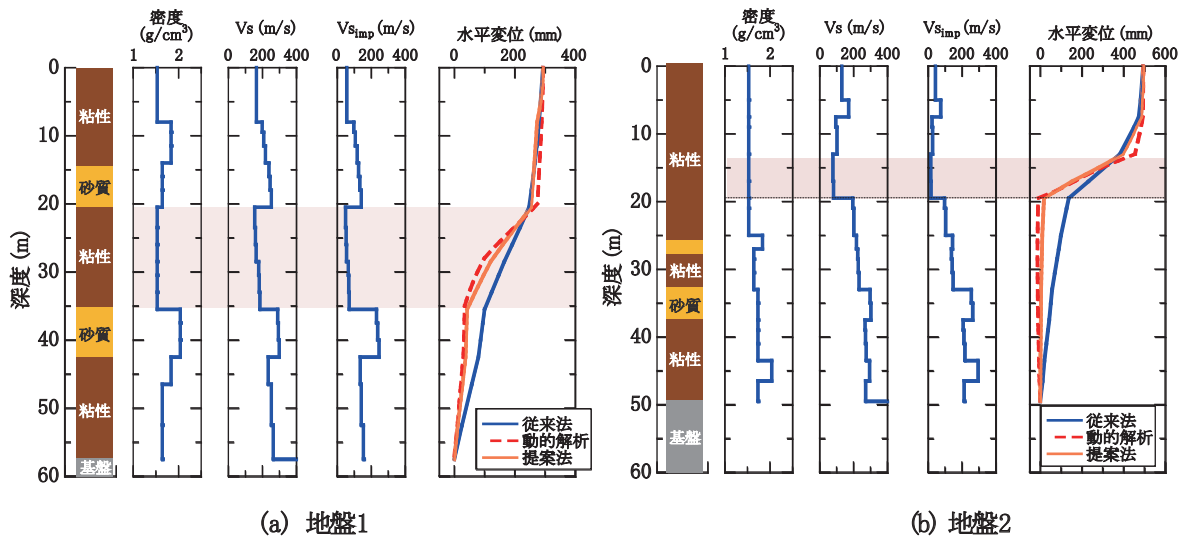


図8 $V_{s_{imp}}$ を用いたモード解析と従来法および非線形動的解析の結果の比較

- ピーダンスが最大となる層とのインピーダンス比の分布を求める。
- Step2: Step1 で求めたインピーダンス比を初期せん断弾性波速度 V_s に乗じて、インピーダンス分布を考慮したせん断弾性波速度 $V_{s_{imp}}$ の分布を求める。
- Step3: Step2 で求めた $V_{s_{imp}}$ 分布を用いてモード解析を行い、地盤変位分布および地盤の固有周期 $T_{g_{imp}}$ を求める。

- (2) 地盤を構成する各地層のインピーダンス比を考慮したせん断弾性波速度 $V_{s_{imp}}$ を用いたモード解析による地盤変位分布の算定法を構築した。これにより、従来のモード解析法と同等の地盤情報を用いて、地盤の非線形動的解析と同等の精度を有する地盤変位の算定が可能である。

本手法を適用して得られた地盤変位分布や用いた V_s 等を、従来のモード解析および逐次非線形動的解析結果と合わせて図8に示す。インピーダンス比を考慮した地盤変位分布は、非線形動的解析から得られる結果とよく一致しており、地盤変位が急増する箇所を適切に特定できることが分かる。以上より、 $V_{s_{imp}}$ を用いたモード解析によって、通常モード解析と同等の地盤情報のみで非線形動的解析とほぼ同等の変位分布を算定可能である。

4. まとめ

本研究では、構造物の耐震設計において必要となる表層地盤の挙動評価において、地盤の非線形性を簡易かつ適切に考慮可能な手法の構築を目的として検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 非線形性の影響が強い表層地盤の地震時挙動を適切かつ簡易に評価できるよう、地盤の等価1自由度モデルを基に設定可能な地盤強度比 K_f を用いた地盤種別の細分類化方法を提案した。本手法を適用することで、従来の地盤種別による手法と同等の地盤情報を基に、地盤の非線形性を考慮した地盤種別の細分類化および慣性力設定が可能である。

文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012
- 2) 室野剛隆，野上雄太：S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.494-497，2006
- 3) 野上雄太，室野剛隆：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，第30回土木学会地震工学研究発表会論文集，2009
- 4) 坂井公俊，室野剛隆：地盤の等価1自由度モデルを用いた非線形動的解析法の提案，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.3，pp.341-351，2015
- 5) 坂井公俊，井澤 淳，室野剛隆，日野篤志：地盤全体系の強度指標の提案とその簡易推定法に関する検討，日本地震工学会論文集，2015
- 6) 末富岩雄，澤田純男，吉田 望，土岐憲三：地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係，土木学会論文集，No.654/I-52，pp.195-206，2006
- 7) 川西智浩，室野剛隆，佐藤 勉，畠中 仁：土質区分の影響を考慮した地盤種別の分類に関する検討，土木学会地震工学論文集，Vol.29，pp.187-196，2007
- 8) 井澤 淳，上田恭平，宇佐美敦浩，室野剛隆：モード解析法を適用した液状化地盤の水平変位分布算定手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.3，pp.17-22，2015