

地震応答解析のための 地盤の等価 1 自由度モデルの構築

坂井 公俊* 室野 剛隆**

Equivalent Single Degree of Freedom Method for the Soil Dynamic Analysis of
the Multi-layered Ground

Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO

We proposed a simple evaluation method of the waveform at the surface of the ground by using both the natural period of the ground and the waveform at the engineering bedrock. In this research, the “Equivalent Single Degree of Freedom method” was proposed based on the results of the static push-over analyses of many grounds with various properties. We compared the waveforms of the multi-layered ground obtained from the proposed method with the dynamic analysis. We then confirmed that those waves are almost identical, and the proposed method is applicable to the evaluation of the surface motion. Despite the existing railway line has only a few soil properties available, the proposed method enables the dense calculation of the surface motions alongside the line in an economical manner. These sets of waveforms will be utilized to identify locations where devastating damage is expected under strong earthquakes.

キーワード：地盤応答解析，等価 1 自由度モデル，静的非線形解析，固有周期，規準変位

1. はじめに

延長の長い鉄道路線全線を対象とした地震挙動評価を行う場合には、入力地震動や構造物の応答評価を簡易な手法で実施することが望まれる。このような観点から、地震動の最大値情報のみを指標とした地震被害の簡易推定法が提案されている。これは、耐震設計上の基盤面位置の地震動最大値（最大加速度 PBA, 最大速度 PBV）を距離減衰式^{1) 2) 3)}に基づき評価し、表層地盤の影響を地盤増幅率で評価する⁴⁾ことで、地表面位置の地震動最大値（最大加速度 PGA, 最大速度 PGV）を求める。最後に橋梁・高架橋の被害推定ノモグラム⁵⁾を適用することで、構造物の損傷程度を大まかに評価することが可能である。

この時に必要なパラメータとしては、対象とする震源域の地震規模、震源までの距離、対象地点の地盤固有周期（地盤種別）、構造物の等価固有周期、降伏震度のみであるため、比較的現実的に入手可能なデータのみで全線の耐震性評価を実施できるという利点を有する。ただし、この方法で予測できるのは最大加速度や最大速度、計測震度といった指標であり、地震動波形を予測することはできない。

一方で、高架橋の等価固有周期と降伏震度が分かれば、構造物の等価 1 自由度モデルを用いることで、

動的解析により地震時挙動を高精度に評価できる⁶⁾。そのため地表面位置の時刻歴波形が存在する場合には、これを利用することで、地点の地震動特性、構造物の応答特性を詳細に考慮した地震被害予測が可能となる。

このように構造物の挙動は簡易に評価可能であるのに対し、地表面位置の地震動波形を評価する手法としては、地盤を多数の薄い要素に離散化した 1 次元の地盤応答解析が実施される場合が多く、これを実行するには、地表面から耐震設計上の基盤面までの各深度におけるせん断弾性波速度 V_s 、単位体積重量 γ 、非線形特性 ($G-\gamma$ 関係、 $h-\gamma$ 関係、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ) 等が必要となるとともに、多自由度の解析モデルを用いた動的解析を実施しなければならない。そのため、既設路線などではモデル化するのに十分な地盤調査結果が揃っていない場合がある上に、たとえ地盤調査結果が揃っている場合であっても構造物の等価 1 自由度モデルによる解析法と比較すると煩雑な作業が必要となるため、動的解析によって路線全体を対象とした地震挙動評価が実施される機会は限られていた。

以上をふまえ本検討では、地震増幅の簡易評価法と同程度のパラメータ（入力地震動と地盤の固有周期 T_g ）から表層地盤の地震増幅の影響を考慮した非線形動的解析法の提案を行う。具体的には、地盤の固有周期のみから『地盤の等価 1 自由度モデル』に基づく動的解析法を構築することで、地表面位置の時刻歴波形を簡易に評価可能とする。

* 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

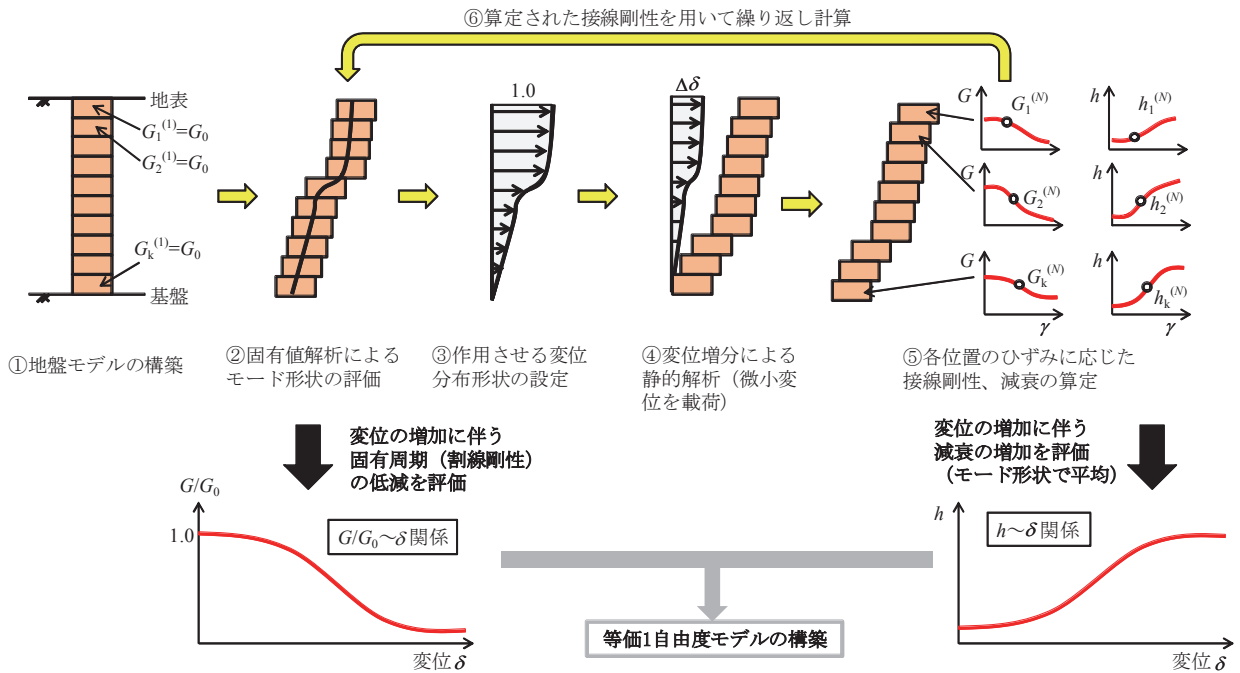


図1 地盤の静的非線形解析の手順

2. 地盤の等価1自由度モデルの提案

2.1 静的非線形解析に基づく地盤全体系の変位-剛性関係, 変位-減衰関係の評価

本節ではまず、地盤の静的非線形解析に基づいて、地表面変位の増加に伴う地盤全体系の剛性低下（長周期化）、減衰の変化を評価する手法を提案する。ここで、一般的な橋梁や高架橋では、桁の重量が大きいために、静的非線形解析を行う際には、各節点に作用させる加速度は等しいと仮定した慣性力を作用させることで、適切な荷重-変位関係を評価できる。一方で地盤を対象とした場合は、ほぼ均質な重量分布であるとともに、層構成や地震動の入力レベルによる非線形化の度合いによって、応答加速度、応答変位の分布が複雑に変化することが考えられる。そこで、図1に示す手順に従った静的非線形解析を実施することで、変形の進行に伴うモード形状の変化を考慮した上で地盤全体系の剛性、減衰の変化を評価する。具体的な手順を以下に示す。

- ① k 自由度の地盤を考え、各物性値（層厚、重量、せん断剛性、減衰、非線形特性）を設定する。初期状態の地盤は弾性状態と考え、各層のせん断剛性 $G_i^{(1)} = G_0(i)$ とする。ここで、 $G_i^{(1)}$: i 番目の層における初期（1ステップ目）のせん断剛性、 $G_0(i)$: i 番目の層における初期せん断剛性である。
- ②③ 各層の層厚、重量、せん断剛性 $G_i^{(N)}$ を用いて、固有値解析を実施し、一次モードの固有角振動数 $1\omega^{(N)}$ と、固有ベクトル $\{1u^{(N)}\}$ を算定する。この時の固有ベクトル $\{1u^{(N)}\}$ は、地表面位置での値が 1.0 となるように正規化する。なお、ここで上付きの

(N) は、 N ステップ目の結果であることを表している。

- ④ 地表面位置での変位増分が $\Delta\delta$ となるように、各層に微小変位を静的に作用させる。この時の深さ方向の変位分布は、式(1)のように、上記②で得られた1次モード形状に従って与える。

$$\{\delta^{(N)}\} = \{\delta^{(N-1)}\} + \Delta\delta \cdot \{1u^{(N)}\} \quad (1)$$

- ⑤ 上記④終了時のひずみ状態における各層の接線剛性 $G_i^{(N)}$ 、減衰 $h_i^{(N)}$ を評価する。
- ⑥ 上記②～⑤の作業を地表面位置で規定変位に到達するまで繰り返す。

また、この結果を以下のように整理することで、地盤全体系の $G/G_0 - \delta$ 関係、 $h - \delta$ 関係が算定できる。

- $G/G_0 - \delta$ 関係：地表面変位の増加に伴う上記②による固有角振動数 $1\omega^{(N)}$ の変化から、式(2)のように各ステップの地盤全体系の剛性の低減を評価する。

$$(G/G_0)^{(N)} = (1\omega^{(N)} / 1\omega^{(1)})^2 \quad (2)$$

- $h - \delta$ 関係：各地表面変位時の上記⑤による各層の減衰 $h_i^{(N)}$ を式(3)のように一次モードのひずみ量分布 $\{1\gamma^{(N)}\}$ に応じた加重平均を行うことで、各変位状態における等価減衰を算定する。

$$h_{eq}^{(N)} = \{h_i^{(N)}\}^T \{1\gamma^{(N)}\} = \{h_1^{(N)}, \dots, h_{k-1}^{(N)}, h_k^{(N)}\} \begin{Bmatrix} (1u_1^{(N)} - 1u_2^{(N)}) / D_1 \\ \vdots \\ (1u_{k-1}^{(N)} - 1u_k^{(N)}) / D_{k-1} \\ 1u_k^{(N)} / D_k \end{Bmatrix} \quad (3)$$

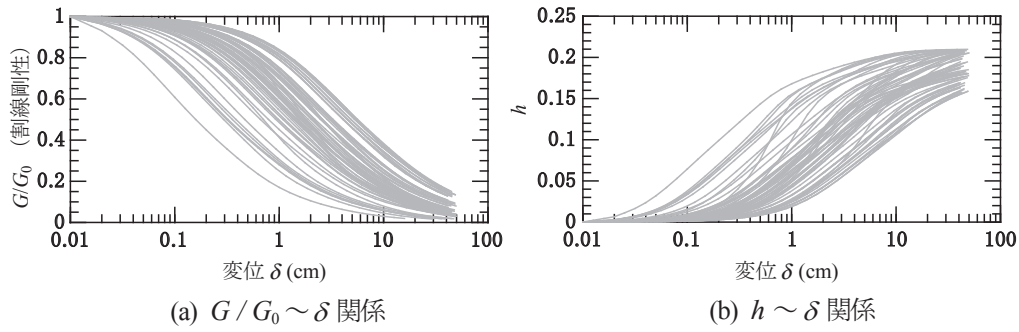


図2 多数地盤の静的非線形解析結果

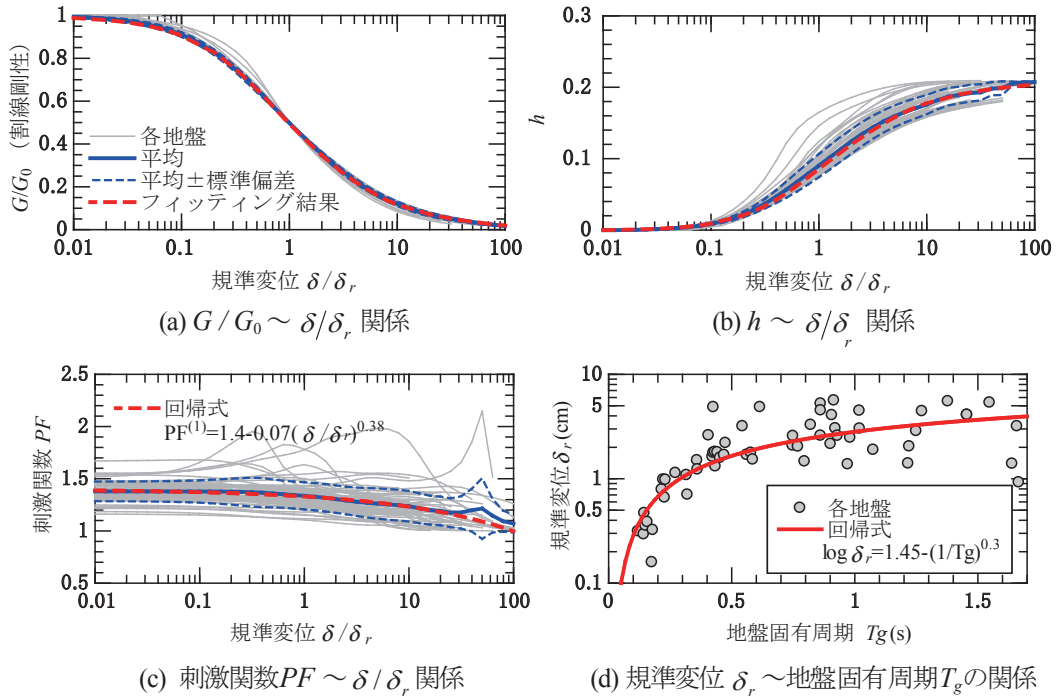


図3 規準変位 δ_r で正規化した静的非線形解析結果

ここで、 D_i は i 番目の層の地盤層厚である。

2.2 地盤の等価 1 自由度モデルの構築

前節で提案した地盤の静的非線形解析を多数の地盤に適用することで、各地盤の $G/G_0 - \delta$ 関係、 $h - \delta$ 関係を評価する。検討に用いた地盤は、多様な周期特性、地層構成を持った 60 地盤とする。なおこの地盤は耐震設計標準⁷⁾の地表面設計地震動を評価する際などにも用いられている地盤であり、固有周期は 0.1 ～ 1.7 秒と幅広い条件を有している。それぞれの地盤における各層の非線形特性は、GHE-S モデル⁸⁾によって表現している。

この 60 地盤に対して静的非線形解析を実施した。載荷は、地表面の最終変形量を 50cm とし、これを 5000 ステップに分割して実施 ($\Delta\delta=0.01\text{cm}$) した。最終的に得られた $G/G_0 - \delta$ 関係、 $h - \delta$ 関係をまとめて図 2 に示す。これより、地盤ごとのバラツキは大きいものの、全体の傾向として変位が大きくなるほど剛性が低下し、減衰が大きくなっていることが分かる。これは地盤の塑性化に

伴う長周期化と履歴減衰の増大を表現したものである。

ここで、地盤材料をモデル化する場合には $G/G_0 = 0.5$ となるひずみ (規準ひずみ γ_r) で正規化して整理することが指摘されており^{例え⁹⁾}、これが地盤全体系に対しても当てはまる可能性がある。そこで、 $G/G_0 - \delta$ 関係、 $h - \delta$ 関係を、 $G/G_0 = 0.5$ となる変位 (これを規準変位 δ_r と呼ぶ) で正規化した結果を図 3(a), (b) に示す。また、最終的に 1 自由度モデルで解析を行った結果を地表面位置での値に変換するためには、地盤 1 次モードの刺激関数 PF が必要である。そこで、刺激関数 PF を規準変位 δ_r で正規化した結果を図 3(c) に、各地盤の固有周期と規準変位 δ_r の関係を図 3(d) に示す。

まず図 3(a), (b) から、多数の地盤の静的非線形解析結果を規準変位 δ_r で整理することで、剛性、減衰の変化を地盤の固有周期、層厚、層構成などによらずほぼ同一の関係で表現できることが分かる。また図 3(c) から、変位が大きくなると高次モードの寄与が多少大きくなる

特集：構造物技術

ため、1次モードの刺激関数 PF は徐々に小さくなっていくことが分かる。さらに図3(d)より、バラツキはあるものの、地盤の固有周期 T_g が長くなるに従い、規準変位 δ_r も大きくなっている。

続いて、図3で得られた各パラメータを簡易に評価することを試みる。ここで規準変位 δ_r (cm) は、本来は地盤の層厚や層構成によっても変化すると考えられるが、今回は限られた指標のみから地盤挙動を評価する手法の構築が目的であるため、固有周期 T_g のみをパラメータとして表現することとする。具体的には、図3(d)の地盤固有周期に対する δ_r の変化の傾向を参考に、式(4)の回帰式で表現した。

$$\log \delta_r = 1.45 - \left(\frac{1}{T_g} \right)^{0.3} \quad (4)$$

これにより表現される規準変位 δ_r ~ 地盤固有周期 T_g の関係も図3(d)に示しているが、周期の増加に伴う規準変位の増大という大まかな傾向は表現できている。続いて刺激関数 $PF \sim \delta / \delta_r$ 関係は式(5)で評価することとした。

$$PF = 1.4 - 0.07 \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_r} \right)^{0.38} \quad (5)$$

式(5)による結果も図3(c)に示しているが、各結果の平均的な傾向を良好に表現している。

最後に、 $G/G_0 \sim \delta / \delta_r$ 関係、 $h \sim \delta / \delta_r$ 関係は GHE-S モデル⁸⁾ で表現することとし、必要なパラメータのフィッティングを行った。得られた結果を表1、表2に示す。このパラメータによって表現される $G/G_0 \sim \delta / \delta_r$ 関係、 $h \sim \delta / \delta_r$ 関係も図3(a), (b)に示しているが、各結果の平均値を良好に再現できている。これらの結果を使用することで、地盤の固有周期のみから各パラメータの設定が可能となる。

2.3 等価1自由度モデルによる動的解析の手順

以上の結果を統合し、地盤の等価1自由度モデルを用いた非線形動的解析法を提案する。具体的には、以下のステップに従って地表面地震動を評価する。

Step1 地盤の固有周期 T_g から、初期剛性 K_0 を設定する。

$$K_0 = \left(\frac{2\pi}{T_g} \right)^2 \quad (6)$$

Step2 地盤の固有周期 T_g と式(4)から規準変位 δ_r (cm)、表1、表2から GHE-S のパラメータを設定する。

Step3 上記 Step1,2 のパラメータを用いて1質点系の非線形動的解析を実施する。

Step4 上記 Step3 により得られた最大変位 δ_{max} と式(5)から、刺激関数 PF を算定する。

Step5 相対加速度、相対速度、相対変位の応答波形に刺激関数 PF を乗じ、地表面応答波形に換算する。

表1 $G/G_0 \sim \delta / \delta_r$ 関係を表現する標準値

$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$	$C_1(1)$	$C_2(1)$
1.00	1.00	0.15	2.5	0.87	1.15

表2 $h \sim \delta / \delta_r$ 関係を表現する標準値

κ	h_{max}
1.30	0.21

3. 提案手法の妥当性の検証

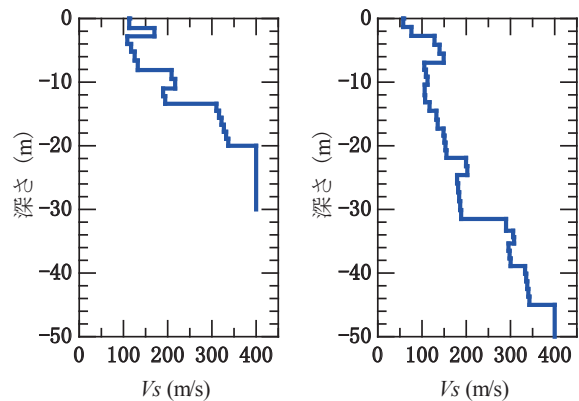
本章では、従来の多自由度モデルを用いた詳細な動的解析と今回提案した等価1自由度モデルによる地盤応答解析の結果を比較することで、提案手法の妥当性を確認する。確認の方法としてはまず地盤の条件を1つに固定した場合の入力レベルの変化に伴う応答の変化を適切に表現できることを確認し、続いて地盤条件の違いによる応答の変化について確認する。

3.1 入力レベルの変化に伴う応答の変化

地震動の入力レベルの変化に伴い、地盤の塑性化程度が変化するため、同一地盤であっても地震増幅特性は変化する。この入力レベルの違いによる応答の変化を提案法によって適切に評価できることを確認する。

対象とする地盤は、図4(a)に示すような層構成を有する地盤である。固有値解析の結果、地盤の固有周期 $T_g=0.36$ 秒と評価され、耐震標準の地盤種別による G3 地盤(普通地盤)に分類される。この地盤を対象に、従来の多自由度地盤モデルと等価1自由度モデルを構築した。入力地震動は、比較的小さなレベルとして、耐震標準に示される L2 地震動スペクトル II (G1 地盤) を最大加速度 100gal に振幅調整したものを、大きな地震動レベルとしてスペクトル II をそのまま入力した動的解析を実施した。

この条件に基づき得られた地表面位置の時刻歴波形、弾性加速度応答スペクトル ($h=0.05$) を図5(スペクトル



(a) G3地盤 ($T_g=0.36$ 秒) (b) G5地盤 ($T_g=0.86$ 秒)

図4 検討に用いた地盤の速度構造

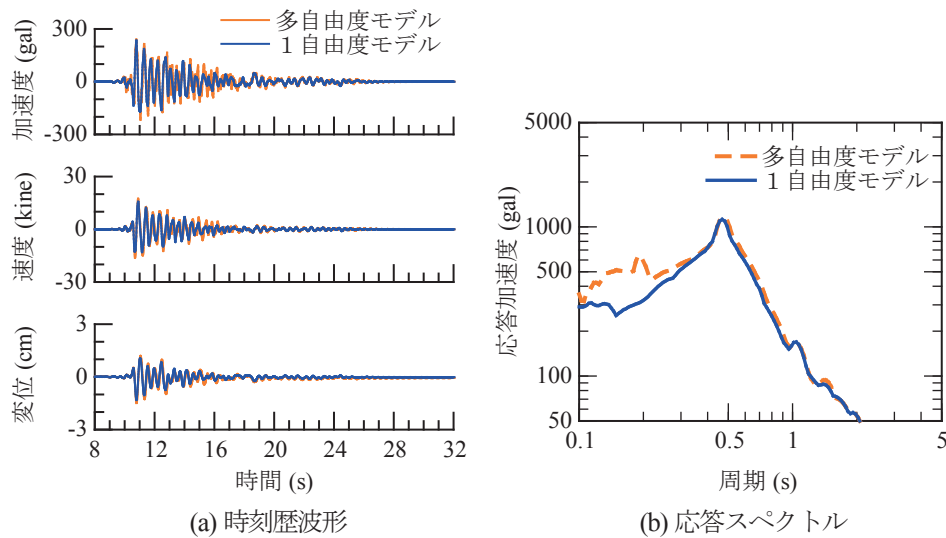


図5 地表面地震動の評価結果（G3地盤（ $T_g=0.36$ 秒），スペクトルII（振幅100gal調整）入力の場合）

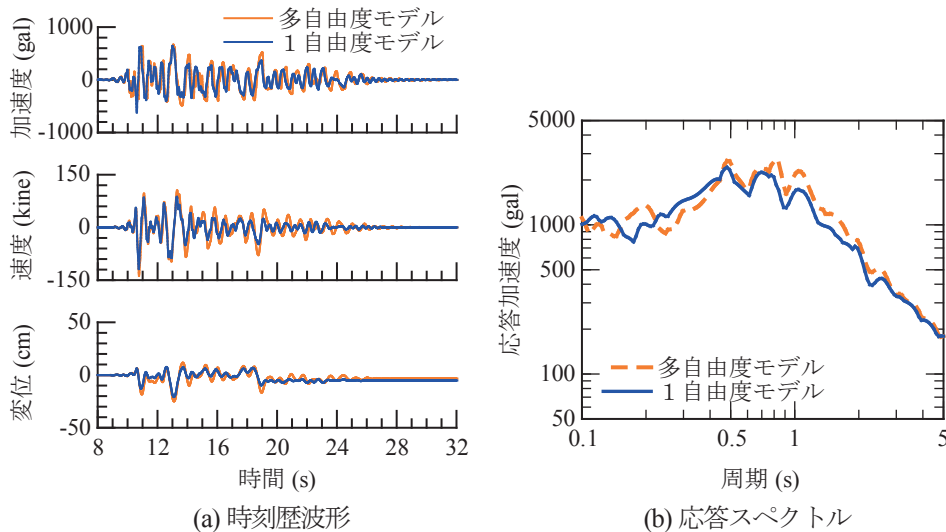


図6 地表面地震動の評価結果（G3地盤（ $T_g=0.36$ 秒），スペクトルII入力の場合）

ルIIの振幅100galに調整），図6（スペクトルIIの元波を入力）に示す。これらの結果から，まず入力レベル100galの場合（図5）は地盤の塑性化の影響が小さく，応答のピークが周期0.45秒前後に見られる。一方で，スペクトルIIをそのまま入力した場合（図6）は，地盤の塑性化の影響で，周期0.5～1秒程度の範囲で応答スペクトルが概ねフラットになっている。このような傾向は，多自由度モデル，等価1自由度モデルともに現れており，今回提案した等価1自由度モデルは，入力レベルによらず適用できることが分かる。

3.2 地盤種別の変化に伴う応答の変化

地盤の軟硬の違いによる応答の変化を提案手法によって適切に評価できることを確認する。入力地震動は図6の検討と同様にL2地震動スペクトルII（G1地盤）をそ

のまま使い，地盤条件は図4(b)に示す軟弱地盤（ $T_g=0.86$ 秒，G5地盤）を対象とした。

以上の条件に基づき地表面地震動を評価した結果を図7に示すが，多自由度モデルと等価1自由度モデルは概ね同一の応答を示していることが分かる。つまり，図6，図7の結果を総合すると，提案手法を用いることで，地盤の固有周期によらず地表面の応答を良好に評価できることが確認された。

また，今回示した地盤以外にも多様な固有周期を有する地盤に対して同様の傾向が得られることは確認済である。これより，提案手法を用いることで，地盤の固有周期のみをパラメータとして，大規模地震時の震源近傍から遠方までの地表面地震動波形を簡易に評価することが可能となった。

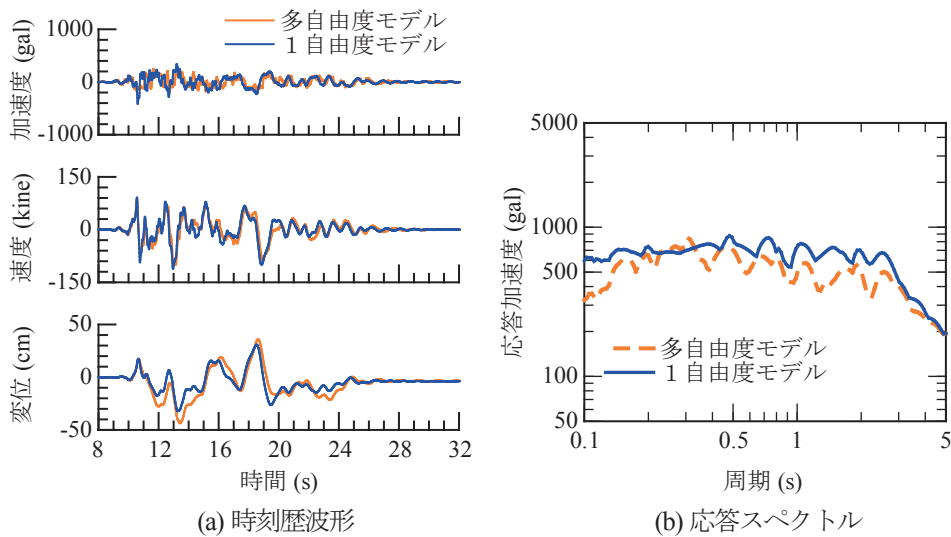


図7 地表面地震動の評価結果 (G5 地盤 (Tg=0.86 秒), スペクトルII 入力の場合)

4. まとめ

本検討では、地盤の固有周期と基盤位置の地震動波形を用いて地表面位置の時刻歴波形を簡易に評価する手法の検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 地盤の非線形挙動に伴う局所的なひずみの蓄積を考慮可能な静的非線形解析法を提案することで、応答変位の増加に伴う地盤全体の剛性低下、減衰の変化を明瞭に評価可能とした。
- (2) 地盤の静的非線形解析法を多数の地盤に適用した結果、地盤変位を規準変位 δ_r で正規化すると地盤の軟硬、層構成によらず剛性低下、減衰増加の傾向を統一的に表現出来ることを明らかにした。さらに、規準変位 δ_r を地盤の固有周期のみから簡易に推定する手法を提案するとともに、 $G/G_0 \sim \delta/\delta_r$ 関係、 $h \sim \delta/\delta_r$ 関係を表現する標準パラメータを GHE-S モデルに基づき設定した。
- (3) 上記 (2) をふまえ、『地盤の等価1自由度モデル』に基づく動的解析法を提案した。これを実際の地盤に対して適用した結果、多自由度の地盤応答解析の結果と概ね同等の地表面地震動を評価可能であることを確認した。

本手法に必要な情報は地盤の固有周期のみであるため、例えば常時微動観測¹⁰⁾や微地形区分¹¹⁾を活用した地盤固有周期の評価のみから簡易に地盤応答解析が可能となる。これにより、地盤情報が十分に揃っていない既設鉄道路線において地震時注意箇所を経済的に抽出する際の手法として活用が期待される。

文献

1) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最

大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, Vol.523, pp.63-70, 1990

2) 坂井公俊, 室野剛隆, 桐生郷史: 地表位置の距離減衰式から工学的基盤位置の地震動を推定する簡易手法, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.332-339, 2011

3) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006

4) 野上雄太, 坂井公俊, 室野剛隆, 盛川仁: 表層地盤と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.191-202, 2012

5) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳史: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集A, Vol.66, No.3, pp.535-546, 2010

6) 室野剛隆, 佐藤勉: 構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.520-528, 2007

7) (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), 丸善出版, 2012

8) 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

9) 原昭夫, 清田芳治: 各種材料の変形特性に関する研究 (その1) 背景と研究目的, 第20回土質工学研究発表会, pp.547-548, 1985

10) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.251-260, 1994

11) 加藤尚, 坂井公俊, 室野剛隆: 地形区分を用いた表層地盤の固有周期の簡易推定, 第47回地盤工学研究発表会発表講演集, 論文番号 846, pp.1683-1684, 2012