

観測記録から地盤全体系の 非線形特性を同定する手法の提案

坂井 公俊¹・井澤 淳²

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: ksakai@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: izawa@rtri.or.jp

大規模地震による入出力記録のみを用いて地盤全体系の非線形特性を同定する手法について検討を行った。まず、地盤の非線形特性を表現する際に重要な指標として、固有周期 T_g と地盤強度比 K_f を抽出するとともに、これらの指標によって地表面地震動をコントロールできることを数値解析に基づいて確認した。続いて基盤位置と地表面位置の地震観測記録から、地盤全体の固有周期 T_g と地盤強度比 K_f 、刺激関数 PF を同定する手法を提案するとともに、手法の有効性を解析的に確認した。その結果、提案法を用いることで、地盤に関する先見情報を有さない場合であっても地盤全体系の荷重-変位関係を適切に推定できる可能性があることを確認した。

Key Words : *strength of a whole ground, natural period, reference displacement, nonlinear deformation characteristics of ground*

1. はじめに

社会インフラ施設の地震時安全性を適切に把握するためには、対象とする施設の地震時挙動を適切に評価する必要がある。対象とする施設の振動特性を高精度に把握することが重要である。そのため、地震時の地盤や土木構造物、建築物の挙動を観測することにより、対象とする系の振動特性を同定するという試みが古くから多数実施されている^(例えば1)~4)。大規模地震時の地表面地震動を高精度に推定するためには、表層地盤の速度構造に加え、非線形挙動を把握することが重要である。

この地盤の非線形特性は、繰り返し三軸試験等の要素試験から評価する事が大半であり、観測記録から同定するという検討はこれまでほとんど実施されていなかった。こうした中で、多層構造を対象として、遺伝的アルゴリズムによって地盤パラメータを同定する検討が実施されている^(例えば5)。これによると、地盤は深さ毎の速度構造や、非線形挙動の特性を同定する必要がある、未知数が多くなるために最終的に推定される各層のパラメータには大きなばらつきが存在し、1つの解に収束しないことも指摘されている。そのため現状では、入出力の地震動のみから各層の詳細なパラメータを決定することは実務

的に困難であると言わざるを得ない。また、地盤を表層および基盤の2層にモデル化することにより、地表での地震記録から地盤の非線形挙動について検討している事例もある^(例えば6)が、この方法を用いるには、表層と基盤のインピーダンス比が非常に大きい地盤である必要があることや、均質な2層にモデル化しているために、ある層に局所的なひずみの集中が生じるような地盤では適用が困難である等のいくつかの制約がある。

こうした中で筆者らの一部は、地盤の静的非線形解析法とこれに基づく地盤の等価1自由度モデルという概念を提案し、この等価1自由度モデルを用いた非線形解析を実施することで、多層モデルを用いた詳細な地盤応答解析の結果をある程度表現できることを確認している⁷⁾。これによると、複雑な層構成を有する地盤であっても、数少ないパラメータ（固有周期と地盤全体系の荷重-変位関係、刺激関数のみ）によって地表面地震動を適切に評価することが可能であり、この程度のパラメータであれば、入出力波形から同定できる可能性もある。

そこで本検討では、振幅の大きな地震動の入出力波形（工学的基盤位置と地表面位置での地震動波形）が得られている場合に、地盤全体系の非線形特性を同定する手法について検討を行う。2章ではまず地表面地震動に影

響を与える地盤のパラメータ（具体的には固有周期 T_g と地盤強度比 K_f ）について整理を行うとともに、このパラメータが同一であれば、地盤の層構成によらず同一の地震動が入力した場合の地表面応答はほぼ同一となることを数値解析により確認する。続いて3章では、工学的基盤位置での入力地震動と地表面地震動が得られている場合に、この地盤パラメータを逆解析により推定する手法を提案するとともに、数値シミュレーションによりこの手法の有効性を確認する。

2. 地表面地震動に影響を与える地盤全体系のパラメータの整理

本章ではまず、水平成層地盤において地表面地震動に影響を与える地盤全体系のパラメータを整理するとともに、これらのパラメータで地盤を表現することの有効性を確認する。

(1) 地盤パラメータの整理

地表面地震動に大きな影響を与える指標としては、従来から固有周期 T_g が多用されている^{例えは8)~10)}。地盤の一次固有周期は各層のせん断弾性波速度もしくは N 値のみから固有値解析や1/4波長則によって簡易に評価することができるため、実務的にも有効な指標である。

一方で大規模地震を対象とした場合には地盤の非線形化の影響が無視できず、これを簡易に表現する指標として、地盤全体系の静的非線形解析⁷⁾に基づく地盤強度比 K_f を提案している¹¹⁾。これは、静的非線形解析によって得られた地表面変位 δ —剛性低下率 G/G_0 のうち、剛性が初期の0.5倍となる（等価周期が初期周期の約1.4倍となる）時点での地表面変位を規準変位 δ_f (cm)と定義し、これと固有周期 T_g を用いて次式によって算定することができる。

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

これは地盤要素のせん断強度 τ や橋梁・高架橋の降伏震度 K_{fb} に対応するものであり、地盤全体系の非線形応答のしやすさ、地表面応答の上限値の大小に関連した指標である。そのため大規模地震動を対象とした場合には、従来の地盤固有周期 T_g に加えて地盤強度比 K_f もパラメータとすることで、簡易に地盤非線形化の程度を考慮した地盤分類が可能となる。

そのため、たとえ複雑な地層構成を有する地盤であったとしても、主に地表面地震動に影響を与えるパラメータとしては、固有周期 T_g と地盤強度比 K_f （もしくは規準変位 δ_f ）のみに帰着できる可能性がある。

(2) 地盤全体系の固有周期と地盤強度比を指標とした表現の有効性の確認

a) 多数の地盤モデルの構築および静的非線形解析の実施

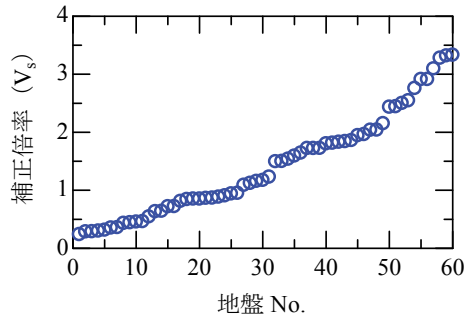
上記(1)で抽出した固有周期 T_g と地盤強度比 K_f （もしくは規準変位 δ_f ）をパラメータとした地盤の整理が、地表面地震動を表現する指標として有効であることを確認する。具体的にはまず、 T_g と K_f が同一であるが、地層構成の異なる多数の模擬地盤を構築する。そしてこれらの地盤に対して同一の地震動を入力した非線形の地盤応答解析を実施し、地表面地震動を算定する。この地表面地震動のバラツキが非常に小さいことを確認することにより、これらの指標で地盤を表現することの有効性を確認する。

検討の前準備として、地盤の固有周期 T_g と地盤強度比 K_f が同一で層構成が異なる多数の模擬地盤を構築する。まず、実際のボーリング結果に基づき、多様な周期特性、層構成を有する60地盤¹²⁾を選定した。各地盤ではPS検層が実施されており、速度構造や土質区分が把握されているとする。非線形特性は、GHE-Sモデル¹³⁾で表現することとし、各パラメータは多数の変形特性試験に基づく標準値¹⁴⁾を使用する。なおこれらの地盤の固有周期は、0.1秒～1.7秒と幅広く分布しており、固有周期が短い方からNo.1, No.2...No.60と順番をつけている。以上により、固有周期、非線形特性の異なる地盤モデルが60個用意された。

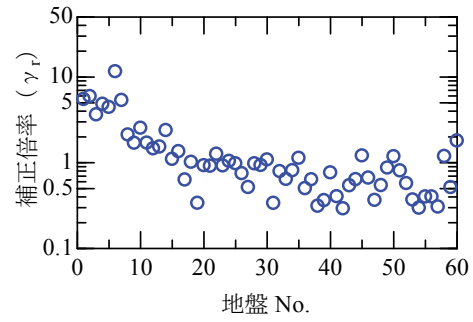
次に、各地盤の固有周期 T_g が0.5秒となるように、各地盤の速度構造を調整する。この時、同一地盤において各層に乗じる倍率係数は同一とし、それぞれの地盤毎に V_s の補正倍率を算定した（最大3.33倍、最小0.24倍）。各地盤における補正倍率をまとめて図-1(a)に示す。当然ではあるが、補正前の周期が短い地盤（No.の小さい地盤）ほど補正倍率は小さく、周期の長い地盤ほど補正倍率は大きくなっている。

続いて非線形特性については、地盤の静的非線形解析を実施することで得られる地盤強度比 K_f が6.64（規準変位 $\delta_f=1.66$ cm）となるように、各地盤の規準ひずみ γ_f を調整する。この時の補正倍率は上記 V_s の補正と同様に地盤毎に全層で同一の値とすることとし、収束計算（誤差0.001%以下）により求めた（最大11.61倍、最小0.29倍）。最終的な γ_f の補正倍率をまとめて図-1(b)に示すが、全体的な傾向として地盤が軟弱なほど倍率が小さくなっていることが分かる。

以上により、固有周期 $T_g=0.5$ s、地盤強度比 $K_f=6.64$ （規準変位 $\delta_f=1.66$ cm）を有し、地層構成が異なる60個の地盤モデルが得られた。最終的な各地盤の速度構造を図-2に、規準ひずみの分布を図-3に示すが、各地盤の層厚や速度構造は大きくばらついていることが分かる。また地



(a) せん断弾性波速度 V_s の補正倍率



(b) 規準ひずみ γ_r の補正倍率

図-1 地盤毎の V_s , γ_r の補正倍率

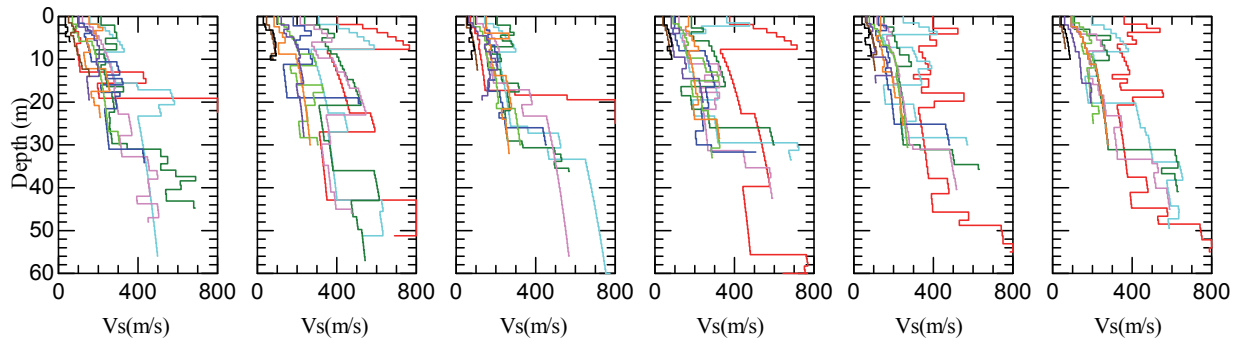


図-2 構築した地盤の速度分布 ($T_g=0.5s$) (全60地盤を10地盤ずつ記載)

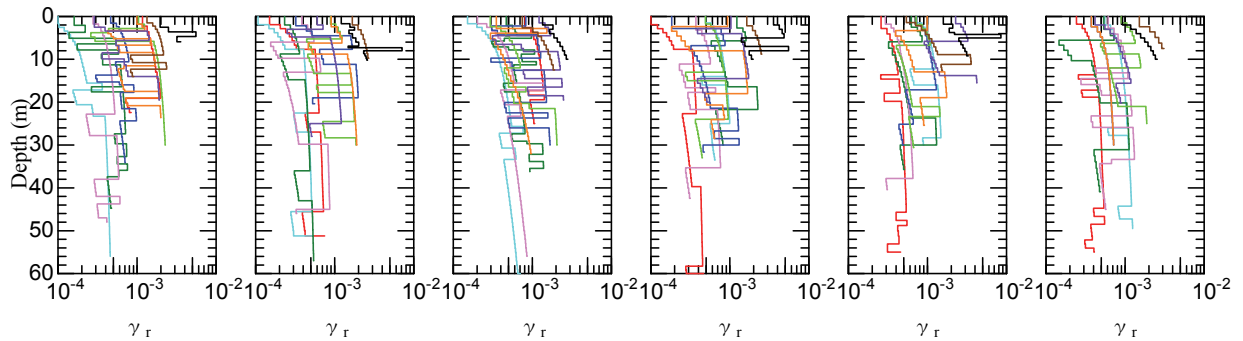


図-3 構築した地盤の規準ひずみ分布 ($K_f=6.64$ ($\delta_f=1.66cm$)) (全60地盤を10地盤ずつ記載)

盤によっては局所的な弱層や複雑な速度構成を有するものが存在する。また、これら全60地盤の静的非線形解析により得られる剛性低下率 G/G_0 - 地表面変位 δ 関係、減衰 h - 地表面変位 δ 関係、刺激関数 PF - 地表面変位 δ 関係を図-4に示す。まず図-4 (a)の G/G_0 - δ 関係は、規準変位 δ_f を1.66cmに揃えているため、当然のように全ての地盤で地表面変位 $\delta=1.66cm$ において $G/G_0=0.5$ となっており、その他の δ においてもバラツキは非常に小さい。さらに図-4 (b)の h - δ 関係は、 G/G_0 - δ 関係と比較すると多少バラツキが大きくなっているものの、変位の増加に伴う減衰の増大の傾向は全地盤において概ね等しい傾向を示している。図-4 (c)の PF - δ 関係においても変位 δ が大きくなると刺激関数 PF が小さくなるという大まかな傾向はほとんどの地盤において共通してみられるが、たとえば地盤

No.5とNo.30ではそれぞれある変位において極端に刺激関数 PF が大きくなっているなど、地盤毎に多少の変化がみられる。

次に地表面位置での荷重－変位関係に相当するものを算出するために、次式によって静的非線形解析結果に刺激関数を考慮することで、地表面位置の変位 δ^s 、荷重 K^s を算定した。

$$\delta^s(x) = \int_0^{\delta} PF(x) dx \quad (2)$$

$$K^s(x) = \int_0^{\delta} \left(\frac{1}{T_g(x)} \right)^2 PF(x) dx \quad (3)$$

ここで、 x は静的非線形解析における作用変位（1次モード重心位置の変位）、 $PF(x)$ は作用変位 x 時の1次モード

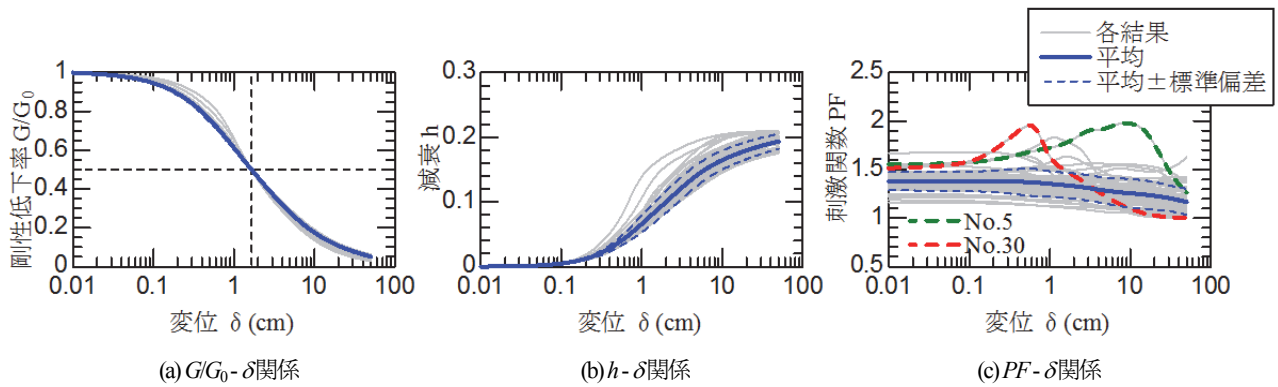


図-4 T_g, K_f を揃えた60地盤の静的非線形解析結果

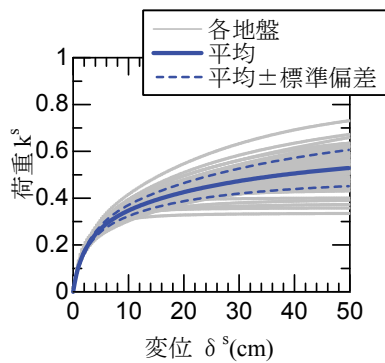


図-5 地盤全体系の荷重 - 変位関係 (全60地盤)

刺激関数, $T_g(x)$ は作用変位 x 時の1次モード周期である。
 図-4で示した全60地盤に対して式(2), (3)を適用して得られた荷重-変位関係を図-5に示す。これを見ると、まず初期の固有周期 T_g を0.5秒に揃えているため、変位が小さな領域では各結果は完全に一致している。また地表面変位が30cm以上と比較的大きな領域において、地盤強度比 K_f を揃えているために、各地盤におけるバラツキはそれほど大きくない。ただし、地盤の強非線形に伴う振動モードの局所的な変化によって刺激関数PFが大きく異なる地盤も存在するため、微小変位時の各地盤のバラツキと比較すると、変動が大きくなっている。

b) 逐次非線形解析による地表面地震動の評価

続いて、上記a)で作成した全60地盤に対して逐次非線形解析を実施し、それぞれ地表面位置の地震動を算定することで、固有周期 T_g と地盤強度比 K_f によって地盤を整理することで、地表面地震動を適切に評価できていることを確認する。

検討に用いる地盤は、上記a)で整理した60地盤を全て用いることとし、非線形特性はGHE-Sモデルによって表現している。入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計に用いられているL2地震動 (スペクトルII) ¹⁰⁾ (図-6) とした。また今回は速度構成を調整しているために、底面の境界条件はダッシュポット等による表現ではなく固定境界とした。さらに今回は T_g, K_f を揃えた検討 (これをケー

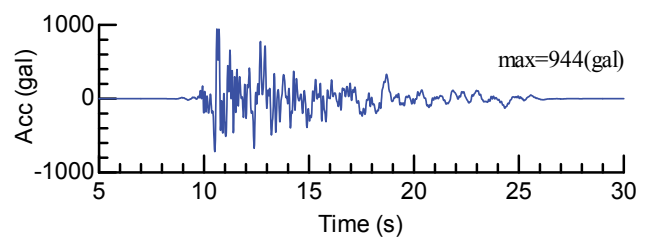


図-6 入力地震動の時刻歴波形

表-1 検討ケース一覧

ケース	固有周期 T_g (s)	地盤強度比 K_f
1	0.5	6.64
2	0.5	線形 ($K_f=\infty$ に相当)
3	0.5	調整なし (元地盤 V_s 使用)
4	調整なし (元地盤 V_s 使用)	6.64

ス1とする)に加えて、表-1に示すように、地盤を線形とした場合、どちらか一方のパラメータのみを揃えた場合の計算も実施することとする。

以上の条件のうち、ケース1 (T_g, K_f とも揃えた60地盤での逐次非線形解析)によって得られた60個の地表面位置の時刻歴波形 (絶対加速度, 相対変位)を図-7にまとめて示す。これより、各波形の振幅特性, 経時特性はほぼ同一となっていることが分かる。その傾向は変位波形だけでなく比較的高振動数成分の影響を表した加速度波形においても同一であり、地盤の1次固有周期 T_g と地盤全体系の強度に着目した指標である地盤強度比 K_f を揃えるだけで、地盤の層厚, 速度構成によらず広い周期帯の応答をコントロールできていることが分かる。

また、全60地盤の弾性加速度応答スペクトルを検討ケース毎に重ねて描いた結果を図-8に示す。まず地盤を線形弾性体としたケース2 (図-8(b)) とケース1 (図-8(a))

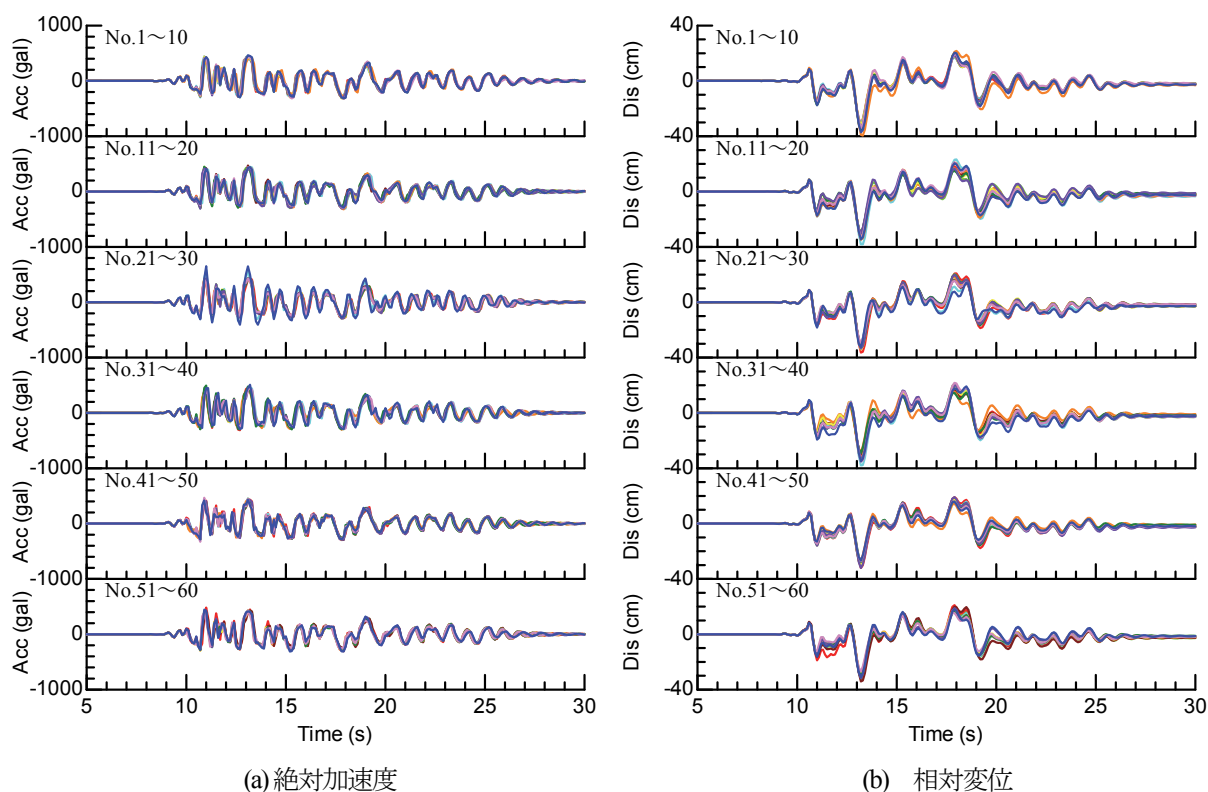


図-7 各地盤の地表面応答波形（各図ごとに10地盤の結果を重ね描きしている）

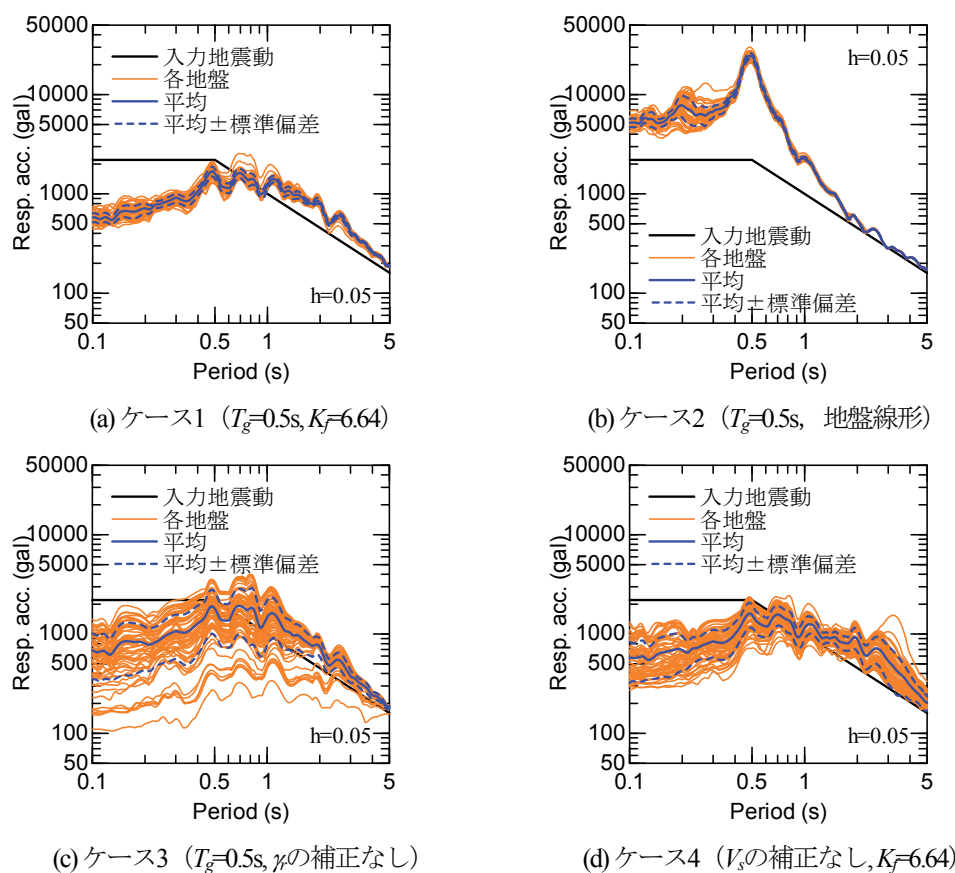


図-8 地表面波形の応答スペクトル

の結果を比較すると、そのスペクトル形状は大きく変化している。この結果より、今回想定した地震動（図-6）

によって、地盤は大きく非線形挙動を示していることが確認できる。また、 T_g と K_f のどちらか一方のみを揃えた

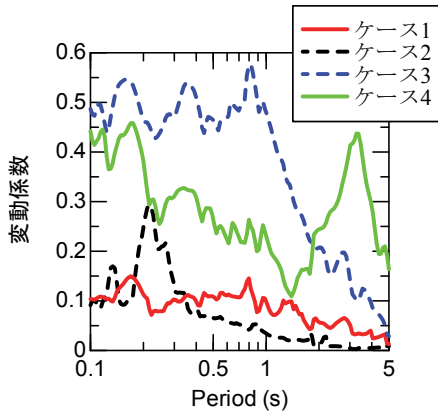


図-9 応答スペクトル ($h=0.05$) の変動係数

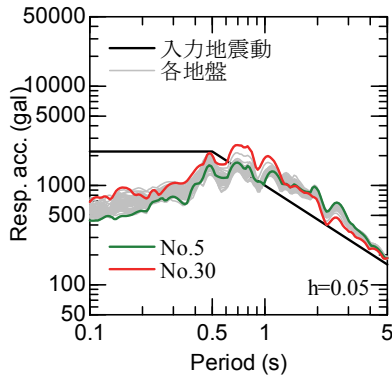


図-10 地盤No.5, No.30における地表面地震動の
応答スペクトル (ケース1)

ケース3, ケース4の結果 (図-8 (c), (d)) とケース1を比較すると、明らかにケース1の方が各地盤の応答の変動が小さくなっており、今回抽出した2つのパラメータで地盤を制御することの妥当性が確認できる。

これを定量的に把握するために、図-9には各条件における応答スペクトルの変動係数を示している。これよりまずケース1, 2と比較してケース3, 4における応答のバラツキは全周期帯において非常に大きくなっていることが確認できる。またケース1とケース2を比較すると、地盤を線形としたケース2では場合、周期0.2秒程度に存在する2次モード近傍で地盤毎のバラツキが大きくなっている。一方で地盤の非線形性を考慮したケース1では、各層の履歴減衰の影響で地盤全体の減衰が大きくなったため、高次モードの影響が相対的に小さくなり、結果的に幅広い周期帯において安定してバラツキが小さくなっている。ただし、図-5に示した全地盤の荷重-変位関係からも分かるように、比較的大きな変位を示す場合には地盤毎の刺激関数が徐々に異なってくるために、地盤固有周期よりも長周期側におけるバラツキは、ケース1よりもケース2の方が多少大きくなっている。特に、図-4 (c) に示す地盤の静的非線形解析結果において特徴的な刺激関数の傾向を示した地盤No.5とNo.30における応答スペ

クトルを他の58地盤の結果と重ね描いた結果を図-10に示すが、地盤No.30では周期0.3~1.0秒程度、地盤No.5では周期2秒以上において、他の地盤よりも応答が大きくなっており、モード形状の特性が他の地盤と異なる場合には、地表面応答も変動していることが確認できる。しかしながら図-9の結果から、その変動はそれほど大きくなく、周期によらず比較的安定した結果となっていることが確認できる。

以上より、たとえ複雑な地層構成を有している場合にも、地盤の堆積構造が水平成層で表現できる地点においては、地盤の非線形特性を表現する指標として固有周期 T_g と地盤強度比 K_f (もしくは規準変位 δ) が重要であることが確認できた。そのため仮に地中と地表面における地震記録が得られている場合に同定すべき地盤のパラメータとしては、各層の非線形特性ではなく、地盤全体系の T_g と K_f (もしくは δ) の2つに絞ることができる。そこで次章では大規模地震における入力波と地表面波が得られている場合に、 T_g と K_f (もしくは δ) を同定する方法を検討する。

3. 地盤の非線形特性の同定

(1) 地盤の非線形特性の同定方法

基盤位置と地表面位置の地震動波形が観測された場合に、地盤非線形特性を同定することを試みる。同定するパラメータとしては、前章で抽出した地盤の固有周期 T_g 、規準変位 δ に加え、1自由度モデルによる応答を地表面位置での値に変換するための刺激関数 PF の3つの指標とした。よってこれらのパラメータを逆解析によって同定することを目的とするが、このうち地盤の固有周期 T_g については、事前のPS検層結果や常時微動観測、微小地震記録によるフーリエスペクトル比などからある程度容易に同定することも可能であると考えられる。そこで今回は、試算のケース1として固有周期 T_g が事前に把握できている場合 (未知数: 規準変位 δ , 刺激関数 PF)、ケース2として固有周期 T_g が分かっている場合 (未知数: 固有周期 T_g , 規準変位 δ , 刺激関数 PF) の2ケースに対して試算を実施することとした。

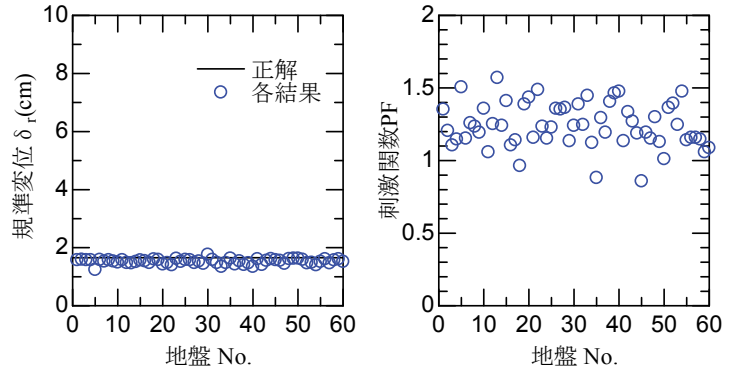
逆解析の方法としては、地盤構造の同定等に多用されている遺伝的アルゴリズム (GA) (例えば¹⁵⁾) を用いることとした。逆解析時の目的関数は以下のように設定した。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (D_{obs}(t_i) - D_{cal}(t_i))^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

ここで、 $D_{obs}(t)$ は時刻 t における基盤位置と地表面位置の観測記録の相対変位、 $D_{cal}(t)$ は時刻 t における等価1自由度モデルを用いた応答解析による相対変位、 n は対象とする波形のデータ数である。GAの計算条件としては、

表-2 パラメータの探索範囲，離散化の条件

パラメータ	ケース1	ケース2
固有周期 $T_g(s)$	— (既知)	0.25~1.0 (8bit)
規準変位 $\delta(cm)$	0.33~8.23 (10bit)	0.33~8.23 (10bit)
刺激関数 PF	0.5~2.0 (8bit)	0.5~2.0 (8bit)



(a) 規準変位 $\delta_r(cm)$ (b) 刺激関数PF
図-11 地盤パラメータの同定結果 (ケース1)

適応度の高い解周辺を探索し，より最適な解を求めるために，ルーレット選択規則¹⁶⁾を用いる．また，局所的な解にとどまることを防ぎ，より広範囲な解を探索するために，動的な突然変異を発生させる．各パラメータの探索範囲，離散化ビット数は表-2に示すように設定した．GAのパラメータとして，個体数10，世代数200，交差確率70%とする．以上の操作を初期乱数を変化させてそれぞれ独立に5回繰り返し，最終的に得られた5個の解の中から，式(4)の目的関数を最も満足する結果を最終的な解として選択した．

また観測される波形としては，2章で用いた入力波，出力波を用いる．具体的には，入力波として図-6で示す鉄道構造物のL2地震動（スペクトルII），出力波は固有周期 $T_g=0.5s$ ，規準変位 $\delta_r=1.66cm$ （地盤強度比 $K_f=6.64$ ）を有し，地層構成の異なる多数地盤による応答解析結果（図-7の絶対加速度波形）とする．そのため今回の問題としては，入力波1波と出力波60波の計60セットの入出力波が得られていることになる．このそれぞれのペアに対して地盤の非線形特性を同定することとする．これら各ケースの正解値としては， $T_g=0.5s$ ， $\delta_r=1.66cm$ であるが，刺激関数は各地盤の変位レベル毎に変化するため，明確な正解値は存在しない．

(2) 試算ケース1（固有周期が既知の場合）

試算のケース1として，まずは地盤の固有周期 T_g が0.5sと既知の条件下での非線形パラメータの同定を試みる．計算の条件は上記(1)で述べたとおりとし，各入出力波形（60セット）に最も合致する規準変位 δ と刺激関数PFを同定した．

最終的に得られた各入出力波形のペア毎の非線形特性推定結果を図-11に示す．これより，各ケースにおいて規準変位 δ はほぼ正解値を推定できていることが分かる．また刺激関数はそれぞれの結果で1.0~1.5の範囲でばらついているが，これは地盤の層構成や変位レベルによっ

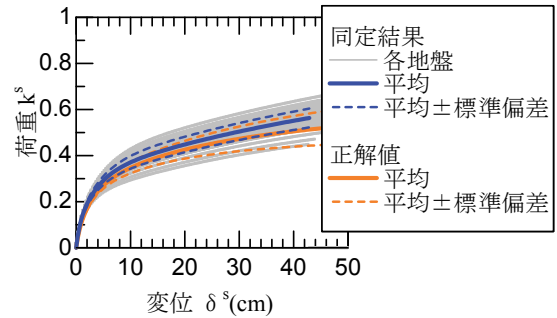


図-12 地盤全体系の荷重－変位関係（ケース1）

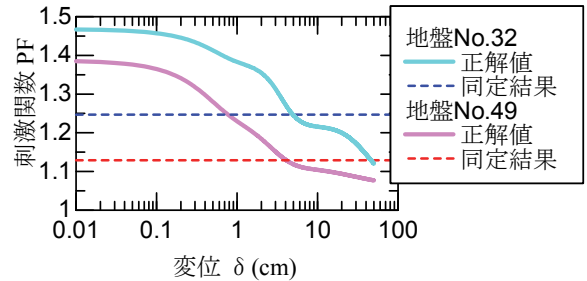


図-13 刺激関数の変位依存性と同定結果の比較

て変化するために，この結果のみから妥当性を判断することは困難である．ただし図-4 (c)のPF - δ 関係と今回の同定結果を比較すると，今回の結果は各地盤の詳細な静的非線形解析による刺激関数算出結果の範囲に収まっており，おおむね妥当な結果が得られていると考えられる．

さらに，これらのパラメータ（固有周期 T_g ，規準変位 δ_r ，刺激関数PF）から評価される地盤全体系の荷重－変位関係を全てまとめて図-12に示す．なお刺激関数PFは変位レベルによらずそれぞれの結果で得られた値をそのまま乗ずることで考慮している．この図には正解値の位置づけとして，図-5で示した各地盤の詳細モデルによる静的非線形解析結果の平均値等も記載しているが，変位が大きな領域において，今回の同定結果の方が多少剛性が大きくなっている．これは，実際の地盤における刺激

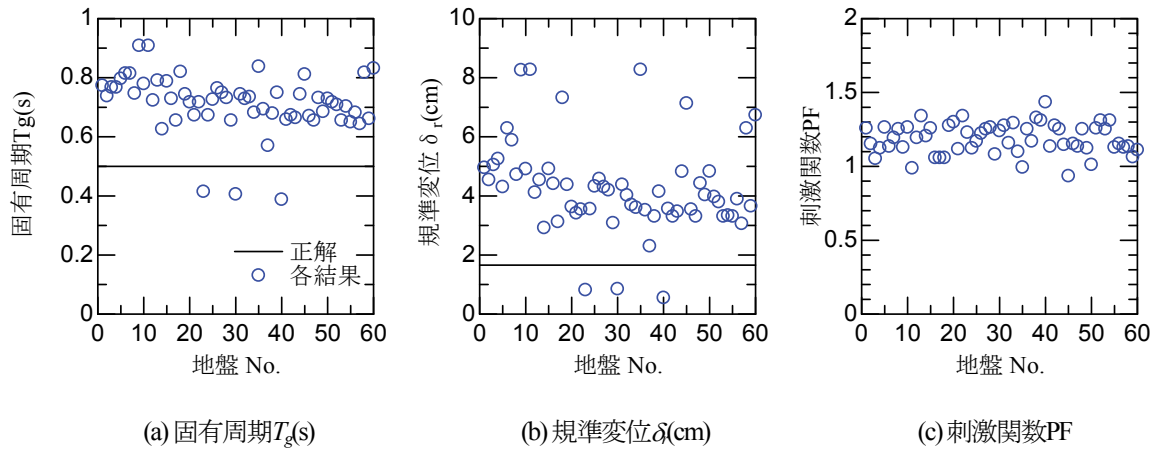


図-14 地盤パラメータの同定結果（ケース2）

関数は、図-4(c)に示したように変位の増大とともに小さくなる傾向があるが、今回の同定問題においては変位レベルによらず一定値としているため、中間的な変位状態におけるPFを推定してしまい、大変位状態におけるPFよりも大きな値を取るために、結果的に荷重を過大に評価してしまっていると考えられる。これを確認するために、代表的な2地盤を対象に静的非線形解析によって得られるPF- δ 関係と逆解析によって同定されたPFを比較したものを図-13に示すが、いずれの結果も数cm程度の変位状態での刺激関数を出力していることが分かる。そのため変位が10cm程度よりも大きな領域では荷重を過大評価した結果となっている。

(3) 試算ケース2（固有周期も未知の場合）

続いて試算ケース2として、地盤の固有周期 T_g も未知（地盤の事前情報として何も無い）とした場合の地盤の非線形パラメータ推定を実施する。計算の条件は上記(2)と同一であるが、表-2に示すように固有周期も未知数として探索を行った。

最終的に得られた各パラメータを図-14に示す。ケース1の結果と比較すると、刺激関数PFの推定値、変動はそれほど変わらないものの、固有周期 T_g 、規準変位 δ は正解値と大きく異なる値を推定しており、各ケース毎のバラツキも大きい。 T_g 、 δ ともに全体的に大きめの値を推定している。

続いて、これらの各パラメータを用いて計算される地盤全体系の荷重-変位関係を図-15に示す。この結果にも上記(2)と同様に変位レベルによらず各ケースで推定された刺激関数PFを乗じている。これを見ると、全体の荷重-変位関係は、正解値の平均的なラインに非常に近く、ほぼ正しい結果を同定できていることが分かる。これは、上記(2)と異なり固有周期（初期剛性）もパラメータとして同定しているため、仮に刺激関数が変位によらず一定であったとしても、変位が小さな領域を対象

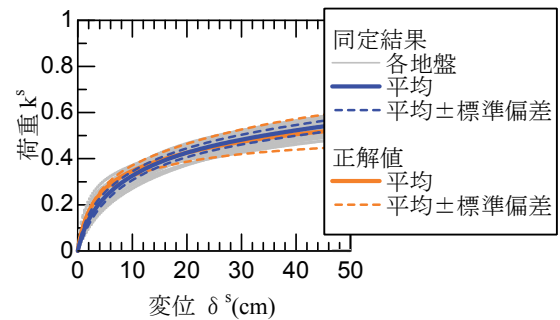


図-15 地盤全体系の荷重-変位関係（ケース2）

に固有周期を調整し、変位が大きな領域では地盤強度比を調整することで、幅広い範囲でのフィッティングが可能となっていたと考えることができる。

以上より、地盤情報として既知の情報がない場合には、それぞれの指標の推定精度はそれほど高くないものの、地盤全体系の荷重-変位関係はある程度適切に評価できており、さらにこの地盤を用いた場合の観測波形の再現性も良好であるため、本手法は地盤の骨格形状を同定する方法として有効であると言える。

またこれらの結果から、地盤特性を同定する際には、刺激関数の変位依存性も考慮できるような形で未知数を設定することによって、より精度の高い地盤の非線形特性が得られると推察される。しかしながらパラメータ同定を行う際の解析手法として、等価1自由度モデルを用いており、変位レベルに応じて逐次変化する刺激関数を適切に考慮することは現時点では難しい。そのため、非線形パラメータ推定時の刺激関数の変位依存性については、今後の課題としたい。

4. まとめ

本検討では、地震による入出力記録から地盤の非線形

特性を同定する手法について検討を行った。まず、地盤の非線形特性を表現する際に重要な指標として、固有周期 T_g と地盤強度比 K_f （もしくは規準変位 δ_f ）を抽出するとともに、実際にこれらのパラメータが同一であれば、層構成が大きく変化する場合にも、同一の地震動を入力した場合に得られる地表面地震動の変動は非常に小さいことを確認した。

続いてこの特性を考慮して、基盤位置と地表面位置の地震観測記録から、地盤全体の固有周期 T_g と規準変位 δ_f 、さらに刺激関数 PF を推定する手法を提案し、試計算により手法の検証を行った。その結果、先見情報として地盤の固有周期 T_g がある場合には、規準変位 δ_f を高い精度で推定できることを確認した。地盤の情報が何もない場合には、固有周期 T_g 、規準変位 δ_f ともに正しい解を得られない可能性もあるが、この場合にも地盤全体系の荷重－変位関係は、適切な結果となっていることを確認した。

ここで、地盤の固有周期は事前のボーリング情報や中小地震記録の伝達関数などから容易に推定できるため、今回の手法は地盤の非線形特性を同定する方法として活用できる可能性が高い。

既往の検討⁵⁾では、各層の地盤の非線形パラメータを同定しようとするケース毎のバラツキが非常に大きくなり、安定した解が得られないものの、各層の応力－ひずみ関係を平均すると、これらの解は概ね同一の応力－ひずみ関係となっていることを指摘している。このことはつまり、今回提案したように、地盤全体系を1要素と考え、この非線形特性を同定することの有効性を示しているものと考えられる。

今後は、本手法を実際の観測記録、実地盤に対して実施することで、実問題に対する手法の適用性を確認する予定である。

参考文献

1) Beck, J.L. and Jennings, P.C.: Structural identification using linear models and earthquake records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.8, pp.145-160, 1980.

2) 土岐憲三, 佐藤忠信, 清野純史, 市原和彦: 地盤－構造物系の非線形復元力特性の同定, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, pp.1-21, 1988.
 3) 護雅史, 林康裕: 構造物の地震時挙動と入力動の推定に関する研究～構造物の振動特性の同定に基づく推定手法の検討～, 構造工学論文集, Vol.42B, pp.309-320, 1996.
 4) 川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学論文集, 第4巻, 第1号, pp.33-52, 2004.
 5) 酒井久和: GA を用いた基盤入射地震動推定のための非線形地盤特性値の同定, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.165-175, 2001.
 6) 時松孝次, 翠川三郎: 地表で観測された強震記録から推定した表層地盤の非線形性状, 日本建築学会論文報告集, 第388号, pp.131-137, 1988.
 7) 坂井公俊, 室野剛隆: 地盤の等価1自由度モデルを用いた動的解析法の提案, 第14回日本地震工学シンポジウム, pp.1819-1828, 2014.
 8) 官報, 建設省告示第1793号, 1980.
 9) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編), 2012.
 10) (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
 11) 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆, 日野篤志: 地盤全体系の強度を指標とした高精度地盤分類のための基礎的検討, 第14回日本地震工学シンポジウム, pp.1829-1838, 2014.
 12) 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.
 13) 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.
 14) 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.
 15) 長尾智晴: 最適化アルゴリズム, 昭晃堂, 2000.
 16) John H. Holland.: Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Bradford Books, 1992.

INVERSION METHOD FOR NONLINEAR CHARACTERISTICS OF A WHOLE GROUND BY USING EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS

Kimitoshi SAKAI and Jun IZAWA

This paper proposes the estimation method for nonlinearity of a whole ground with using only input and output records of a large earthquake. Natural period, T_g and strength of whole ground, K_f which is proposed by the authors, are selected as important indexes for expressing ground nonlinearity. It was confirmed that the ground motion at surface are much influenced by these two indexes. We, therefore, examined the estimation method for T_g and K_f by using input and output record of large earthquake in this paper. Applicability of the method is confirmed by numerical simulations. By using proposed method, nonlinear deformation characteristics of a whole ground can be estimated using only observation records without detailed soil profile of each layer.