

地震観測記録に基づく地盤の非線形特性同定 のための基礎的検討

坂井公俊¹・井澤淳¹

¹正会員 工博 鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-163）

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、施設の地震時挙動を適切に評価する必要がある。このとき対象とする施設の振動特性を高精度に把握することは重要である。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)}。この中で大規模地震を対象とした場合には、表層地盤の非線形挙動の影響が大きくなるため、弾性時の速度構成だけでなく、非線形挙動の程度や非線形パラメータを適切に評価する必要がある。この地盤の非線形特性を同定する検討は非常に限られているものの、いくつか実績がある^{例えば5)}。しかしながらこの検討によると、地盤は各深さ位置の速度構成や、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確認されている。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。

一方で、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が提案され、この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が確認されている⁶⁾。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、地震動の入出力波形が得られている場合に、地盤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 と規準変位 δ ）について整理を行う。続いて、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ことで、抽出したパラメータの妥当性を検証する。3章では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パラメータを整理するとともに、これらのパラメータで整理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。これは地盤のせん断波速度もしくは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⁶⁾に基づく地盤強度比 K_f が提案されている⁷⁾。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 $\sqrt{2}$ 倍となる）時点での地表面変位を規準変位 δ (cm)と定義し、次式によって算定される。

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

これは地盤要素のせん断強度 τ や橋梁の降伏震度 K_{fy} 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を表したものである。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 に加えこの地盤強度比 K_f もパラメータとして加えることで、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、最終的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 と規準変位 δ （もしくは地盤強度比 K_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規準変位を指標とした表現の有効性の確認

ここでは、上記(1)で抽出された固有周期 T_g と規準変位 δ （もしくは地盤強度比 K_f ）による地盤表現が、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、 T_g と δ が一致し、多様な地層構成を有する多数の地盤を用意する。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することで、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小さいことを確認することにより、これらの指標の重要性を確認する。

検討の前準備として、地盤の固有周期 T_g と規準変位 δ 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⁸⁾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⁹⁾を使用する。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、同一地盤の各層に乗じる係数は同一とし、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）。続いて非線形特性については、静的非線形解析を実施することで得られる規準変位 δ が1.66cmとなるように、

各地盤の規準ひずみを調整する。この時の補正倍率は上記同様に各地盤内で同一とし、収束計算（誤差0.0001%以下）により求めた（最大5.62倍、最小0.16倍）。以上により、固有周期 $T_g=0.5$ s、規準変位 $\delta=1.66$ cm（地盤強度比 $K_f=6.64$ ）となる60地盤が得られた。各地盤の速度構造を図-1に、規準ひずみの分布を図-2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。

この全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。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）（図-3）とした。また今回は速度構造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。以上の条件により得られた地表面位置の時刻歴波形（絶対加速度、相対変位）を図-4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1次モードの剛性低下に着目した指標である規準変位 δ を揃えるだけで、広い周期帯の応答を調整できていることが分かる。

また、全波形の応答スペクトルを図-5(a)に、地盤を線形弾性体とした場合の地表面波形の応答スペクトルを図-5(b)に示す。図-6には、それぞれの条件における応答スペクトルの変動係数を示す。これより、本検討において地盤は大きく非線形化していることが分かる。また地盤を線形とした場合、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が、地盤の非線形性を考慮した場合は、全体の減衰が大きくなったために、全周期帯で安定してバラツキが小さくなっている。

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 と規準変位 δ （もしくは地盤強度比 K_f ）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、 T_g と δ （もしくは K_f ）の2つに絞られることになる。そこで次章ではこのような問題に対して逆解析を実施することで、入力波と地表面波が得られている場合に、 T_g と δ を同定する方法を検討する。

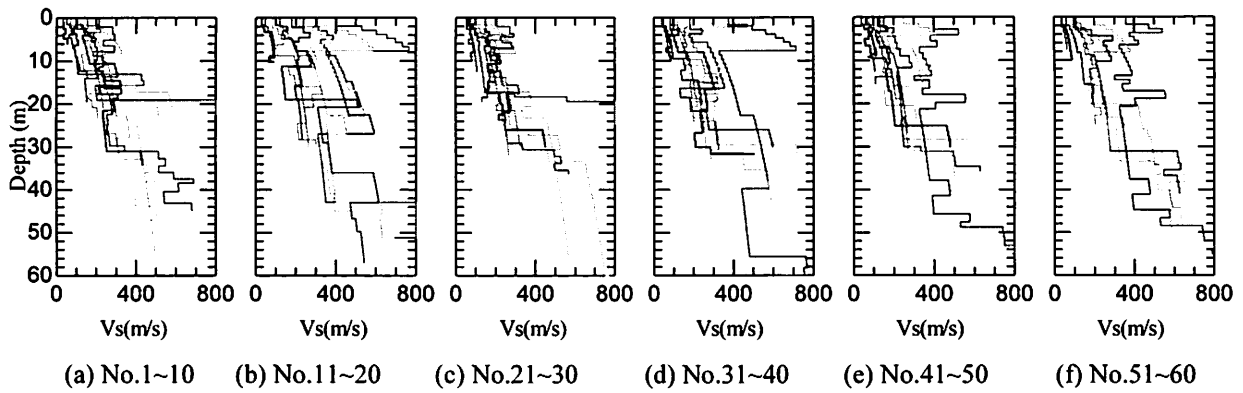


図-1 構築した地盤の速度分布 ($T_g=0.5s$)

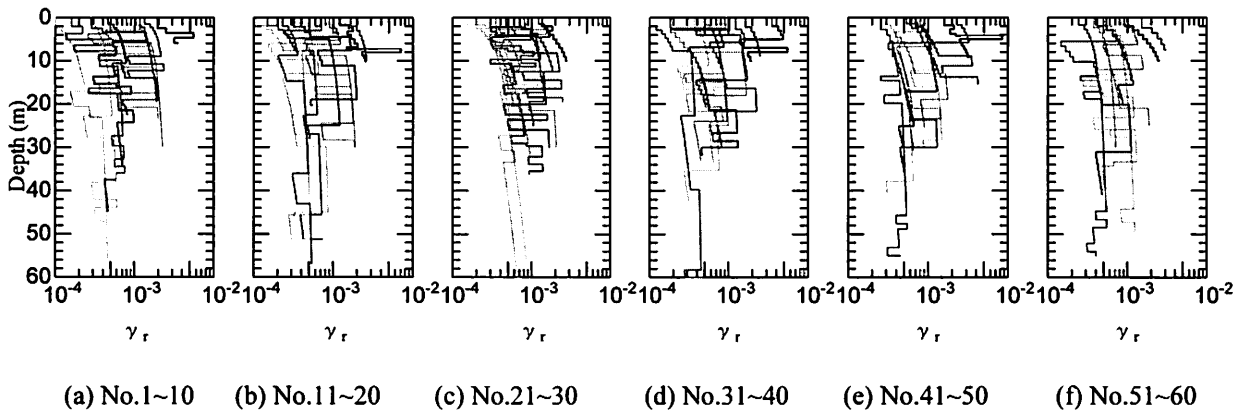


図-2 構築した地盤の規準ひずみ分布 ($\delta=1.66cm$ ($K_f=6.64$))

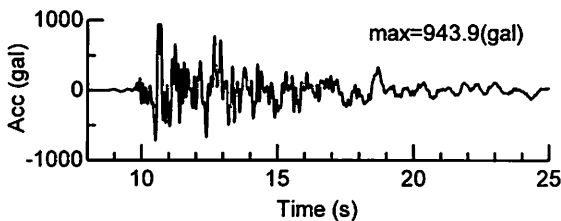


図-3 入力地震動の時刻歴波形

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、地盤のパラメータ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 も必要となる。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、地盤構造の同定手法等に近年一般的に用いられている遺伝的アルゴリズム (GA)⁹⁾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。

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

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である。GAの計算条件としては、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¹¹⁾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-1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(2)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

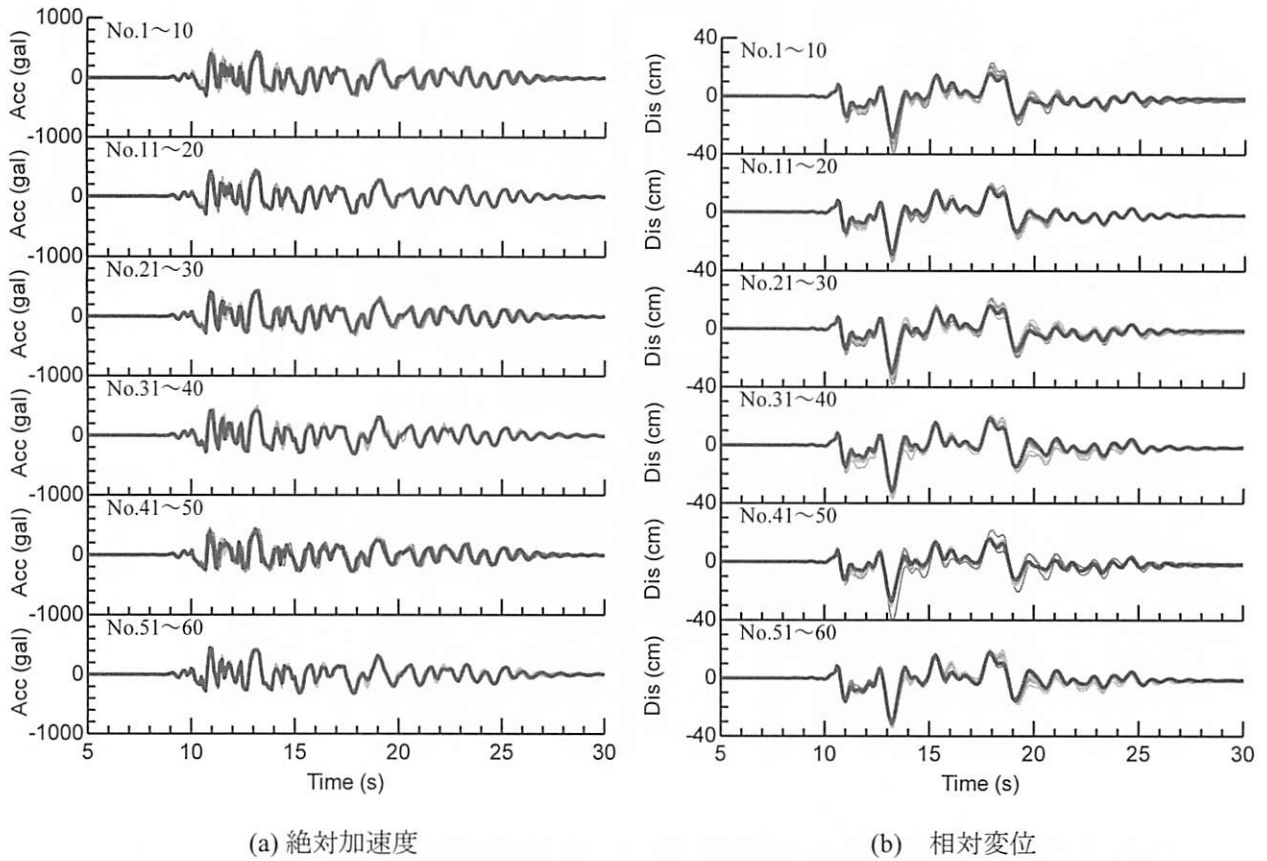


図-4 各地盤の地表面応答波形（各図ごとに10地盤の結果を重ね描きしている）

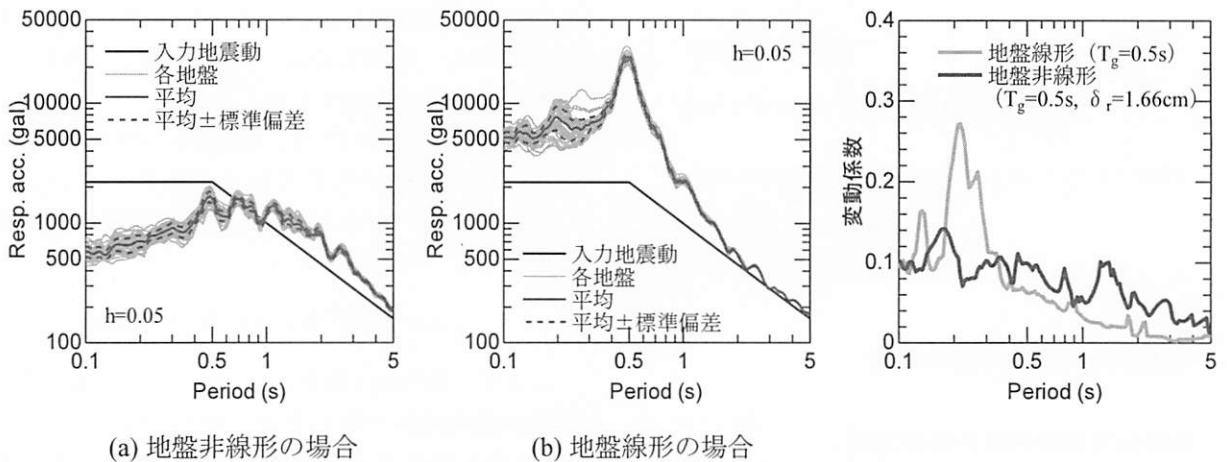


図-5 地表面波形の応答スペクトル

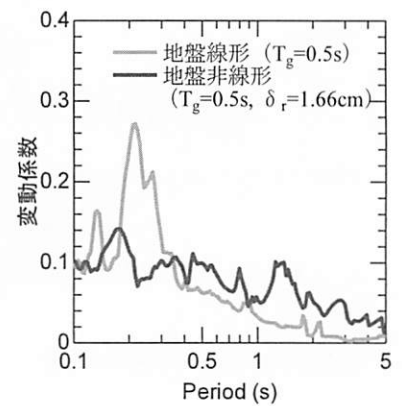


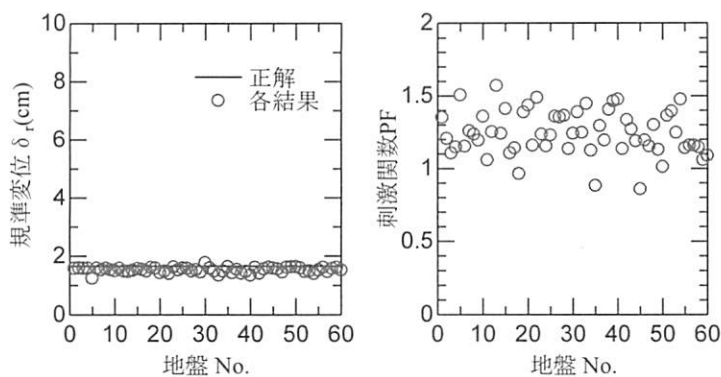
図-6 変動係数

表-1 地盤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 $\delta_r(cm)$	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)

出力波，出力波を用いる．具体的には，入力波として図-3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 $K=6.64$ ）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-4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．



(a) 規準変位 δ (cm) (b) 刺激関数PF

図-7 地盤パラメータの同定結果 (ケース1)

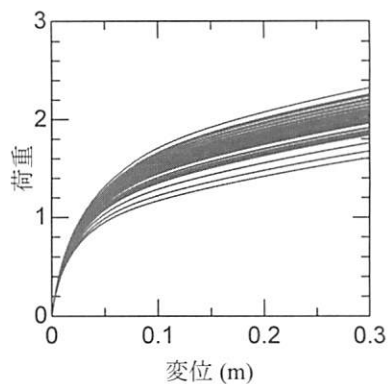


図-8 地盤全体系の荷重-変位関係 (ケース1)

(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-7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て変化するために、推定時の問題にはならない。

さらに、これらのパラメータ (固有周期 T_g 、規準変位 δ 、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-8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。当然ながら固有周期 T_g と規準変位 δ はほぼ同一で概ね正解値を推定できているが、地盤毎の刺激関数が異なるため、地盤全体系の荷重-変位関係も多少変動している。

(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-1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-9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-10に示す。この結果にも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、固有周期 T_g と規準変位 δ ともに実際よりも大きめの値を推定しているものの、地盤強度比 K_f は正解値に近い結果となっており、地盤全体系の荷重-変位関係のバラツキはそれほど大きくなく、ケース1の結果 (図-8) とほぼ同一の結果となっている。また、これらのパラメータを用いて評価される地表面地震動は、観測された出力波形を良好に満足していることも確認済である。

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。

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 と規準変位 δ (もしくは地盤強度比 K_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 、さらに刺激関数PFを推定する手法を提案し、試算により手法の検証を行った。その結果、

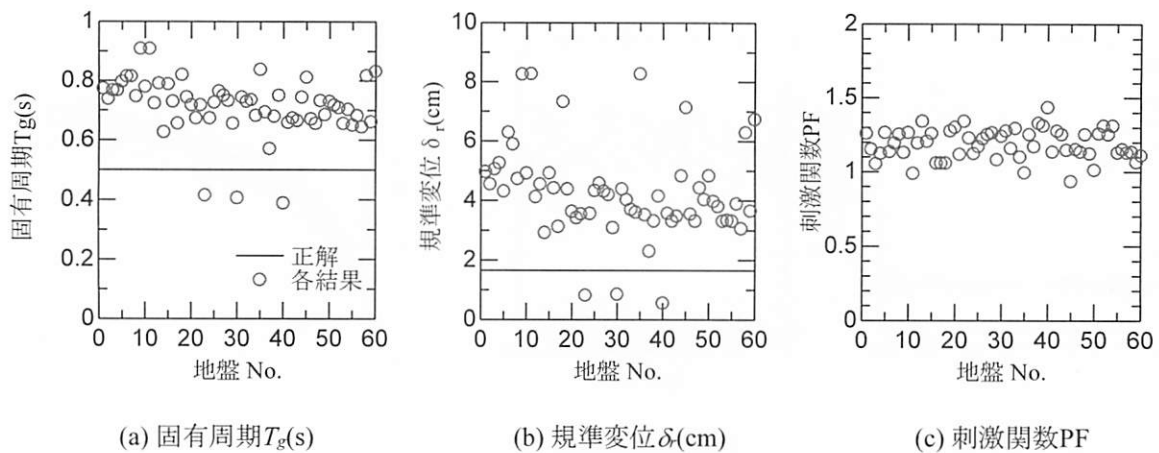


図-9 地盤パラメータの同定結果 (ケース2)

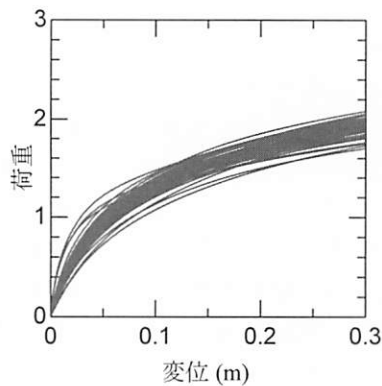


図-10 地盤全体系の荷重-変位関係 (ケース2)

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 を高い精度で推定できることを確認した。地盤の情報は何もない場合には、固有周期 T_g 、規準変位 δ ともに正しい解を得られない可能性があるが、この場合にも地盤全体系の荷重-変位関係は、適切な解を推定し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解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、有効性を検証する予定である。

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) 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), 投稿中.
- 7) 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, 日本地震工学学会論文集, 投稿中.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 長尾智晴: 最適化アルゴリズム, 昭晃堂, 2000.
- 11) John H. Holland.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Bradford Books, 1992.