

逐次非線形解析に基づく基盤入力地震動の推定手法

坂井 公俊*

Estimation of Input Earthquake Motion Based on Nonlinear Time Domain Analysis

Kimitoshi SAKAI

In this research, the authors propose a method of estimating the earthquake motion at seismic bedrock using seismic observation records at the surface by employing a nonlinear time domain analysis. In the proposed method, a general optimization method is used. In addition to the general optimization method, the perturbation waveform incorporating in a forward analysis is proposed to drastically improve the convergence of calculation. Furthermore, the equivalent single-degree-of-freedom model of the ground is used when performing the nonlinear analysis in the time domain. As a result, the calculation time decreases small enough to estimate the seismic motion with an economical cost while considering complex soil nonlinearity. The proposed method is applicable for estimating the strong ground motion at bedrock from surface records, considering the nonlinear behavior of the surface soil layers.

キーワード：基盤入力地震動，時間領域，逐次非線形解析，等価 1 自由度モデル

1. はじめに

地盤は小さなひずみレベルから非線形挙動をすることが確認されており，比較的規模の大きな地震発生時の震源近傍で得られた観測記録には，地盤の塑性化の影響が多く含まれる場合がある。一方で，大規模地震発生後の被害原因究明や設計地震動の評価を行う場合には，震源近傍で得られた地表面地震動を用いて基盤位置の地震動への引き戻し計算を行う必要がある^(例えば 1) 2)。

この時の地震動引き戻し計算の手法としては，SHAKE³⁾に代表される周波数領域の解法が用いられることが一般的である。この方法では，各層において地盤の非線形化の影響を考慮した等価剛性，等価減衰を収束計算により算定した後に，理論的に基盤地震動を推定するため，計算負荷は非常に小さい。また，この周波数領域の解法を改良した手法^(例えば 4)による実問題への適用性も確認されているとともに，コードの公開や汎用ソフトへの組み込み等も積極的に行われているため，実務設計において用いられる機会が多い手法となっている。しかし，一般的な周波数領域の計算では，地震開始から終了までの地盤の剛性や減衰を等価な一定値とするため，ひずみレベルの変化に伴う剛性，減衰の変動を反映できず，振幅の大きな地震動や，軟弱地盤箇所等で得られた地震動のように，地盤の非線形挙動の影響を顕著に含んだ地震記録を対象とした引き戻し計算を行うと，非現実的な加速度が算出されてしまうこともある。

一方で，時間領域の地震動の引き戻し計算手法も今まで複数提案されている^(例えば 5) ~ 8)。しかしながら，手

法の適用範囲が限られていたり，収束性が十分ではない，運動方程式を組み替えているために汎用の地盤応答解析コードの活用が難しい，計算負荷が大きい等の理由によって，現時点で一般的に使用されるまでに至っていない。

こうした中で筆者らは，表層地盤の地震時挙動を等価な 1 自由度系に置換した上で，時間領域の非線形解析によって地表面地震動を評価する手法を提案している⁹⁾。この方法では，事前に地盤の静的非線形解析を行うことで，表層地盤を 1 つの系とみなした場合の変位増大に伴う剛性の低下，減衰増大の関係を評価し，これを適切に再現可能な 1 質点系バネの非線形特性を設定することができる。この等価 1 自由度モデルによる地表面地震動の算定法は，従来から一般に行われている多自由度系の逐次非線形解析と比較すると，当然ながら自由度が小さいために計算時間の大幅な短縮が可能であり，これを用いることで逐次非線形解析に基づく実用的な基盤入力地震動推定法を提供できると考えられる。

以上の考え方に基づき，地盤の等価 1 自由度モデルを活用した基盤入力地震動の推定手法を構築した¹⁰⁾ので，本報告では提案法の概要と数値計算による手法の有効性確認について述べる。

2. 基盤入力地震動の推定手法

2.1 問題の設定，基本的な推定手順

逐次非線形解析に基づいた基盤入力地震動の推定手法の提案を行う。ここではまず，問題の設定と，基盤地震動の推定手法の概要について述べる。

問題設定として，図 1 に示すように，地表面位置に設置された加速度計で，ある加速度記録 $a_s(t)$ が観測され

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

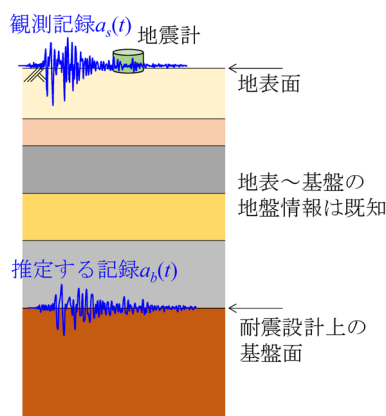


図1 問題の設定

たものとし、この地震記録を用いて地中位置の地震動加速度 $a_b(t)$ を推定することを考える。地表面から推定を行う地点までの表層地盤の物性値（各深さ位置のせん断弾性波速度、単位体積重量、非線形特性、減衰特性等）は詳細に把握されているとする。

この問題を逐次非線形解析法によって解く場合には、何らかの地震動 $a_b(t)$ を仮定して、対象とする地盤の応答解析を実施して得られる地表面地震動 $a_s^{est}(t)$ と地表面位置の観測地震動 $a_s^{obs}(t)$ が可能な限り一致するまで、基盤地震動 $a_b(t)$ を試行錯誤により推定することが考えられる。この非線形最適化法の解法としては様々なものが考えられるが、本検討では制約なし最適化法の一つである準ニュートン法^{例えば 11)}を用いることとした。この時の目的関数として式 (1) のように、地表面位置の観測地震動 $a_s^{obs}(t)$ と推定地震動 $a_s^{est}(t)$ の誤差 ε が最小となるような基盤地震動 $a_b(t)$ を求めることとした。

$$\varepsilon = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[a_s^{obs}(t_i) - a_s^{est}(t_i) \right]^2 \right\}^{0.5} \rightarrow \min \quad (1)$$

また本検討では、直線探索問題として二分法を用いることとした。

2.2 基盤入力地震動推定の工夫1：地盤の等価1自由度モデルの利用

前節で示した方法によれば、繰り返し計算に基づいて、地表面地震動を可能な限り再現する基盤地震動を推定することができると考えられる。しかしながら、逐次非線形解析では1度の計算実行に比較的多くの時間を要するため、多数回の計算が必要な場合には、実問題への適用が困難になる可能性がある。すなわち、対象とする地震動の継続時間が長いほど、対象とする地盤の層厚が大きくモデル自由度が大きくなるほど、また地盤の非線形挙動が顕著になり収束計算に多くの試行が必要になるほど、問題が大きくなると考えられる。

そこで本検討では、収束計算の初期段階では地盤を等

価な1自由度モデルによって表現することで、より効率的な最適解への収束を実現することとした。具体的には、地震動の引き戻し計算を行う前に、引き戻し対象層よりも上層を対象として地盤の静的非線形解析⁹⁾を実施することで、表層地盤全体を一つの系とした時の変位と剛性低下率、減衰の関係を把握しておく。この剛性と減衰の変化の関係を適切に再現可能な非線形特性を有する等価1自由度モデルを構築し、収束の初期段階においては、この等価1自由度モデルを用いた逐次非線形解析を実施する。これによってある程度収束した後に、詳細モデルを用いた計算を実施することで、基盤地震動の推定を行う際の高速化を実現する。

2.3 基盤入力地震動推定の工夫2：摂動波形の設定

本検討では基盤地震動を推定する最適化法として準ニュートン法を用いる。この手法に限らず、多くの最適化法では何らかの方法で次ステップの移動方向および移動量を決定する必要がある。その時に、勾配ベクトルを用いる場合があるが、一般的には入力に微小な摂動を与えて算定することになる。しかしながらこの摂動としてインパルスを用いると、最終的に得られる結果には物理的に意味のない短周期成分が含まれる可能性がある。そこで本検討では摂動波形として、式 (2) で表される Ricker Wavelet 波¹²⁾を用いることとした。

$$f(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\alpha - 0.5) \cdot \exp(-\alpha) \quad (2)$$

$$\alpha = \left[\frac{\pi(t - t_p)^2}{T_p} \right]^2$$

ここで、 T_p ：フーリエ振幅のピーク周期 (s)、 t_p ：時間領域の最大振幅となる時間 (s)、である。この Ricker Wavelet 波は、積分時に残留値が残らないことや、時間軸上でコンパクトであること、フーリエ振幅スペクトルを理論的に算定できるためピーク振動数を容易に変更可能であるという利点を有している。Ricker Wavelet 波の時刻歴波形、フーリエ振幅スペクトルの例を図2に示す。

この Ricker Wavelet 波を各ステップにおける摂動波形として用いるが、今回対象とするのは、比較的規模の大きな地震時の引き戻し計算である。そのため、地盤の非線形挙動が顕著になると考えられ、微小振幅において適切であると判定された Ricker Wavelet 波のフーリエ振幅のピーク周期 T_p 、最大振幅となる時間 t_p が、大きな振幅を対象とした場合には適切ではない可能性もあり、次ステップの基盤地震動として適切な移動方向および移動量とならない状況が発生し得ると考えられる。

そこでこの問題を解決するために、探索の初期状態では摂動波形の振幅を大きく取ることで、大局的な基盤波形の推定を行うとともに、徐々に摂動波形の振幅を小さ

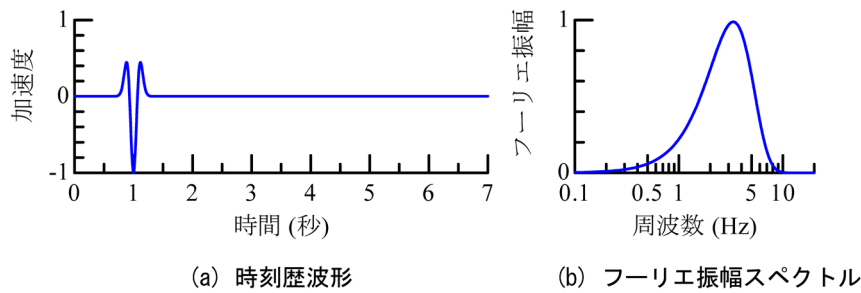


図2 Ricker Wavelet 波の例 ($T_p=0.3s$, $t_p=1s$, 時刻歴波形の最大値を 1 に規準化)

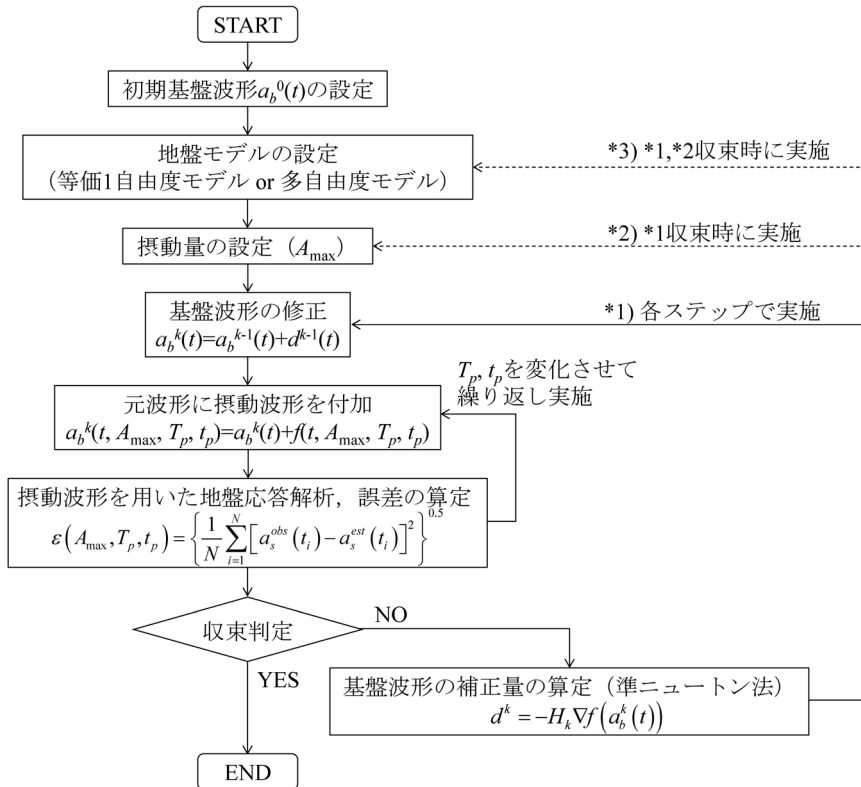


図3 提案する基盤地震動の推定手法

くすることで、地表面地震動を可能な限り再現する基盤地震動の探索を効率的に行うこととした。

以上を総括して、本検討で実施する基盤地震動の推定手順を図3に示す。この方法は、一般的な非線形最適化法であるものの、収束の初期段階では地盤の解析自由度を1自由度系とすることで、計算の高速化を実現するとともに、摂動波形の形状の工夫と、振幅を適切に調節することで、少ない計算回数で大局的な収束に至ることを狙っている。これによって、現実的な計算時間で適切な基盤地震動が推定されることを期待している。

3. 提案手法の有効性の検証

3.1 問題の設定

前章で提案した基盤地震動の推定手法の有効性を確認するための試算を行う。対象とした地盤は図4に示す工

学的基盤までの深度20mの実地盤である。この地盤では、PS検層に基づく各深さ位置のせん断弾性波速度や、動的変形特性試験に基づく非線形特性が得られている。これに基づいて解析モデルを構築するが、今回は地盤を16要素で分割するとともに、各層の非線形構成則は、GHE-Sモデル¹³⁾によって表現することとする。この地盤に対して静的非線形解析を実施した結果を図5に橙実線で示すが、载荷する変位 δ の増大に伴って、地盤全体としての剛性が低下するとともに、履歴減衰が増大していることが確認できる。次に、この静的非線形解析結果をできるだけ再現するように、等価1自由度モデルのパラメータを設定した。この結果も図5に青点線で示しているが、変位の増大に伴う剛性低下、減衰増大の傾向を良好に表現できている。

正解となる基盤地震動に関しては、図6に示す1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測記録(NS方向)

を工学的基盤位置の波形として設定した。

これら地盤条件、基盤入力地震動を用いて地盤応答解析を実施した結果得られた地表面応答波形を図7に示す。この地震動が地表位置に設置した地震計で観測されたと考え、基盤地震動の推定を行う。

3.2 基盤地震動推定の条件

前節で設定した問題に対して、前章で提案した手法によって、基盤地震動の推定を行う。検討ケースの一覧をまとめて表1に示す。ここでは、前章で整理した効率的な収束を目指した3パターンの検討を行う。具体的には、収束の工夫を行わないものをケース1、2.3節で提案した摂動波形の振幅の工夫を行ったものをケース2、これに加えて2.2節で提案した等価1自由度モデルを併用したものをケース3として実施する。

初期ステップで与える基盤地震動は、全時刻において振幅0とした。また、摂動波形として与える Ricker Wavelet 波のフーリエ振幅のピーク周期 T_p は、0.2～2s まで 0.2s 刻みで設定した。さらに、摂動の工夫を行わない場合（ケース1）の Ricker Wavelet 波の振幅 A_{max} は全ステップにおいて 0.1gal とする。摂動量の工夫を行う場合（ケース2,3）には応答波形の 1/10 程度（具体的には 100gal）を初期条件として設定し、収束が落ち着いた場合に、その振幅を半分にするという作業を繰り返し、最終的な摂動量が 0.1gal になるまで計算を行うこととした。

等価1自由度モデルの併用を行う場合（ケース3）には、図5に青点線で示した特性を有する等価1自由度モデルによって、上記の収束計算を行い、収束が落ち着いた段階で、地盤の解析モデルを多自由度モデルに切り替えて

同様の作業を行う。

また、提案手法の有効性を従来法と比較するために、基盤地震動の推定手法として一般的に用いられている周波数領域の引き戻し計算³⁾も実施することとした。

3.3 基盤地震動の推定結果

提案手法を用いて基盤地震動の推定を行った。また、推定された基盤地震動を用いて、時間領域の解析によって、地表面地震動の算定も行った。得られた結果を図8

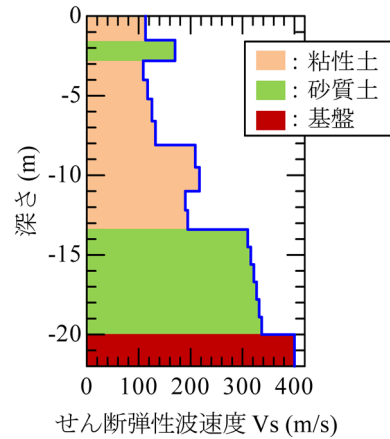


図4 対象とする地盤条件

表1 検討ケース

検討 ケース	摂動量 の変化	等価1自由度 モデルの併用
ケース1	—	—
ケース2	○	—
ケース3	○	○

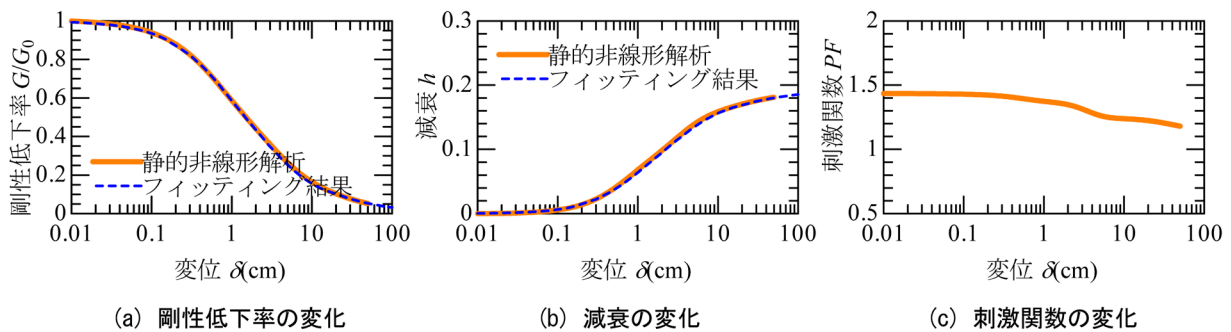


図5 地盤の静的非線形解析の結果

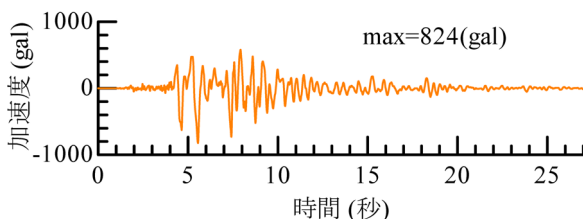


図6 基盤入力地震動の時刻歴波形

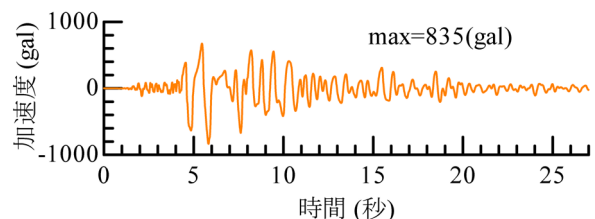


図7 地表面地震動の時刻歴波形

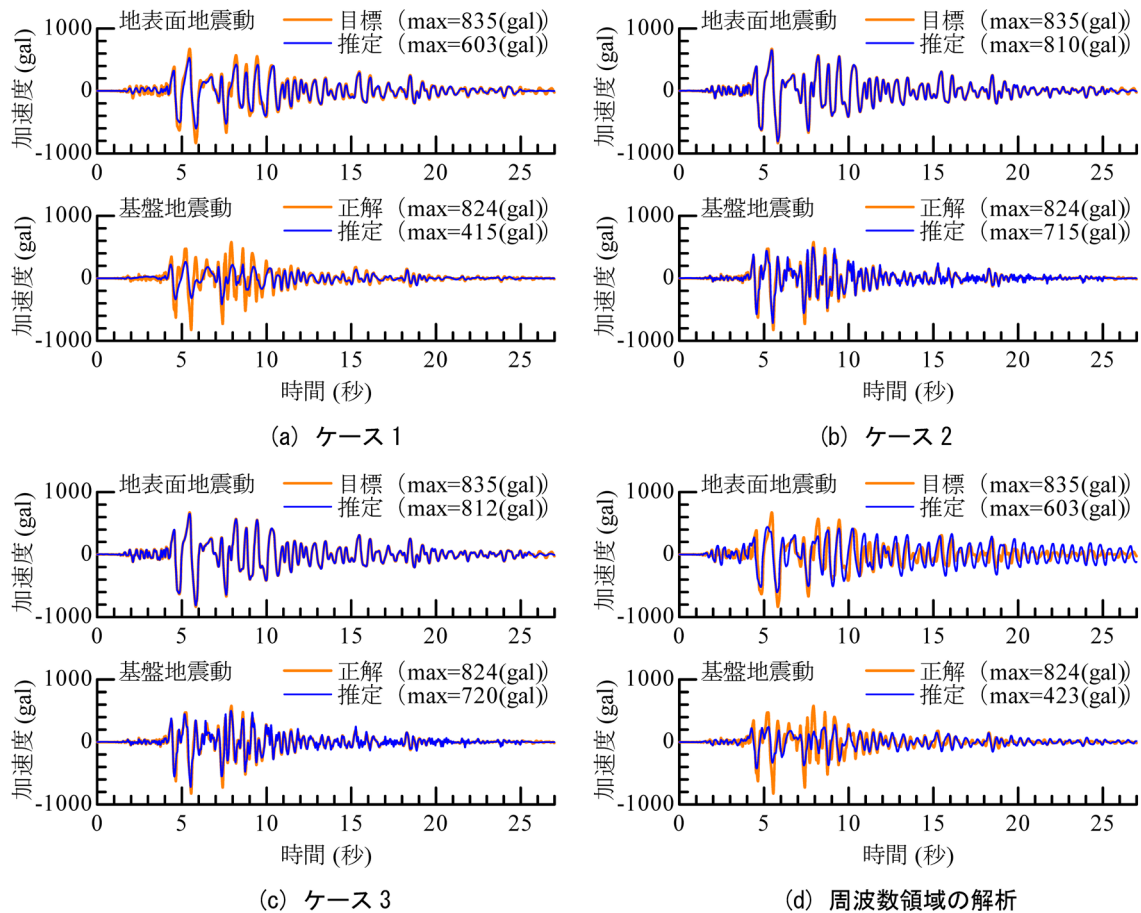


図8 推定した基盤地震動とこれにより得られる地表面地震動

(基盤位置、地表面位置の時刻歴波形)，図9（ケース3の基盤地震動のフーリエ振幅スペクトル）に示す。また，計算時間と誤差 ε の低減程度を関係を図10に示す。

図8の基盤地震動，地表面地震動を見ると，ケース1（図8(a)）においては適切な解に収束していないことが分かる。これに対してケース2，ケース3の結果（図8(b)，(c)）では，基盤位置の時刻歴波形の最大加速度では正解値と比較して多少の違いが見られるものの，位相特性や振幅レベル等，正解値と類似した時刻歴波形となっている。この正解値と推定値の一致の傾向は，時刻歴波形の時間4～7秒付近の振幅の大きなパルス近傍だけでなく，15秒以降の比較的振幅の小さな部分においても良好であり，本手法において主要動部以外でも適切な解が得られることを示している。また，ケース3の基盤地震動のフーリエ振幅（図9）を見ても，提案法によって正解値を良好に再現できていることが分かる。これに対して周波数領域の解析によって得られる時刻歴波形（図8(d)）を見ると，時刻5～10秒付近では振幅を過小評価，20～25秒付近では振幅を過大評価していることが確認できる。これは，周波数領域の解析では当然ながら各層の剛性を終始一定としているため，逐次非線形解析に基づく地盤の挙動と比較すると，最大が

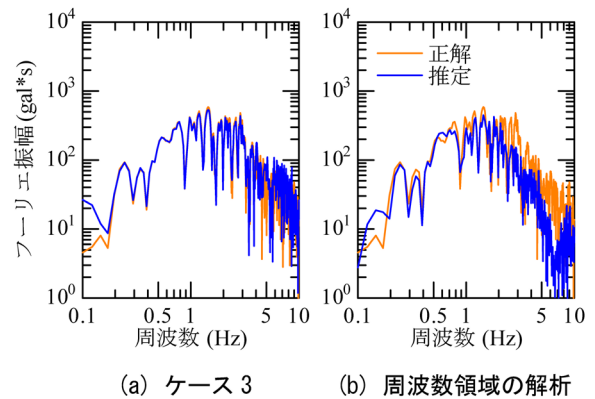
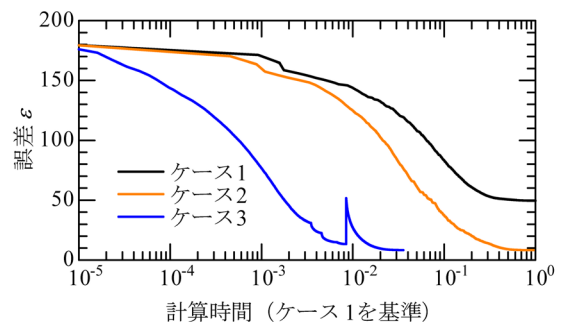


図9 推定した基盤地震動のフーリエ振幅スペクトル



振幅となる時刻周辺（5～10秒程度）では実際よりも相対的に大きな剛性を仮定している一方で、それ以外の時刻では相対的に小さな剛性を設定してしまっていることが要因であると考えられる。これに対して今回提案を行った方法では、このような仮定を排除して剛性が時々刻々変化するために、より正解に近い結果が推定できている。

また、誤差 ε の低減程度の結果（図10）を見ると、ケース1においては、他のケースと比較して誤差が大きいことが分かる。この原因としては、微小振幅の Ricker Wavelet 波を与えた解析で選択された時刻や周波数特性が、振幅が大きい場合には不適切であり、結果として誤差低減が不可能と判定されたものと考えられる。これと比較して、摂動波形に与える振幅を初期段階では大きく設定し、徐々に小さく変化させたケース2では、誤差の低減が速く、かつ最終的な誤差もケース1と比較すると大幅に小さくなっていることが分かる。また、等価1自由度モデルを併用したケース3では、最終的な誤差の大きさはケース2と概ね同等であるにもかかわらず、計算終了までに要する時間が約1/27と大幅に低減されている。ここで、ケース3の計算時間0.01程度において誤差 ε が一時的に大きくなっているが、これは、地盤の解析モデルとして等価1自由度系から多自由度系に切り替わったタイミングであり、モデル変更に伴う地表面応答の変化が誤差の増大という形で表現されたものである。しかしながら、結果としてケース3の方が最終的な収束に至る速度は向上しており、等価1自由度モデルを併用することで、適切な解を効率的に推定できていることが確認される。今回提案を行った摂動波形の工夫、等価1自由度モデルの併用は、対象とする地震動の振幅レベルが大きい場合（地盤のひずみレベルが大きい場合）、あるいは対象とする地盤の層厚が大きい場合においてより有効性が高まると考えられる。

4. まとめ

本検討では、地表面で得られた地震観測記録を用いて、適切な基盤入力地震動を推定する手法の提案を行った。この問題を解く際、一般的には周波数領域の解析法が用いられるが、提案手法では、より適用範囲が広いと考えられる逐次非線形解析に基づいている。

この際の解法としては、逆解析の方法として一般的な非線形最適化法を用いるが、摂動波形に Ricker Wavelet 波を用いることで、物理的に意味のない短周期パルスの発生を抑制するとともに、収束の初期段階では摂動波形の振幅を大きく取ることで、収束性の向上をはかる。さらに、収束初期段階の解析モデルとして地盤の等価1自由度モデルを併用することにより、逐次非線形解析の繰り返し実施によって基盤地震動を推定する際の計算時

間の増大が問題となる点も解決した。

以上のように、提案した手法は逐次非線形解析に基づく基盤地震動を高精度かつ高速に推定可能であるため、大規模地震発生後の被害原因究明や設計地震動の評価を行う際の基盤地震動推定手法として活用が期待される。

文 献

- 1) 地震による新幹線脱線シミュレーション解析グループ：新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析，鉄道総研報告特別第52号，2008
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・解説（耐震設計），2012
- 3) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 4) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222, 2002.
- 5) Toki, K., Sato, T. and Kiyono, J.: Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories, Proc. of Japan Society of Civil Engineers, No. 410/I-12, pp. 413s-421s, 1989.
- 6) 須藤敦史，星谷勝，柳河勇：絶対応答波形を用いた地震動入力とシステムパラメータ同定，構造工学論文集，Vol. 41A, pp. 709-716, 1995
- 7) 酒井久和，澤田純男，土岐憲三：時間領域での基盤入力地震動の推定法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 577/I-41, pp. 53-64, 1997
- 8) 鈴木琢也：モーダル反復誤差修正法を用いた弾塑性地盤モデルにおける基盤入力動インバージョン，日本建築学会構造系論文集，Vol. 83, No. 749, pp. 1021-1029, 2018
- 9) 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
- 10) 坂井公俊：地盤の等価1自由度モデルを併用した逐次非線形解析に基づく基盤入力地震動の推定，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 77, No. 1, pp. 132-145, 2021
- 11) 田村明久，村松正和：最適化法，共立出版，2002
- 12) Ricker, N.: The computation of output disturbances from amplifiers for true wavelet inputs, Geophysics, Vol. 10, pp. 207-220, 1945.
- 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