

# 逐次非線形解析に基づく基盤地震動推定の有効性検証

坂井 公俊\*

Validation of Bedrock Motion Estimation Based on Time Domain Non-linear Analysis

Kimitoshi SAKAI

We confirmed the effectiveness of a proposed method for estimating earthquake ground motion from observation waveforms at the ground surface based on time domain nonlinear analysis. Specifically, earthquake ground motion was estimated using the proposed method for various kinds of earthquake motion and ground conditions, and the results were compared with those of a conventionally used frequency domain method. The result confirmed that the proposed method can estimate more appropriate earthquake ground motion in all the cases investigated here. Therefore, the proposed method is an effective method for estimating earthquake ground motion, appropriately taking into account the effects of the ground non-linearity.

キーワード：基盤地震動，地盤応答解析，逐次非線形解析

## 1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計では、耐震設計上の基盤面で定義された設計地震動が用いられる<sup>例えは<sup>1)</sup></sup>。そのため、地表面位置で観測された地震記録を基盤位置に引き戻す場合<sup>例えは<sup>2)</sup></sup>もあり、この時の地震動の引き戻し計算手法としては一般的に周波数領域の解法<sup>例えは<sup>3)</sup></sup>が用いられている。しかしこの方法では、地震開始から終了までの各層の剛性、減衰を一定値として計算を行うため、ひずみレベルが大きな場合には適用が困難である<sup>例えは<sup>4)</sup></sup>という課題を有している。

その一方で、時間領域の地震動の引き戻し計算手法も今日まで複数提案されている<sup>例えは<sup>5)~8)</sup></sup>。これらは、カルマンフィルタを用いて入力推定を行うもの、運動方程式の定式化を工夫したもの、繰り返し計算を実施することで最適解を探索するもの等、各種のアプローチがされており、それぞれ設定した問題に対して良好な基盤入力地震動を推定できている。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。

これを踏まえて筆者は、逐次非線形解析に基づく入力地震動の推定手法を提案している<sup>9)</sup>。これは逆解析の方法として一般的な非線形最適化法に基づいているものの、摂動波形にRicker Wavelet<sup>10)</sup>を用いることで、無意味な短周期パルス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設定することで、収束性の向上も実現している。さらに、逐次非線形解析に

基づく入力推定において大きな課題となる計算時間に対応するために、表層地盤を等価な1自由度系に置換したモデル<sup>11)</sup>を併用することで、この課題の解決をはかっている。

しかしながら既往の検討<sup>9)</sup>では、計算手法を提案するとともに、1つの地盤と1つの地震動波形に対する有効性の確認のみに留まっており、幅広い問題に対する適用性、有効性の確認は今後の課題として残されていた。多様な地盤、地震動に対する適用性や適用限界を把握することは、今後の基盤地震動推定の高度化や実問題への適用を考える上では重要な課題である。

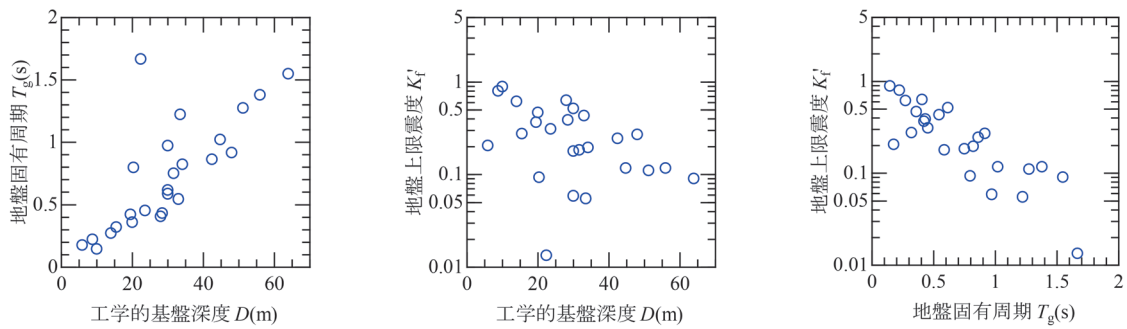
そこで本稿では、逐次非線形解析に基づく基盤地震動推定手法<sup>9)</sup>の有効性を確認するための検討を行う。具体的には、複数の地盤、地表面地震動に対して提案手法を適用することで、各ケースの基盤地震動を推定する。この時の地表面位置の地震動は、対象とする地盤モデルと既知の入力地震動を用いた応答解析により算出することで、正解となる基盤地震動が把握できる条件での検討とする。これとともに、同一の地盤、地表面地震動を用いて周波数領域の解法によって基盤地震動を推定する。両結果と正解として設定した基盤地震動を比較することで、提案手法の有効性を検証する。なお本検討の逐次非線形解析としては、水圧上昇の影響等を無視した全応力での時間領域における非線形動的解析法を用いる。

## 2. 検討の条件

### 2.1 対象とする地盤、地震動の条件

ここではまず、検討対象の地盤、地震動を整理する。まず、地盤は地表面～耐震設計上の基盤面までの表層地盤を対象とし、多様な地層構成、深度、固有周期を有す

\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室



(a) 深度  $D$ —固有周期  $T_g$  の関係 (b) 深度  $D$ —地盤上限震度  $K_f'$  の関係 (c) 固有周期  $T_g$ —地盤上限震度  $K_f'$  の関係

図 1 検討に用いる地盤条件の概要

る全 25 地盤を用いる。これは鉄道構造物における設計地震動評価の際に収集した多数の地盤<sup>12)</sup>の中から周期、強度の観点で幅広く分布するように抽出したものである。

検討に用いる各地盤の基盤までの深度  $D$  (m)、固有周期  $T_g$  (s)、地盤上限震度  $K_f'$ <sup>13)</sup> の関係をまとめて図 1 に示す。このうち地盤の固有周期  $T_g$  は、表層地盤の固有値解析により算出している。また地盤上限震度  $K_f'$  は、図 2 に示すような地盤全体系の荷重—変位関係を考えた場合の強度に関する指標であり、橋梁・高架橋の耐震性能を表現する際の指標の一つである降伏震度  $k_{hy}$  と同一の単位系を有している<sup>13)</sup>。この地盤上限震度  $K_f'$  は、各地盤の静的非線形解析<sup>11)</sup> によって算出している。

検討に用いる地震動は、正解となる波形を明確にするために、基盤位置で地震動波形を規定する。つまり、基盤位置で地震動波形を入力した逐次非線形解析を実施することで地表面地震動を算出し、これが観測されたと考えられる (図 3)。

この時の基盤地震動は、図 4 に示す 3 波形を用いる。具体的には波形 1 として 1995 年兵庫県南部地震における JMA 神戸観測記録 (NS 成分)、波形 2 として 1993 年釧路沖地震における JMA 釧路観測記録 (NS 成分)、波形 3 として 2000 年鳥取県西部地震における K-NET 広瀬観測記録 (EW) (元波形の最大加速度 267.5gal) を用いる。これらの図から、波形 1 は比較的長周期成分が卓越する一方で、波形 3 は相対的に短周期成分が卓越している。また波形 2 は、波形 1、3 と比較して地震規模が大きいために継続時間も相対的に長くなっている。なお提案手法の適用性は、地震動の振幅レベルによっても変化する可能性が考えられるため、波形 1、2 については最大加速度を 200gal にしたもの、波形 3 については振幅を 3 倍にしたものも入力地震動として用いることとした。

以上の地盤 (25 地点)、基盤地震動 (3 波×2 振幅 = 6 波) を網羅的に組み合わせた 1 次元多自由度系の逐次非線形動的解析を実施し、計 150 波の地表面地震動を算出した。得られた地表面地震動の例を図 5 (時刻歴加速度波形) に示す。これを見ても分かるように、地震動

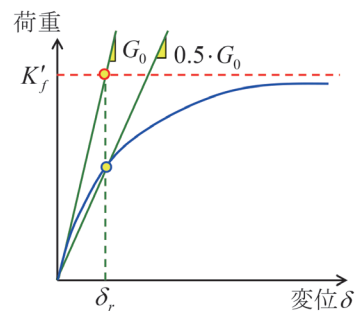


図 2 地盤全体系の荷重—変位関係のイメージ

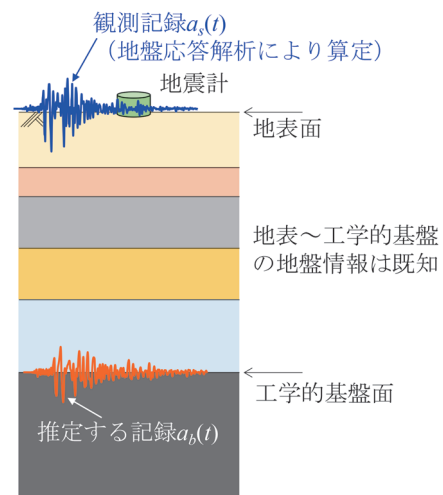
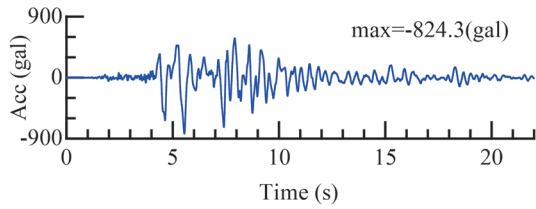


図 3 想定する問題

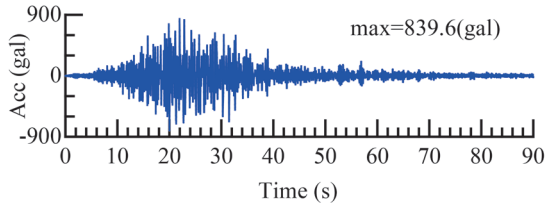
の振幅レベル、地盤条件に応じて地盤の非線形挙動の程度も様々に変化している。これが各地盤の地表面位置で観測されたと考えて、提案手法によって基盤地震動の推定を行う。

## 2.2 基盤地震動を推定する際の計算条件

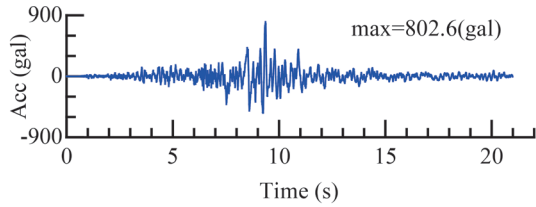
前節で整理した多数の地盤と地表面地震動を用いて、基盤地震動を推定する。この時には、筆者が提案している逐次非線形解析に基づく基盤地震動の推定手法<sup>9) 14)</sup> を用いる。計算の手順は一般的な非線形最適化法に基づい



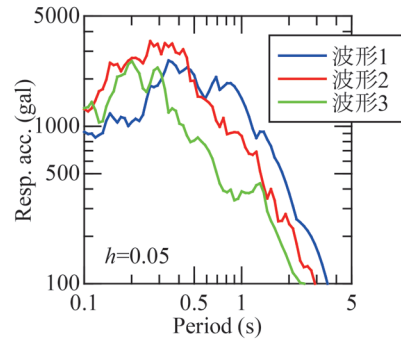
(a) 波形1 (兵庫県南部地震 JMA 神戸)



(b) 波形2 (釧路沖地震 JMA 釧路)

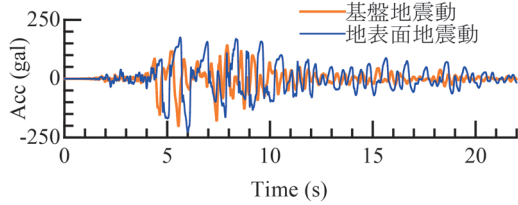


(c) 波形3 (鳥取県西部地震 K-NET 広瀬×3倍)

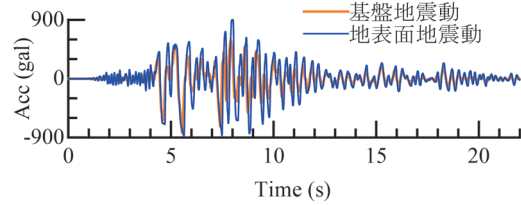


(d) 弾性加速度応答スペクトル

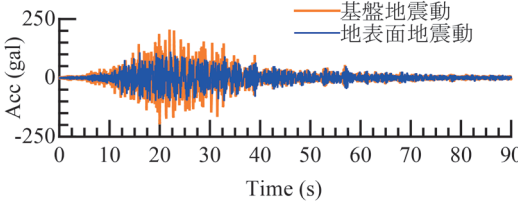
図4 検討に用いる基盤入力地震動の概要 (振幅大のケース)



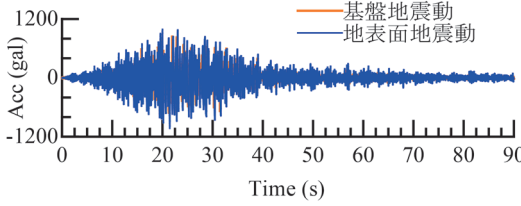
(a) 波形1 (振幅小), 地盤  $T_g=0.82s$



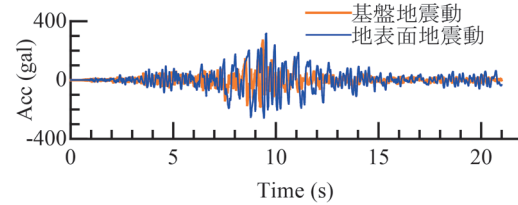
(b) 波形1 (振幅大), 地盤  $T_g=0.15s$



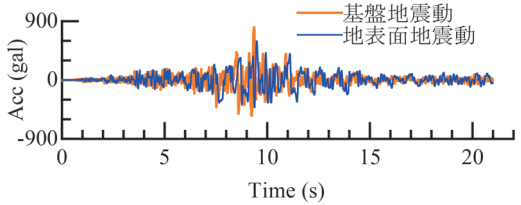
(c) 波形2 (振幅小), 地盤  $T_g=0.80s$



(d) 波形2 (振幅大), 地盤  $T_g=0.22s$



(e) 波形3 (振幅小), 地盤  $T_g=0.43s$



(f) 波形3 (振幅大), 地盤  $T_g=0.42s$

図5 地表面地震動の評価例 (時刻歴加速度波形)

ている。ただし、計算の収束性向上をはかるために、摂動波形として Ricker Wavelet を用いる、はじめはこの摂動量を大きく設定し、徐々に小さくする、収束の初期段階は地盤の応答解析モデルとして等価 1 自由度モデルを用いる等の工夫を行っており、これによって現実的な時間内での収束を実現している。

引き戻し計算を行う際の各条件は以下のように設定した。まず、地盤の等価 1 自由度モデルは既往の検討<sup>11) 15)</sup>において整理、構築したものをを用いる。摂動波形として与える Ricker Wavelet 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。摂動量の工夫としては、図 4 の波形を基盤地震動とした場合には 100gal、最大加速度 200gal 程度の振幅小の波形を基盤地震動とした場合は 50gal を初期条件として設定し、収束が落ち着いてきた場合もしくは繰り返し計算数 50 回まで達した場合に、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。また、等価 1 自由度モデルを用いた収束計算によって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。なお繰り返し計算数 50 回について、現時点では計算時間との関係でこの上限回数を設定しているが、これをより大きくすることで、さらに適合度の高い波形の推定も期待される。

また収束計算時の誤差  $\varepsilon$  は次式で評価する。ここで、 $\varepsilon$  : 推定した地震動の適合度、 $a_s^{obs}(t)$  : 地表面位置の観測地震動、 $a_s^{est}(t)$  : 推定地震動である。

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

なお、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<sup>3)</sup>も実施することとした。この時に、地盤を非線形とした場合に必要となる有効ひずみ換算係数  $\alpha$  は、一般的に用いられることのある 0.65, 0.80, 1.00 の 3 パターンを設定する。実際の問題においては、このうちどの結果が適切であるかは不明である。ただし本検討においては、正解となる基盤地震動が分かっているため、各ケースで正解値と推定値の誤差を次式で算定し、これが最小となる有効ひずみ換算係数  $\alpha$  の結果を採用することとした。

$$error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[a_s^{obs}(t_i) - a_s^{est}(t_i)]^2}{a_s^{obs}(t_i)^2} \quad (2)$$

### 3. 基盤地震動の推定結果

前章の条件に従って、各地盤、各地震を対象とした時の基盤地震動を推定した。推定された基盤地震動波形の例を図 6 (振幅小の場合)、図 7 (振幅大の場合) に示す。また、これら基盤地震動の弾性加速度応答スペクトルをまとめて図 8 に示す。

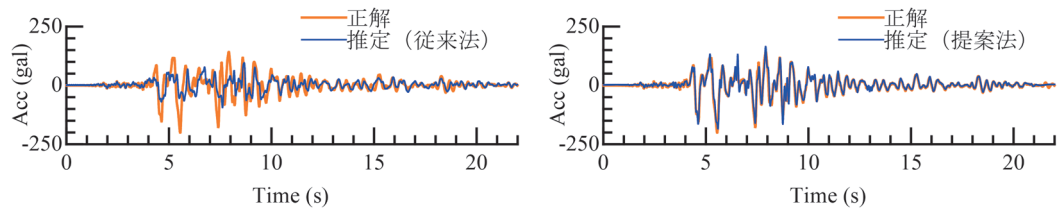
これらの図を見ると、提案手法を用いることで従来法よりも適切な基盤地震動を推定できていることが分かる。特に継続時間の短い波形 1, 波形 3 の基盤地震動は、提案手法を用いることで正解値と非常に類似した結果となっており、提案手法の有効性を示すものである。

その一方で継続時間の長い波形 2 の基盤地震動については、提案法を用いることで従来法よりもより正解に近い結果を推定できているものの、その適合度はまだ十分とは言えない。これは、今回の収束計算時の条件 (繰り返し回数の最大計算数を 50 回に設定) によるものであると考えられ、これをさらに増やすことで正解値により近い基盤地震動が推定される可能性が考えられる。適切な繰り返し回数は地震動の振幅レベルや継続時間との関係により変化すると考えられるため、これについては今後の課題としたい。

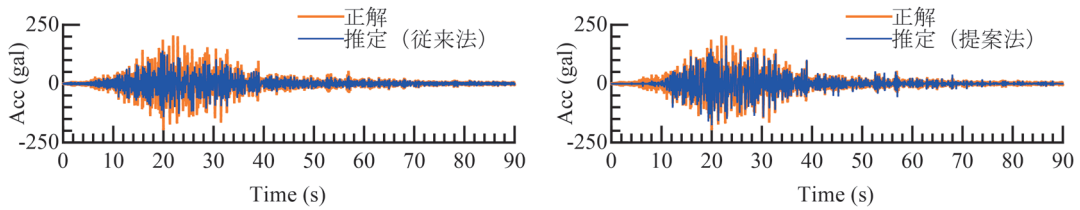
また、最終的に推定された基盤地震動の適合度を式 (2) で評価するとともに、これによって算定される結果をまとめて図 9 に示す。この結果より、多様な地盤に対して実施した基盤地震動の誤差においても、いずれも提案手法を用いることで、従来の周波数領域での引き戻し計算の結果よりも適切な地震動を推定できている。またこの図には、地盤の固有周期  $T_g = 0.5s$  を境として色分けしているが、地盤が軟弱なほど相対的に誤差が大きくなっていることが分かる。提案手法においては、今回設定した繰り返し計算の回数や収束条件をさらに厳しく設定することで、さらなる誤差低減が期待され、これによって提案手法の有用性がさらに高くなると考えられる。以上より、筆者が提案した逐次非線形解析に基づく基盤地震動の推定手法<sup>9)</sup>は、幅広い地震動の条件、地盤の条件に対する適用性を有しており、地盤の非線形化の影響を適切に考慮した基盤地震動の推定手法として有効であると言える。

### 4. まとめ

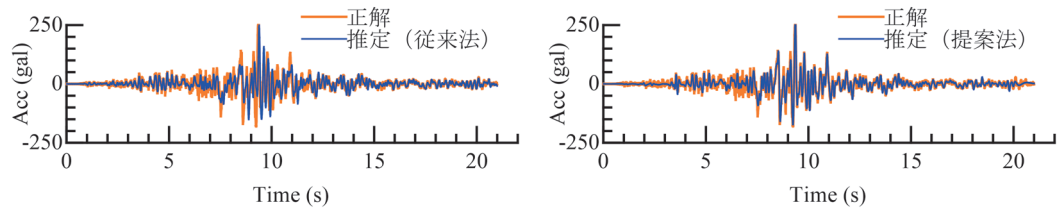
本検討では、逐次非線形解析に基づいて地表面位置で観測された地震動波形から、基盤地震動を推定する提案手法の有効性を確認した。具体的には、多様な地震動、地盤条件を対象として提案手法によって基盤地震動の推定を行うとともに、従来から一般的に用いられている周波数領域の手法との比較を行った。



(a) 波形 1 (振幅小), 地盤  $T_g=0.82s$

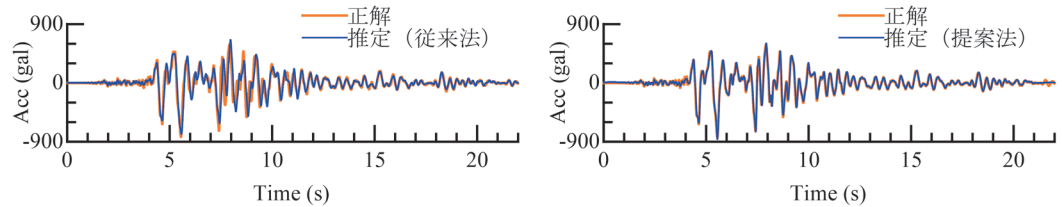


(b) 波形 2 (振幅小), 地盤  $T_g=0.80s$

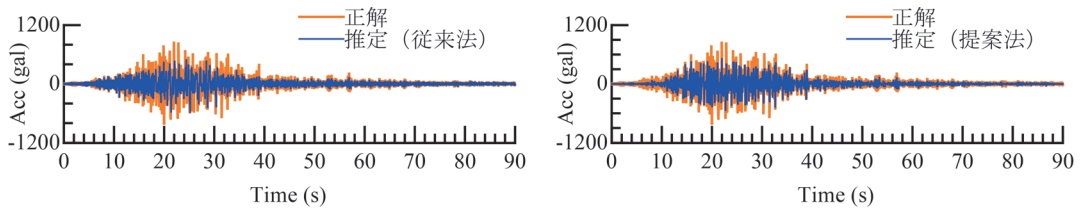


(c) 波形 3 (振幅小), 地盤  $T_g=0.43s$

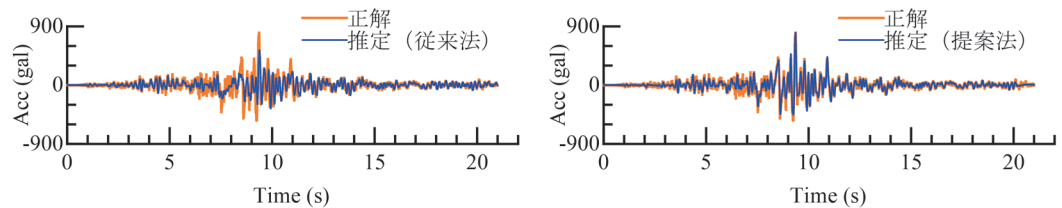
図 6 基盤地震動の推定結果の例 (左: 従来法, 右: 提案法) (振幅小の場合)



(a) 波形 1 (振幅大), 地盤  $T_g=0.15s$



(b) 波形 2 (振幅大), 地盤  $T_g=0.22s$



(c) 波形 3 (振幅大), 地盤  $T_g=0.42s$

図 7 基盤地震動の推定結果の例 (左: 従来法, 右: 提案法) (振幅大の場合)

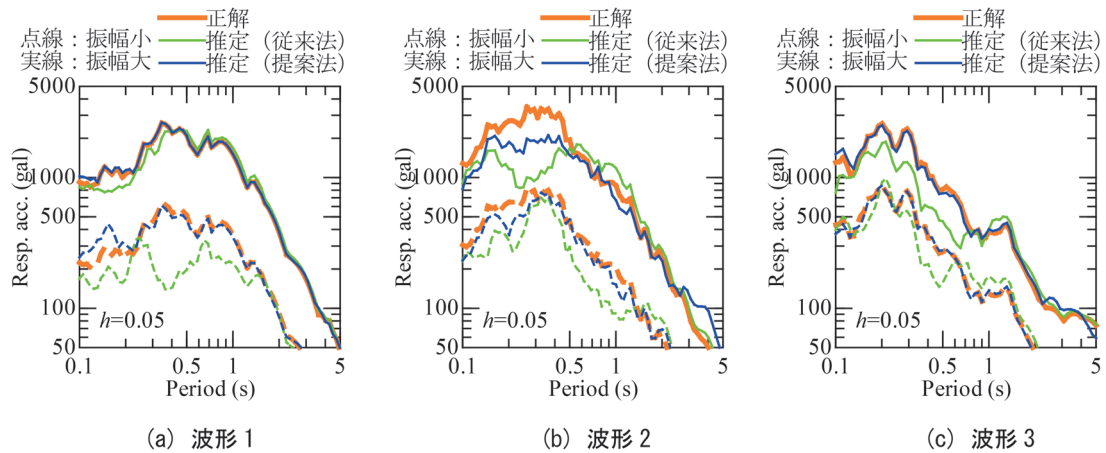


図8 基盤地震動の推定結果の例（弾性加速度応答スペクトル）

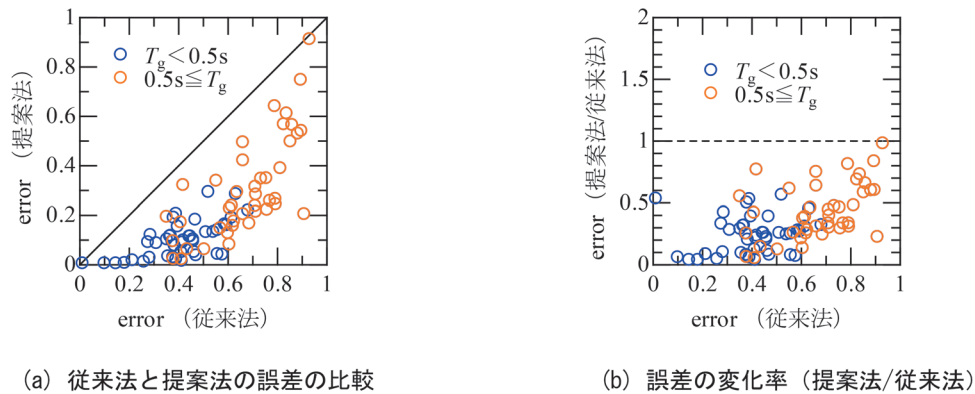


図9 基盤地震動の適合度の算定結果

その結果、今回検討を行ったすべてのケースにおいて、提案手法を用いることで、より適切な基盤地震動を推定できることを確認した。以前から指摘されているように、周波数領域の手法では地盤のひずみレベルが大きな場合への適用には課題が残されている。その一方で提案手法は逐次非線形解析を用いているため、このような大ひずみ領域に対しても適切な結果が得られる。そのため提案手法は、地盤の非線形化の影響を適切に考慮した基盤地震動の推定手法として一定の有効性、適用性を有していると言え、地点毎の設計地震動、基盤地震動を高い信頼性で評価する際の基本的な手法としての活用が期待される。

## 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），丸善出版，2012
- 2) 坂井公俊，室野剛隆，佐藤勉：近年の地震記録に基づいたL2地震動の考え方とその設定方法，鉄道総研報告，Vol.25，No.9，pp.5-12，2011
- 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, Berkley, 1972.
- 4) 中村晋，吉田望：周波数領域での地盤の非線形地震応答解析の精度と課題，応用力学論文集，Vol.7，pp.823-831，2004
- 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) 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
- 7) 野津厚：時間領域における基盤入射波推定法の再考，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.74，No.4，pp. I\_160-I\_167，2018
- 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：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
- 10) Ricker, N.: The computation of output disturbances from

- amplifiers for true wavelet inputs, Geophysics, Vol.10, pp.207-220, 1945.
- 11) 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
  - 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) 坂井公俊, 井澤淳: 表層地盤の強度に関する指標を橋梁・高架橋の降伏震度と同次元で表現する方法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4, pp. I\_290-I\_300, 2020
  - 14) 坂井公俊: 逐次非線形解析に基づく基盤入力地震動の推定手法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.5, pp.23-28, 2021
  - 15) 坂井公俊: 地盤の地震時挙動を等価な 1 自由度系で評価する際の刺激係数考慮に関する一考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.77, No.4, pp.I\_670-I\_679, 2021