

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 27 日現在

機関番号：92503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560595

研究課題名(和文) 広域強震動予測の為に表層地盤非線形増幅特性のモデル化と地域防災・国土保全への反映

研究課題名(英文) Nonlinear amplification characteristics modeling of surface ground for broad band strong ground motion prediction

研究代表者

池田 隆明 (Ikeda, Takaaki)

飛鳥建設株式会社技術研究所・その他部局等・部長

研究者番号：40443650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：断層モデルによる強震動予測では、地震の相似則と震源スペクトルの相似則に基づき経験的または統計的グリーン関数の線形な重ね合わせで地震動が合成されるため、軟弱地盤では特に短周期領域で合成波形が過大評価となる。研究代表者らは経験的グリーン関数法と地盤の非線形地震応答解析を組み合わせた詳細な方法を提案しているが、詳細な地盤特性が必要であるため広域地震動予測のような評価地点が多い場合には困難を伴う。そこで、予測対象を応答スペクトルに絞り、評価地点のAVS30と断層モデルから直接得られた地震動から地盤の非線形性を考慮した応答スペクトルが評価できる簡便な方法を構築し、実観測記録を用いて有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Strong ground motion prediction methods using fault models such as the empirical and stochastic Green's function methods overestimate short-period ranges at sites on soft soils because it cannot consider a nonlinearity of the soil. The principal investigators proposed a detailed method that combined the empirical Green's function method and dynamic response analysis considering soil nonlinearity but had difficulties in the case where there were numerous study sites because detailed data was required on soil characteristics. Then, the authors focus on the prediction of response spectrum, propose a simple method for estimating response spectrum considering the nonlinearity of soil using the natural period at the study site and verify the effectiveness of the method using observation records.

研究分野：地震工学

キーワード：地震動 応答スペクトル 表層地盤 非線形特性 地域防災 AVS30 増幅特性 断層モデル

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震では、震源破壊の指向性効果と地盤構造の影響により、1秒程度の周期が卓越するパルス波形が生じ、多くの構造物に被害を与え、地震動評価では最大値だけではなく、振動数特性の考慮が重要であることが指摘された。

また、2011年東北地方太平洋沖地震は、極めて広い範囲が震源となり、各地に特徴的な地震動を引き起こした。南海トラフ沿いや中央構造線に周辺では、同様の規模が大きい地震が発生する可能性が高く、これまで想定されていなかった地震を含めた地震防災対策の見直しが必要とされた。

地震動は「震源」、「伝播経路」、「サイト」の3特性に支配されるため、これらを適切に考慮することにより特徴的な地震動の再現が可能となる。地震動予測の研究は、断層パラメータの相似則等の研究とともに1970年頃から始まり、1995年兵庫県南部地震を契機に研究が推進され、震源のモデル化手法も提案され、過去に発生した地震に適用しその有効性が検証されてきた。しかし、これらの検証は震源モデルや震源破壊の指向性効果のモデル化に重点が置かれ、表層地盤の増幅特性のモデル化についての議論は避けられてきた。

そこで研究代表者らは、非線形性を含んだ表層地盤の増幅特性のモデル化に着目し、既往の地震動評価手法と地盤の非線形地震応答解析手法を組み合わせることにより、増幅特性を考慮した地震動予測ができることを示した。

しかし、広域地震動予測の場合、全ての対象地点で非線形地震応答解析を行うことは現実的ではなく、目的に応じた精度を有する簡易な方法により、非線形増幅特性を考慮する手法が要求された。

2011年東北地方太平洋沖地震では、強い地震動は極めて広域にわたり、巨大地震に対する適切な準備(地震防災計画・対策)の必要がクローズアップされた。地震防災計画の策定の基礎となる広域地震動予測では、表層地盤の増幅特性を最大地震動の増幅係数で与える場合が多いが、地点毎に与えられる増幅係数は単純でわかりやすい反面、周波数特性や強震時の非線形特性が考慮されていないという課題があった。特に、構造物被害は地震動の振動数特性に影響を受けるため、これらを考慮した方法が必要となる。

2. 研究の目的

将来発生する地震に対して、社会生活に影響を及ぼさないレベルまで構造物の被害を軽減するための予測・評価・対策技術確立することが研究の最終目的である。そのためには、想定外地震を生じさせないように想定地震の設定精度を高めるとともに、被害に直結する地震動の予測精度を向上させ、ハード面(耐震設計の高度化や耐震補強等)とソフト面(防災計画の立案等)の対策を押し進め

ていく必要がある。

本研究は、地震動の予測精度の向上を目的とし、地震動に大きく影響を及ぼす表層地盤の非線形増幅特性のモデル化手法を提案するものである。個別サイトへの対応方法は別途研究を進めているため、ここでは広域地震動予測を対象に構造物被害と関連の高い応答スペクトルの評価精度の向上を目指す。非線形増幅特性は国土数値情報から定まる表層30mの平均せん断波速度( $V_{s30}$ )と関係づけ、広域サイトにおける適用性を向上させる。また、非線形増幅特性には、表層地盤の液状化の影響を考慮できるように補正係数特性の導入を試みる。

3. 研究の方法

対象地点の地盤特性と入力地震動レベルからスペクトル補正関数を評価し、波形合成法から算出した地盤の非線形性を考慮しない応答スペクトルに乗じることにより、地盤の非線形性を考慮した地震動の応答スペクトルを評価する。式(1)に評価方法を示す。

$$S_{NL}(t_{np}) = C(t_{np}) \times S_L(t_{np}) \quad (1)$$

$S_{NL}(t_{np})$ ,  $C(t_{np})$ ,  $S_L(t_{np})$ は地盤の非線形性を考慮した応答スペクトル、スペクトル補正関数、地盤の非線形性を考慮しない応答スペクトルである。

スペクトル補正関数は、地盤の非線形性を考慮した地震動の応答スペクトルを地盤の非線形性を考慮しない応答スペクトルで除したものである。図1に詳細法の考え方をベースに地盤の非線形性を考慮した地震動と考慮しない地震動との関係を模式的に示す。

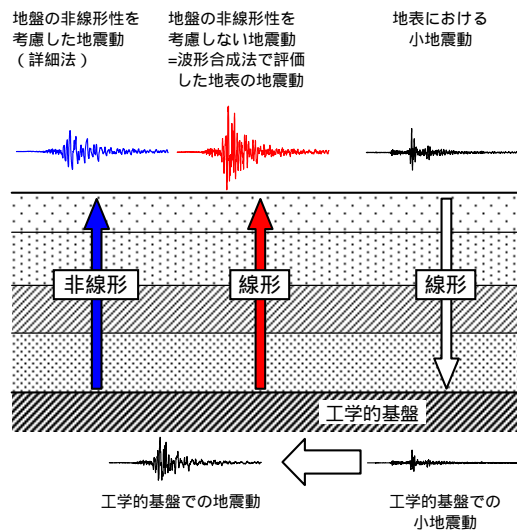


図1 地盤の非線形性を考慮しない場合と考慮した場合の地震動の関係

地盤の非線形性を考慮した地震動は、詳細法の手順の通り工学的基盤において波形合成法から算出された地震動を入力地震動として、地盤の非線形地震応答解析により算出される。地盤の非線形性を考慮しない地震動は、同じ地震動を入力地震動として、地盤の線形地震応答解析により算出される。そのた

め、スペクトル補正関数は、同じ地盤を対象に同じ入力地震動を用いた地盤の非線形地震応答解析から得られた応答スペクトルを線形地震応答解析から得られた応答スペクトルで除することにより算出することができる。

スペクトル補正関数は地盤特性と入力地震動レベルにより異なると考えられることから、地盤モデルと入力地震動レベルを複数設定し、線形および非線形地震応答解析からスペクトル補正関数を算出し、統計処理によってモデル化する。また、入力地震動のスペクトル特性にも影響を受ける可能性があるため、異なるスペクトル特性を有する入力地震動を用いて検討を行う。

スペクトル補正関数は地盤の固有周期で無次元化して表現する。従って固有周期を評価するため検討対象地点のS波速度構造などが要求される。地盤調査が行われていない地点の震動特性を推定する手段として、表層のS波速度を利用する手法の研究が行われ、地盤の増幅特性は地表から深さ30mまでの平均S波速度(AVS30)と相関があることが明らかにされている。AVS30は容易に設定可能で、地盤の増幅特性を簡便に表現することができ、その精度も期待できることから、地盤特性(ここでは固有周期)の評価指標としてAVS30を使用する。

地盤の非線形性の影響は入力地震動レベルに依存するため、スペクトル補正関数のモデル化には入力地震動の指標が必要となる。しかし、簡便法では既知の情報は波形合成法によって評価された地盤の非線形性を考慮しない地表の地震動のみであり、工学的基盤での入力地震動レベルは未知である。そこで、地盤の非線形性を考慮しない地震動から算出された応答スペクトルの最大値を入力地震動レベルの評価指標として使用する。

#### 4. 研究成果

スペクトル補正関数は図2のように単純化し、入力地震動レベルと地盤特性に影響を受けない $T_1$ と $CA_2$ は $T_1=0.9$ 、 $CA_2=1.1$ と固定し、 $T_2$ および $CA_1$ を入力地震動レベルと地盤特性に依存した関数として設定する。

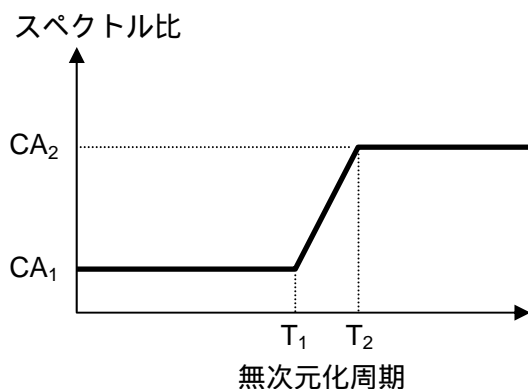


図2 無次元化周期を用いたスペクトル補正関数のモデル化

$T_2$ と $CA_1$ は式(2)、(3)で定義する。

$$T_2 = a1 \times PVRS_{max} + b1 \quad (2)$$

$$CA_1 = a2 \times PVRS_{max} + b2 \quad (3)$$

$a1$ 、 $a2$ 、 $b1$ 、 $b2$ は地盤特性、入力地震動特性に依存する係数であり、 $PVRS_{max}$ は地盤の非線形性を考慮しない場合の応答スペクトルの最大値である。

提案した簡便法を実地震に適用し、その有効性の検証を行う。対象は地盤が軟弱で通常の地震動評価手法では過大評価する地点である。

図3に提案法により地盤の非線形性を考慮した応答スペクトルを観測波形の応答スペクトルと地盤の非線形性の影響を考慮しない応答スペクトルと比較して示す。

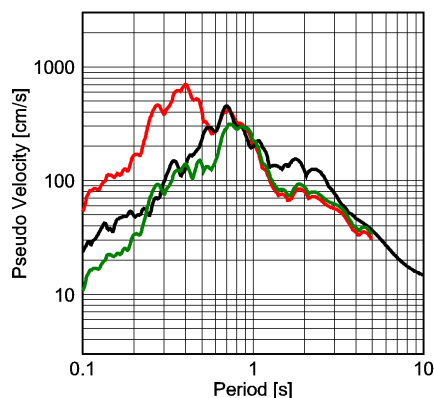


図3 擬似速度応答スペクトル(h=0.05)の比較

黒色が観測記録、赤色が地盤の非線形性を考慮しない地震動、緑色が提案手法を用いて地盤の非線形性を考慮した地震動である。提案法を用いて地盤の非線形性の影響を考慮することにより、短周期領域における過大評価が改善され、観測波形の応答スペクトルとの一致度が向上している。そのため、提案法は簡便ながら地盤の非線形性を評価できる方法であることが確認された。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

池田隆明, 小長井一男, 片桐俊彦, 清田隆: 2011年東北地方太平洋沖地震で液状化が発生した東京都江東区新木場の液状化強度の推定, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No. 4, pp.I\_138-I\_151, 2013. 【査読】

紺野克昭, 西川貴文, 藤野陽三: 2011年東北地方太平洋沖地震における不整形な立面・平面を持つ免震構造物の免震層における並進・回転成分の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.13, No.3, pp.3\_14-3\_29, 2013. 【査読】

池田隆明, 小長井一男, 釜江克宏, 入倉孝次郎, 清田隆, 目黒公郎: 断層モデルと地盤の非線形性を考慮した簡便な強震動予測手法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No. 4, pp.I\_252-I\_262, 2014. 【査読】

佐藤京, 西弘明, 池田隆明, 高瀬裕也, 小長井一男: 北海道での地震動評価と道路橋梁構造物の被害推定, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No. 4, pp.1\_1078-1\_1088, 2014.【査読】  
西川貴文, 紺野克昭, 藤野陽三, 中山雅哉: 高層免震建物における既設ネットワークを利用した高密度振動観測システムとデータの利活用, 日本地震工学会論文集, Vol. 14, No.2, pp. 2\_1-2\_15, 2014.【査読】  
佐藤京, 池田隆明, 高瀬裕也, 西弘明, 小長井一男: 地盤凍結が地表面地震動に与える影響, 第 34 回地震工学研究発表会講演論文集, C24-670, 2014.  
池田隆明, 釜江克宏, 小長井一男, 高瀬裕也: 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動生成域を対象とした地震規模の推定, 土木学会論文集 A1, Vol.71 (2015), No. 4, 2015.【査読・搭載決定】

Ikeda T., Konagai, K., Kamae, K. and Irikura, K.: Strong ground motion prediction method using fault model reflecting nonlinear site effect, Proc. of the 2ECEES, No. 366, 2014.【査読】

Sato, T., Nishi, H., Ikeda, T., Takase, Y. and Konagai, K.: Strong ground motion estimation in hokkaido area and damage estimation of the road bridge structures, Proc. of the 2ECEES, No. 1024, 2014.【査読】

Ikeda, T., Konagai, K., Kamae, K. and Irikura, K.: Simplified strong ground motion prediction method for reflecting nonlinear site effect using fault model Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2015.【査読・搭載決定】

池田隆明, 釜江克宏, 小長井一男, 高瀬裕也: 2014 年長野県北部の地震(Mj6.7)の震源のモデル化, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, 2015.【搭載決定】

[学会発表](計 6 件)

池田隆明, 小長井一男, 片桐俊彦, 清田隆: 2011 年東北地方太平洋沖地震で液状化が発生した東京都江東区新木場の液状化強度の推定, 第 32 回地震工学研究発表会, 2012 年 10 月 25 日, 東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)

池田隆明, 小長井一男, 釜江克宏, 入倉孝次郎, 清田隆, 目黒公郎: 広域的な地震動評価のための地盤の非線形性の簡易補正方法, 第 33 回地震工学研究発表会, 2013 年 10 月 25 日, 東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)

池田隆明, 小長井一男, 釜江克宏, 入倉孝次郎: 地盤軟弱における経験的グリーン関数法の適用拡大に関する検討, 地盤の非線形性を考慮するスペクトル補正法の検討, 土木学会年次学術講演会, 2013 年 9 月 4 日, 日本大学生産工学部(千葉県・習志野市) 紺野克昭, 鈴木雄吾, 長尾和之, 宮島章年,

伊藤賢次: 常時微動を用いた高速道路盛土の振動特性の推定, 土木学会年次学術講演会, 2013 年 9 月 6 日, 日本大学生産工学部(千葉県・習志野市)

池田隆明, 釜江克宏, 小長井一男, 高瀬裕也: 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動生成域を対象とした地震規模の推定, 第 34 回地震工学研究発表会, 2014 年 10 月 9 日, まちなかキャンパス長岡(新潟県・長岡市)

池田隆明, 釜江克宏, 小長井一男, 高瀬裕也: 特性化震源モデルを用いた 2014 年伊予灘の地震の強震動シミュレーション, 土木学会年次学術講演会, 2014 年 9 月 11 日, 大阪大学・豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

[図書](計 1 件)

池田隆明: 続・実務で役立つ耐震設計入門(実践編), 第 1 章 地震動の特性と設計地震動の評価, pp.1-32, 土木学会, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 隆明 (Takaaki IKEDA)  
飛鳥建設株式会社・技術研究所・部長  
研究者番号: 40443650

(2) 研究分担者

紺野 克昭 (Katsuaki KONNO)  
芝浦工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 40276457

(3) 連携研究者

清田 隆 (Takashi KIYOTA)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号: 70431814

高瀬 裕也 (Yuya TAKASE)

飛鳥建設株式会社・技術研究所・副主任研究員  
研究者番号: 30515911

(4) 研究協力者

西本 聡 (Satoshi NISHIMOTO)  
土木研究所・寒地土木研究所・グループ長  
研究者番号: 40373211

小長井 一男 (Kazuo KONAGAI)  
東京大学・生産技術研究所・教授(2012)  
横浜国立大学・教授(2013-2014)  
研究者番号: 50126471