

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560498
 研究課題名（和文）非線形系の応答の時間周波数特性と不確定性を考慮した設計地震動の合成及び評価手法
 研究課題名（英文）Ground motion synthesis considering time-frequency characteristics and uncertainty of nonlinear response
 研究代表者
 本田利器（HONDA RIKI）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：60301248

研究成果の概要（和文）：

社会基盤施設の耐震設計においては、地震や構造物の様々なパラメタの不確定性の考慮が重要な課題となっている。本研究では、様々な条件の不確定性や、構造物の非線形挙動を考慮したうえで、合理的な設計入力地震動を合成する方法論を構築した。地震動の時間周波数特性にもとづく表現方法を提案した。また、想定する地震動の集合を設定し、その集合を代表する波形を合成するという手法により設計地震動を設定する手法も開発した。

研究成果の概要（英文）：

It is essential to consider the uncertainty of structural and seismic parameters for the seismic design of infrastructure. This research proposed a input ground motion synthesis method that considers uncertainty in various factors and nonlinear behavior of structures. Representation of ground motion based on time-frequency characteristics is presented. The proposed methods first define a set of possible ground motions and then generate the ground motion that represents the set.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：設計地震動、時間周波数特性、不確実性、非線形性、ウェーブレット

1. 研究開始当初の背景

現在、社会基盤施設の耐震設計においては、性能設計の概念が広く導入されるようになっている。解析においても複雑な非線形動的

解析の利用が可能となってきたおり、入力条件に対する感度は高くなっている。そのため、比較的大きい安全率を見込む従来の設計であれば本質的な問題とはならなかった地震

や構造物の様々なパラメタの不確定性も、今後の性能設計においては重要な課題となる。一方、強震観測体制の充実や、強震動のシミュレーション手法の高度化により、入力波形を精緻化するための環境も整備されつつあるといえる。したがって、入力地震動の設定においては、これらの情報を考慮した上で合理的な形で明示することが求められる。従来、設計入力地震動を規定する際には、応答スペクトルによる表現が広く用いられてきており、時刻歴波形の作成においても、フーリエ変換を用いて応答スペクトルに“フィッティング”して合成した時刻歴波等が用いられてきた。

しかし、これらの手法では、構造物の非線形挙動を十分に考慮しているとは言えず、対象を非線形系に拡張するための理論的根拠が希薄である。近年では、非線形系の応答スペクトルの活用も試みられてきているが、時間的な変化に対する考慮は十分ではない。また、考慮されている地震動のばらつきや、それが非線形系の応答におよぼす影響についての定量的な指標の検討も十分ではない。したがって、これらの問題をふまえた入力地震動特性の表現手法及び波形合成手法が求められている。

2. 研究の目的

非線形系の入力地震動を合理的に表現するための考え方として、時間周波数特性の考え方を明示的に取り入れた方法を提案する。また、それに基づき、入力地震動を実際に合成する手法の開発も行う。さらに、そのように合成された波形の有効性を検証し、その波形の入力地震動としての性能を定量的に評価する手法も開発する。

3. 研究の方法

本研究では、設計入力地震動を非線形系の応答時刻歴の時間周波数特性を用いて規定し、それに基づく入力波を合成し、その妥当性を定量的に示す、という手法を提案することを目的とする。そのための検討内容は、(1)適切な時間周波数特性の表現手法の構築、(2)非線形問題としての波形合成手法の設定とその計算手法の開発という構成になる。以下にそれぞれについて述べる。

(1)時間周波数特性を表現するための手法について検討する。強震動記録や強震動シミュレーションにより得られた波形などを対象に時間周波数特性を算出し、時間周波数空間での解像度や、波形合成に利用する場合の利便性、耐震設計で考慮すべき地震動特性との整合性等について検討する。

与えられた時間周波数特性に基づき時刻

歴波形を合成する手法について検討する。線形系が対象の場合、応答の周波数特性を伝達関数で除し、逆フーリエ変換することで入力波を求めることができる。本研究では、研究代表者らが開発した手法に基づき、ウェーブレット変換を用いることで、時間周波数領域においてこれに対応する関係を導出し、線形系を対象とした場合に時間周波数特性にもとづいて入力波を合成するための手法を開発する。

(2)入力波や構造パラメタ等のばらつきがある場合を想定し、入力地震動の特性（非線形系の応答の時間周波数特性）を設定する手法の開発を行う。様々な因子のばらつきを大きくとることは、安全側の設計を表現すると考えられる一方、設定する地震動特性を過大にする可能性が高い。ばらつきの程度を変化させることによる、設計入力地震動の有する情報量の変化の分析に基づき、適切な地震動を提示するための手法を構築する。

そのうえで、それらの波形を代表する設計地震動を合成する手法を構築する。本研究では、段階的に波形を修正していくことにより、設計地震動を合成する手法について検討する。

(3)波形合成のための収束計算を効率化し、計算量の縮減のための検討を行う。そのため、遺伝的アルゴリズムや学習理論等のヒューリスティックな手法の導入を検討する。

また、具体的なRC構造物を対象として、非線形動的解析モデルを用いた設計地震動の試算を行い、提案手法の有効性の検討を行う。対象とする地震動波形としては、経験的グリーン関数法等の強震動シミュレーション手法においてパラメタにゆらぎを与えて生じる多数の地震動や、多数の強震記録をスペクトルフィッティングして得られる地震動などを用いることとする。提案手法により、これらの波形を代表する設計地震動を合成して、その設計地震動としての性能を、上記の動的解析モデルを対象としたシミュレーションで検討する。その結果等に基づき、実設計への適用性の検討を行う。

4. 研究成果

(1)時間周波数特性の表現手法について時間周波数特性を表現するための手法の検討としての短時間フーリエ変換、非定常パワースペクトル、ウィグナー分布、ウェーブレット変換等の手法の有用性を比較し、構造物系の非線形応答を考慮して入力波形合成をする際に解析信号ウェーブレットを用いることを提案し、その有効性を検証した。

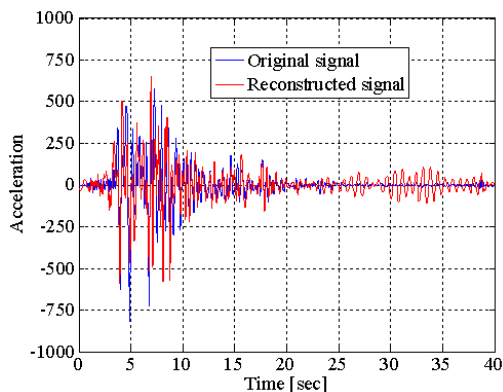
提案する解析信号ウェーブレットを用いたウェーブレット変換がフーリエ変換と同様の性質を有するため、波形合成への利用が容易であることなどが示された。

解析信号ウェーブレットを用いた離散ウェーブレット変換は、フーリエ変換が持っている上記の特長と同様の特長を持っている。解析信号ウェーブレットは shift invariance 性を有している。そのため、ウェーブレット係数 $a_{j,k}$ を、絶対値と偏角を用いて

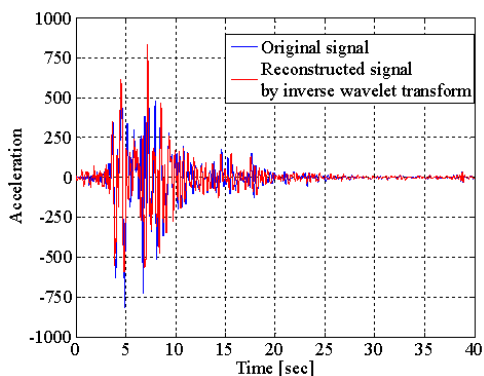
$$a_{j,k} = |a_{j,k}| e^{i \arg(a_{j,k})}$$

と表すとき、 $|a_{j,k}|$ はウェーブレット基底の受け持つパワーを、 $\arg(a_{j,k})$ は基底の回転を表すことになり、フーリエ変換と同様の表現をすることができる事が分かる。

そのため、時間的に局在する範囲における位相特性にノイズを加えて新しい波形を合成することなどが可能となる。



(a) フーリエ変換による波形



(b) 提案手法による波形

図 フーリエ変換と提案手法により位相特性にノイズを与えて合成された時刻歴の比較

また、解析信号ウェーブレットは正規直交系をなすという点においてもフーリエ変換と同様の使い勝手を有していると言える。

フーリエ変換の利点として、伝達関数のフーリエ変換を用いて応答の出力のフーリエ変換を算出できることが挙げられる。ここでは、提案するウェーブレット変換においても、同様の利点を用いることが出来ることを示した。

フーリエ変換を用いて応答の出力のフーリエ変換を算出できることが挙げられる。ここでは、提案するウェーブレット変換においても、同様の利点を用いることが出来ることを示した。

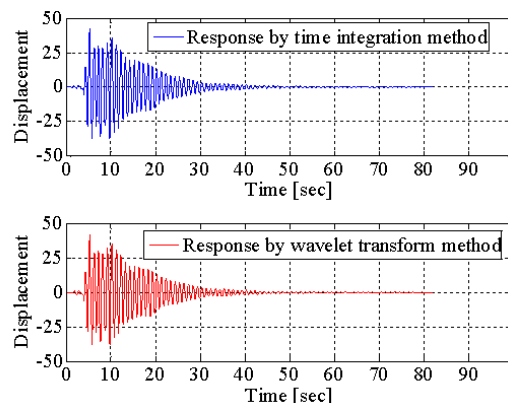


図 フーリエ変換と提案手法により合成された非線形系の応答時刻歴の比較

時間周波数空間上での解像度、利便性、計算量、計算手法の安定性などを考慮した比較に基づき、本研究の目的に適切な方法として解析信号ウェーブレット変換を選定することとした。

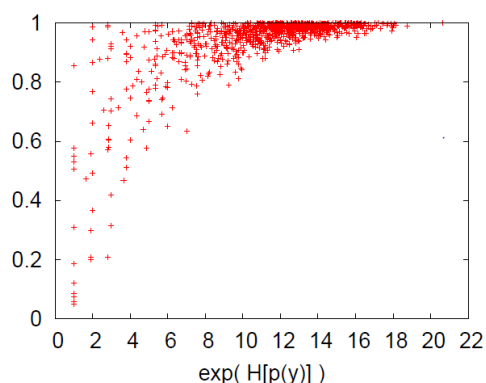
また、選定された同手法を用いて、規定される地震動の特性に基づき時刻歴波形を合成する手法について検討した。非線形挙動をする構造系は、伝達関数を有しないため、収束計算を伴う近似的評価が必要となる。この際、時間周波数特性を用いて、周波数特性だけではなく時間的変化も考慮することで、高い精度で近似を可能とする手法を提示し、その性能を波形合成手法においても示した。

また、入力波や構造パラメタ等に不確実性がある場合に、合成された波形や観測された強震動記録の性能を定量的に比較するための手法として、構造物の非線形挙動を考慮した複数の指標を組み合わせて用いる手法を考案した。

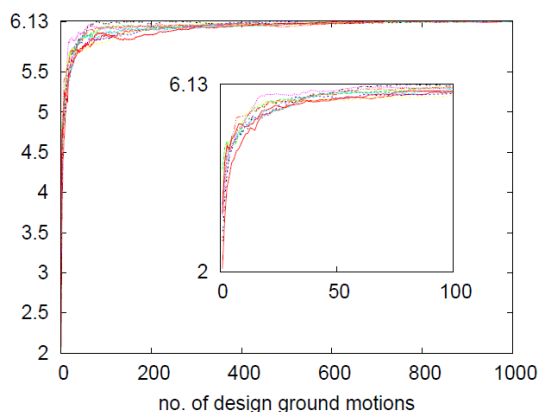
(2) 地震動の特性を規定する特徴指標の有効性の検証のための手法として、その地震動で設計された構造系が損傷する確率が、想定された値を上回らない確率という概念を導入した。そのうえで、それを検証するために、相互情報量を用いた定量化手法を提案した。入力波や構造パラメタ等のばらつきを想定した数値シミュレーションにより、提案手法が、従来から広く用いられている相関係数等よりも有効な指標であることを示した。

また、複数の地震動を考慮する場合の、設計地震動としての有用性を効率的に定量化する指標としての情報エントロピーの有用性を検証するため、仮想的な設計条件の下で、

設計地震動の集合の設定と安全性の算定、およびその設計地震動の集合が有する情報量の算出を行い、設計の安全性と情報量の関係を検証した結果、設計地震動の集合が有する情報量と設計の安全性には相関性があることを示した。また、情報量の増加と安全性の向上の相関性も示され、設計地震動として考慮すべき地震動の選定における情報エントロピーの有効性が検証された。



図：設計地震動の集合が有する応答値の情報エントロピーと、損傷発生確率の関係。



図：考慮する地震動の数とそれらの波形の有する情報エントロピーの関係。地震動の数が増加すると、情報エントロピーの値が飽和していることがわかる。

さらに、上記の考え方に基づく、設計地震動の加工手法として、ウェーブレット変換の有用性の比較検討もを行い、直交性を有する複素関数ウェーブレットを用いることで効率的な波形合成が可能となることを示した。

(3) 効率的に目標とする波形を効率的に合成する方法について検討した。波形合成には、

候補となりうるさまざまな地震動の地震動特性を考慮に入れた波形の逐次的な修正が有効であることを考慮し、想定される地震動を学習しつつ波形を逐次的に変化させていく手法を考案し、その有効性を検証した。

学習する対象とする波形は、最も「近い」波形を選出する。そのための距離の定義として、KL ダイバージェンスの概念を活用することの妥当性を定量的に示した。

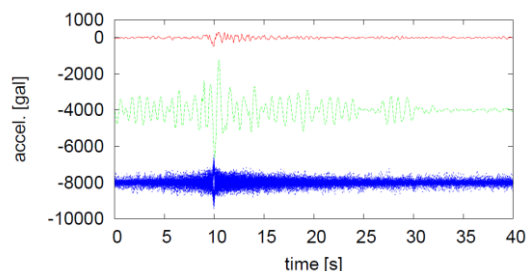


図 元の観測波形(上段)、合成地震動の時刻歴波形(中断)及び学習の対象とした波形(対象とした波形を重ねてプロットしたもの。)

また、実際の状況を想定したシミュレーションとして、経験的グリーン関数法により合成された波形や、設計用スペクトルにフィッティングした波形に基づく地震動の合成を試みた。これにより、想定すべき不確実性を考慮した波形などを対象に、提案手法の妥当性を多自由度非線形構造系の設計に用いるための地震動を合成し、提案手法の適用性を検証した。この結果、提案手法は、実際の設計に設計可能な地震動を合理的に合成することが示され、十分な実用性を有する手法であることが確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

1. 宮本崇, 本田利器, 非線形応答値を特徴指標とする探索的な設計地震動の合成, 応用力学論文集, 査読有, Vol. 12, pp. 601-610, 2009
<http://www.jsce.or.jp/library/open/proc/maglist2/00561/index.htm>
2. 宮本崇, 本田利器: 非線形応答値を特徴指標とした, 構造系に与える影響の観点からの地震動の類似性評価, 土木学会地震工学論文集, 査読有, vol. 30, pp. 88-96, 2009

<http://www.jsce.or.jp/library/open/proc/maglist2/00578/2009/mg01.htm>

3. Riki Honda and Tauqir Ahmed: Design Input Motion Synthesis considering the Effect of Uncertainty in Structural and Seismic Parameters by Feature Indices, Journal of Structural Engineering, ASCE, 査読有, Vol. 137, 391-400, 2011
4. DOI:
10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000085
5. 宮本崇・本田利器: 地震動の集合が有する設計地震動としての情報量の定量的評価, 土木学会, 応用力学論文集, 査読有, Vol. 13, pp. 577-584, 2010
<http://www.jsce.or.jp/library/open/proc/maglist2/00561/index.htm>
6. 宮本崇・本田利器: 地震動の集合が有する設計地震動としての情報量の定量的評価, 第 13 回地震工学シンポジウム論文集, 査読無, Vol. 13, pp. 3065-3072, 2010 (URL 無)
7. Tauqir Ahmed and Riki Honda: Performance of design input motions selected using feature indices to represent possible ground motions, 第 13 回地震工学シンポジウム論文集, 査読無, Vol. 13, pp. 1965-1972, 2010 (URL 無)
8. Tauqir Ahmed and Riki Honda: Performance of nonlinear response of structures as feature indices for the selection of design ground motions, 土木学会論文集 A1 (構造工学・地震工学), 査読有, Vol. 68, 2012 (印刷中)
9. 宮本崇, 本田利器: 非線形応答値を特徴指標とした探索的な設計地震動の合成手法の鉄筋コンクリート橋脚モデルに対する適用性の考察, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol. 67, pp. 439-449, 2011
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejam/67/0/_contents/-char/ja/
10. 宮本崇, 本田利器: 設計地震動の集合が有する情報量に基づく構造物の安全性評価, JCOSSAR 2011 論文集, 査読有, Vol. 7, pp. 425-431, 2011 (URL 無)
11. Tauqir A. and R. Honda : Efficiency of design ground motion representing ground motions

generated by fault model in terms of nonlinear response values, JCOSSAR 2011 論文集, 査読有, Vol. 7, pp. 432-439, 2011 (URL 無)

[学会発表] (計 8 件)

1. 宮本崇・本田利器, 特徴指標を用いた探索的な設計地震動の合成, 理論応用力学講演会, 平成 21 年 6 月 10 日, 日本学術会議
2. 宮本崇・本田利器, 非線形応答値を特徴指標とした入力地震動の記述手法の提案, 第 65 回土木学会年次学術講演会, 2010 年 9 月 3 日, 北海道大学
3. 宮本崇, 本田利器, 非線形応答に与える影響の観点に基づく東北地方太平洋沖地震における地震動特性の分析, 土木学会, 第 66 回年次学術講演会, 平成 23 年 9 月 7 日, 愛媛大学
4. A. Tauqir and R. Honda, Quantification of effectiveness of indices for selection of design ground motions by using mutual information, 土木学会, 第 66 回年次学術講演会, 平成 23 年 9 月 7 日, 愛媛大学
5. 宮本崇, 本田利器, 特徴指標の情報エントロピーに基づく地震動の性能照査における有用性の定量化, 第 31 回地震工学研究発表会, 平成 23 年 11 月 17 日, 東京大学生産技術研究所
6. Tauqir Ahmed and Riki Honda, Performance of nonlinear response of structures as feature indices for the selection of design ground motions. 第 31 回地震工学研究発表会, 平成 23 年 11 月 17 日, 東京大学生産技術研究所
7. Tauqir A. and R. Honda, Efficiency of design ground motions synthesized in iterative modification utilizing multiple indices associated with nonlinear response of structures, 9th CUEE and 4th ACEE joint conference, 平成 24 年 3 月 7 日, 東京工業大学
8. Riki Honda and PremPrakashKhatrri, Discrete Analytic Signal Wavelet Decomposition for Phase Localized in Time-Frequency domain for simulation OF ground motions with stochastic

property in phase spectrum, 9th CUEE
and 4th ACEE joint conference, 平成
24年3月7日, 東京工業大学

[図書] (計0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0 件)

○取得状況 (計0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本田 利器 (Honda Riki)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号 : 60301248