

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420576

研究課題名(和文)地震動特性にパラメータ変動を考慮した耐震設計のための数値実験システム

研究課題名(英文) Numerical experiment system for seismic design with considering parameter variation of seismic characteristics

研究代表者

山川 誠 (Makoto, Yamakawa)

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：50378816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：建築構造物の設計において、特定の地震動に対してのみ安全性が保たれるような設計は望ましくなく、不確定性への配慮が必要となる。このような設計上の課題に対し、構造最適化手法による数理的な設計手法の導入からの解決を試みた。パラメータ変動幅が規定される不確定性解析において、設計解の最悪応答の近似精度を保証する方法を提案し、ロバスト最適設計法への適用性について調べた。

研究成果の概要(英文)：In the practical design process, uncertainty in the parameters should be appropriately taken into account. Earthquakes should be considered as uncertain phenomena. Robust design method is known as an effective design method under such uncertainties, where a design is found to be insensitive to environment and other uncontrollable factors. Worst-case design of structures is a popular approach as a robust design method, where the objective function and/or the constraints are assigned to the worst values of the structural responses. However, predicting the exact extremes from small samples is difficult in general. Hence, we have proposed use of the approximately worst value instead of the exact worst value. We can predict and control more accurately the behavior by the order statistics with RS. We could successfully apply the approach to seismic design problems linking with a prescribed accuracy. The result indicates a new aspect of the proposed robust design method.

研究分野：建築構造

キーワード：耐震設計 地震動 不確定性 構造最適化 動的解析 ロバスト性 ランダムサンプリング 順序統計

1. 研究開始当初の背景

従来の設計での想定レベルを超える断層近傍・長周期地震動の発生、危険性が指摘されている。このような高レベル地震動への対策は重要な社会的要請として認識されている。高レベル地震動への対策として、地盤振動の研究者からは、予測地震動に基づく耐震設計への転換が主張されている。設計入力地震動に予測地震動を直接扱うことの是非について見解は分かれるものの、パラメータ変動を考慮した上で、予測される地震動特性の影響を反映した耐震設計が望ましいという点については、多くの関係者が認めるところである。しかし、不確定性を扱うための指針や設計法が十分に整備されていない現状で、高度な工学的判断を構造設計の実務家に性急に求めることは現実的とは言えない。

このような不確定性を陽に考慮した設計として、ロバスト設計が知られている。地震動特性の不確定性を考慮したロバスト設計の研究として、周波数応答領域の解析に基づくロバスト性評価手法などが提案されている。しかし、現行の設計体系への応用においては、各種非線形性を考慮した時刻歴応答解析に基づく設計法が必要である。最悪ケース解析において時刻歴応答解析を扱うには各種の問題点が存在することが知られており、加えて正確な最悪値を求めること自体に、実務設計上の要求は大きくないという背景がある。以上のように、十分な知見がなく、根拠の曖昧なパラメータ変動幅で規定される問題を迅速に解くことが求められる。

2. 研究の目的

高レベル地震動が発生した場合、下層部への変形集中・累積現象発生の危険性が指摘されている。このような現象に対して、制振装置の設置だけでは十分な対策とならず、例えば、特定層への変形集中を緩和するような、弾性材の必要性が指摘されている。地震動特性の不確定性に対して有効と予想されるような対策について、定量的な評価を行うための方法論は未だ確立されていない。この種の構造計画上のスタディに有効な数値実験システムの実現に必要な次の各項目を研究対象とした。

(1) 時刻歴応答解析に基づく耐震設計問題に対して、最適性条件を満たす点への収束性が理論的に保証され、かつ実用的にも性質の良い設計解を少ない解析回数で安定して発見できる確率的最適化法を開発する。

(2) (1)の方法を拡張し、与えられた地震動特性のパラメータ変動に対しても、設計条件の充たされる確率が予め決められた水準以上になることを満たし、精度の保証された近似最適解を得ることができるよう手法を提案する。

(3) (1),(2)の成果に基づいて、地震動特性にパラメータ変動を考慮した耐震設計のための数値実験システムとして統合化し、資料を整備する。

3. 研究の方法

本研究では、不確定性を伴う地震動に対する合理的耐震設計法の構築、および高レベル地震動に対して有効な構造形式の定量的検討を行う。これらの実現のために、以下を行った。

(1) 不確定性を伴う地震動に対する数理的設計理論の構築

最悪ケース設計はロバスト設計の一種であり、「ある範囲内でモデルパラメータに変動が生じた場合の、最悪のケースにも設計条件が充たされるという要求を満たす」設計である。パラメータ変動を伴う地震動に対する時刻歴応答が設計条件として与えられるような耐震設計問題についても、このような手法・枠組の拡張が有効である。ただし、実用的な要求に対しては、保守的過ぎる設計となることがある。

この課題を解決するために、設計条件の充たされる確率が予め決められた水準以上であることを要求するように条件を緩め、さらにパラメータ変動を伴う地震時応答に対して、サンプリング・順序統計量に基づく確率的方法により、応答における不確定性の効率的な評価法を提案する。

(2) 設計問題の分析と性質を利用可能な手法

時刻歴応答を考慮した最適設計問題のような複雑な系に対しては、確率的方法の適用が有効である。実際の耐震設計では、地震動の不確定性に影響を受ける設計条件と同時に、不確定性を考慮する必要のない設計条件が含まれる。

以上の観点から、実際的な耐震設計における設計条件について、不確定性・平滑性(微分可能性)・凸性等の有無から分析・分類し、各設計条件が持つ性質を利用して、提案法の効率改善を行う。

(3) 高レベル地震動に対する安全性確保に有効な構造形式の検討

地震動予測に必要とされる各種パラメータの変動幅について、現状では十分な知見が得られていない。将来的に知見が蓄積された段階で、そのような成果を利用できるような不確定性モデルへの依存性の少ない定式化を行うと同時に、モデルパラメータ、とりわけ地震動の周期特性の変動幅についてのパラメトリックスタディから、入力における不確定性が応答に与える影響レベルを調べる。

(4) 鋼構造骨組の最適化における逐次局所探索法の終了条件

建築骨組の最適化問題は、規格断面を用いる場合には、離散変数の組合せ最適化問題となり、大域最適解を効率よく求めることは困難となる。静的荷重の作用する鋼構造骨組を対象として、多点スタート局所探索によって、複数の局所最適解を求め、特定の局所最適解へ向かう解の集合を用いた終了条件を提案、検証する。

4. 研究成果

建築構造物の設計において、特定の地震動に対してのみ安全性が保たれるような設計は望ましくなく、不確定性への配慮が必要となる。このような設計上の課題に対し、構造最適化問題としての定式化を行い、数理的な設計手法の導入からの解決を試みた。パラメータ変動幅が規定される不確定性解析において、解の近似精度を保証する方法を提案し、ロバスト最適設計法への適用性について検討した。得られた研究成果はつぎの通りである。

(1) 順序統計理論に基づき、Random Sampling から得られる n 標本の第 k 番目に大きい標本値を調べることで、最悪応答値を所定の精度で見積もることができる。このことを利用して、構造物パラメータおよび地震動特性パラメータに不確定性が含まれる場合の構造物の最悪応答について、第 k 順序統計量から予測可能なことを示した。提案法では、与えられた精度を確率的に満たす最悪応答の予測が可能である。また、応答の分布についての検討も不要である。このような特徴を持つことが、信頼性指標に基づく方法とした場合の提案法の利点である。一方、応答の分布についての情報は、提案法からは得られない。よって、応答の分布に興味がある場合には適さない方法と言える。

(2) 第 k 順序統計量を指標値とした最小化問題を解くことにより、所定の精度で不確定変動に対処できるようなロバスト設計解が得られる。すなわち、与えられた精度で最悪ケース時についての応答値が保証された設計解が得られる。提案法は適用可能な範囲が広く、特に時刻歴応答解析を含め強い非線形性を有する問題を扱うことに適している。数値解析例では、不確定変動の影響を受けやすい中間層の応答を抑えるような設計解が得られた。これは、応答の変動が大きい層に対し、安全率を大きめにとった設計がロバスト設計解として選ばれたと解釈される。

(3) ばね鋼と低降伏点鋼からなる新たな種類の弾塑性ダンパーを開発した。本ダンパーは安定した紡錘型履歴曲線を示し、幾何的非線形性から引張側剛性・耐力が高くなる。塑性論に基づく履歴モデルについての最適化手法に基づくパラメータ推定から、非対称挙動および引張側剛性・耐力上昇効果を表現で

き、かつ容易に実装可能な履歴モデルを提案した。さらに、設計用地震動の振幅を変化させ、ダンパー応答を調べた結果、実験データが得られた変形レベルの範囲内で精度よくダンパーの荷重変形曲線を再現することを確認した。また、PGV が 100cm/s を超える高レベル地震動に対して、ダンパー単体の引張側剛性が増大する性質により建物全体での層剛性が確保され、変形集中が緩和された。

(4) 多点スタート局所探索において、探索途中で得られる解空間の情報を活用するために、探索された局所解の attractor のサイズを用いた終了条件を導いた。このような逐次局所探索法における終了条件の変更により、既往の終了条件よりも解の探索性が改良されることを確認した。また、静的荷重をうける建築骨組の応力制約条件下での最適化問題などの多数の局所最適解がある問題に対して、上記の終了条件の適用性を検証し、一般的に下層の柱が上層に比べて断面積が大きく、合理的な設計解が得られることを確認した。

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 11 件、うち査読付き論文 5 件)

山川誠、大崎純、順序統計量を用いて地震動特性のパラメータ変動を考慮したロバスト最適設計、日本建築学会、構造工学論文集、査読有、Vol.62B、2016、pp.381-386

Makoto Yamakawa, Mitsuki Nihei, Masahiko Tatibana, Kyouzou Hukazawa, Makoto Ohsaki, Takuzo Nakamura and Hiroyuki Yamanouchi, Modeling and simulation of spring steel damper based on parameter identification with a heuristic optimization approach, Journal of Mechanical Science and Technology (Springer), 査読有, Vol.29(4), 2015, pp.1465-1472
DOI: 10.1007/s12206-015-0319-3

山川誠、吉中進、空間構造における TMD システムの順序統計量に基づく確率的最適化法、日本建築学会、構造工学論文集、査読有、Vol.61B、2015、pp.531-536
二瓶光希、立花正彦、山川誠、深澤協三、中村拓造、山内泰之、ばね鋼と低降伏点鋼から構成される弾塑性ダンパーの履歴モデル提案・検討、日本建築学会、構造工学論文集、査読有、Vol.61B、2015、pp. 509-517

古田理恵、山川誠、加藤直樹、荒木慶一、大崎純、組合せ剛性理論に基づく冗長性を考慮したトラス構造物の最適設計法、日本建築学会構造系論文集、査読有、第

699号、2014、pp.583-592

山川誠、大崎純、入力地震動の不確定性に対する第k順序統計量に基づくロバスト最適設計、日本機械学会、最適化シンポジウム講演論文集、査読無、Vol.11、2014、No.2207

谷口悠盛、大崎純、山川誠、建築構造物の最適設計における局所探索法の終了条件、日本機械学会、最適化シンポジウム講演論文集、査読無、Vol.11、2014、No.2208

谷口悠盛、大崎純、山川誠、建築構造物のロバスト最適設計における局所探索法の終了条件、日本建築学会、第37回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、pp.143-146、査読無、2014

山川誠、大崎純、朝山秀一、地震入力と構造特性の不確定性に対する第k順序統計量を用いた最悪応答解析、日本計算工学会、計算工学講演会論文集、査読無、Vol.19、2014、No.F-10-2

田畑正幸、山川誠、立花正彦、深澤協三、二瓶光希、中村拓造、ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーの数値解析モデル提案・検討、日本計算工学会、計算工学講演会論文集、査読無、Vol.19、2014、No.E-4-1

山川誠、大崎純、朝山秀一、パラメータ変動を有する構造最適化の順序統計量による精度評価、日本建築学会、第36回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、pp.173-176、査読無、2013

[学会発表](計17件)

Makoto Yamakawa, Makoto Ohsaki, Worst-case analysis with linear constraints based on the k-th order statistics, Proc. of Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016 (ACSMO 2016), Nagasaki, Japan, Paper No. 118, 2016.5.25

Makoto Yamakawa, Makoto Ohsaki, Robust design optimization based on the k-th order statistics under uncertainty of seismic input, The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, Tokyo, Japan, No. OW1-3-2, 2015.10.14

山川誠、大崎純、第k順序統計量を用いた最悪応答解析に基づくロバスト最適設計、日本建築学会大会学術講演会、2015年9月4日~2015年9月6日、東海大学(神奈川県平塚市)

二瓶光希、田畑正幸、山川誠、立花正彦、深澤協三、中村拓造、山内泰之、ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーのモデルパラメータ推定および最適設計法(その1:モデルパラメータ推定と応答低減効果の検証)、日本建築学会大

会学術講演会、2015年9月4日~2015年9月6日、東海大学(神奈川県平塚市)
田畑正幸、山川誠、二瓶光希、立花正彦、深澤協三、中村拓造、山内泰之、ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーのパラメータ推定および最適設計法(その2:最適化手法に基づくダンパー設計法)、日本建築学会大会学術講演会、2015年9月4日~2015年9月6日、東海大学(神奈川県平塚市)

山川誠、大崎純、入力地震動・構造特性の同時不確定性に対する第k順序統計量を用いた最悪応答解析、第63回理論応用力学講演会、2014年9月26日~2014年9月28日、東京工業大学(東京都目黒区)

田畑正幸、山川誠、立花正彦、山内泰之、二瓶光希、深澤協三、中村拓造、最適化手法に基づくばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーによる地震応答低減、第63回理論応用力学講演会、2014年9月26日~2014年9月28日、東京工業大学(東京都目黒区)

新治若奈、山川誠、吉中進、空間構造におけるTMDシステムの順序統計量に基づく確率的最適化法、第63回理論応用力学講演会、2014年9月26日~2014年9月28日、東京工業大学(東京都目黒区)

山川誠、大崎純、構造特性の不確定性に対する第k順序統計量を用いた最悪応答解析、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月12日~2014年9月14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

谷口悠盛、大崎純、山川誠、ランダム探索と局所探索を用いた建築骨組のロバスト最適設計、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月12日~2014年9月14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

田畑正幸、山川誠、立花正彦、深澤協三、二瓶光希、中村拓造、山内泰之、ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーの数値解析モデル提案・検討、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月12日~2015年9月14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

Makoto Yamakawa, Susumu Yoshinaka, Yoshikazu Araki, Koji Uetani and Ken'ichi Kawaguchi, Estimation of the global optimality for multiple tuned mass damper systems using order statistics, Proc. of 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), pp.4362-4372, 2014.07.21, Barcelona, Spain

Makoto Yamakawa, Masahiko, Tatibana, Kyouzou Hukazawa, Mitsuki Nihei, Makoto Ohsaki, Takuzo Nakamura and Hiroyuki Yamanouchi, Parameter identification and numerical analysis of spring steel damper with a heu-

ristic optimization approach, Proc. of 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, Paper No. 104, 2014.5.28, Gyeongju, Korea
Yusei Taniguchi, Makoto Ohsaki, Makoto Yamakawa, Robust design optimization of building frames using order statistics and local search, Proc. of 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, Paper No. 59, 2014.5.28, Gyeongju, Korea
谷口悠盛、大崎純、山川誠、確率的最適化手法を用いた建築構造物のロバスト設計、日本建築学会中国支部研究発表会、2014年3月1日、広島大学(広島県東広島市)
Makoto Yamakawa and Makoto Ohsaki, Worst-case design of structures using stopping rules in k-adaptive random sampling approach, Proc. of 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Paper Id. 5314, 2013.5.21. Orlando, Florida, USA
Rie Kohta, Makoto Yamakawa, Naoki Katoh, Yoshikazu Araki and Makoto Ohsaki, A design method for optimal truss structures with certain redundancy based on combinatorial rigidity theory, Proc. of 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Paper Id. 5163, 2013.5.21. Orlando, Florida, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山川 誠 (YAMAKAWA, Makoto)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号：50378816

(2) 研究分担者

大崎 純 (OHSAKI, Makoto)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：40176855