

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820264

研究課題名(和文) 建物の冗長性・ロバスト性向上のための最悪シナリオを考慮した最適制震構造設計法

研究課題名(英文) Development of robust optimal design methodology for vibration control structure under structural uncertainties

研究代表者

藤田 皓平 (Fujita, Kohei)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40648713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、建物の構造性能に影響する種々の物性値のばらつき(例えば、施工誤差や経年変化、材料レベルのばらつき等を想定)が存在した場合であっても、地震時の建物の揺れを抑制することを目的とした制振建物の設計法を提案した。本研究で提案する設計手法を用いることで、通常の建物の設計時では想定し得なかったシナリオに対しても所定の性能を発揮するように建物の設計を行うことが可能となり、設計時に不確定性を考慮することで建物の構造安全性に対して信頼性の向上につながる。

研究成果の概要(英文)：The robust optimal design methodology for the vibration control structure has been proposed to control the structural seismic response under various structural uncertainties, e.g. construction error, deterioration, variability of material property, etc. Compared with conventional optimal structural design scheme, the proposed robust optimal design method is effective for the worst scenario which can be hard to consider in the general structural design procedure. The supremum of the design criteria can be investigated in the robust design under various uncertainties in design process, which can enhance the reliability of structural safety of the building.

研究分野：建築構造応用力学

キーワード：ロバスト最適設計 ロバストネス関数 不確定性解析 区間変数 制振構造 最適ダンパー配置

1. 研究開始当初の背景

超高層建物等の重要構造物においては、想定される幅広い地震動に対して安全性を十分に確保することが要請されていた。特に、近年の地震被害例から、長周期地震動が高層建物に及ぼす影響が、広く周知されるようになり、今後起こると予想される南海地震等に対する超高層建物の安全性が懸念されていた。建物の設計時には、建物が経験し得る地震動を想定することが必須ではあるが、地震動の特性には不確実性が極めて高いため、不測の事態が生じうる可能性を極力低減する設計方法の開発が望まれていた。

また、構造物の性能は、構造物を構成する構造体の寸法や接合方法などに依存するが、設計時に想定していた性能が発揮されているとは限らず、ある程度のばらつきが存在することを考慮しなければならない。構造物の特性のばらつきを設計時に考慮することは、免震建物等に限定されており、一般的な建物や超高層建物などでは、ほとんど行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、入力地震動の特性及び構造物の特性（例えば、剛性や減衰などの物理量）にばらつきがあることを前提として、これらの種々のばらつきが構造物特性に及ぼす影響をロバスト性という観点に基づいて定量的に把握する方法を構築する。ロバスト性とは、種々の不確実性を考慮した場合にでも所定の性能を発揮する頑強さのことである。ロバスト性の定量的な評価に基づいて、ロバスト性を向上する実用性の高いロバスト最適設計法を構築する。ロバスト最適設計により、設計時に最悪なシナリオを想定することが可能となり、超高層建物などの制振構造物の構造的な安全性、信頼性を飛躍的に向上することが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者らが提案してきた不確実性解析法（＝種々の不確実性を考慮した際の応答上限値を評価する方法。ここでいう応答上限値とは、種々のばらつきを許容した際に建物に生じる応答の最大値を指す。）を基に、ロバスト性の定量的な指標であるロバストネス関数を評価する。

ロバストネス関数とは、Ben-Haimによって提唱されたロバスト性を定量的に評価する方法である^[1]。ロバストネス関数は、ある指定した性能値に達するのに、どの程度のばらつきが許容されるかを示したものである。例えば、ロバストネス関数が小さいとは、現在の性能値に対して、要求される性能値に対して余裕度が小さく、構造的な小さなばらつきで要求された性能値を満足できなくなる可能性があることを示唆している（＝ロバスト性が小さい）。ロバストネス関数を高い信頼性で評価するには、ばらつきの程度と性能値の

上限値の評価が必要となり、不確実性解析法^[2]を適用することで解決される。

ロバストネス関数の実用的な評価方法を確立することによって、ロバスト性を考慮した建物の最適化問題を定義することが可能となり、数理計画法に基づいた最適設計手法を構築する。また、制振建物におけるダンパー等の制振装置の最適配置問題に対して本提案手法を適用する。

4. 研究成果

種々のばらつきを考慮した際の地震時応答の上限値を評価する従来の不確実性解析の問題として、応答上限値の推定精度に関する検討を行った。特に、時刻歴応答解析等を用いて建物の応答を評価する場合には、ばらつきを考慮する不確定パラメータの変動に対して応答値が非単調に変動する場合も考えられ、ノミナル値の近傍からばらつきを考慮する不確定パラメータの変動による全体の応答変動を推定することは困難である場合があることを明らかにした。

本研究では、ばらつきを考慮する変数の変動区間の上限及び下限が指定されたとして、変動区間の端点における応答値を参照することで、変動区間全体の大域的な応答変動にも対応した不確実性解析法（NURP法）を提案した。図1では、設計変数が2つの場合の不確実性解析の概念を示している。NURP法では、各設計変数のばらつきの変動区間の端点での応答評価値を基に段階的に不確定パラメータの組合せ（＝目的関数の上限を与える最悪な組合せ）を決定し、各設計変数のばらつきに対する応答の変動量の上限値を高精度に推定することが可能である。

ロバストネス関数は、指定した性能値に達するばらつきの変動幅の上限値として定義

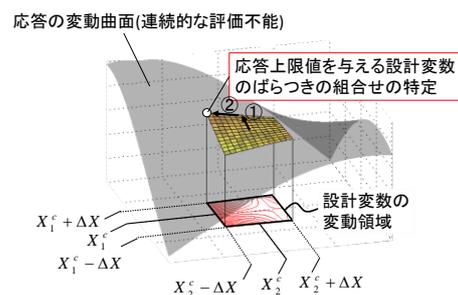


図1 NURP法の概要

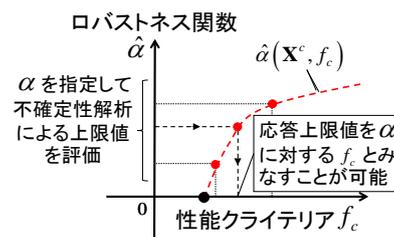


図2 NURP法によるロバストネス関数の評価

されるが、本研究では、図2に示すようにばらつきの変動幅を離散的に変化させ、あるばらつきに対する応答上限値をNURP法によって見出し、これを性能値とすることで、ロバストネス関数を評価する。

ロバストネス関数の評価例を示す。粘性ダンパーを有する10層建物モデル(せん断質点系モデル)に適用した。目的関数は、最大速度25[cm/s]で基準化したEl Centro NS(1940)を受ける際の層間変位の最大値とする。ばらつきを考慮する変数は、各層の層剛性とダンパーの減衰係数とし、ロバストネス関数値が1.0となるばらつき基準の変動幅は、ノミナル値に対して上下限共に30%とした。図3に、初期のダンパー配置として、全層にダンパーを一様に配置する配置Aと、層剛性に比例して配置を行う配置Bに対して、ロバストネス関数を評価した結果を示す。図より、ロバストネス関数値が1.2程度までは、配置Aのほうが同一の性能値に対して高いロバスト性を有していることがわかる。一方、要求性能値を緩和すると、配置Bのほうが、ロバスト性が高い設計といえる。このようにロバストネス関数を定量的に評価することで、種々のばらつきが構造物の性能に及ぼす影響を視覚化することが可能になる。

定量的なロバスト性評価を行うことで、建物の構造設計における最適化問題を展開することが可能となる。本研究では、ロバストネス関数の評価に基づいて、種々のばらつきに対するロバスト性を向上するロバスト最適設計手法を提案した。図4にその概要を示した。ロバスト最適設計法の特徴は、指定された性能値におけるロバストネス関数の最

大化を目的として、設計変数を決定することである。一方、パラメータのばらつきの影響を考慮しない従来の構造最適化問題では、図4においてロバストネス関数値が0の軸上で応答値を最小化することが主な目的とみなすことができる。しかしながら、性能の向上とロバスト性の向上は必ずしも対応しているとは言えないため、ロバスト性の観点に基づいた意思決定が設計上有用である。

本研究で提案しているロバスト最適設計法を、粘性ダンパーの付加減衰総量一定条件下におけるダンパーによる付加減衰の層方向最適配置問題に適用した。表1に、ロバストネス最適設計の結果の一例を示す。ロバスト最適設計では、ロバストネス関数を評価する性能クライテリアを指定する必要があるため、指定する性能クライテリア値と得られる最適設計の対応を把握する必要がある。そこで、同表では、異なる性能クライテリア値に対する結果と、ロバスト性を考慮しない従来の最適設計手法をそれぞれ比較した。指定する性能クライテリア値によって、ロバスト最適設計解が異なる結果となっている。性能クライテリアの設定値が大きい場合(=要求される性能が低い)は、ロバストネス関数値が大きくなるため、ロバストネス関数の評価に関わる近似精度の影響を受けやすいと言える。

通常最適配置と比較して、ロバスト最適配置の違いがロバスト性に及ぼす影響について検討した。ロバスト性の比較方法として、それぞれの最適解に対するロバストネス関数を評価し、通常最適配置(表1の右端)のロバストネス関数との比を、性能クライテリア値を横軸にとり図示した結果を図5に示す。ロバストネス関数比が1以下の領域では、通常最適配置の方がロバスト性は高い。一方、

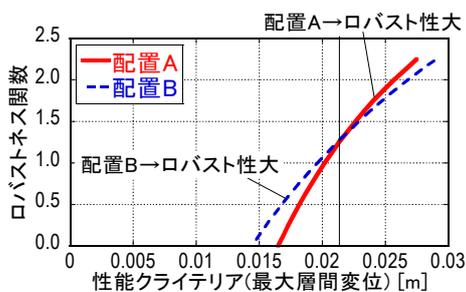


図3 ロバストネス関数の比較

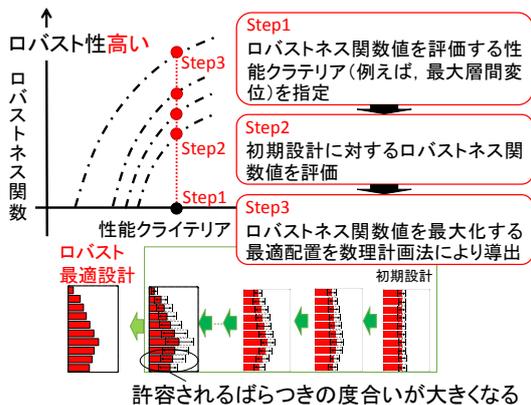


図4 ロバスト最適設計法の概要

表1 ロバスト最適ダンパー配置の比較

| ロバストネス関数最大化ロバスト最適設計法の結果 \hat{a} を評価する際に指定する性能クライテリア | | | |
|---|--------------------|---------------------|---------|
| $f_c^{des} = 0.017$ | $f_c^{des} = 0.02$ | $f_c^{des} = 0.023$ | 通常最適化配置 |
| A配置 | B配置 | C配置 | |
| | | | |

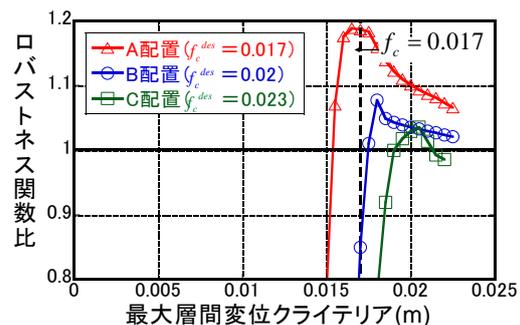


図5 ロバスト最適ダンパー配置におけるロバスト性の向上の比較

1 以上の領域では、ロバスト最適配置の方がロバスト性は高い。通常最適配置と比較して、指定する性能クライテリアにおけるロバストネス関数値が2割程度大きくなる例（配置A）も見られ、ロバスト最適設計法により得られたダンパー配置の最適化によってロバスト性が向上したといえる。A配置では、通常最適配置と比べ中層から上層に減衰を多く付加した設計となっており、最大層間変位が生じる低層部にダンパーを相対的に多く配置するのではなく、中・上層に比較的多くの減衰を付加することで、パラメータのばらつきに対して最大層間変位の増大を抑制することが可能である高いロバスト性を有した設計となっていると考えられる。

<引用文献>

- [1] Ben-Haim Y. (2001): Information-gap decision theory: decisions under severe uncertainty. Academic Press.
- [2] 藤田皓平, 竹脇 出 (2011): 不確定な構造特性を有する免震建物のロバスト性評価のための地震時応答限界解析, 構造系論文集, Vol.76, 666, pp1453-1460.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① K.Fujita and I.Takewaki, Robust passive damper design for building structures under uncertain structural parameter environments, *Earthquakes and Structures*, Vol.3, No.6, pp805-820, 2012. (DOI: 10.12989). [査読有]
- ② K.Fujita, M. Kasagi, Z.Q. Lang, P.F. Guo and I.Takewaki, Optimal placement and design of nonlinear dampers for building structures in the frequency domain, *Earthquakes and Structures*, Vol.7(6), pp1025-1044, 2014. (DOI: 10.12989). [査読有]

[学会発表] (計 2 件)

- ① 藤田皓平, 他, 構造物特性の不確定性を考慮したロバストネス関数による制振ダンパーの配置決定法, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (構造系), 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校 (大阪府・大阪市)
- ② 藤田皓平, 他, 建築物の構造性能の変動を考慮したロバスト最適ダンパー配置 その1 不確定性解析によるロバストネス関数の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2015年9月(発表予定), 東海大学 (神奈川県・平塚市)

[図書] (計 1 件)

- ① I.Takewaki and K.Fujita, Robust Control of Building Structures under Uncertain Conditions, *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, edited by Michael Beer, Edoardo Patelli, Ioannis Kougioumtzoglou and Ivan Siu-Kui Au, Springer-Verlag, 2014 (DOI 10.1007/978-3-642-36197-5_161-1). (分担執筆)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 皓平 (Kohei Fujita)

研究者番号 : 40648713