

構造最適化を用いた超高層制振構造の耐震設計に関する研究

TAKEI, Hideki / 武居, 秀樹

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

310

(発行年 / Year)

2024-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第606号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2024-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030514>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名	武居 秀樹
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	第 867 号
学位授与の日付	2024 年 3 月 24 日
学位授与の要件	本学学位規則第 5 条第 1 項(1) 該当者(甲)
論文審査委員	主査 教授 浜田 英明 副査 教授 山本 佳士 副査 准教授 宮田 雄二郎 副査 (学外) 東京理科大学教授 山川 誠

構造最適化を用いた超高層制振構造の耐震設計に関する研究

1. 論文内容の要旨

近年、災害をはじめ各種リスクに対応した“レジリエントな都市”の実現に向け、国内外問わず、さまざまな取り組みが実施されている。建物に要求される構造性能に関しても、耐震安全性能の確保はもちろんのこと、事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）の観点から機能維持性能や早期回復性能が求められるなど、その多様化は顕著であり、建物用途や発注者のニーズに応じた、さまざまな地震動レベルに対応したきめ細やかな性能設計が要求されるようになっている。

特に社会に与える影響が大きい超高層建築物においては、これらに加え、長周期地震動や暴風への対応も求められ、制振装置が要所に配置される構造形式（以下、超高層制振構造）の採用が多くなっている。超高層制振構造における制振効果は骨組架構特性との相互作用により定まり、制振装置の配置は構造計画だけでなく建築計画にも大きな影響を及ぼすため、設計実務現場では設計初期段階から膨大なケーススタディが求められることになる。

他方、現代の我が国では、少子高齢化による労働人口の減少に伴った構造設計者の担い手不足や「働き方改革」の実現に向けた労働時間短縮化も早急に対策を講じる必要性のある課題であり、構造設計の実務現場における業務効率化は避けて通ることはできない。

このような現状のもと、超高層制振構造の設計現場において、構造最適化手法の適用により、多様化した目標性能のもとで合理性を担保しながら効率的に構造設計を行う手法の確立が希求されている。しかしながら、その実現事例は極めて少ない。これは、地震動を

受けた際の超高層制振構造の動的挙動が一般的な建築物と比べより複雑で、その挙動を弾塑性時刻歴応答解析などによって把握する必要があることに起因している。つまり、超高層制振構造の構造最適化問題は、現代の高度化したコンピュータの演算能力をもってしても現実的な時間で解くことができない、極めて強い非線形性のある大規模な組合せ最適化問題となることが大きな障壁となっている。

この課題に対して、本論文は、以下に示す3つの観点を骨子に据え、設計実務現場での利用を想定して、より実践的な超高層制振構造の耐震設計法を提案することを試みている。

- 1) 対象とする最適化問題の整理と適切な解法の探究
- 2) 要求性能目標や構造設計者の設計思想を柔軟に取り入れられる方策の追究
- 3) 得られる設計解の定量的・定性的分析を通じた設計手法の特徴の整理

本論文は6章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究に至った背景および既往の研究を整理するとともに、本研究を行う意義と目的、方法について述べられている。

第2章では、本研究で扱う最適化問題を解く上で、膨大な計算量を削減しながら効率的に解探索を行うことに適した解法探究のため、機械学習の分野で利用されることが多い応答曲面法（サンプリングデータから生成した近似関数曲面を利用して解探索を行う手法）の適用可能性について、具体的な設計例題を通して考察している。結果、本研究で対象とする組合せ最適化問題に対しては、ある特定の応答曲面算定アルゴリズムを複合させて採用することで、応答曲面の近似精度が向上し、既往の最適化手法と比較して、計算効率と解探索性能の両面において同手法が有効であることを確認している。この検討により、以降の本研究での最適化問題における探索手法として応答曲面法を採用することとしている。

第3章では、超高層建築物の耐震設計における最適化技術適用への課題を整理するとともに、その適用を見据え、質点系振動モデルを用いた弾塑性応答層せん断力と応答変位分布を目的関数とする層骨格曲線の多目的最適化問題を定式化し、得られた設計解の特性を分析している。結果、想定地震動レベルおよび設計クライテリアに対応したかたちで、設計者の選好を反映することが可能な程度に多様な設計解が得られることを示し、その有効性を確認している。

第4章では、設計実務現場での利用を想定した、より実践的な超高層制振構造の耐震設計法の確立にむけて、要求性能目標や構造設計者の設計思想が柔軟に取り入れられる多段階の最適化ステップを有する設計法を提案している。提案設計法は、質点系振動モデルを用いて、i) 最適な架構の弾性応答特性の決定、ii) 塑性化後の最適な架構の靱性能やエネルギー吸収能力の決定、iii) 得られた架構特性のもとでの最適な制振装置の配置決定、の3つの最適化ステップにより効率的に超高層制振構造の理想的な弾塑性応答特性を把握し

たうえて、立体骨組モデルを用いて、iv) 得られた弾塑性応答特性を再現しうる最適な部材断面を決定するという、4段階の最適化過程を経るものである。

第5章では、第4章で提案された設計法を高さ100m規模の鉄骨造超高層制振構造へ適用し、得られた設計解に対して、立体骨組モデルでの弾塑性時刻歴応答解析を行い、その特性を分析し、提案設計法の妥当性を確認している。その際、各段階の最適化を逐次行う多段階最適化と、複数段階の最適化を同時に取り扱う同時最適化で得られる設計解についても比較を行い、各手法の特徴について論じている。

第6章では、本研究で得られた成果を総括し結論づけるとともに、今後の課題と展望についてまとめている。

以上、本論文では、超高層制振構造の耐震設計において、多様化した目標性能に弾力的に対応しつつ、コンピュータを用いた構造最適化手法の支援により構造設計業務の効率化を図りながらも、構造設計者の選好が反映可能で、設計実務現場での利用に耐えうる、より実践的な設計手法を提案するに至っている。

2. 審査結果の要旨

本論文の主題である超高層制振構造の耐震設計において構造最適化による設計解を得るためには、如何に計算負荷を抑制しつつ効率的に最適化を実行するかが大きな課題である。この課題に対して本論文では、i) 最適化手法自体の効率化の模索と ii) 質点系振動モデルの積極的活用による弾塑性応答解析コストの低減、この 2 つのアプローチによって、その解決を図っている。

i) 最適化手法自体の効率化の模索に関しては、第 2 章において既往の発見的手法に応答曲面法を複合させた多目的最適化手法を提案している。具体的には、3 種類の応答曲面算定アルゴリズムのうち複数を組み合わせながら、各応答曲面上で空間充填アルゴリズムを用いて大域的に解探索を実行するとともに、並行して遺伝的アルゴリズム（以下、GA）により Pareto 解探索性能を向上させることを目指す、独自性の高いものである。この手法を実務現場で想定される規模の組合せ最適化問題に適用し、丹念にその可能性を検証した結果、3 種すべての応答曲面算定アルゴリズムを組み合わせさせた場合、応答曲面の近似精度が高まり計算効率が増加すること、さらに GA を複合させることで初期解に依存することなく解探索性能が向上することを示すなど、学術的にも重要な知見を得ることに成功している。

ii) 質点系振動モデルの活用による解析コストの低減に関しては、a) 第 3 章での質点系振動モデルを用いた弾塑性応答層せん断力と応答変位分布を目的関数とする層骨格曲線の多目的最適化問題の定式化と b) 第 4 章での多段階の最適化過程の採用による弾塑性応答解析コストの効率配分の提案が、主たる研究業績として挙げられる。a) について、応答層せん断力最小化および応答変位分布一様化はトレードオフの関係にあり、これらを目的関数とすることにより、全層が均等に変形する架構や低層階で積極的にエネルギー吸収を図り応答層せん断力を低減する架構（いわゆるソフトファーストストーリー構造）など一度に多様な候補解が得られることを示している点は、適応性の高い設計手法を模索するうえで意義深い。また、b) については解析コストの低減のみならず、第 5 章における具体的な設計例題の検討をとおして、各段階の最適化過程を部分的に適用することで各段階の設計目的に合致した設計案が個別に取得できることはもちろんのこと、複数段階の最適化過程を逐次もしくは同時に扱うことで複数の設計目的を勘案した設計案が取得可能であることを示している。これは、例えば制振装置が想定機能を発揮しない場合のフェイルセーフ機能を設計者が適切に付与できるなど、実務現場の様々な場面において臨機応変に設計者の意図を反映可能な設計手法としての特長を有することを意味し、特筆に値する。

以上のように、本論文は、実現事例の少ない超高層制振構造の耐震設計における構造最適化の適用に関して、設計実務現場での利用に耐えうる、より実践的な設計手法を提案することに成功しているだけでなく、多目的最適化手法としての応答曲面法の計算効率と解探索性能の向上ならびに応答層せん断力の最小化や制振デバイスの最適配置に関する知見についても得られているなど、実務的および学術的意義のあるものである。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した。