

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06301

研究課題名(和文)単純な柱梁接合方法を多用した低コスト耐震鋼構造建物の構造設計法

研究課題名(英文) Cost-effective Structural Seismic Design of Steel Buildings Highly using Simple Beam-to-column Connections

研究代表者

高木 次郎 (Takagi, Jiro)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：90512880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造事務所建物の耐震架構配置に着目し、ほぼ全ての柱梁接合部を曲げモーメントを伝達する剛接合として全体を耐震架構とする設計(全体型)と外周に耐震架構を限定する設計(集約型)を比較した。両型式の建物の骨組に対して、部材断面寸法を設計変数とし、許容応力度設計と必要保有水平耐力の条件を満足させることを制約条件とした鋼材量最小化を行った。両型式の優良設計解同士を比較して、耐震架構配置が鋼構造事務所建物の構造的性状に及ぼす影響を比較分析した。全体型の方が集約型よりも鋼材量が多い傾向を得た。保有水平耐力が同等になるような優良設計解同士の比較でも集約型の鋼材量が少ないことを確認した。

研究成果の概要(英文)：There are two major types of lateral frame systems in steel buildings, which are space frame system (SFS) and perimeter frame system (PFS). Moment connections are used in most of beam-to-column connections in SFS, while they are limitedly used in the perimeter frames in PFS. Structural characteristics of steel office buildings designed with SFS and PFS are investigated. Superior design solutions are computed by using Multiple Start Local Search (MSLS) for the standard steel office buildings with these two different lateral frame systems. The superior design solutions are locally optimized solutions of a problem under constraints on allowable stress design and seismic ultimate lateral strength requirements. The objective function is the total volume of steel and the discrete variables are the steel member sizes. Inelastic pushover analyses are conducted. The steel volume of the superior solutions with PFS is smaller than that with SFS.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造 最適化 耐震架構配置 柱梁接合部 構造設計

1. 研究開始当初の背景

現在および将来的な建設技能者不足は深刻な社会問題であり、鋼構造建物にも生産工程の合理化が求められている。我国の一般的な鋼構造建物は、ほぼ全ての柱梁接合部が、梁フランジを柱に対して溶接接合し、梁端部の発生曲げモーメントを柱に伝達させる剛接合となっているが、接合部で柱を切断してダイヤフラム挿入後に柱を完全溶け込み溶接する仕口の加工には手間がかかる。一方、他国の地震地域では、溶接が多い剛接合は特定の耐震架構でのみ用い、その他の架構（長期架構）では、H形鋼梁のウェブのみを柱に接合し、梁モーメントを柱に伝達させないピン接合が用いられる。前者では、地震水平荷重下で柱に2軸の曲げモーメントが作用することから角形鋼管が用いられ、後者では1軸曲げに有利なH形鋼柱が用いられるのが一般的である。これらの架構構成の相違は、各地域の設計の考え方や製造加工の技術的要因などに依存し、改めて相互の特性を比較分析した研究は少ない。本研究では、鋼材量の最小化手法を応用し、実用的な優良設計解を導出した上で、両者の鋼材量や加工手間などの定量的評価および耐震性能評価を行う。これにより、単純な柱梁接合方法を多用した経済的で十分な耐震性能を備えた鋼構造建物の合理的な構造設計の可能性を探求する。

鋼構造建物の耐震架構配置に着目して耐震性能の比較分析を行った既往研究や経済性を比較した研究は存在するが、最適化手法を応用して比較した研究は存在しない。既往研究では、異なる耐震架構配置の設計がほぼ等しく合理的であるような設計解が導出されていないことから、公平な議論がなされているとは言い難い。また、コスト最小化に関する研究では、変数が多くなる立体骨組を扱ったものは少数であり、建物の架構形状などの設定条件や規格寸法および接合部での部材寸法の関係などの制約条件の設定が不十分あるいは実状に十分対応できていないことも多い。また、鋼材量と加工手間その他のコストを最適化解析の中で詳細に評価しようとする試みや耐震性能とコストの両面からの最適化の試みなどは存在するものの、弾塑性挙動を含めた耐震性能を耐震架構配置に応じて解明しようとする研究は存在しない。

本研究を推進するに至った経緯として、米国西海岸の耐震工学を専門とする研究者から、日本の鋼構造骨組は高価であると指摘されたことがあり、価格と性能（特に耐震性能）の関係を分析する必要があると考えた。最適化手法の応用により、異なる耐震架構配置建物に対して、同程度の合理性を有する設計解を導出し、それらの比較により耐震架構配置のあり方の議論が可能である。

2. 研究の目的

鋼構造建物の耐震架構配置は柱梁接合方式の組み合わせによって決定され、それによって柱の断面形状も変化する。本研究では、耐震設計規定を含む許容応力度設計および保有水平耐力の制約条件下の鋼材量最小化手法を応用した優良構造設計解導出手法を提示し、耐震架構配置に応じた優良設計解同士を経済性と弾塑性耐震性能の両面から定量的に比較分析する。これにより、単純な柱梁接合方法を多用した経済的で十分な耐震性能を備えた鋼構造建物の構造設計の可能性を探求する。

3. 研究の方法

最適化手法を応用した優良設計解導出のためのプログラミングとアルゴリズムの構築から着手した。並行して、最適化のための実務上の制約条件および解析用標準設計建物の整理を行った。そして、複数の規模や階数の異なる標準的な鋼構造建物に対して優良設計解を導出した。鋼材量および加工手間などを定量的に評価した。さらに、優良設計解に対して、耐震性能の評価を行った。柱が角形鋼管またはH形鋼のそれぞれの場合について、柱梁接合部の局部座屈や累積変形能力の復元力特性の設定を行い、弾塑性地震応答解析により各設計解の性能を評価した。建物の冗長性についても検証した。

4. 研究成果

耐震設計規定を含む許容応力度設計および保有水平耐力の制約条件下の鋼材量最小化手法を応用した鋼構造建物の優良構造設計解導出手法を提示し、耐震架構配置に応じた優良設計解同士を経済性と弾塑性耐震性能の両面から定量的に比較分析した。鋼構造建物の耐震架構配置は柱梁接合方式の組み合わせによって決定され、それによって柱の断面形状も変化する。単純な柱梁接合方法を多用した経済的で十分な耐震性能を備えた鋼構造建物の構造設計の可能性を探求した。

標準設計された鋼構造事務所建物の耐震架構配置に着目し、ほぼ全ての柱梁接合部を曲げモーメントを伝達する剛接合として全体を耐震架構とする設計（全体型）と外周に耐震架構を限定する設計（集約型）を比較した。全体型では柱を角形鋼管、集約型では角形鋼管とした場合とH形鋼とした場合の両方を評価した。両型式の建物の骨組に対して、部材断面寸法を設計変数とし、許容応力度設計と必要保有水平耐力の条件を満足させることを制約条件とした鋼材量最小化を行った。部材断面の大きさと板厚を設計変数として、それらの規格寸法を設計領域とする離散化設計変数に対する最適解を多点スタート

局所探索 (MSLS) により得た。両型式の優良設計解同士を比較して、耐震架構配置が鋼構造事務所建物の構造的性状に及ぼす影響を比較分析した。

7 階建の事務所建物を対象とした検討

標準的と考えられる7階建て事務所建物について検討した。桁行方向 (X 方向) はラーメン構造、張間方向 (Y 方向) はブレース架構 (全体型ではブレース架構とロングスパン梁を含むラーメン架構) である。全体型では柱を角形鋼管、集約型では H 形鋼とした。

(1) 最適化により、全体型の X 方向の柱梁部材断面は主として層間変形角と 1, 2 節の柱梁耐力比の制約で決定され、1 階の柱については耐力の制約が支配的である。Y 方向の部材断面については、ロングスパン梁で長期荷重下の耐力、ブレースおよび 1 階の付帯柱で Y 方向荷重下の耐力が支配的である。2, 3 節の付帯柱およびその他の梁については、幅厚比制約下の最小断面となり、耐力には余裕がある。また、Y 方向の層間変形角の制約にも余裕がある。一方、集約型では、全体型ほど柱梁耐力比は支配的ではない。X 方向部材では変形角と耐力の両方が支配的であり、Y 方向部材では、1, 2 節のブレースと付帯柱で耐力、2, 3 節で層間変形角の制約が支配的である。3 節のブレース耐力には余裕がある一方、2, 3 節の境界梁が曲げ戻しに寄与し、耐力が支配的である。耐震架構の柱梁断面は全体型より大きい、長期架構ではロングスパン梁を除き断面が小さい。

(2) 優良設計解の柱、梁、ブレースの鋼材量を比較すると、集約型は全体型よりも 7% 少ない。X 方向梁の鋼材量で 18% 少なく、ブレース鋼材量で 74% 多い。全体型のダイヤフラム鋼材量は、柱鋼材量の 15% である。部材鋼材量に、小梁、全体型のダイヤフラムあるいは集約型の柱スチフナ分を加え、それらの 30% と仮定した雑鉄骨分を加えた総鉄骨量は単位面積あたり 1019N/m² (全体型) と 936N/m² (集約型) であり、既往研究による同規模同用途建物の推定鉄骨量の 79% と 73% である。最適化により鋼材量が低減できていることを確認した。

(3) 両型式の加工手間を比較するため、4 階部分の柱梁仕口の換算溶接量を算出した。全体型の溶接量は集約型の 2.1 倍であり、全体型の換算溶接量の 76% がダイヤフラムの加工によるものである。両型式の加工手間には大きな差があることを定量的に確認した。

(4) 保有水平耐力の検討を行った。全体型の X 方向については、優良設計解がの保有水平耐力 Q_u が必要保有水平耐力 Q_{un} を上回ったが、集約型の X 方向と、両型式の Y 方向については、 Q_u は Q_{un} 以下となった。 $Q_u \geq Q_{un}$ となる

よう地震荷重を割増しして求めた優良設計解の部材鋼材量の増分は、全体型で 11.4%、集約型で 10.9% である。鋼材量の増分は両型式ではほぼ等しく、許容応力度設計を制約条件とした優良設計解同士の比較で、保有水平耐力の検討を含めた型式の比較ができたと考えられる。

(5) 検討建物の階数が 7 の場合に加えて、4 と 10 の場合の優良設計解を算出した。全体型に対する集約型の鋼材量は 89% (4 階建)、93% (7 階建)、98% (10 階建) であり、階数が大きくなるほど差が小さく、いずれも集約型の方が少ない。

階数が異なる事務所建物の傾向分析

4, 7, 10 階建ての事務所建物について、全体型と集約型の優良設計解に対して時刻歴地震応答解析を行い、静的解析による制約条件下の設計解の動的性状を分析した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 優良設計解の X 方向のラーメン架構の部材断面設計では、両形式とも層間変形角の制約が支配的である。加えて、全体型で柱梁耐力比と梁降伏先行の制約条件が支配的である。

(2) 優良設計解の鋼材量は、集約型の方が全体型よりも 13% 少ない。全体型で鋼材量が多い理由として、ロングスパン梁を含めた柱梁耐力比と梁降伏先行の制約により、柱断面が大きくなることが考えられる。

(3) 小梁や雑鉄骨などを含めた優良設計解の概算鋼材量は、同規模の鋼構造事務所建物の推定鋼材量よりも全体型で 9%、集約型で 22% 少なく、MSLS による鋼材量最小化の効果が確認できた。

(4) 優良設計解に対する時刻歴地震応答解析では、両型式ともに新築建物に対する標準的な設計クライテリアを満足しない。従って、許容応力度設計と必要保有水平耐力の静的解析に基づく制約を満足する鋼構造建物の設計でも、地震応答クライテリアを満足しない可能性がある。

(5) X 方向のラーメン架構について、全体型と集約型の応答は概ね等しいが、塑性率は集約型の方が大きい。Y 方向のブレース付架構でも、集約型の応答の方が大きい。ただし、それらの差は比較的限定的であり、両型式の鋼材量差を考慮すると、建物全体として集約型が優位である。

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 2 件)

- 1) 高木次郎, 大崎純, 石川栞: 耐震架構全体分散型と外周集約型の鋼構造事務所建物の保有水平耐力と地震応答, 日本建築学会構造系論文集, 第 728 号, pp1743-1751, 2016. 10 (査読付き論文)
- 2) 高木次郎, 大崎純: 耐震架構全体分散型と外周集約型の鋼構造事務所建物の構造性状比較, 日本建築学会構造系論文集, 第 715 号, pp1469-1478, 2015 年 9 月 (査読付き論文)

[学会発表] (計 6 件)

- 1) 小花瑠香, 高木次郎, 大崎純: 耐震架構配置が異なり保有水平耐力が同等の鋼構造架構の構造性状比較, 日本建築学会大会 (東北), 2018
- 2) 上野彰太, 高木次郎, 小花瑠香, 大崎純: 断面形状が異なる曲げ降伏先行ブレースの正負交番載荷時挙動評価, 日本建築学会大会 (東北), 2018
- 3) 小花瑠香, 高木次郎, 大崎純: 曲げ降伏先行ブレースを用いた鋼構造架構の解析的性状評価, 日本建築学会大会 (中国), 2017
- 4) 叢一, 大崎純, 高木次郎: 接合部コストを考慮した耐震架構全体分散型と外周集約型の鋼構造建物の最適設計の比較, 日本建築学会大会 (中国), 2017
- 5) 石川栞, 高木次郎, 大崎純: 耐震架構形式の異なる 7 階建鋼構造事務所建物のラーメン架構の地震応答評価, 日本建築学会大会 (九州), 2016
- 6) Jiro TAKAGI, Makoto OHSAKI: Simulated Annealing for Evaluation of Structural Characteristics of Steel Buildings with Different Lateral Frame Systems, Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016, May 22-26, 2016, Nagasaki, Japan, Proceedings

[図書] (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 次郎 (Takagi Jiro)
首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

授

研究者番号: 90512880

(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