

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04337

研究課題名(和文)減衰部材を有する鋼構造建物の大地震後の継続利用を志向した合理的設計解導出法

研究課題名(英文)Development of design method for steel buildings with dampers considering post-earthquake business continuity

研究代表者

高木 次郎 (Takagi, Jiro)

東京都立大学・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：90512880

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)：鋼構造建物の優良設計解の導出手法を提案し、要求耐震性能や架構型式、構造種別、規模および用途等に応じた設計解群の構造特性を分析した。優良設計解は多スタート局所探索法を利用して鋼構造建物のコストを最小化した設計解であり、長期荷重と中小地震に対する許容応力度設計を満足して、大地震に対して限界耐力計算による安全限界の制約を満足する。設計変数は、柱梁部材の断面寸法と座屈拘束ブレースの配置である。要求耐震性能に対する設計解のコスト変化や、柱梁主架構を弾性にとどめる設計解の構造特性などを調査した。大地震後の継続利用を志向する優良設計解の分析により、合理的な設計に関する客観的な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レジリエントな社会構築のために、大地震時にも損傷を許容せず、事後の継続利用を志向する設計(「高耐震設計」と呼ぶ)の汎用化のため、最適化手法を応用して合理的な鋼構造の高耐震設計解の導出手法を開発した。本手法の特徴は、(1)実設計精度の複雑な最適化問題を効率よく導出できることと(2)減衰による応答低減を評価して耐震システム全体を合理化することの2つにある。これらにより、高耐震設計の具体像を明確にできる。本研究では、多様な架構型式、構造種別、規模および用途等に応じた設計解群の構造特性を分析した。最適化を利用した設計解群の導出により、合理的な設計解の評価に一般性を確保した点に研究成果の意義がある。

研究成果の概要(英文)：An algorithm to obtain the superior design solutions (SDSs) of steel buildings was developed, and their structural properties were investigated for the various design conditions such as seismic demands, lateral frame types, structural systems, sizes and occupancies. The SDSs are the rational solutions with locally minimized steel weight using a multiple-start-local-search method. The SDSs satisfy the constraints of allowable stress design for suspended loads and medium earthquakes, and the safety-limit constraints of calculations of resistance and limit state for large earthquakes. The design variables are the section sizes of main frames composed of columns and beams, and the locations and strengths of buckling restrained braces (BSBs). The cost variations of SDSs with respect to the seismic demands were investigated, and the structural properties of SDSs providing the post-earthquake business continuity were evaluated.

研究分野：建築構造および材料関連

キーワード：鋼構造建物 最適化 耐震設計 地震後継続利用 減衰部材 耐震架構配置

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築基準法には、大地震時の損傷を許容して倒壊を防止する建物の構造設計の基本的な考え方が示されている。一方で、熊本地震(2016)等の近年の大地震で、倒壊せずとも損傷を受けた建物は、設計目標どおりの耐震性能を発揮したが、余震に対する安全性を保持できず住民は長期の避難生活を余儀なくされ、結果的に解体されたものもある。レジリエントな社会構築のためには、現状の構造設計の考え方に改善の余地がある。免震構造や制振構造の研究開発と普及が進み、大地震時にも損傷を許容せず、事後の継続利用を志向する設計(「高耐震設計」と呼ぶ)は増えつつあるが、高耐震建物は未だ比較的特殊かつ少数で、普及は十分ではない。

2. 研究の目的

実用的な等価線形化法である限界耐力計算法の枠組みを用いて減衰部材の地震エネルギー吸収効果を評価して高耐震設計解群を求める。架構型式も含む大きな設計領域の中から、主架構と減衰部材の合理的な設計解を見出すことで新しい設計の可能性を探る。

建物の構造コストを主架構の鋼材と減衰部材と加工手間の総和で評価して、高耐震設計解と一般的な耐震設計解の耐震性能とコストの相関性を建物規模や用途に応じて求める。最適化された設計解(「優良設計解」と呼ぶ)同士の比較分析により、設計者の技量に依存しない、公平な議論を行う。鋼構造建物の架構型式や減衰部材の配置を設計領域に含めた合理的な高耐震設計の在り方を考察する。

3. 研究の方法

(1) 最適化問題の定式化とアルゴリズムの構築

図1のような多スタート局所探索法のアルゴリズムを用いて、立体骨組の最適化のための数値解析プログラムを整備した。グループ化した部材断面寸法および減衰部材の性能や配置のほか、架構型式を設計変数として目的関数を最小化した。大地震時の応答制約のほか、長期荷重下の使用性の制約および部材の幅厚比や柱梁耐力比など、実構造設計に耐える精度で設計制約条件を定式化した。

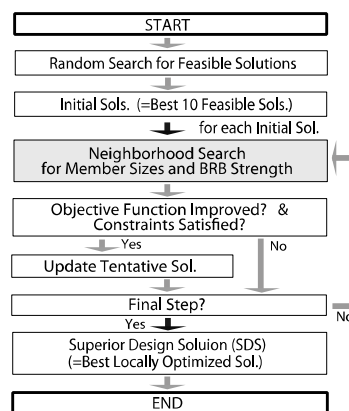


図1 多スタート局所探索アルゴリズム

(2) 高耐震設計解の導出

建物の構造コストを主架構の鋼材と減衰部材と加工手間の総和で評価した。減衰部材のコストはメーカー資料やヒアリングを参考に設定した。それらを目的関数として、コストを最小化した高耐震設計解を導出した。

(3) 検討建物の拡充と最適化設定の検証

整形な中規模事務所建物の高耐震設計解導出後に規模や用途の異なる建物についても設計解群を求める。大地震時に損傷を許容する一般的な設計解も開発手法を用いて導出し、耐震性能とコストの相関性を求めた。減衰部材と主架構のそれぞれで消費される地震エネルギーのコストに対する比率を新たな構造性能指標として提案し、設計解ごとに整理した。また、優良設計解同士の比較分析の公平性を利用して、異種構造(免震構造)の評価や、外国(米国)の設計体系の評価などを行った。

4. 研究成果

本研究の成果として、以下のような一連の知見を得た。

- (1) 純ラーメン構造では、全体型よりも集約型の鋼材量が少なく、ブレース構造では逆に全体型の鋼材量が少ない。
- (2) 純ラーメン構造で、限界耐力計算の安全限界層間変形角 R_{SL} の制約を 2.0%とした場合は、許容応力度設計の層間変形角や許容応力度の制約条件が支配的である。
- (3) 要求耐震性能倍率 R_D に対する優良設計解の鋼材量の変化は 4 階建てと 10 階建てで大きく異なり、4 階建ての場合 R_D の増加に伴い鋼材量も大きく増加する。純ラーメン構造と BRB 構造の両構造形式において、 R_D を 1.0 から 1.5 に増加したことによる鋼材量の増分は、4 階建ての事務棟 A では 40%程度であるのに対し、10 階建て同棟では 15%程度である。10 階建て建物の方が 4 階建て建物よりも高耐震設計のためのコスト造が小さい
- (4) 座屈拘束ブレース (BRB) つきラーメン構造 (「BRB 構造」と呼ぶ) では、標準せん断力係数 C_0 が 0.2 以下の中小地震に対して BRB を降伏させない設計制約条件を満足すれば、 R_{SL} を 1.5%以上とする限界耐力計算の制約を満足する。また、 $C_0=0.2$ 相当の設計用地震荷重に対する許容応力度設計の制約条件により BRB の耐力が決定され、 R_D の異なる優良設計解間の損傷限界時の水平耐力差が小さい。 R_D を増加させた場合でも BRB をできるだけ早期に降伏させて損傷限界時変位を小さくし、塑性化による加速度低減率を小さくする設計の合理性が確認された。
- (5) BRB 構造の極めて稀に発生する地震動 (L2 地震動) に対する限界耐力計算と時刻歴応答解析の結果はほぼ整合する。一方、鋼管を用いたブレース構造や純ラーメン構造では、時刻歴応答解析を用いた設計で要求される耐震性能は保有水平耐力計算を用いた設計のそれより大幅に高い。
- (6) R_D が異なる優良設計解群に対して、限界耐力計算の安全限界層間変形角 R_{SL} と時刻歴応答解析における最大層間変形角 R_{RHA} は概ね良好な対応を示すが、純ラーメン構造で R_D が大きい場合、変形が下層に集中して R_{RHA} が R_{SL} を上回る可能性がある。平面構成や用途が異なる優良設計解の比較において、純ラーメン構造では鋼材量の差が小さく、 R_D の増加に伴う鋼材量の増加が顕著である。BRB 構造では、長期荷重に対する設計が支配的になる部材が多いほど R_D の増加に伴う鋼材量の変化が小さい。
- (7) BRB 構造の優良設計解は、BRB のコスト設定に対して比較的鈍感である。また、弾性時の柱梁のみの主架構の水平剛性に対する BRB の水平剛性は一般的な設計よりも高い。
- (8) 純ラーメン構造では、 R_D の増加に伴う柱鋼材の増加率が梁鋼材の増加率より大きい。 R_D が増加すると層間変形角の制約よりも限界耐力計算の制約が相対的に支配的になり、水平剛性よりも耐力と変形性能の増大が要求される中で、梁を早期降伏させてエネルギー吸収させる設計が合理的である可能性がある。
- (9) 米国の一般的な構造設計手法である Equivalent Lateral Force (ELF) procedure による純ラーメン構造の米国準拠解の設計用地震荷重のベースシア係数は 0.07 程度になり得る。すなわち、米国では高さ 30 m 程度の建物でも長周期化により地震入力を低減させた設計が可能である。一方、BRB 構造については、日本よりも米国の柱梁主架構に対する設計要求が厳しく、米国準拠解の柱梁断面が大きい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 高木次郎, 林 茜里, 齋藤一樹, 大崎 純	4. 巻 87
2. 論文標題 鋼構造建物の耐震設計条件と優良設計解の関係	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1257-1266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.1257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takagi Jiro, Ohsaki Makoto, Cao Yongsheng	4. 巻 34
2. 論文標題 Structural properties of superior design solutions of steel buildings associated with BRBs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Structures	6. 最初と最後の頁 3851 ~ 3865
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.istruc.2021.10.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 WATANABE Daichi, TAKAGI Jiro, OHSAKI Makoto, MIKAMI Tomohiro	4. 巻 86
2. 論文標題 COMBINATORIAL OPTIMIZATION OF MULTIPLE-TYPE DEVICES IN SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS SATISFYING CONSTRAINTS IN RESPONSE HISTORY ANALYSES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1615 ~ 1621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.1615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 高木次郎, Cao Yongsheng, 矢吹優佳, 大崎 純	4. 巻 第782号
2. 論文標題 座屈拘束ブレースの耐力と配置を設計変数に含めた鋼構造建物の優良設計解	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 642 ~ 650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 高木次郎, 矢吹優佳, 林 茜里, 大崎 純	4. 巻 第88巻 第808号
2. 論文標題 日本と米国の鋼構造耐震設計基準を満足する優良設計解の構造特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1016 ~ 1026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.88.1016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 栗原 遼, 高木次郎, 大崎 純, 見上知広	4. 巻 第88巻, 第811号
2. 論文標題 上部構造の部材断面と異種免震部材の組合せを変数とした免震建物のコスト最小化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1339 ~ 1347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.88.1339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 齋藤一樹, 高木次郎, 大崎純
2. 発表標題 設計条件の異なる鋼構造優良設計解の耐震性能比較評価 その1 安全限界変形角の制約値の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林茜里, 高木次郎, 大崎純
2. 発表標題 設計条件の異なる鋼構造優良設計解の耐震性能比較評価 その2 鋼管ブレースと座屈拘束ブレースの比較
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林茜里, 高木次郎, 大崎純, 矢吹優佳
2. 発表標題 座屈拘束ブレースの配置を設計変数に含めた鋼構造建物の優良設計解の比較評価
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤一樹, 高木次郎, 大崎純
2. 発表標題 鋼構造建物の層数と安全限界変形角の設計条件が優良設計解に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大崎 純 (Ohsaki Makoto) (40176855)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------