

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04449

研究課題名(和文) 既存骨組への影響を考慮した耐震補強のための制震デバイスの形状最適化

研究課題名(英文) Shape optimization of passive control devices for seismic retrofit considering effect on existing frame

研究代表者

大崎 純 (Ohsaki, Makoto)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：40176855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：既存骨組の柱・梁部材や接合部への影響および施工の容易性を考慮して、主に圧縮力と接触力で層せん断力に抵抗する耐震補強格子ブロックの形状を最適化する手法を提案し、最適形状の力学性能を3Dプリンタを用いた模型実験で検証した。また、圧縮のみに抵抗する二重鋼管ブレースや曲げ降伏先行形のH形断面ブレースなどの新しい形式のブレースを提案し、それらの性能を載荷実験によって検証した。さらに、発見的最適化手法と機械学習を用いて、地震力に対するブレース配置最適化問題における優良設計解の構造特性を分析し、優良設計解を判別する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の建築建物の耐震性能を向上させるため、主に圧縮力と既存骨組への接触力で層せん断力に抵抗するブレースの新しい形式を提案し、数値解析によって、その性能を最適化するとともに実験で検証した。本研究の成果により、建物の使用を継続しながら、火器の使用や騒音をともなわずにブレースを簡便に設置でき、耐震性能を向上させることができる。また、ブレースの最適な配置を、設計者の勘と経験に頼らず、最適化や機械学習に基づく数理的な手法で求めることが可能となった。

研究成果の概要(英文)：A shape optimization method has been presented for latticed blocks for seismic retrofit. The blocks can easily be installed in the existing building, because seismic shear force is mainly supported with compressive forces in the block and contact to the existing beams and columns. The performance of the optimized blocks has been confirmed through experiment of a 3D-printed small-scale model. Furthermore, new types of braces such as compression brace with double steel tubes and flexural yielding brace with H-section have been proposed, and their performances have been confirmed through loading tests. Furthermore, a method has been proposed to evaluate structural performances of decent solutions for optimal brace placement problem and classify them using heuristic approach and machine learning.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：耐震補強 構造最適化 ブレース ブロック壁

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

座屈拘束ブレースやパネルダンパーなどの履歴エネルギー吸収型と、補強ブロックなどの強度抵抗型のデバイスによる建築骨組の耐震補強については、多くの研究や実施例が存在する。しかし、これまでの研究には、以下のような問題点が存在する。

- (1) パッシブ制振デバイスの設計や最適化に関する研究は、単体としての特性を考慮したものが多く、制振デバイスの設置にともなう既存骨組部材への影響（応力や変形の増加やデバイスとの相互作用）は、断面力レベルでの検討にとどまっている。それに対して、研究代表者らは、簡単な梁要素でモデル化された耐震補強ブロックの形状を、既存骨組との接触力などを考慮して最適化した。
- (2) 制振デバイスの開発研究は、実験的研究が多く、既存骨組に設置したときの性能検証が困難である。このような状況において、研究代表者らは、ソリッド要素を用いた詳細有限要素解析によって、制振ブレースや鋼材パネルダンパーの形状を最適化できることを示した。
- (3) 室内の柱梁で囲まれた空間を補強する形式（内壁補強型）の耐震壁では、既存骨組への影響とともに、事業継続性、意匠性、採光性、通気性などの構造以外の特性を考慮する必要がある。しかし、これらの性能を十分に考慮した研究は存在しない。
- (4) 3D プリンタによる付加製造技術の使用を前提として、耐震補強ブロックの部材配置や接合部の形状を最適化する手法は存在しない。

### 2. 研究の目的

パッシブ制振装置を用いた建築骨組構造の耐震補強の性能向上のため、以下の目的を達成する。

- (1) 既存骨組の柱・梁部材や接合部への影響を考慮して、履歴エネルギー吸収型と強度抵抗型の制振デバイスの剛性、強度や形状などのパラメータを最適化する手法を提案する。
- (2) パーツ形式の耐震補強ブロックの配置を、組合せ最適化問題を解くことによって最適化する。さらに、ブロック接合部の形状を最適化し、模型実験によって性能を検証する。
- (3) 既存骨組に設置した制振デバイスの局部座屈や延性破断をともなう複雑な応答特性をシミュレートするための詳細有限要素解析モデルを開発し、詳細な解析を多数実行することによって、骨組全体の性能を考慮したロバストな耐震補強を実現するための最適化手法を提案する。

### 3. 研究の方法

本研究の構成要素は以下の通りである。

- (1) 耐震補強ブロックの格子形状を、詳細有限要素解析を繰り返し実行して、組合せ最適化問題を解くことによって最適化する。
- (2) 上記の最適化で得られた形状の性能を確認するため、3D プリンタで模型を作成し、骨組モデルに設置して載荷実験を行う。
- (3) 嵌合形式で接続される耐震補強ブロックの形状を詳細有限要素解析を繰り返し実行して最適化する。
- (4) 座屈拘束ブレースの新しい形式を提案し、載荷実験によって性能を確認する。
- (5) ブレース付き骨組のブレース配置と接合形式を、組合せ最適化問題を解くことによって最適化し、優良な解の特性を機械学習を用いて分析する。

### 4. 研究成果

- (1) 既存骨組への影響を考慮した耐震補強ブロックの最適化

耐震補強での利用を想定して、施工性を向上させるため、主に圧縮力と接触力によって層せん断力に抵抗できるような耐震補強ブロックを最適化する手法を提案した。その成果は、以下のようにまとめられる。

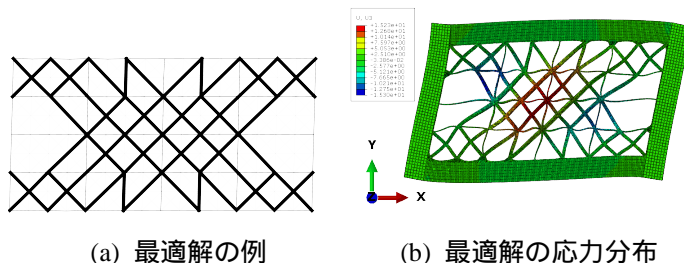


図1: 梁要素による最適化結果と有限要素解析による検証

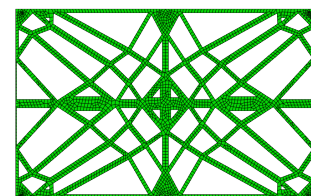


図2: 平面応力要素による最適化解の例

・梁要素による耐震補強ブロックの組合せ最適化

さまざまな種類の耐震補強ブロックを組み合わせ、既存骨組への影響が少なく、層せん断力に対して効率よく抵抗するブロック壁を設計するための最適化手法を開発した。最適化では、ブロックの部材には柱梁要素を用いる。最適解の例を図 1(a)に示す。また、最適化されたブロック壁に対して、ソリッド要素を用いた有限要素解析を実施し、梁要素の解析精度を検証するとともに、面外座屈の影響を検討した。その結果、図 1(b)のような応力分布が得られ、主に圧縮応力で層せん断力に抵抗する機構が生成されていることを検証できた。(雑誌論文 , 学会発表 )

・平面応力要素によるブロックの形状と接合部の形状最適化

梁要素によるモデルでは、生成される形状があらかじめ設定された形状のブロックの組み合わせに限定される。そのため、平面応力要素を用い、ブロックのラチス材の配置と幅を最適化するための 2 段階の手法を開発した。第 1 段階では、ラチス材の接続関係(トポロジー)を固定して節点位置を最適化するため、軸力密度法を用いて形状を定義し、焼きなまし法を用いて、指定された層間変形角での層せん断力が最大になるような形状を求める。第 2 段階では、形状を固定して、材料の体積制約の下で部材幅を最適化する。以上の 2 段階を繰り返すことにより、主に圧縮力で層せん断力に抵抗するラチス材の配置が得られた。最適化結果の例を図 2 に示す。(雑誌論文 , 学会発表 )

・3D プリンタで製作した模型による検証実験

最適化されたブロック壁の性能検証のため、4 枚のブロックからなる基準モデルと最適解を骨組に設置して、水平方向強制変位を与えて検証実験を行った。材料は VeroGray であり、3D プリンタを用いて試験体を製作した。既存骨組の梁と柱は鋼材である。ブロック間は接着し、ブロックと梁柱の間は接触接合とした。実験の結果、規則的な部材配置を有する基準モデルと比べて最適解は高い性能をもつことを確認した。(学会発表 )

・嵌合接合を用いた耐震ブロック壁の最適化

平面充填図形を嵌合で接合して耐震ブロック壁を最適化する手法を提案した。空間充填図形は、四面体の展開図から生成する。図形の幾何学的パラメータを変数として、指定された層間変形角での層せん断力が最大になるような形状を求めた。図 3(a)のようなパターン最適化して得られた形状の例を図 3(b)に示す。図 3(c)のように、ブロック間の接触と離間により圧縮のみで抵抗するブロック壁が生成されていることがわかる。

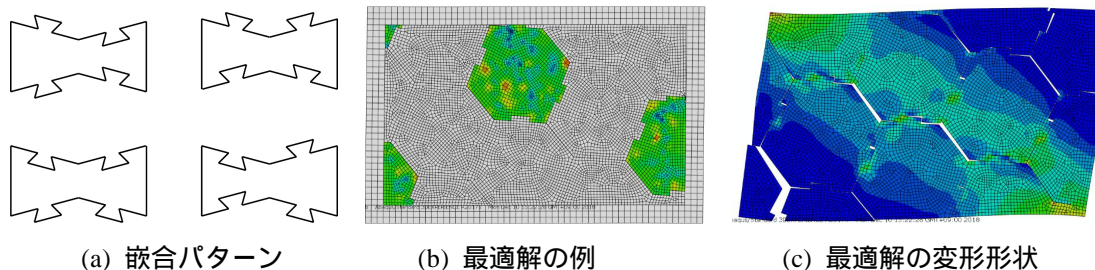


図 3: 嵌合接合された最適解の例

(2) 既存骨組への影響を低減するようなブレースの設計と実験による検証

耐震補強での利用を想定して、既存骨組への取り付けが容易なブレースの形式を提案した。その概要は以下にまとめられる。

・引張力には抵抗せず、圧縮力のみを負担する二重鋼管圧縮ブレースを提案した。骨組にピン形式で接合される場合について、片流れ型試験体(図 4)および K 型試験体の繰返し載荷実験を行い、圧縮ブレースとしての性能を確認した。また、内管に初期圧縮力を与えることでスリップ挙動を抑制できることを確認した。さらに、縮み代部分の内管局部破壊が生じた場合、内管内に挿入する接合部突起部を延伸するなどの対策を検討した。(学会発表 )

・二重鋼管圧縮ブレースが骨組に固定形式で接合される場合についても、繰返し載荷実験および有限要素解析(図 5)を通じて挙動特性を考察し、十分な性能を有することを確認した。(学会発表 )

・二重鋼管圧縮ブレースの端部補強およびウェブの耐力評価について検討し、載荷実験を通じて端部補強効果とウェブ耐力の評価精度を検証した。本形式のブレースを用いることにより、鉄骨架構に対する補強ブレースの取り付け部位にブレースからの引張力に対する補強が不要となる。(学会発表 )

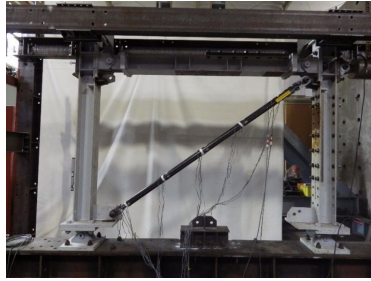


図 4: ピン形式の繰返し載荷実験

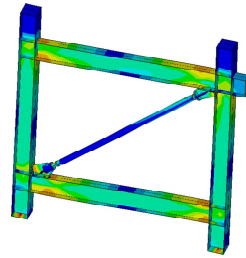


図 5: 固定形式の有限要素解析

### (3) 曲げ先行ブレースの開発

図 6 に示すように、ブレースの中央に折点を有し、圧縮軸力下で曲げモーメントが発生する曲げ降伏先行ブレースを提案した。弱軸まわりの座屈より強軸まわりの曲げ降伏を先行させ、特殊な材料や機構を用いない単純な構造に特長がある。断面形状として、偏平な H 形鋼を用いた偏平断面曲げブレースと接合部近傍でフランジを切り欠く RBS 曲げブレースを提案した。実験によって正負交番載荷時挙動を確認し、偏平断面曲げブレースは構面外変形を低減でき、RBS 曲げブレースは溶接部近傍での破断を回避できる可能性があることを示した。また、有限要素モデルの静的増分解析によって、実験で得られた履歴曲線の基本的な性状を概ね評価できた。さらに、地震応答解析により、鋼管を用いた K 形ブレース架構と比較して曲げ降伏先行ブレースを適用した架構では柱梁の損傷を低減できることを示した。(学会発表, )

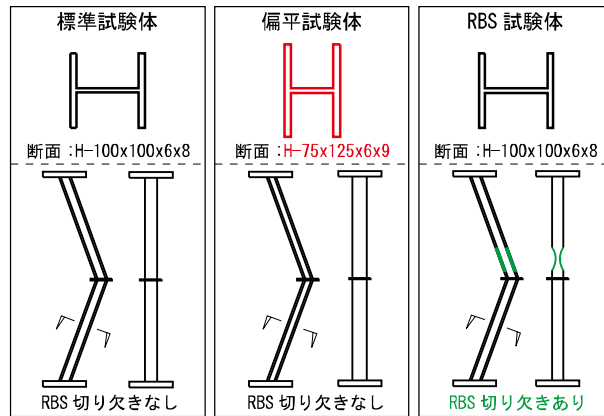


図 6: 曲げ先行型ブレースの実験モデルの概要

### (4) 骨組構造のブレース配置の最適化

さまざまな接合形式を有する鋼構造骨組を対象とし、優良解がもつ特性を分析した。その概要は以下の通りである。

・耐震架構配置と柱断面形状が異なる架構に対して、純ラーメン構造やブレース構造などの構造種別に応じた優良設計解を求め、合理的な架構を設計するための検討を行った。図 7 に示すように、柱が角型鋼管で柱梁接合部を全て剛接合として全体を耐震架構とする型式(全体型)、柱が H 形鋼で外周部のみを耐震架構とする型式(集約 H 型)、集約 H 型の柱を角型鋼管とする型式(集約 B 型)の 3 種類に対して優良解を求めて、それぞれの型式に対して、純ラーメン構造とブレース構造および混成構造の場合を比較した。ブレース構造は鋼管ブレースの場合と座屈拘束ブレースの場合を検討した。純ラーメン構造では集約 H 型の鋼材量が少なく、集約 B 型が多いが、ブレース構造では集約 B 型がやや少なく、混成構造では全体型の鋼材量が増大することを示した。(雑誌論文, 学会発表)

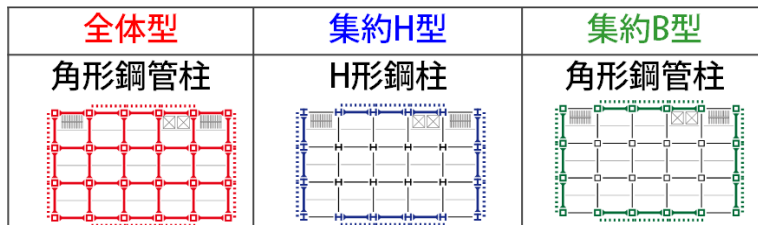


図 7: 3 種類の耐震架構形式

・耐震補強を想定し、ブレースを配置した際の層間変位に関する制約の下で、既存骨組の応力増加量を最小化する問題に対して、優良設計解と非優良設計解の特性を、機械学習を用いて判別した。また、機械学習の過程を最適化アルゴリズムに組み込むことにより、最適化の精度を維持して解析時間を削減することが可能であることを示した。とくにサポートベクターマシンを用いた学習では、畳み込み処理を行った解に対してプーリングを実行しデータの次元数を削減することにより、解の優劣の予測に要する時間を短縮することができ、さらに、小規模骨組の学習結果を用いることで、大規模骨組の優良解・非優良解の予測を行うことが可能であることを示した。(雑誌論文, 学会発表, , , , )

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計5件)

高木次郎, 小花瑠香, 大崎 純, 耐震架構配置と柱断面形状が異なる鋼構造建物の優良設計解, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 84, No.763, 2019. (掲載決定)

木村俊明, 大崎 純, 山岡祐貴, 既存躯体との接触接合による耐震補強格子ブロック壁の形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 84, No.757, pp.385-391, 2019.

DOI:10.3130/aijs.83.1445

T. Tamura, M. Ohsaki and J. Takagi, Machine learning for combinatorial optimization of brace placement of steel frames, Japan Architectural Review, Vol. 1(4), pp. 419-430, 2018.

DOI:10.1002/2475-8876.12059

見上知広, 大崎 純, 田川 浩, 耐震補強格子壁の格子材配置の最適化, 構造工学論文集, Vol. 64B, pp. 55-61, 2018.

福島功太郎, 大崎 純, 見上知広, 宮津裕次, さまざまなユニットで構成された耐震補強ブロック壁の組合せ最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 81, No. 728, pp. 1657-1664, 2016.

DOI:10.3130/aijs.81.1657

### 〔学会発表〕(計20件)

木村俊明, 大崎 純, 田川 浩, 高木次郎, 見上知広, 形状最適化された接触接合耐震補強格子ブロック壁の構造性能実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, Vol. 59, 構造系, 2019. (掲載決定)

包子翔平, 田川 浩, 陳 星辰: 固定接合形式二重鋼管圧縮ブレースに関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第42巻, pp.239-242, 2019.

T. Kimura, M. Ohsaki, Y. Yamaoka, Shape and topology optimization of shear wall consisting of latticed blocks, Proceedings of IASS Symposium 2018, Paper No.234, 2018.

M. Ohsaki, T. Tamura, J. Takagi and T. Kimura, Machine learning for layout optimization of braces of building frames, Proc. Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (ACSMO 2018), Dalian, China, Paper No. A050030, 2018.

山岡祐貴, 大崎 純, 木村俊明, 既存躯体との接触接合による耐震補強ブロック壁の形状最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), B2, pp. 383-384, Paper No. 20192, 2018.

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, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), B2, pp. 861-862, Paper No. 22431, 2018.

上野彰太, 高木次郎, 小花瑠香, 大崎 純, 断面性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, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), B2, pp. 707-708, Paper No. 22354, 2018.

田村拓也, 大崎 純, 木村俊明, 高木次郎, 機械学習を用いた鋼構造骨組のブレース配置の性能予測と組合せ最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), B2, pp. 375-376, Paper No. 20188, 2018.

木村俊明, 大崎 純, 田村拓也, 高木次郎, 機械学習による応答予測を用いた鋼構造ブレース補強骨組の付加応力最小化, 第41回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 日本建築学会・情報システム技術委員会, No. H22, pp. 234-237, 2018.

小池計至, 田川 浩, 陳 星辰, 鋼構造骨組における二重鋼管圧縮ブレース接合部の圧縮挙動, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第41号, pp. 169-172, 2018.

包子翔平, 田川 浩, U字孔を有する座屈拘束方杖ダンパーの繰返し載荷実験, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第40号, pp. 343-346, 2017.

田村拓也, 大崎 純, 高木次郎, 機械学習を用いた鋼構造骨組の最適ブレース配置の分析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, Vol. 57, 構造系, pp. 477-480, 2017.

J. A. Mateus and H. Tagawa, Cyclic loading tests on buckling-restrained braces using round steel bar cores restrained by inner round steel tubes and an outer square steel tube, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Chugoku, B3, pp. 1177-1178, Paper No. 22589, 2017.

田村拓也, 大崎 純, 高木次郎, 機械学習を用いた鋼構造骨組のブレース配置の組合せ最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B1, pp. 355-356, Paper No. 20178, 2017.

山岡祐貴, 大崎 純, 見上知広, 形状最適化された耐震補強ブロック壁の有限要素解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B1, pp. 357-358, Paper No. 20179, 2017.  
田村拓也, 大崎 純, 高木次郎, 機械学習と疑似焼きなまし法を用いた鋼構造骨組のブレース配置の組合せ最適化, 第40回情報・システム・利用・技術シンポジウム, 日本建築学会・情報システム技術委員会, No. H81, pp. 67-70, 2017.  
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, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B3, pp.1255-1256, 2017.  
大塚悠平, 田川 浩, 二重鋼管圧縮ブレースの繰返し載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B3, pp. 1191-1192, 2017.  
田村拓也, 大崎 純, 高木次郎, 鋼構造骨組のブレース配置の組合せ最適化, 第12回最適化シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, No. 2208, 2016.  
福島功太郎, 大崎 純, 見上知広, 宮津裕次, ユニットで構成された耐震補強ブロック壁のトポロジー最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), B1, pp. 391-392, Paper No. 20196, 2016.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：田川 浩

ローマ字氏名：TAGAWA, Hiroshi

所属研究機関名：広島大学

部局名：工学研究院

職名：教授

研究者番号(8桁)：70283629

研究分担者氏名：高木 次郎

ローマ字氏名：TAKAGI, Jiro

所属研究機関名：首都大学東京

部局名：都市環境科学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：90512880

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。