

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630257

研究課題名(和文) 柔軟な構造を用いた地震応答低減のための最適化手法

研究課題名(英文) Optimization method for seismic response reduction utilizing flexibility of structures

研究代表者

大崎 純 (Makoto, Ohsaki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40176855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：空間構造の屋根と支持構造の境界部分の破壊を防ぎ、天井などの非構造材の被害を低減するため、屋根と支持構造が一体となって振動するような柔な支持構造を最適化する手法を提案した。支持構造の頂点が斜め方向に振動することにより、アーチの法線の振動が低減されることを示した。また、曲面上のラチスシェルに対しても、柔軟な支持構造によって応答低減が可能であることを確認した。さらに、幾何学的な特性による免震構造を実現するため、水平方向の地震動によって頂点が上方向に移動する支持構造を最適化し、模型製作によって性能を確認した。

研究成果の概要(英文)：An optimization method has been presented for designing a flexible support for preventing damage at the connection between long-span roof and its support structure. A synchronized vibration of roof and support also prevents damage of nonstructural components such as ceiling. It has been shown that diagonal displacement of connection reduces seismic responses of arch in normal direction. Similar effect has also been confirmed for a long-span latticed shell. Furthermore, a support structure with upward displacement due to horizontal loads has been optimized considering geometrical nonlinearity to realize a base isolation utilizing geometrical nonlinearity. The effectiveness of this support has been confirmed by a small-scale model.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：柔なメカニズム 地震応答 最適化 空間構造

1. 研究開始当初の背景

建築構造の地震応答を低減するための耐震構造、免震構造、制振構造では、骨組頂部の変位、速度、加速度の全てを低減することは困難である。最近になって、これらの標準的な構造形式以外に、建物の変形や柔軟性を利用した方法が提案されている。しかし、それらの形式は、経験的に決められることが多い。また、柔軟なメカニズムの設計に関するこれまでの研究のほとんどは、数式を用いた解析的な表現に基づいており、数値解析によるシステマティックな方法は存在しない。

このような状況において、研究代表者らは、部材の変形を利用した柔軟なメカニズムを用いて空間構造や骨組の地震応答を低減できることを示した。とくに、空間構造の柔軟な支承によって、水平方向のみならず鉛直方向の免震支承を実現できることを示した。また、柔軟なメカニズムを用いた展開屋根構造を提案し、重力を利用することによって展開のために必要な荷重の最大値を低減できることを示した。

2. 研究の目的

建築骨組構造の変形を利用した地震応答低減については、ロッキング機構、ソフファーストストーリーなどが存在する。しかし、それらの機構は経験的な方法で設計されることが多く、最適な形態が得られているとはいえない。本研究では、以下の目的を達成して、新しい柔軟構造を設計するための最適化手法を提案する。

1. 柔軟な支持構造（基礎、柱、ファーストストーリーなど）を実現する骨組構造の形状を、トポロジー最適化手法で生成し、地震に対して柔軟に抵抗する骨組構造と屋根構造を設計する。
2. 柔軟な支持構造を有する骨組および屋根構造に対して地震応答解析を実行し、幾何学的特性、剛性、強度などのパラメータを最適化する。
3. 上記の方法で設計された構造の有効性を、振動台実験によって検証する。

3. 研究の方法

本研究は、以下の4つのステップで構成される。

1. 静的外力が作用したときの変形を自由に制御するため、骨組の基礎構造あるいは空間構造の支持構造の最適化問題を定式化し、最適トポロジーを得るための新しい手法を提案する。
2. 上記の手法を用いて得られたトポロジーに対して、応答スペクトル法で評価された地震応答を低減するための柔軟な支持構造の形状と剛性分布を最適化によって求める。
3. 上記の支持構造を有する骨組および屋根構造に対して時刻歴応答解析を実施して、応答の低減効果を確認するとともに、

実務設計で要求される性能を検証する。

4. 簡単な平面構造モデルを作成して1軸振動台実験を行い、振動特性を確認する。

4. 研究成果

4.1 骨組構造の基礎の最適化

図1のような4層2スパンの鋼構造骨組を対象とし、屋根最大変位の低減を目的として柔軟な支持構造を最適化する。（詳細は[学会発表①]を参照）

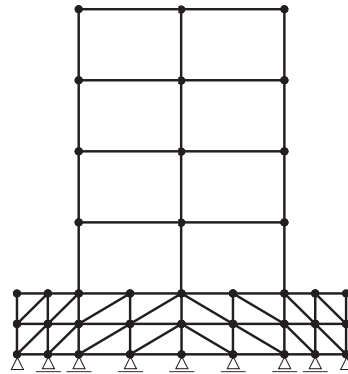
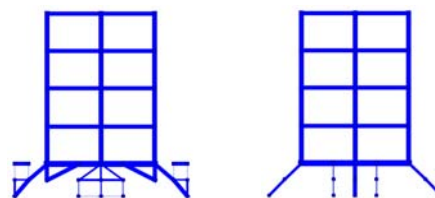


図1: 4層2スパン骨組モデル

図1の基礎部分の部材は簡単のため鋼管とし、外径と厚さの比を固定して、外径と節点位置を変数とする。最適化の後に外径が微小となった部材を削除して、最適な剛性と部材配置を得る。

限界耐力計算法で用いられる第2種地盤の設計用加速度応答スペクトルに適合する地震動を想定し、応答スペクトル法(SRSS法)を用いて応答量を算出する。支配的な振動モードとして3次までを考慮し、最適化の際には減衰定数は0.02で固定する。

また、長周期化による応答低減と区別するために、1次固有周期が1.0秒以下となる制約を与える。さらに、支持構造に十分な鉛直剛性を持たせるために、自重作用時の1層柱脚節点1および2の最大鉛直変位に対して上限値を与える。



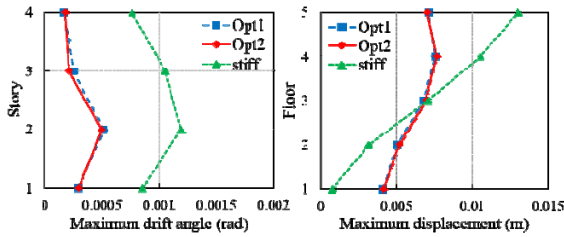
(a) Opt1 (b) Opt2
図2: 柔軟な基礎構造の最適形状

目的関数を屋根最大変位として、最小化する。既往の研究結果より、基礎と上部骨組が逆方向に回転して屋根変位を低減するようになりバースロッキング振動を得るためには、2次刺激係数が1次刺激係数よりも十分大きな値である必要があることがわかっている。そのため、2次刺激係数が1次刺激係数の5倍以上なるような制約を与える。部材の厚さ

と節点位置の修正量に対しても上下限值を与える。

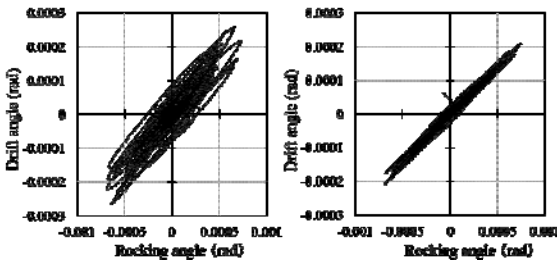
10 個のランダムな初期解から非線形計画法による最適化を行って得られた解のうち、上位 2 個の最適形状 (Opt1, Opt2) を図 2(a), (b) に示す。

性能比較のため、全部材の外径を上限値に一致させた剛モデルを作成する。Opt1, Opt2 と剛モデルに対して時刻歴応答解析を行って得られた各層の最大層間変形角と各階の最大変位の分布を図 3 に示す。最大層間変形角は各層で約 60% 低減されている。また、変位は下階では増加するが、上階では低減されている。



(a) 最大層間変形角 (b) 最大変位
図 3: 最適形状と剛モデルの応答

図 4 に、Opt1, Opt2 の基礎梁回転角（反時計回りを正）と上部骨組の平均層間変形角（骨組が右に変位した時を正）の関係を示す。Opt1 と Opt2 とともに、基礎梁が建物と逆方向に回転し、ロッキング振動していることがわかる。



(a) Opt1 (b) Opt2

図 4: 基礎回転角と平均層間変形角の関係

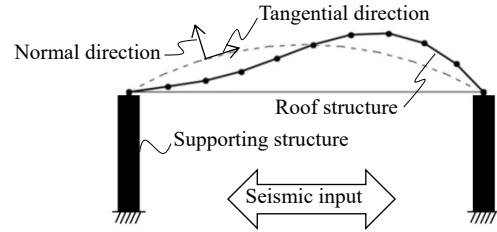
4.2 アーチの支持構造の最適化

最近の地震被害から、空間構造の屋根と支持構造の境界部分（以下、支持構造頂点という）の破壊が問題となっている。このような破壊を防ぐためには、支持構造の剛性を低減して、屋根と支持構造が一体となって振動する必要がある。そのため、屋根の応答低減を目的として、柔な支持構造を最適化する。

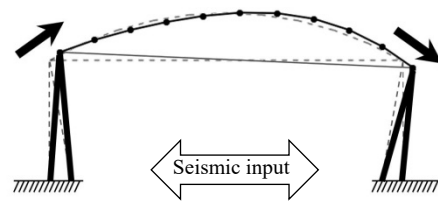
水平方向地震動に対するアーチの応答は、支持構造の特性によって図 5 のように変化する。支持構造が剛な場合には逆対称の上下方向応答が卓越し、柔な場合には、アーチは剛体的に振動する。また、地震応答は、支持構造の剛性のみならず、支持構造頂点の振動方向にも大きく依存する。

支持構造をトラスでモデル化し、静的水平力が頂点に作用した時に、指定した方向に変

位するような柔な支持構造を最適化する。まず、幾何学的非線形性を考慮し、頂点が左右のいずれに移動した時にも上方向に変位するようなトラスを求めてモデルを作成した。変形状態を写真 1 に示す。このような支持構造を用いることにより、免震構造と同様の効果が期待できる。



(a) 剛な支持構造

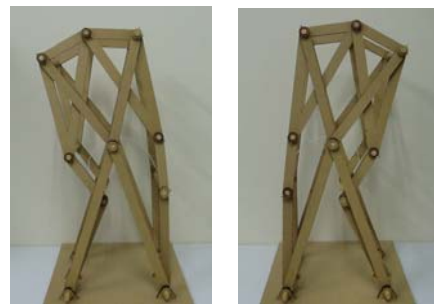


(b) 柔な支持構造

図 5: 支持構造の剛性と屋根振動の関係



(a) 変形前



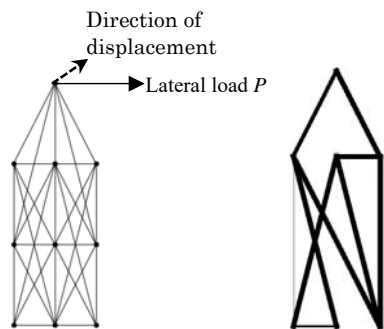
(b) 左に移動 (c) 右に移動

写真 1: 幾何学的非線形性を考慮した最適形状

次に、幾何学的非線形性は考慮せず、頂点の水平荷重に対して斜め方向に変位する支持構造を最適化する。（詳細は[雑誌論文①]参照）

図 6(a) のような初期解から最適化すると、図 6(b) のような構造が得られた。これを図 7 のようにアーチの両端に設置し、水平方向地

震動に対して時刻歴応答解析を行って得られた接線方向と法線方向の最大加速度分布を図 8(a), (b)に示す。ここで、 Δ は剛モデル、 \times は最適解である。図より、支点がアーチの接線方向に移動することにより、接線方向の加速度は大きくなるが、法線方向の加速度は低減されることがわかる。



(a) 初期解 (b) 最適解

図 6: 斜め方向に変位する支持構造

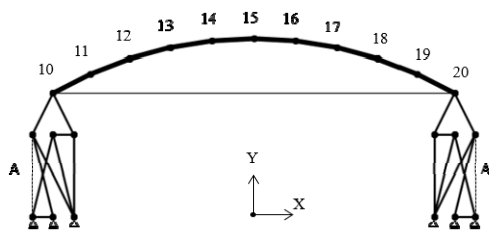
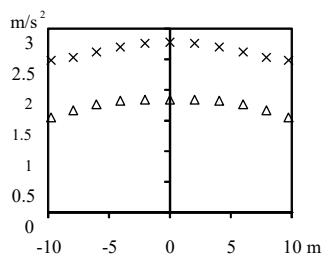
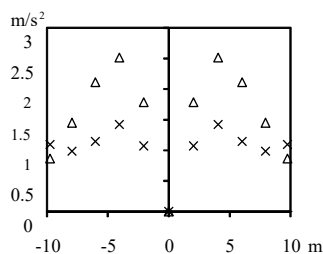


図 7: 斜め方向に変位する支持構造をもつアーチ



(a) 接線方向



(b) 法線方向

図 8: アーチの加速度応答

(Δ : 剛モデル, \times : 最適解)

斜め方向に変位する支持構造を有するアーチの振動特性を確認するため、写真 2 のようなモデルを作成した。支持構造は含めず、写真 3 のように方向振動方向を変更できるような支点を設置した。振動実験の結果、支点の方向による振動震動性状変化は定性的に確認できたが、支点での摩擦の影響で定量的比較は困難であった。

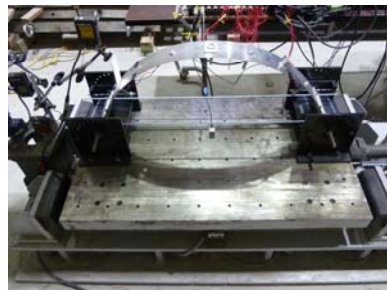


写真 2: 振動実験のためのアーチモデル



写真 3: アーチモデルの支点

平面アーチのみならず、曲面上のラチスシェルに対しても、柔軟な支持構造によって応答低減が可能であることを確認した。

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 1 件)

- ① Y. Miyazu, M. Ohsaki and S. Tsuda, Topology optimization of supporting structure for seismic response reduction of an arch, Science China Technological Sciences, 10.1007/s11431-016-6028-z, 掲載決定, 2016. (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 岩月 脩, 大崎 純, 江口範高, 渡邊秀和, 地震応答低減のための柔なロック構造のトポロジー最適化, 第 63 回理論応用力学講演会, OS09-01-03, 2014.
- ② 大崎 純, 柔軟な構造の設計のための最適化手法, 第 11 回最適化シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, 特別講演 2, pp. 3-7, 2014.
- ③ 岩月 脩, 大崎 純, 津田勢太, 宮津裕次, 空間構造物の地震応答低減のための柔

な支持構造の最適化, 日本建築学会中国
支部研究報告集, Vol. 38, pp. 101-104,
Paper No. 205, 2015.

- ④ M. Ohsaki, O. Iwatsuki, Y. Miyazu and
S. Tsuda, Optimization of flexible
supports for seismic response
reduction of long-span structures, Proc.
11th World Congress of Structural and
Multidisciplinary Optimization
(WCSMO11), Sydney, Paper No. 1040,
2015.
- ⑤ M. Ohsaki, Y. Miyazu and S. Tsuda,
Optimization of flexible supports for
seismic response reduction of arches
and frames, Proc. 11th World Congress
of Computational Mechanics
(WCCM12), Seoul, Paper No. 150564,
accepted for presentation, 2016.
- ⑥ Y. Miyazu, M. Ohsaki and S. Tsuda,
Topology optimization of supporting
structures for seismic response
reduction of spatial structures, Proc.
Annual Symposium of Int. Assoc. Shell
and Spatial Structures (IASS 2016),
Tokyo, Paper No. 1069, accepted for
presentation, 2016.

6. 研究組織

(1)研究代表者

大崎 純 (Makoto Ohsaki)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：40176855

(2)研究分担者

津田勢太 (Seita Tsuda)
岡山県立大学・デザイン学部・准教授
研究者番号：80584325