

# 骨組の位相最適化手法を用いた制震ダンパーの最適配置

## Optimum placement of response control damper using topology optimization method for frame structure

久保和毅\*  
Kazuki KUBO

Recently, response control dampers are often used for improving seismic performance of building. The placement of the dampers is important because the seismic performance of building depends on it. Therefore, in this paper, a method to obtain an optimum placement of response control dampers is proposed. In the present method, the optimum placement of the dampers is obtained by topology optimization method for frame structure (i.e. ground structure method). The response control dampers work for dynamic external force, but, in this method, the placement of the dampers is obtained by the optimization analysis for static external force. The effectiveness of the optimum placements obtained by the present method is verified by the dynamic response analysis of some numerical examples.

**Keywords:** Response control damper, Optimum placement, Topology optimization, Ground structure method  
制震ダンパー, 最適配置, 位相最適化, グランドストラクチャ法

### 1. 緒言

近年, 建物の地震に対する安全性を確保する方法として, 建物の骨組構造に地震エネルギー吸収装置(制震ダンパー)を設置する制震構造が増えている. このような制震構造は, 新築建物だけでなく, 現行の耐震基準を満たさない既存不適格建物の耐震補強にも用いられている.

また, 今年, 日本に衝撃を与えた東日本大震災での長周期地震動で, 東京などでの高層建物の揺れが問題になった. 建物の上層部では, 長周期の揺れが原因で, 家具などの転倒があり, 人の命も危険に冒された. このことから高層建物の耐震補強が急務となっている. しかし, 高層建物の場合, 通常の耐震補強では, 建物の固有周期が短くなり, 応答を増大させてしまう危険性がある. そこで, 建物内部の被害を抑えるという観点からも, 建物の骨組構造に制震ダンパーを設置する制震構造が注目されている.

このような制震構造では, 建物頂部または第一層に集中的に制震ダンパーを配置する方法もあるが, 一般的には構造体の各層に分散的に制震ダンパーを配置する層間設置型がよく用いられている. この層間設置型では, 制震ダンパーの配置方法として, 連層配置, 市松配置, 下層集中配置, 複数層への分配配置など様々な配置方法がある. また, 構造上の条件とは別に, 建物の用途や計画上の理由によって, ダンパーを設置できる空間が制約されることがある. したがって, 制震構造の設計において, 制震ダンパーの適切な配置を見つけることは容易ではない. 特に, ダンパーの設置場所や設置数に制限がある場合, 効果的な制震ダンパーの配置には, 豊富な設計経験と解析的な試行錯誤が必要となる.

このような問題を解決するため, GA (遺伝的アルゴリズム) を用いてこのような制震装置の最適配置を求める方法がいくつか提案されている<sup>1)3)</sup>. しかし, ダンパー配置の組み合わせパターンは, 対象となる建物の規模が大きくなると最適解を求めることは容易ではない.

そこで, 本研究では, 解析上, すべての設置可能場所に制震ダンパーを配置し, 数理計画法を利用して, 重要度の低いダンパーを逐次消去していく方法により, ダンパーの最適配置を求める方法を提案する. 本最適化問題では, 本来, 制震ダンパーの減衰力が設計変数となり, 動的地震力に対する建物の最大応答の最小化が目的となる. しかしながら, 動的地震力は, 震源とその伝達経路によって様々な特性を有しており, 最適解も地震力の特性に大きく左右される. したがって, よりロバストな解を得るためには, 地震力を静的な外力に置き換えた解析からダンパーの最適配置を求めることが望ましい. そこで, 本研究では, 通常の設計で用いられる  $A_i$  分布の静的地震力を用い, ダンパー設置位置には, 減衰力を剛性に置き換えた部材を配置する. そして, 骨組全体の剛性を最大化するダンパー置換部材の最適配置を求めることで, 実際のダンパー配置の最適解を求める. これは, ダンパーを剛性部材に置き換えて, 骨組の位相最適化手法であるグラウンドストラクチャ法を適用することに相当する. 換言すれば, 部材剛性が必要となる箇所にダンパーを配置すれば, 骨組構造の効率的な減衰性能を確保できるという仮定に基づいている.

本論文では, このような方法によって求めた制震ダンパーの配置が, 他の配置モデルと比べて動的地震力に対する骨組構造の最大応

\* 近畿大学大学院 大学院生

答の最小化すること、減衰力を最大化することを、いくつかの代表的な地震力に対する動的地震応答解析によって検証する。

以下、本論文第2章では、グランドストラクチャ法によって、制震ダンパーの最適配置を求める方法を述べる。第3章では、いくつかの建築骨組の解析例に対して本方法によって得られた配置と、他の配置候補の動的地震力に対する応答、減衰定数を比較することにより、本提案手法の有効性を示す。第4章では、以上のまとめを述べる。

## 2. 制震ダンパーの最適配置法

### 2.1 解析法の概要

本手法は、図1aに示すように、解析上、まず、すべての設置可能箇所に制震ダンパーを配置する。次に、図1bに示すようにすべてのダンパーを剛性部材に置き換える。次に、このダンパー置換部材の剛性を設計変数とし、静的な地震力(Ai分布の地震層せん断力)に対する応力解析(有限要素解析)を行う。そして、骨組全体の剛性が最大となるように、ダンパー置換部材の剛性を最適化する。この場合、図1cに示すように、必要なダンパー置換部材の剛性(太さ)は大きくなり、 unnecessaryダンパー置換部材の剛性は小さくなる。このようにして得られたダンパー置換部材の剛性分布から、図1dに示すようにダンパー配置位置を決定する。

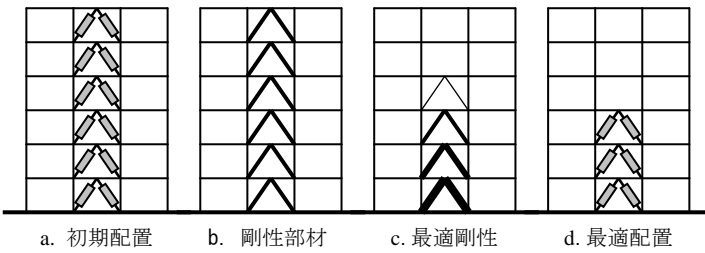


図1 解析法の概要

### 2.2 最適化問題の定式化

次に、ダンパー置換部材の剛性を設計変数とし、骨組構造の剛性を最大化する最適化問題の定式化を示す。なお、本論文では、すべてのダンパー配置可能位置に剛性部材を配置した構造をグランドストラクチャと呼ぶ。

まず、本問題では、グランドストラクチャのダンパー置換部材の剛性を評価するために、ダンパー置換部材の要素密度を  $\rho_i$  とし、ダンパー置換部材の要素剛性マトリクス  $\mathbf{k}_i$  を次式で表すものとする。

$$\mathbf{k}_i = \rho_i \mathbf{k}_i^0 \quad \rho_i \geq 0 \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{k}_i^0$  は、初期の要素剛性マトリクスである。また、ダンパー置換部材の総質量  $m$  は次式で表されるものとする。

$$m = \sum_{i=1}^N \rho_i A_i l_i \quad (2)$$

ここに、 $N$  はダンパー置換部材の部材数、 $A_i, l_i$  は  $i$  番目部材の断面積と長さを表す。

ダンパー置換部材の剛性を最適化する位相最適化問題は、質量制約下でコンプライアンス(剛性の逆数)を最小化する次のような問題として定式化する。

$$\begin{aligned} \min \quad & C(\boldsymbol{\rho}) \\ \text{subject to} \quad & m(\boldsymbol{\rho}) \leq \bar{m}, \quad \boldsymbol{\rho} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、コンプライアンス  $C$  は、次式から求められる。

$$C = \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{d}^T \mathbf{f} \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{d}, \mathbf{f}$  は節点変位ベクトルと節点外力ベクトル、 $\mathbf{K}$  は全体剛性マトリクスである。

### 2.3 最適化問題の解法

本論文では、(3)式 of 非線形最適化問題を CONLIN 法<sup>4),5)</sup>で解く。CONLIN 法では、第  $k$  ステップの解を既知として、(3)式の第  $k$  ステップの設計変数に関するテーラー展開を、感度係数が正の場合と負の場合に分けて、次式のように行う。

$$\begin{aligned} C(\boldsymbol{\alpha}) &= C(\boldsymbol{\alpha}^{(k)}) + \sum_{\frac{\partial C}{\partial \alpha_i} > 0} \frac{\partial C}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i - \sum_{\frac{\partial C}{\partial \alpha_i} < 0} (\alpha_i^{(k)})^2 \frac{\partial C}{\partial \alpha_i} \left( \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_i^{(k)}} \right) \\ m(\boldsymbol{\alpha}) &= m(\boldsymbol{\alpha}^{(k)}) + \sum_{\frac{\partial m}{\partial \alpha_i} > 0} \frac{\partial m}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i - \sum_{\frac{\partial m}{\partial \alpha_i} < 0} (\alpha_i^{(k)})^2 \frac{\partial m}{\partial \alpha_i} \left( \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_i^{(k)}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha_i^{(k)}$  は第  $k$  ステップの  $i$  番目部材の設計変数、 $\Delta \alpha_i$  は  $\alpha_i^{(k)}$  からの設計変数の増分値、 $(1/\alpha_i - 1/\alpha_i^{(k)})$  は設計変数の逆数の増分値を表す。この方法では、設計変数の逆数のテーラー展開に解の収束を速める効果がある。ただし、この効果を有効にするためには、非線形関数となる目的関数の増減を設計変数の増減に比例させる必要がある。このため、本研究では  $\alpha_i = 1/\rho_i$  としている。この場合、要素剛性マトリクス  $\mathbf{k}_i$  は次式で表される。

$$\mathbf{k}_i = (1/\alpha_i) \mathbf{k}_i^0 \quad \alpha_i > 0 \quad (6)$$

また、(5)式内の感度係数は、次式により計算される。

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha_i} = -\mathbf{d}_i^T \left( -\frac{1}{\alpha_i^2} \mathbf{k}_i^0 \right) \mathbf{d}_i \quad \frac{\partial m}{\partial \alpha_i} = -\frac{1}{\alpha_i^2} A_i l_i \quad (7)$$

最適化計算では、(5)式に初期値を与え、繰り返し計算により、各ステップの設計変数の最適増分を求め、解の更新を行う。本問題では、40 ステップ程度の繰り返しで、収束解が得られる。ただし、この収束解は局所解である場合が多いため、本論文では、文献7)に示す方法により、真の最適解を求める。なお、文献6)にも同様の解法が示されている。

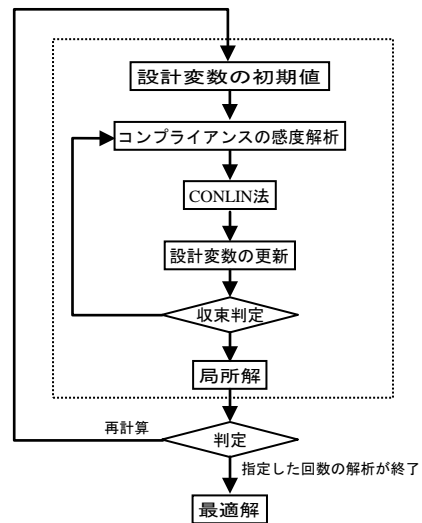


図2 グローバル最適解を探索する計算フロー

図2は本計算法のフローを示したものである。図の点線で囲まれた部分が(5)式を用いた通常の最適化計算であり、本計算フローでは、点線内の解析で得られた最適解を再度初期値として再計算を行う。ただし、再計算を行う場合は、設計変数のムープリミット、CONLIN法の諸係数等はすべて初期化される。本解析では、30回程度の再計算を行うことで、グローバル最適解を得ることができる。

### 3 解析例

#### 3.1 解析概要

本提案手法の有効性を検討するに当たって、まず解析モデルを作成し、2章で説明した位相最適化手法により解析を行う。得られた結果をもとに、配置モデルを作り、これを最適配置とする。位相最適化手法により得られた結果の有効性を検証するために比較モデルを作り、地震応答解析で検証を行う。ダンパーの減衰力は最適配置モデルの減衰力が10%になるように設定し、ダンパーの性能をすべて同等のものとして比較を行う。

地震応答解析によって検証する地震波は、ElCentro NS, 神戸海洋気象台 NS, 八戸 NS, Taft EWを使用した。

本論文では、ダンパーの無い骨組モデルを基準として、Elcentro NSの最大速度の結果を示す。

#### 3.2 解析例①

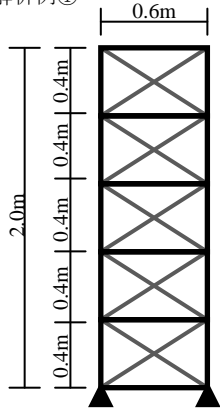


図3 解析モデル

表1 断面詳細

|   | 柱                                   | 梁                                |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|
| E | $2.05 \times 10^8 \text{N/m}^2$     |                                  |
| A | $1.304 \times 10^{-3} \text{m}^2$   | $4.5 \times 10^{-2} \text{m}^2$  |
| I | $1.73867 \times 10^{-9} \text{m}^4$ | $3.75 \times 10^{-5} \text{m}^4$ |

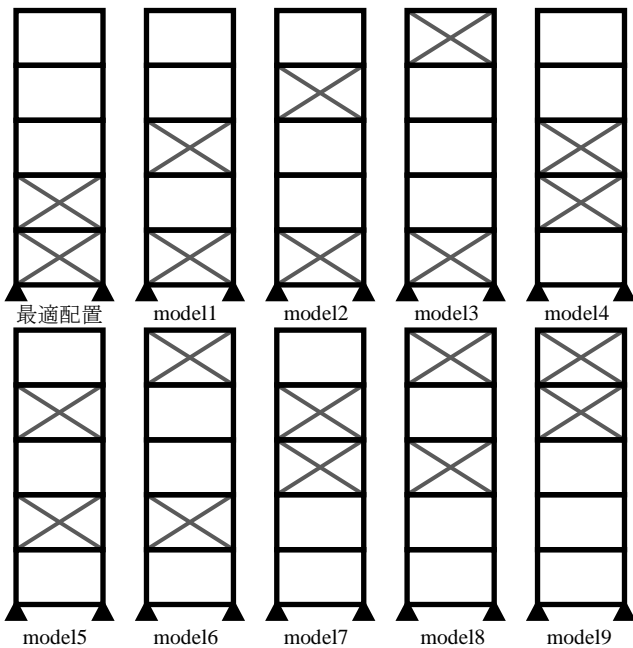


図4 最適配置, 比較モデル

まず、本方法の有効性を検証するため、文献8)に示される実験モデルを参考に、図3に示す解析モデルによる解析を行う。

このモデルは5層1スパンからなるモデルで、建物の詳細を表1に示す。

2章で説明した位相最適化手法により図3のモデルで解析を行った結果を図4(最適モデル)に示す。位相最適化手法により得られた結果の有効性を検証するために図4の比較モデルで地震応答解析を行う。

図5にElcentro NSの最大速度の結果を示す。図より、本手法で提案しているダンパー配置の最大応答が最も小さくなった。変位, 加速度, 他の地震波でも同様の結果が得られた。また、減衰力は最も大きくなった。

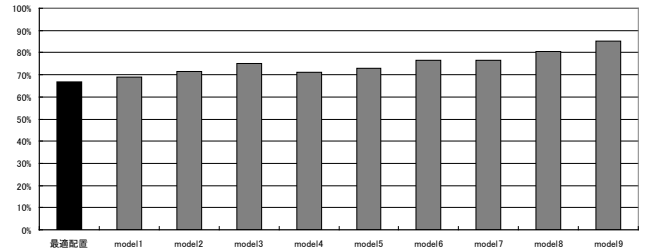


図5 最大速度の比較 (ElCentro NS)

#### 3.3 解析例②

文献9)に示される実設計モデルを参考に、図6に示す解析モデルによる解析を行う。

このモデルは6層5スパンからなるモデルで、図6の解析モデル、表2の断面詳細で解析を行った。結果、配置モデルを図7(最適配置)に示す。次に地震応答解析のとき比較に用いるモデルを図7に示す。

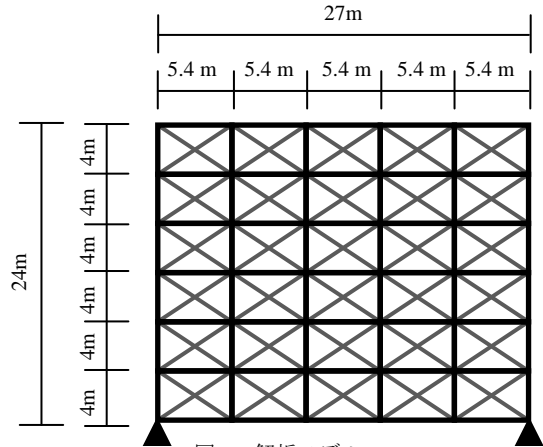


図6 解析モデル

表2 断面詳細

| 柱    | 部材断面         | 断面2次モーメント | 断面積   |
|------|--------------|-----------|-------|
| 1, 2 | 450*450*25*1 | 109       | 387.4 |
| 3~6  | 450*450*19*6 | 86        | 351.7 |
| 梁    | 部材断面         | 断面2次モーメント | 断面積   |
| 2    | 700*200*14*2 | 174       | 192.1 |
| 3    | 600*200*12*2 | 108       | 178.7 |
| 4    | 600*200*12*2 | 99        | 167.4 |
| 5    | 600*200*12*1 | 82        | 144.9 |
| 6,7  | 600*200*12*1 | 73        | 139.5 |

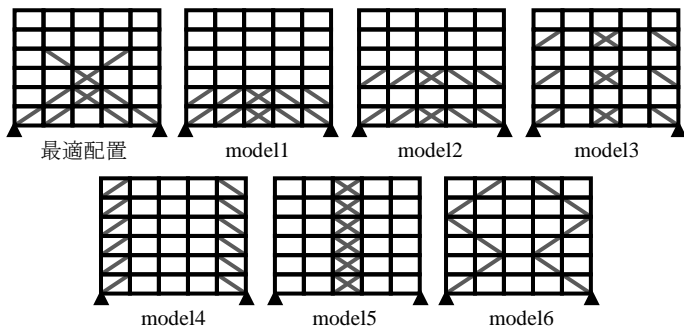


図7 最適配置，比較モデル

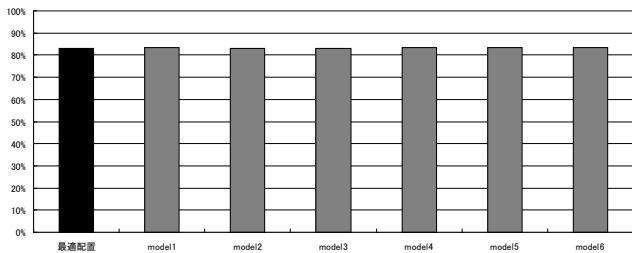


図8 最大速度の比較 (ElCentro NS)

図8にElcentro NSの最大速度の結果を示す。図より、本手法で提案しているダンパー配置の最大応答が最も小さくなった。変位，加速度，他の地震波でも同様の結果が得られた。また，減衰力は最も大きくなった。

### 3.4 解析例③

次に3.3のモデルに建物の用途や計画上の理由によって，ダンパーを設置できる空間が制約されるという問題を想定して，窓を配置し，そこにはダンパーを設置できないパターンで検証を行う。図9の解析モデルで解析を行った。結果，配置モデルを図10(最適配置)に示す。次に地震応答解析のとき比較に用いるモデルを図10に示す。

図11にElcentro NSの最大速度の結果を示す。図より，本手法で提案しているダンパー配置の最大応答が最も小さくなった。変位，加速度，他の地震波でも同様の結果が得られた。また，減衰力は最も大きくなった。

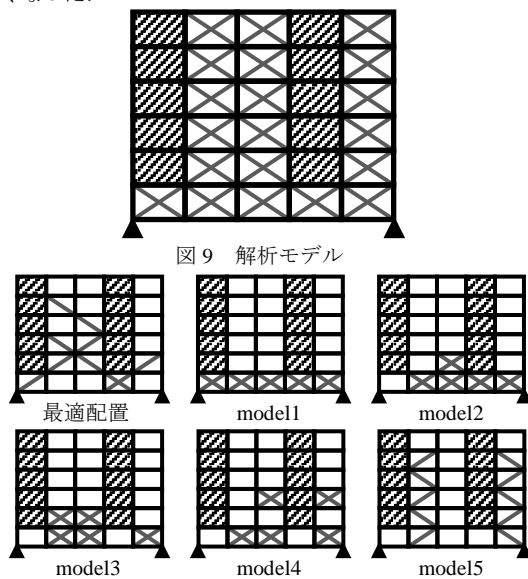


図10 最適配置，比較モデル

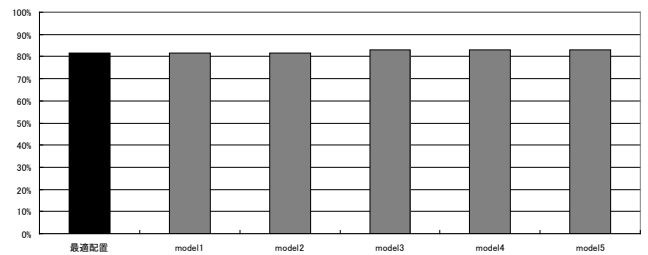


図11 最大速度の比較 (ElCentro NS)

### 3.5 解析例④

3.4と同様に3.3のモデルに建物の用途や計画上の理由によって，ダンパーを設置できる空間が制約されるという問題を想定して，窓，耐震壁を配置し，そこにはダンパーを設置できないパターンで検証を行う。図12の解析モデルで解析を行った。結果，配置モデルを図12(最適配置)に示す。次に地震応答解析のとき比較に用いるモデルを図13に示す。

図14にElcentro NSの最大速度の結果を示す。図より，本手法で提案しているダンパー配置の最大応答が最も小さくなった。変位，加速度，他の地震波でも同様の結果が得られた。また，減衰力は最も大きくなった。

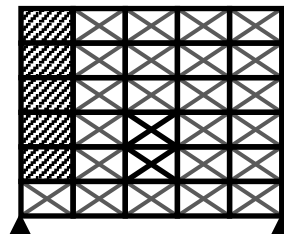


図12 解析モデル

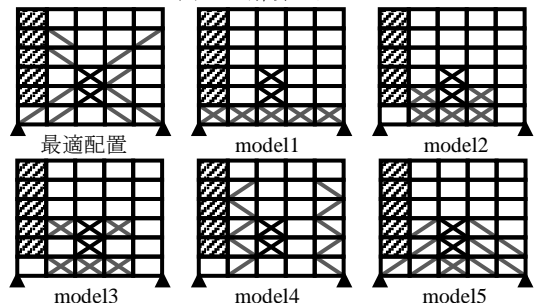


図13 最適配置，比較モデル

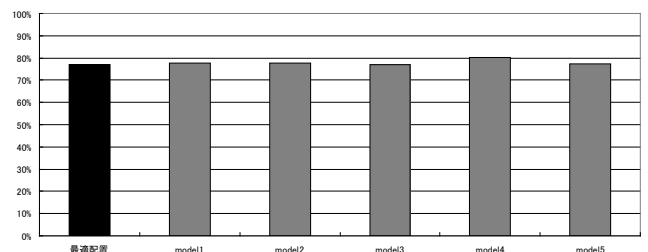


図14 最大速度の比較 (ElCentro NS)

### 3.6 解析例⑤

次に高層ビルとして，nttビルを参考に図に示す解析モデルによる解析を行う。このモデルは35層の建物で各階の高さが4m，高さが6mの建物である。図15の解析モデル，表3の断面詳細で解析を行った。結果，配置モデルを図15(最適配置)に示す。次に地震応答解

析とき比較に用いるモデルを図 15 に示す。

図 16 に Elcentro NS の最大速度の結果を示す。図より、本手法で提案しているダンパー配置の最大応答が最も小さくなった。変位、加速度、他の地震波でも同様の結果が得られた。また、減衰力は最も大きくなった。

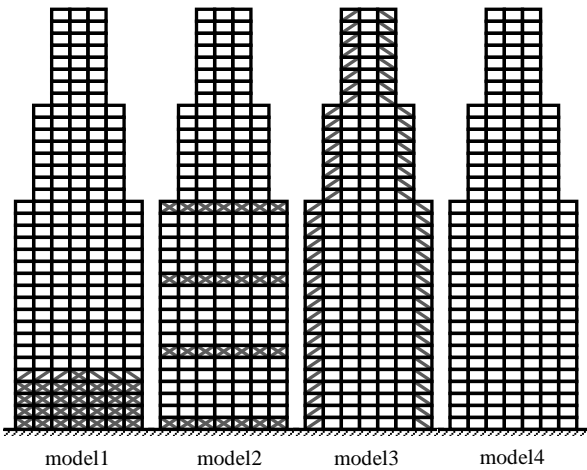
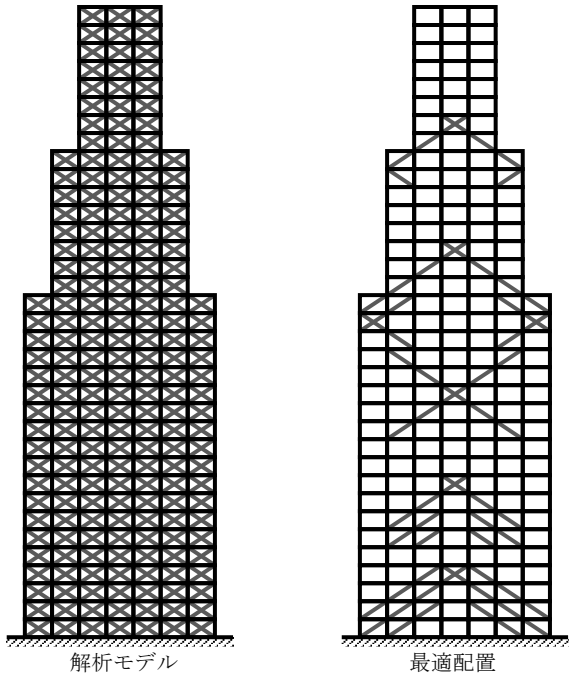


図 15 モデル図

表 3 断面詳細

| 柱     | 部材断面           | 断面 2 次モーメント | 断面積   |
|-------|----------------|-------------|-------|
| 1~6   | 950*950*50*175 | 2150000     | 1671  |
| 7~12  | 900*900*50*175 | 1790000     | 1571  |
| 13~18 | 850*850*50*175 | 1480000     | 1471  |
| 19~36 | 800*800*50*175 | 1210000     | 1371  |
| 梁     | 部材断面           | 断面 2 次モーメント | 断面積   |
| 1~6   | 950*400*19*36  | 714000      | 457.6 |
| 7~12  | 900*400*19*40  | 684000      | 478.6 |
| 13~18 | 850*400*19*40  | 602000      | 469.1 |
| 19~36 | 800*400*19*40  | 525000      | 459.6 |

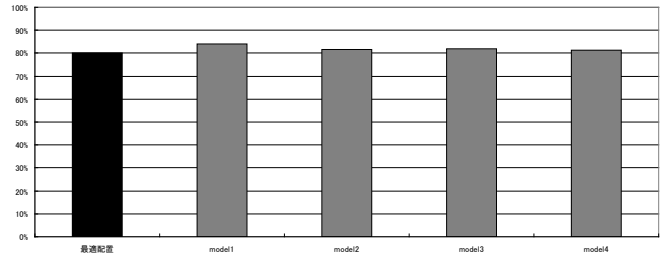


図 16 最大速度の比較 (Elcentro NS)

### 3.7 解析例⑥

次に 3.6 のモデルに建物の用途や計画上の理由によって、ダンパーを設置できる空間が制約されるという問題を想定して、窓を配置し、そこにはダンパーを設置できないパターンで検証を行う。図 17 の解析モデルで解析を行った。結果、配置モデルを図 17 に示す。次に地震応答解析のとき比較に用いるモデルを図 18 に示す。

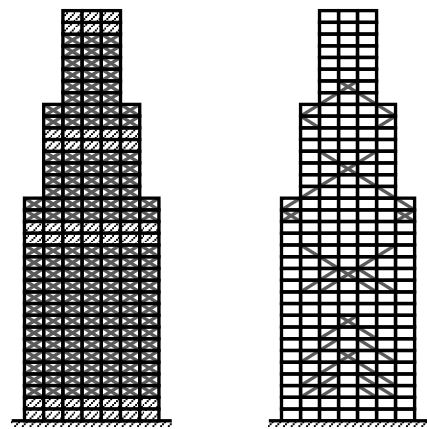


図 17 解析モデル、最適配置



図 18 比較モデル

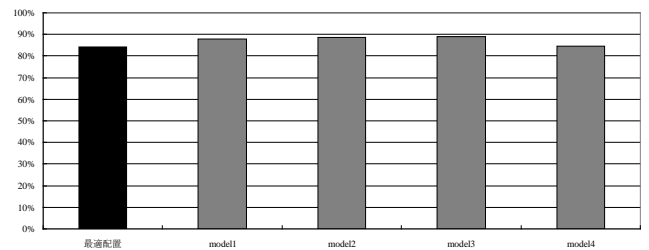


図 19 最大速度の比較 (Elcentro NS)

図 19 に Elcentro NS の最大速度の結果を示す。図より、本手法で

提案しているダンパー配置の最大応答が最も小さくなった。変位、加速度、他の地震波でも同様の結果が得られた。また、減衰力は最も大きくなった。

### 3.6 解析例⑥

次に超高層ビルとして、都庁の庁舎を参考に図に示す解析モデルによる解析を行う。

このモデルは 66 層の建物で各階の高さが、4m としスパンが 6m の建物である。図 20 の解析モデル、表 4 の断面詳細で解析を行った。結果、配置モデルを図 20 に示す。

次に地震応答解析のとき比較に用いるモデルを図 21 に示す。

図 22 に Elcentro NS の最大速度の結果を示す。図より、本手法で提案しているダンパー配置の最大応答が最も小さくなった。変位、加速度、他の地震波でも同様の結果が得られた。また、減衰力は最も大きくなった。

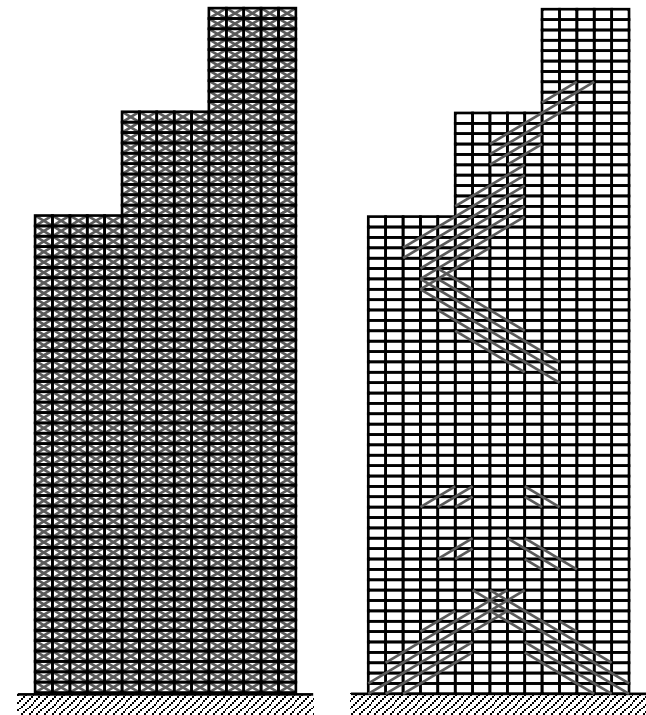


図 20 解析モデル，最適配置

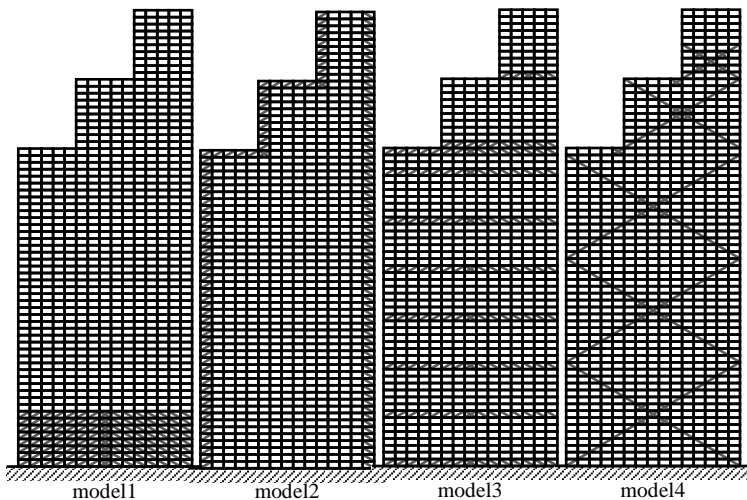


図 21 比較モデル

表 3 断面詳細

| 柱     | 部材断面             | 断面 2 次モーメント | 断面積  |
|-------|------------------|-------------|------|
| 1~18  | 950*950*50*175   | 1130000     | 1265 |
| 19~36 | 900*900*50*175   | 1110000     | 1226 |
| 37~54 | 850*850*50*175   | 1090000     | 1188 |
| 55~66 | 800*800*50*175   | 1000000     | 1099 |
| 梁     | 部材断面             | 断面 2 次モーメント | 断面積  |
| 1~12  | 1400*1400*50*175 | 7580000     | 2571 |
| 13~54 | 1200*1200*50*175 | 4620000     | 2171 |
| 55~66 | 1000*1000*50*173 | 2540000     | 1771 |

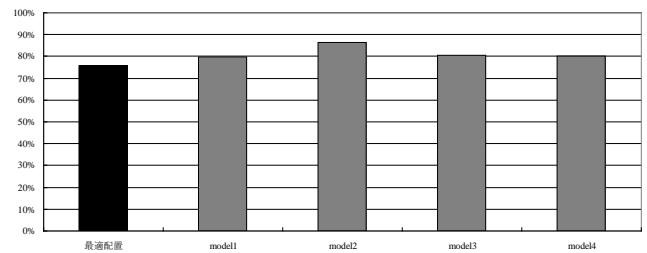


図 22 最大速度の比較 (Elcentro NS)

## 4. 結言

本論文では、制震構造のダンパーの最適配置を求める方法として、静的荷重に対する構造の剛性を最大化するダンパー置換部材の配置を求め、ここにダンパーを配置する方法を提案し、有効性を 6 種の解析例で検討した。

本提案手法のダンパー配置が、最大変位、最大速度については最小、もしくは比較モデルの最も良いダンパー配置と、ほぼ同等の値を示した。最大加速度については、他のモデルや骨組よりも大きくなる場合があったが、これは制震装置を入れたことにより固有周期が変化したことが原因と考えられる。減衰定数については、本提案手法のダンパー配置が最も大きくなった。このことにより本論分で提案した制震ダンパーの配置方法は、建物の規模に関わらず、また、建物の用途や計画上の理由によって、ダンパーを設置できる空間が制約される場合においても有効的であることが証明できた。

### 参考文献

- 1) 加地孝敏, 皆川洋一: 遺伝的アルゴリズムを用いた制震壁の最適配置, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.355-356, 2000.9
- 2) 浜崎宏典, 藤田 聡: 改良型 GA による制振装置の適正配置の検討 (単純 GA との比較および加振実験での制振性能の確認), 日本機械学会論文集 (C 編), 68 巻, 673 号, pp.61-68, 2002.9
- 3) 仁平瑛士, 朝比奈大輔, 北嶋圭二, 中西三和, 安達洋: 遺伝的アルゴリズムに基づいたパッシブエネルギー吸収部材の最適配置に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1063-1064, 2005.9
- 4) Fleury, C. and Braibant, V.: Structural Optimization: A new dual method using mixed variables, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.23, pp.409-428, 1986
- 5) 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣, 最適化手法 CONLIN を用いた骨組構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.548, 2001.10
- 6) 藤井大地: 建築デザインと最適構造, 丸善, 2008.10
- 7) 藤井大地, 真鍋匡利, 高田豊文: グランドストラクチャ法による建築構造の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 633 号, pp.1967-1973, 2008.11
- 8) 多田聡, 飛田喜則, 大場新太郎, 振動実験に基づく制振ダンパーの最適配置に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 2002
- 9) 嶋津孝之ら, 「鋼構造」, 森北出版, 2003