

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

久保和毅*, 藤井大地**, 大田和彦**, 野中哲也***

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

Kazuki KUBO*, Daiji FUJII**, Kazuhiko OHTA** and Tetsuya NONAKA***

Abstract

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

1. はじめに

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。

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配置する層間設置型がよく用いられる。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、複数層への分散配置など様々な配置方法がある。

また、構造用の条件とは別に、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¹⁾³⁾。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に応じて指数状に増加するため、建物の規模が大きくなると

* 近畿大学大学院システム工学専攻

Graduate School of System Engineering,
Kinki University

** 近畿大学工学部建築学科

Department of Architecture, Faculty of Engineering
Kinki University

*** (株)地震工学研究開発センター

Earthquake Engineering Research Center Inc.

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、すべての設置可能箇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、通常的设计で用いられる 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、実際のダンパーの最適配置を求める。これは、ダンパーを剛性部材に置き換えて、骨組構造の位相最適化手法であるグラ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。

本報告では、このような方法によって求めた制震ダンパーの配置が、動的地震力に対する骨組構造の最大応答も最小化することを、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、本報告第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示す。第3章では、いくつかの例題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最大応答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、まず、設計上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 (A_i 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は大きくなり (部材が太くなり)、 unnecessary ダンパー置換部材の剛性は小さくなる (部材が細くなる)。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。

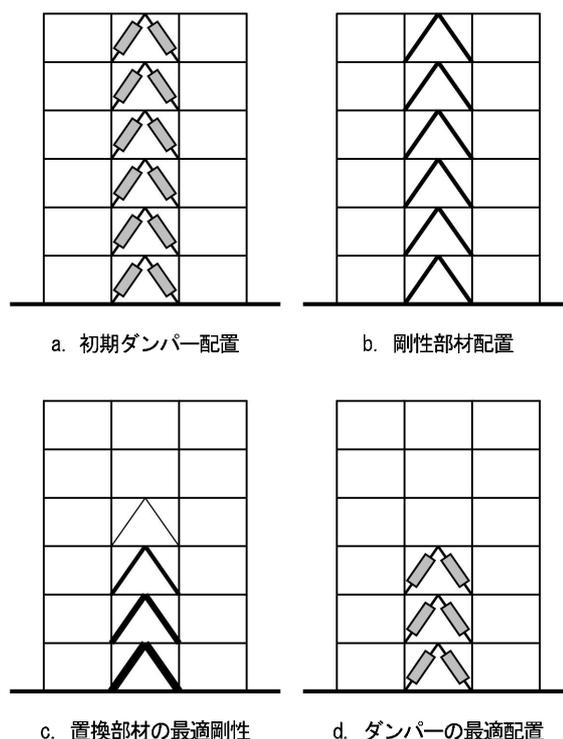


図 1 解析法の概要

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、本報告では、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 ρ_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

本報告では、(3)式の非線形最適化問題を CONLIN 法⁴⁾⁵⁾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。

$$C(\boldsymbol{\alpha}) \square C(\boldsymbol{\alpha}^{(k)}) + \sum_{\frac{\partial C}{\partial \alpha_i} > 0} \frac{\partial C}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i - \sum_{\frac{\partial C}{\partial \alpha_i} < 0} (\alpha_i^{(k)})^2 \frac{\partial C}{\partial \alpha_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_i^{(k)}} \right) \quad (5)$$

$$m(\boldsymbol{\alpha}) \square m(\boldsymbol{\alpha}^{(k)}) + \sum_{\frac{\partial m}{\partial \alpha_i} > 0} \frac{\partial m}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i - \sum_{\frac{\partial m}{\partial \alpha_i} < 0} (\alpha_i^{(k)})^2 \frac{\partial m}{\partial \alpha_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_i^{(k)}} \right)$$

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、(1)式の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。

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

CONLIN 法では、(5)式に双対法を適用し、逐次二次計画法を用いて解かれるが、詳しい解法については文献 6) に示され、付属 CD に FORTRAN のソースコードも公開されているため参照されたい。

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、本報告では、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 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(局所解)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。

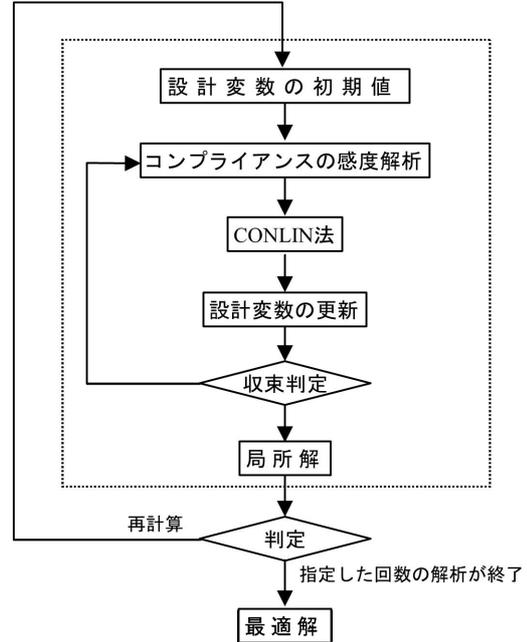


図 2 グローバル最適解を探索する計算フロー

3. 解析例

3.1 実験モデルによる検証

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。本モデルは、5 層 1 スパンで、中央にせん断型のダンパーが設置されている。図中には、解析に必要な柱・梁のヤング係数 E 、断面積 A 、断面 2 次モーメント I が示されている。また、各層梁の質量は 120kg で、この場合、骨組の固有周期は 0.8sec となる。

図 4 は、図 3 のせん断型ダンパーを柱部材に置換し、第 2 章に示したグラウンドストラクチャ法で、柱置換部材の最適太さ(密度)を求めたものである。図に示されるように、この問題では下層配置が最適配置となっている。

次に、図 5 に示すように、図 4 の柱置換部材を元のせん断型ダンパーに置き換えて、時刻歴地震応答解析を行う。地震応答解析は平均加速度法を用い、地震加速度は、ElCentro NS, Taft NS, 八戸 NS, 神戸海洋気象台 NS の 4 種を用いる。図 6 は、比較モデルとして、2 層配置のすべての場合を示したものである。これらのモデルについても同様の解析を行う。

表 1 は、ダンパー無しの骨組の最大応答値を基準として、図 5、図 6 に示すモデルの最大応答値の比率 (%) を示したものである。表に示されるように、変位、速度、加速度共に、図 5 のモデルの最大応答値が最小となることがわかる。

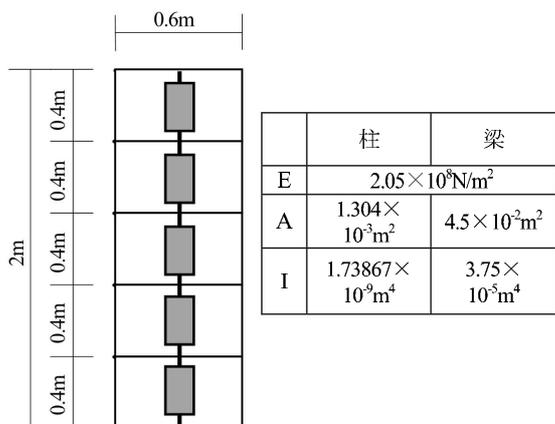


図3 実験モデル

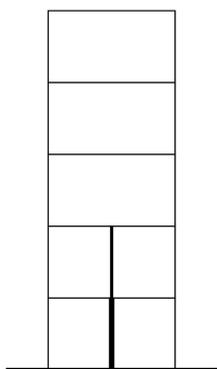


図4 解析結果

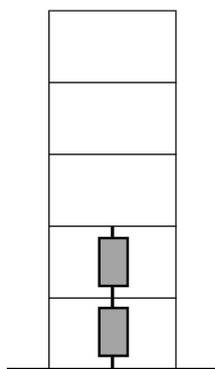


図5 最適配置モデル

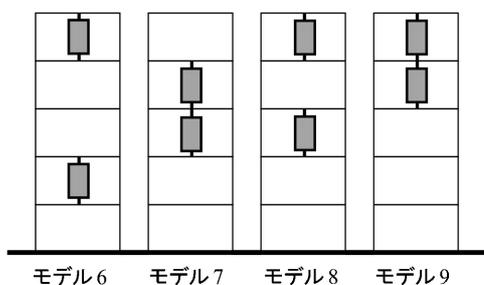
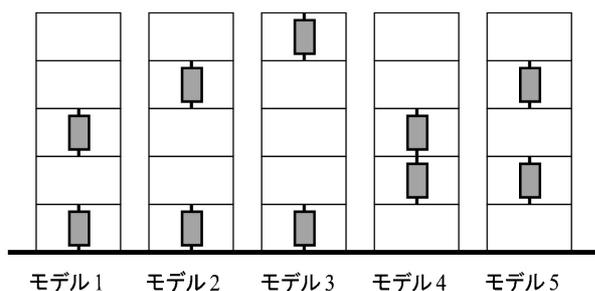


図6 比較モデル

表1 ダンパー配置による最大応答の比較

EICentroNS	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	72.27%	71.87%	94.14%
モデル1	72.92%	72.54%	93.86%
モデル2	73.62%	73.06%	93.80%
モデル3	74.30%	73.74%	94.24%
モデル4	77.47%	75.56%	96.72%
モデル5	78.76%	76.98%	95.98%
モデル6	80.26%	80.47%	96.72%
モデル7	80.25%	81.17%	95.49%
モデル8	84.12%	85.00%	96.05%
モデル9	90.08%	90.20%	95.39%

Taft EW	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	81.40%	82.35%	84.78%
モデル1	83.19%	83.53%	85.00%
モデル2	85.12%	85.29%	84.97%
モデル3	86.41%	86.51%	86.86%
モデル4	89.37%	90.04%	92.95%
モデル5	91.65%	91.72%	91.76%
モデル6	93.02%	93.24%	94.36%
モデル7	93.78%	93.36%	91.57%
モデル8	95.18%	94.87%	93.65%
モデル9	97.42%	96.51%	92.91%

八戸 NS	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	67.07%	67.60%	70.60%
モデル1	69.67%	70.16%	72.92%
モデル2	72.52%	72.94%	75.46%
モデル3	74.78%	75.07%	77.48%
モデル4	80.36%	80.25%	82.24%
モデル5	83.80%	83.55%	85.19%
モデル6	86.53%	86.09%	87.50%
モデル7	87.36%	86.93%	88.19%
モデル8	90.23%	89.59%	90.60%
モデル9	94.24%	93.71%	93.91%

神戸 NS	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	62.32%	58.11%	54.91%
モデル1	64.27%	60.24%	57.67%
モデル2	66.45%	62.62%	60.83%
モデル3	68.19%	64.55%	63.51%
モデル4	72.67%	69.92%	70.32%
モデル5	75.63%	74.45%	74.93%
モデル6	79.06%	78.15%	78.68%
モデル7	80.25%	79.42%	79.88%
モデル8	84.37%	83.55%	84.10%
モデル9	90.54%	89.82%	90.39%

3.2 実設計モデルによる検証

次に、文献9)に示される鉄骨造事務所ビルの構造設計例を参考に、図7の解析モデルを作成した。本モデルでは、すべての層にブレース型ダンパーが配置できるものとし、ブレース型ダンパーをX型ブレースに置換している。表2は、解析に必要な梁、柱の断面積 A と断面2次モーメント I を示したものである。ただし、ヤング係数は $2.05 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ としている。

図8は、第2章に示すグラウンドストラクチャ法で、置換ブレース材の最適太さ（密度）を求めたものである。図に示すように、この場合は、かなり特殊な配置になっていることがわかる。

図9は、図8を参考に、ブレース型ダンパーを配置した解析モデルである。図10は、図9の解析モデルの性能を検討するために作成した比較モデルである。なお、各モデルではダンパー数が異なるため、各モデルのダンパーの総減衰量が同一になるようにダンパーの減衰値を設定している。

表3は、図8、図9の解析モデルに対して、時刻歴地震応答解析を行った結果である。表では、ダンパーが無い場合の骨組の最大応答値を基準とした最大応答比率(%)が示されている。表より、地震波によっては、最適配置モデルが、他のモデルの最大応答と比較して必ずしも最小になっていない場合もあるが、概ね最小あるいは最小値に近い値になっていることがわかる。

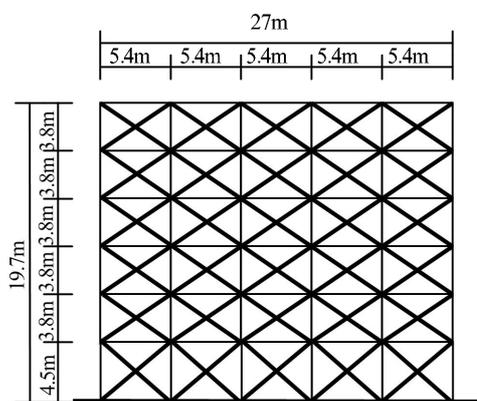


図7 解析モデル

表2 解析モデル詳細

		A	I
梁	1F	2.38×10^2	1.74×10^3
	2F	2.09×10^2	1.08×10^3
	3F	1.92×10^2	9.90×10^4
	4F	1.57×10^2	8.20×10^4
	5,6F	1.40×10^2	7.30×10^4
柱	1,2F	3.87×10^2	1.09×10^3
	3~6F	3.09×10^2	9.22×10^4

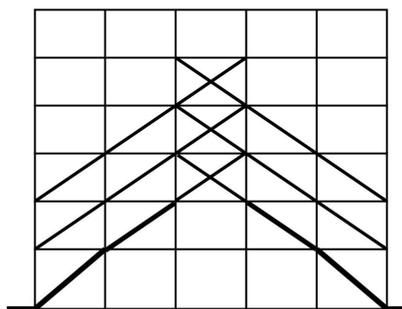


図8 解析結果

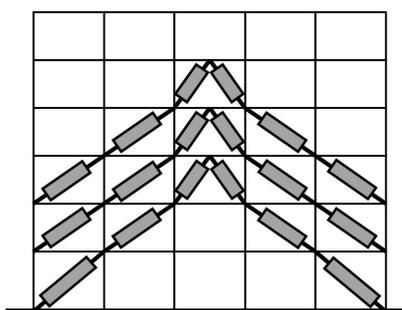


図9 最適配置モデル

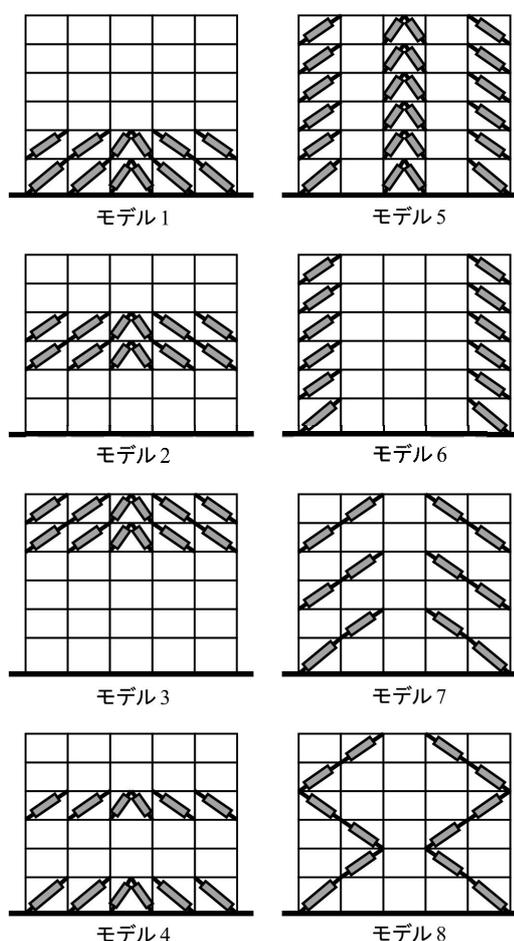


図10 比較モデル

表3 ダンパー配置による最大応答の比較

ElCentroNS	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	72.4%	84.4%	89.5%
モデル1	72.8%	86.2%	93.8%
モデル2	73.5%	86.3%	93.5%
モデル3	87.8%	91.1%	91.0%
モデル4	72.7%	85.8%	91.6%
モデル5	79.4%	87.5%	89.4%
モデル6	75.8%	86.7%	90.9%
モデル7	73.4%	84.7%	88.2%
モデル8	73.4%	84.6%	88.1%

Taft EW	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	62.9%	57.7%	71.4%
モデル1	62.2%	58.4%	70.6%
モデル2	61.9%	60.4%	71.7%
モデル3	74.1%	77.5%	78.7%
モデル4	62.3%	58.5%	69.4%
モデル5	68.8%	66.8%	74.5%
モデル6	64.4%	61.7%	71.2%
モデル7	63.3%	59.1%	70.2%
モデル8	63.4%	59.2%	70.3%

八戸 NS	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	64.9%	63.9%	68.4%
モデル1	65.4%	64.4%	69.6%
モデル2	65.4%	64.3%	69.8%
モデル3	82.2%	82.0%	84.6%
モデル4	65.5%	64.6%	69.2%
モデル5	72.4%	70.9%	75.3%
モデル6	68.5%	67.3%	71.8%
モデル7	66.0%	64.9%	69.0%
モデル8	66.0%	64.9%	69.0%

神戸 NS	最大変位	最大速度	最大加速度
最適配置	60.1%	60.9%	59.8%
モデル1	61.3%	62.4%	61.6%
モデル2	61.7%	62.6%	62.0%
モデル3	82.0%	81.7%	80.7%
モデル4	61.4%	62.5%	61.4%
モデル5	68.6%	69.0%	67.7%
モデル6	64.2%	65.7%	64.4%
モデル7	61.2%	62.3%	60.9%
モデル8	61.2%	62.2%	60.9%

4. まとめ

本報告では、設計上すべての設置可能箇所に制震ダンパーを配置し、これを剛性部材に置き換え、静的地震力に対する置換部材の最適剛性分布から、制震ダンパーの最適配置を求める方法を提案した。

そして、実験モデルおよび実設計例から解析モデルを作成し、本方法の有効性を検討した。その結果、本方法によって得られたダンパーの最適配置は、4種の代表的な地震波に対する時刻歴地震応答解析においても、変位、速度、加速度共に、概ね最大応答値を最小にすることがわかった。

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震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(北陸), 構造系(B-2), pp.841-842, 2002.8
- 9) 島津孝之(編), 中山昭夫, 高松隆夫, 森村 毅共著: 鋼構造 [第2版], 森北出版, 2005