

ESO法を用いた制震ダンパーの最適配置

OPTIMAL PLACEMENT OF RESPONSE CONTROL DAMPER USING EVOLUTIONARY STRUCTURAL OPTIMIZATION (ESO) METHOD

山崎進一*
Shinichi YAMASAKI

Recently, response control dampers are often used for improving seismic performance of buildings. However, since the dampers are generally expensive as compared to braces, the placement planning of the dampers is important especially in high-rise buildings. Therefore, in this paper, a method to obtain an optimal placement of the response control dampers is proposed. In the present method, first, the dampers are placed on all possible places in the frame structure (ground structure) of the building, and then the dampers are gradually removed to reach the target number by evolutionary structural optimization (ESO) method. The accumulated damping energy of the damper in the dynamic analysis is used for the threshold whether to remove the damper or not. The effectiveness of the present method is verified by comparison with the traditional ground structure method which is used for obtaining the optimal placement of braces in the static analysis.

Keywords: Optimal placement, Response control damper, ESO method, Ground structure method, Topology optimization

最適配置, 制震ダンパー, ESO法, グランドストラクチャ法, 位相最適化

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, 有効な制震装置(ダンパー)の配置を求める方法がいくつか提案されてきた¹⁻⁶⁾。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有効な配置を求めることは容易ではない。したがって, 既往の研究の多くは, 解析にせん断質点系モデルを用いて, 各層の最適なダンパー投入量の検討を行っている。しかしながら, ダンパーの配置には, 市松配置等に見られるように, 骨組構面内の配置計画も重要となる場合がある。特に, 既存不適格建物の耐震補強では, 劣化等により構面内に剛性(強

度)のばらつきがある場合も考えられるため, このような問題にも対応できるような配置手法が望まれる。これに対して, 藤井ら⁷⁾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, 数理計画法による位相最適化手法を用いて, ダンパーの有効な配置を求める方法を提案している。しかし, 動的解析にこのような方法を適用するには, 感度解析が難しく, ここでは地震力を静的な外力(A_i 分布)に置き換える方法を用いている。したがって, この方法は, 制震ダンパーの最適配置が全体剛性を最大化する耐震ブレースの最適配置と同等であるという仮定に基づいた方法であり, 長周期地震動等の地震波の特性を考慮することができない。

そこで, 本論文では, 同じグランドストラクチャ法に, 感度解析が必要ないESO法(Evolutionary Structural Optimization)を適用し, 地震加速度を用いた時刻歴応答解析により, 制震ダンパーの最適配置を求める方法を提案する。本方法は, まず, ビルの骨組構面上のすべての配置可能箇所にダンパーを配置し, 次に, この骨組構面の動的応答解析によって各ダンパーの累積減衰エネルギーを計算し, この減衰エネルギーの小さい順にダンパーを除去していくという非常に単純な方法である。なお, 本方法は, 文献8)の方法を動的解析に応用したもので, 文献8)では, 静的解析において, ひずみエネルギー密度の小さい順に部材を除去することで, 全体剛性を最大化する最適解またはそれに類似した解が得られることを確かめている⁸⁾。

本論文では, 以上のような方法により有効なダンパー配置が求まることを, その他の一般的な配置法等と比較することにより検証する。なお, この方法は, 複数の性能の異なるダンパーを用いる場合も, 累積減衰エネルギーの小さいダンパーからより性能の低いダン

* 近畿大学大学院システム工学研究科 博士前期課程

パーに置き換え、それが最低限の性能であれば除去するという段階的除去法を用いれば適用可能である。また、3次元骨組にも簡単に適用できるが、ここでは、本手法の有効性の検討が主目的であるため、ダンパー性能は1種類とし、1構面の2次元骨組を対象とする。

以下本論文2章では、提案手法である ESO 法を動的解析に適用し、制震ダンパーの有効な配置を求める方法を示す。3章では、ダンパーの減衰に関する運動方程式を示す。4章では、提案手法と一般的に用いられるダンパー配置との比較により、提案手法の有効性を検証する。5章では以上のまとめを述べる

2. ESO 法を用いた動的解析による制震ダンパーの配置法

ここでは、初期の ESO 法¹⁰⁾の考え方にもとづき、非常にシンプルな計算アルゴリズムを提案する。

本論文では、すべてのダンパー配置可能位置に制震ダンパーを配置した構造をグランドストラクチャと呼ぶ。

まず、グランドストラクチャは、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。ここでは、グランドストラクチャに対して、動的地震応答解析を繰り返す。そして、各ステップで、各ダンパーの減衰エネルギーを計算し、これを指標として不必要なダンパーを除去し、最終的に最適配置を求める。具体的な解析の流れは以下のようなになる。

- ① グランドストラクチャの地震応答解析を行い、各ダンパーの累積減衰エネルギーを計算する。なお、 i 番目ダンパーの累積減衰エネルギー E_i は次式により計算される。

$$E_i = (1/2) \int_0^t (\dot{\mathbf{d}}_i^T \rho_i \mathbf{c}_i^0 \dot{\mathbf{d}}_i) dt \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{c}_i^0 はダンパー要素の初期減衰マトリクス、 $\dot{\mathbf{d}}_i$ は i 番目要素の節点速度ベクトル、 t は解析時間である。また、要素密度 ρ_i は、残存しているダンパー要素は 1 とし、除去要素は 0 とする。なお、ここでは、ダンパーは粘弾性ダンパーとし、地震応答解析には平均加速度法を用いる。また、(1)式の時積分は、単純に平均加速度法の各時間ステップの減衰エネルギーを加算することによって求める。

- ② ダンパーの要素番号を累積減衰エネルギーの小さい順に並べる。
- ③ 最も累積減衰エネルギーの小さい要素番号のダンパーをグランドストラクチャから除去する。なお、同じ累積減衰エネルギーのダンパーが複数ある場合は、複数除去する。(これは対称性を保つための処置でもある。)
- ④ すべての設計対象要素が目標のダンパー数に達するまで①～③を繰り返す。ダンパー数 0 になるまで行うことも可能。
- ⑤ 表示ソフト(本論文では MicroAVS を用いている)を用いて、すべての除去ステップを参照し、目標とする最大応答値以下となるダンパー数とダンパー配置を確認し、選択する。

以上のプロセスを図1の簡単な例題で再現してみる。図1には、すべての除去ステップを MicroAVS で表示した結果を示している(上記プロセス⑤)。なお、この場合、対称問題であるため、ダンパーは各ステップ2本ずつ除去されている。

以上のように、本手法は、非常に単純な方法であり、図1の結果を見ることで、ダンパーは下層に配置する方が効果的であることがわかる。

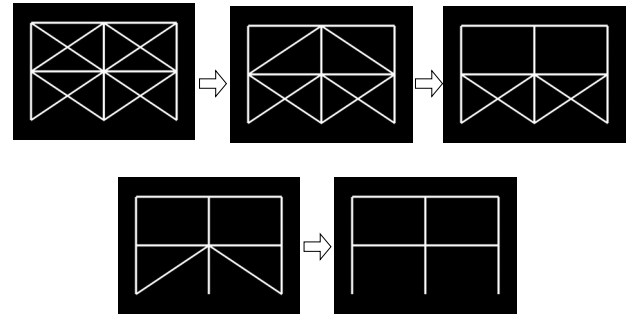
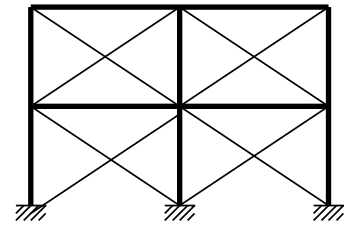


図1 ESO 法による制震ダンパーの除去過程

3. 解析に使用するダンパー

ここでは、地震波における建築骨組の効果的な揺れの低減を目的としており、オイルダンパーを想定している。振動解析では、粘性減衰(ダッシュポッド)ダンパーに置き換えているため、減衰力は速度に比例し、また、振動方向に対して抵抗力として働くため、ダランベールの原理により、釣合式は次式となる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2)$$

ただし、 c は粘性減衰係数である。

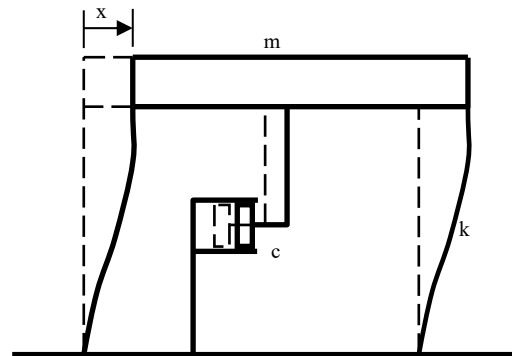


図2 減衰自由振動モデル

地盤が動く場合、質点の慣性力は $-m(\ddot{x} + \ddot{y})$ となるため釣合式は次のようになる。

$$-m(\ddot{x} + \ddot{y}) - c\dot{x} - kx = 0 \quad (3)$$

ただし、 \ddot{y} は地震加速度である、 $-m(\ddot{x} + \ddot{y})$ は慣性力、 $-c\dot{x}$ は減衰力、 $-kx$ は復元力である。(3)式を変形すると次式の運動方程式が得られる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{y} \quad (4)$$

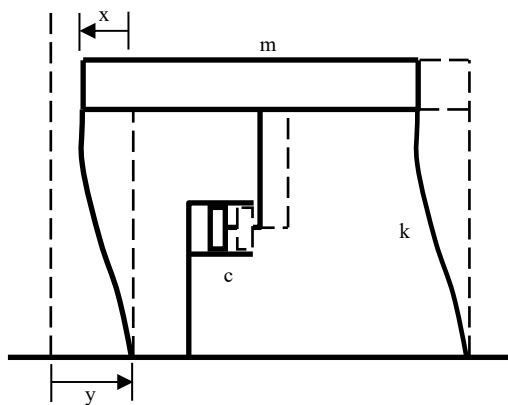


図3 地震応答モデル

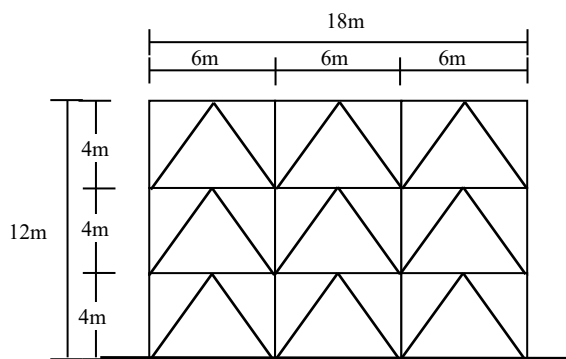


図4 解析モデル

4. 解析例

ここでは、まず、2章で提案した単純な手法（提案手法）によって有効な解が得られるかどうかを、3層3スパンの解析モデルに対して対称性を考慮した配置可能なすべてのダンパー配置との比較を行い検証する。

さらに、より実務的な解析モデルに対して一般的に用いられる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（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）との比較により検証する。

4.1 3層3スパンの解析例

図4は、鉄骨造3層3スパン作成した解析モデルである。本モデルでは、すべての層にダンパーが配置できるものとし、グランドストラクチャを作成している。表2は、解析に必要なとなる梁、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 2.05×10^8 kN/m²としている。図5は、本手法によるダンパーの削除過程を示している。図中の各Stepは同数のダンパーを配置した際の本手法における最適解を図示している。表3は各Stepでの最大変位、全体減衰率、Step間減衰率を示している。全体減衰率はダンパーを配置していない（Step6）からそのStepがどれだけ揺れを抑えられているかを示している。Step間減衰率は前Stepと比べてどれだけ揺れが抑えられているかを示している。ダンパーを1本から3本に増加した時が、最も減衰が大きくなっていることが分かる。

本研究は大地震に対する被害の低減を目的としており2次設計でよく用いられる観測波として、時刻歴応答解析に使用する地震波は、ElCentroを用いる。

表1 観測点記録と位置

Station code	Max.acc. (gal)	Direction	Duration time (sec)
Elcentro	341.7	NS	300

表2 解析モデルの部材断面諸元

	部材断面寸法(mm)	A (m ²)	I (m ⁴)
柱	440×400×16	2.37×10^{-2}	5.71×10^{-4}
梁	450×300×11×18	1.539×10^{-2}	5.47×10^{-4}

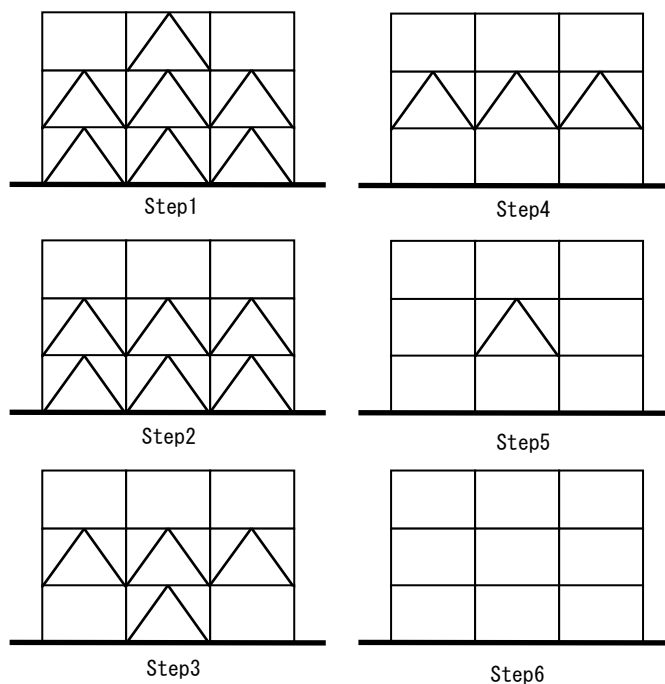


図5 各Stepのダンパー配置

表3 各Stepの解析結果

	最大変位 (m)	全体減衰率	Step間減衰率
全配置	0.03676	34.04%	90.3%
Step1	0.04073	37.7%	94.5%
Step2	0.04309	39.9%	84.5%
Step3	0.05098	47.2%	91.0%
Step4	0.05601	51.9%	69.8%
Step5	0.0803	74.4%	74.4%
Step6	0.108	100.0%	

図6は、ダンパーをStep4と同数配置する際、対称性を考慮したすべての配置モデルを示している。ダンパー数の選定は、一般に用いられる層間設置型の多くを再現できるためStep4と同数とした。表4は、図6の解析結果を示している。表4では、ダンパーを配置しな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。

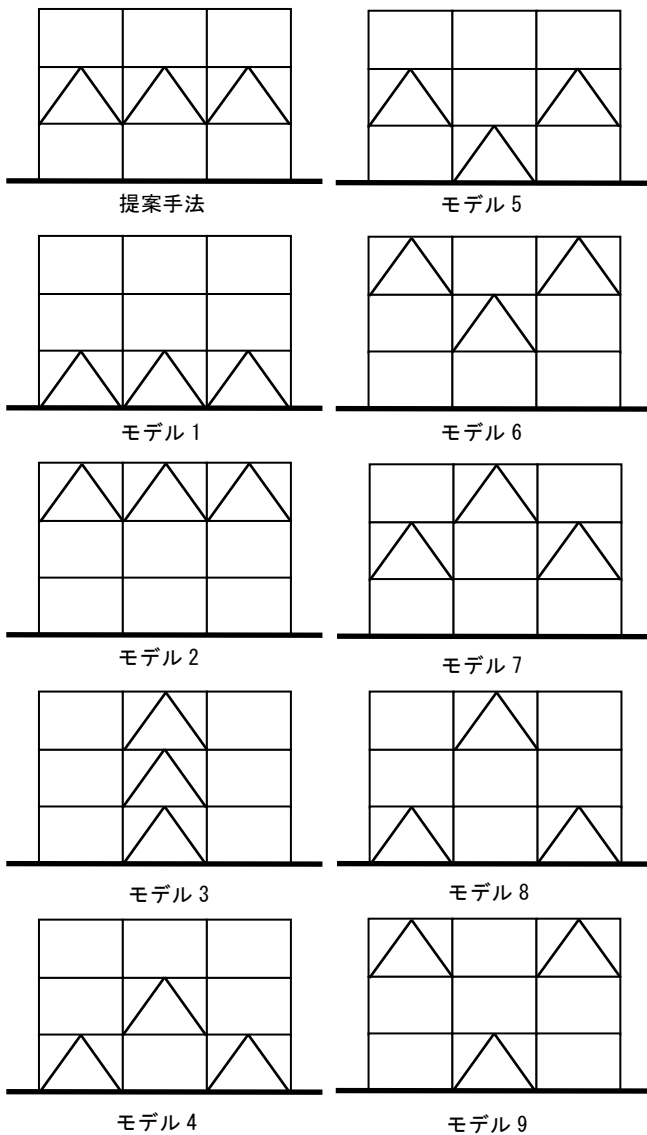


図6 解析モデルのダンパー配置

ほかのモデルと比較すると、最大変位、最大速度、最大加速度いずれも本手法による配置モデルが最小となっている。特に最大変位、最大加速度は、次点のモデル5とそれぞれ3.1%、1.9%と大きな差があることが分かる。

表4 ダンパー配置における最大応答の比較

EiCentro	最大変位	最大速度	最大加速度
提案手法	51.9%	52.9%	63.9%
モデル1	63.7%	64.0%	73.8%
モデル2	72.6%	74.1%	81.3%
モデル3	60.1%	57.2%	69.3%
モデル4	58.4%	56.3%	68.6%
モデル5	55.0%	53.1%	65.8%
モデル6	62.9%	61.6%	72.0%
モデル7	56.5%	55.0%	66.6%
モデル8	65.1%	63.4%	74.0%
モデル9	68.1%	66.9%	76.6%

最大速度に関しては0.2%とわずかではあるが最小の値を取ることが分かる。優良なモデルは中層に多くダンパーを配置していることがわかる。これらのことから本手法は有効な解を得られることがわかる。

図7は各stepの層間速度を示したものである。最大値はstep6の中層で0.5057m/s 最小値が全配置時の下層で0.1159m/sとなっている。そして、いずれも中層が最大となっていることがわかる。増減率でみると全配置からstep1に移行した際の下層で-3%の増減となり最小となっており、step4からstep5に移行した際に+64%と最大の増減になっている。

(4)式から減衰力にあたるのが cx であるためダッシュポッドによる減衰力は速度に比例しているのがわかる。よって、解析例では層間速度が遅い上層から消えていき、次に下層、最後に層間速度の速い中層と除去されていったことがわかる。

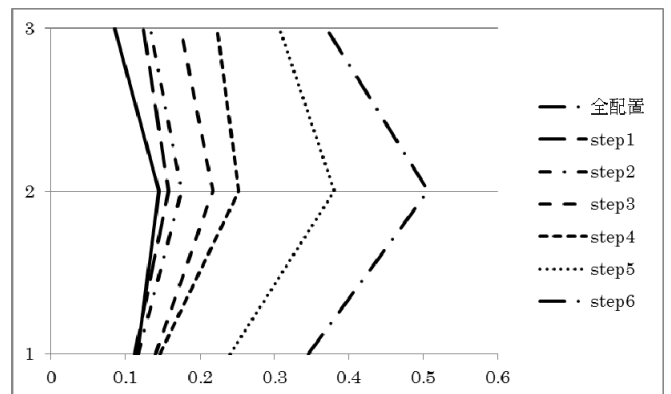


図7 各stepの層間速度

4.2 鉄骨造事務所の解析例

次に、図8は、文献11)に示される鉄骨造事務所ビルの構造設計例を参考に作成した解析モデルである。本モデルでも、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、グランドストラクチャを作成している。表5は、解析に必要となる梁、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。

図9は、本手法によるダンパーの削除過程を示している。表は各Stepでの最大変位、全体減衰率、Step間減衰率を示している。1本目のダンパーを配置した時に最も減衰が大きくなっているのが分かる。

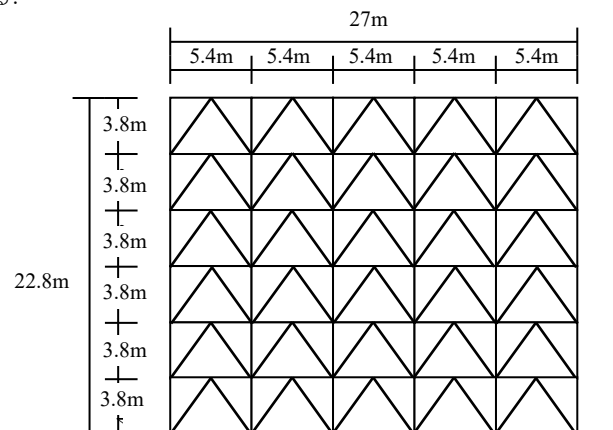
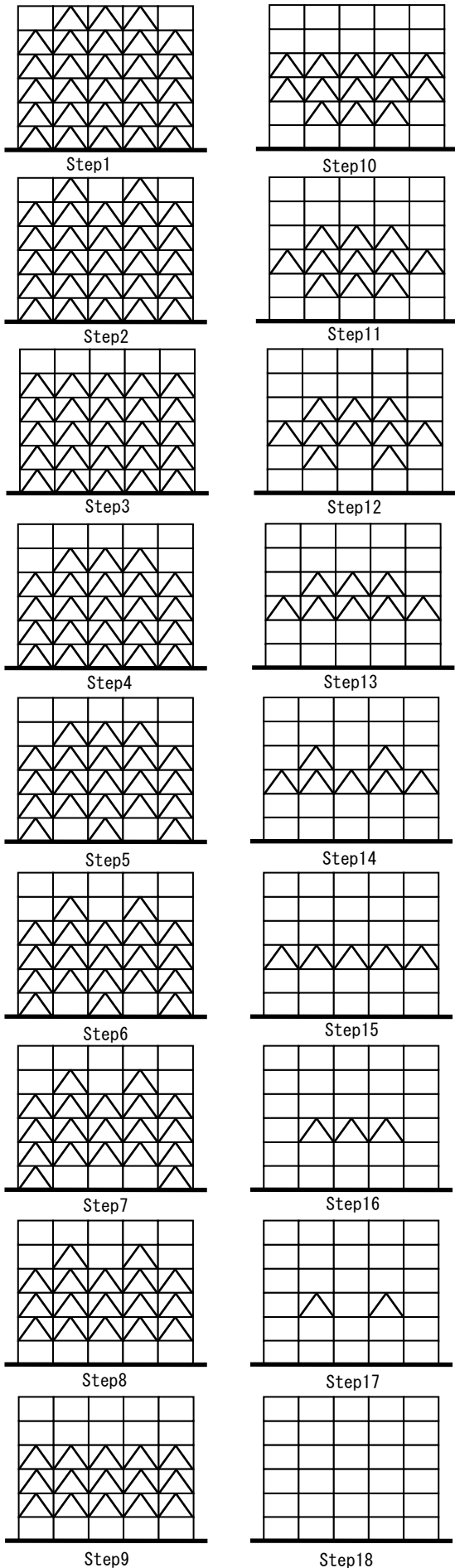


図8 解析モデル



Step9 Step18
図9 各 Step のダンパー配置

表5 解析モデルの部材断面諸元

		部材断面寸法 (mm)	A (m ²)	I (m ⁴)
梁	1F	700 × 200 × 14 × 2	2.38 × 10 ⁻²	1.74 × 10 ⁻³
	2F	700 × 200 × 14 × 2	2.09 × 10 ⁻²	1.08 × 10 ⁻³
	3F	600 × 200 × 12 × 2	1.92 × 10 ⁻²	9.90 × 10 ⁻⁴
	4F	600 × 200 × 12 × 2	1.57 × 10 ⁻²	8.20 × 10 ⁻⁴
	5,6F	600 × 200 × 12 × 1	1.40 × 10 ⁻²	7.30 × 10 ⁻⁴
柱	1,2F	450 × 450 × 25 × 1	3.87 × 10 ⁻²	1.09 × 10 ⁻³
	3~6F	450 × 450 × 19 × 6	3.09 × 10 ⁻²	9.22 × 10 ⁻⁴

表6 各 Step のダンパー配置

	最大変位 (m)	全体減衰率	Step 間減衰率
全配置	0.08535	43.5%	99.3%
Step1	0.08598	43.8%	99.5%
Step2	0.0864	44.0%	99.1%
Step3	0.08722	44.5%	97.9%
Step4	0.08908	45.4%	97.3%
Step5	0.09154	46.7%	98.7%
Step6	0.09275	47.3%	98.6%
Step7	0.09408	48.0%	97.1%
Step8	0.09684	49.4%	97.2%
Step9	0.09968	50.8%	95.6%
Step10	0.1043	53.2%	92.9%
Step11	0.1123	57.2%	95.9%
Step12	0.1171	59.7%	91.8%
Step13	0.1276	65.0%	95.5%
Step14	0.1336	68.1%	90.9%
Step15	0.147	74.9%	90.0%
Step16	0.1633	83.2%	94.2%
Step17	0.1733	88.3%	88.3%
Step18	0.1962	100.0%	

図10は、3ステップごとの層間速度を示したものである。最大値は Step18 の3層目で 0.3195 m/s 最小値が全配置時の下層で 0.0625 m/s となっている。前項でも述べたように、最終的にダンパーが残存する中層、特に3層目の層間速度がどの Step でも早いのがわかる。

図11は、ダンパーを第1章で述べたような一般的な下層集中配置、市松配置、複数層への分散配置と同ダンパー数の本手法の解析結果のモデルを示している。今回は Step9, Step12 と同数のダンパー配置となった。

表7は、図11の解析結果を示している。Step9, Step12 いずれも同じ本数の一般的なダンパー配置と比較した場合、最大変位、最大速度、最大加速度が最小になっている。

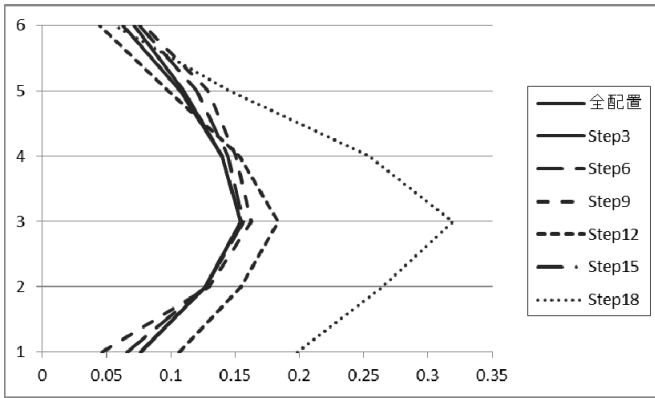


図 10 3ステップごとの層間速度

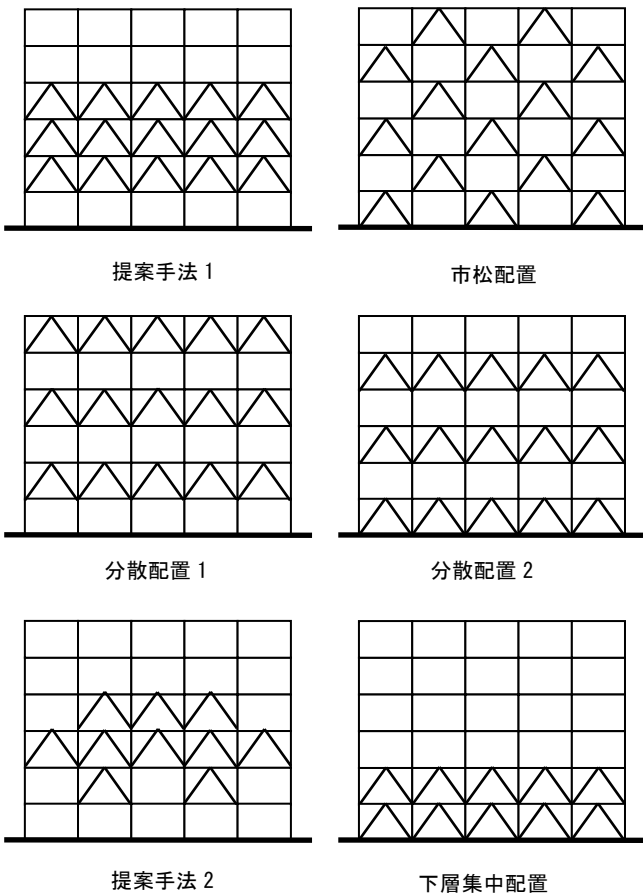


図 11 解析モデルのダンパー配置

表 7 ダンパー配置における最大応答の比較

EiCentro	最大変位	最大速度	最大加速度
提案手法 1	50.8%	52.4%	60.5%
市松配置	57.0%	61.3%	62.4%
分散配置 1	59.7%	63.4%	65.0%
分散配置 2	55.4%	59.8%	61.9%
提案手法 2	57.6%	60.6%	69.8%
下層集中配置	65.0%	69.8%	72.6%

5. まとめ

本論文では、グラウンドストラクチャ法に初期の ESO 法の考え方を適用した骨組構造の制震ダンパー配置手法を提案した。そして、提案手法により得られる解と、3 層 3 スパンの構面に配置可能なすべての配置モデルの比較により、提案手法の有効性を検証した。その結果以下のような結果が得られた。

骨組構面の制震ダンパーの最適配置問題では、同じダンパー本数で均一性能として比較した場合、提案手法の方がより最大応答変位を低減できた。ただし、最大速度と最大加速度に関して必ずしも最適解がでなかったが、概ね小あるいは最小値に近い値となっていることがわかる。これは、ダンパーの減衰力が速度に比例しているためであり、結果からもそれを裏付けることができた。

以上の結果より、本手法は、すべての要素に必ずしも最適配置を与えるものではないが、最大応答変位に関しては、最小となり、構設計計に対して、明確な提案を与えることができることがわかった。

今後は、以上の方法により高層ビルの解析を行い、3 次元骨組への拡張、有効性の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Takewaki, I. : Optimal damper placement for minimum transfer functions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.26, pp.1113-1124, 1997
- 2) 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
- 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) Lavan, O., Levy, R.: Fully stressed design of passive controllers in framed structures for seismic loadings. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.32, pp.485-498, 2006
- 5) 寒野善博: 整数計画を用いたせん断型構造物モデルにおける粘性ダンパーの最適配置法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), p.20218, 2013.8
- 6) 川上雄平, 吉富信太: 建築構造物の動的応答を考慮した高精度縮約モデルを用いたオイルダンパーの最適配置法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), p.21358, 2014.9
- 7) 久保和毅, 藤井大地, 大田和彦, 野中哲也: 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, 近畿大学工学部研究報告, No.44, pp.53-58, 2010
- 8) 藤井大地, 真鍋匡利, 高田豊文: グラウ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
- 9) 藤井大地: 建築デザインと最適構造, 丸善, 2008
- 10) Xie, Y.M., Steven, G.P. : *Evolutionary Structural Optimization*, Springer, 1997
- 11) 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