

ESO法を用いた高層ビルの制振ダンパー層配置の最適化

OPTIMIZATION OF PLACEMENT OF RESPONSE CONTROL DAMPER ON LAYER OF HIGH-RISE BUILDING STRUCTURE USING ESO METHOD

山田 法仁*

Norihito YAMADA

Response control dampers are used to improve seismic response of high-rise building. However, it is not easy to obtain the optimum placement of the dampers on the layer of structure, because the damper's performance depends on the dynamic behavior of the building. Therefore, in this paper, a method to obtain an optimum placement of the response control dampers on the layer is presented. In this method, first, the dampers are placed on all layers in the multi-mass system, and then the dampers are gradually removed by ESO method. The effectiveness of the present method is verified by elastic and elasto-plastic analysis.

Keywords : Response control damper, Optimal placement, ESO method, Shear-multi-mass system model, Elasto-plastic analysis

制振ダンパー, 最適配置, ESO法, せん断多質点系モデル, 弾塑性解析

1. はじめに

近年, 長周期地震動による高層ビルの共振が問題となっており, エレベータ内に閉じ込められる事故や, 内装材の損傷, 家具の転倒などの被害が報告されている. このような, 高層ビルの揺れを低減するためには, 建物の固有周期をあまり変化させない制振ダンパーの設置が有効とされている. しかしながら, 制振ダンパーは, 耐震ブレースに比較してコストが高く, 必要最小限の効率的な配置計画が望まれる. しかし, どのような配置が効率的であるかは, 経験を積んだ構造設計者であっても難しい判断となる. このため, このような制振ダンパーの配置に関しては, 最適化手法を適用する方法が数多く提案されてきた¹⁻¹⁰⁾. しかしながら, これまでの研究では, 高層ビルへの適用例は少ない. これは高層ビルの場合, 設計変数が多くなり, 最適解を求めることが容易ではないためと考えられる.

以上のような背景から, 野村ら¹¹⁾は, 進化的アルゴリズムであるESO (Evolutionary Structural Optimization) 法を用いて, 高層ビル構面における制振ダンパーの最適配置を求める方法を提案している. 本手法は, すべての配置可能位置に制振ダンパーを配置し, 時刻歴地震応答解析に対して, エネルギー吸収量の最も少ない制振ダンパーから順に除いていく非常に単純な方法で, 計算効率が良い. しかしながら, これを3次元問題あるいは弾塑性問題に拡張する場合は, やはり解析時間は増大する. また, 柱・梁の軸方向変形が小さい場合, 高層ビルの応答はせん断変形が支配的となるため, 各層のダン

パー投入量が同じであれば, 層内の水平方向の配置を変化させても, 全体の応答はほとんど変化しない. したがって, 特に計画段階では, 高層ビルをせん断多質点系にモデル化し, 各層のダンパー投入量を最適化の方が現実的である.

そこで, 本研究では, 野村ら¹¹⁾が用いている手法をせん断多質点系モデルに適用し, 高層ビル各層のダンパー投入量の配置計画が可能かどうかを検討する. また, 野村ら¹¹⁾の研究は, 弾性解析のみの検討であったが, 本研究では, せん断多質点系モデルのバネ剛性の履歴特性を Bi-linear とし, 弾塑性応答解析における有効性も合わせて検討する.

2. 解析方法

本研究では, Fig.1 に示すようなせん断多質点系モデルを対象として解析を行う. ここに, $m_i, k_i(t), c_i$ は, i 層の質量, 剛性, 粘性減衰係数を表す. ただし, 剛性は時間 t の関数とする. また, 地震応答解析には増分形式の平均加速度法を用いる.

Fig.1 の各層の制振ダンパーの減衰性能 (投入量) を粘性減衰係数 $c_i (i=1, L, N)$ で表し, これを設計変数 $\rho_i (i=1, L, N)$ を用いて次式のように置く.

$$c_i = \rho_i c_i^0 \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \quad (i=1, L, N) \quad (1)$$

ここに, c_i^0 は初期の粘性減衰係数を表す.

* 近畿大学大学院システム工学研究科 博士前期課程

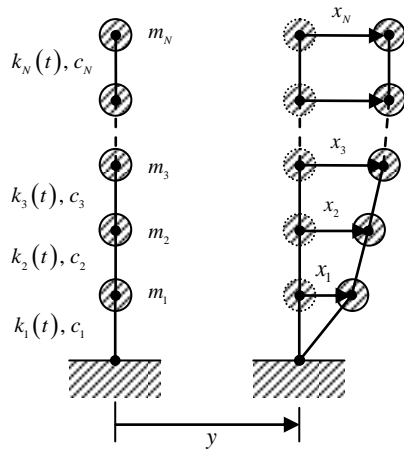


Fig.1 Multi-mass system model

一般の最適化問題では、目的関数と制約条件を定め、与えられた制約条件の下で目的関数を最大化あるいは最小化する設計変数 $\rho_i (i=1, L, N)$ を求めることになるが、本研究で用いる ESO 法では、以下のようなプロセスで ρ_i を求める。

まず、初期値として、 $\rho_i = 1 (i=1, L, N)$ を与える。次に、Fig.1 のモデルで地震応答解析を行い、各層の制振ダンパーがどれくらい働いたかを次式の累積減衰エネルギー E_i で評価する。

$$E_i = (1/2) \int_0^t (\dot{\mathbf{x}}^T \rho_i \mathbf{c}_i^0 \dot{\mathbf{x}}) dt \quad (i=1, L, N) \quad (2)$$

次に、(2)式から求められる E_i が最も小さい層（ここでは q 層とする）の設計変数を 0 とする。すなわち、

$$\rho_q = 0 \quad (3)$$

ただし、 ρ_q は、各層の制振ダンパーの数（投入量）に応じて、例えば、 $\rho_q = 0.9, 0.8, 0.7, L$ のように段階的に小さくしていくことも可能である。

後は、同様に繰り返し地震応答解析を行い、 E_i を指標として、各ステップの q 層の設計変数を変更し、指定したステップ数まで計算を繰り返す。最後に、以上の解析で得られた各ステップの解は、すべて優良解であると考え、設計者は、制振ダンパーの総コストと、地震応答特性（頂部最大変位、最大層間変位等）を考慮して、各層のダンパー投入量を決定することになる。

ただし、以上の方法は最適化問題を数学的に解いているわけではないため、特定の目的関数に対する最適解が求まるわけではない。しかしながら、各ステップの解が、最大変位や最大層間変位を概ね最小化する解であれば、ダンパーの配置計画を行う上で、十分に役立つツールとなりえると考えられる。

3. 解析例

3.1 解析モデル

まず、本手法の有効性を確かめるために、実際の鋼構造建物の設計例¹²⁾から Fig.2 に示すせん断多質点系モデルを作成した。ただし、上部構造のせん断バネ剛性の復元力特性は Bi-linear 型とする。Table 1 に各層の質量と復元力特性の設定値を示している。また、

全体の減衰性能は瞬間剛性比例型として与え、減衰定数を 0.02 としている。解析に用いる地震波は長周期地震動として有名な 2003 年 9 月 26 日十勝沖地震時に苫小牧で観測された HKD129 波とする。また、Fig.2 の $c_1 : c_{30}$ は各層の制振ダンパーの投入量を粘性減衰係数に置き換えたもので、ここでは、(1)式の $c_1^0 : c_{30}^0$ を $120 \text{ kN}/(\text{cm}/\text{s})$ に設定している。なお、本解析モデルのダンパー投入量 0 の場合の弾性 1 次固有周期は 4.65sec、2 次は 1.65sec、3 次は 0.986sec となる。

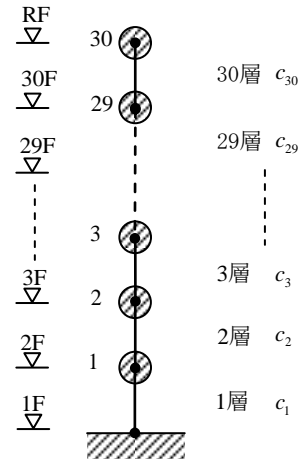


Fig.2 30-layer building model

Table1 Mass of each story and restoring characteristics

Story	Mass (kN)	Initial stiffness (kN/cm)	Brake point (cm)	Stiffness reduction rate
1	3.762	2933	2.74	0.063
2	3.762	3189	2.54	0.143
3	3.762	3157	2.52	0.180
4	3.762	2964	2.66	0.241
5	3.762	2960	2.76	0.405
6	3.762	2958	2.66	0.482
7	3.762	2881	2.72	0.440
8	3.762	2881	2.92	0.299
9	3.762	2877	2.71	0.127
10	3.762	2774	2.78	0.120
11	3.762	2704	2.59	0.263
12	3.762	2635	2.62	0.449
13	3.762	2540	2.68	0.509
14	3.762	2469	2.65	0.466
15	3.762	2401	2.69	0.447
16	3.762	2311	2.78	0.379
17	3.762	2308	2.80	0.347
18	3.762	2305	2.78	0.404
19	3.762	2197	2.87	0.290
20	3.762	2104	2.54	0.173
21	3.762	2015	2.64	0.151
22	3.762	2002	2.67	0.102
23	3.762	2000	2.69	0.072
24	3.762	2001	2.81	0.072
25	3.762	2001	2.50	0.072
26	3.762	2003	2.24	0.072
27	3.762	2005	1.97	0.072
28	3.762	2010	1.67	0.072
29	3.762	2032	1.33	0.072
30	5.642	2170	0.90	0.072

3.2 各層のダンパー投入量を 1 種類とした場合の解析

まず、各層のダンパー投入量を一定とし、特定の層に集中的に配置する場合を想定した解析を行う。この場合、 $\rho_i (i=1, L, N)$ は、1 または 0 となる。

Fig.3 は、弾性解析の除去過程を示す。図では、 $\rho_i = 1$ の層を黒丸

と太線で表し、図に示す除去 Step における制振ダンパーの配置を示している。また、図中の Step の下の数値は頂部の最大応答変位を示している。図より、ダンパーは、上層から順に除去される傾向にあるが、Step 20 からは、やや不規則な消え方となることがわかる。Fig.4 は、Fig.3 に示す各ステップにおける各層の最大層間変位を示している。図より、ダンパー投入量の減少により、最大層間変位が大きくなっていることがわかる。

Fig.5 は、Fig.3 の Step 20 の解 (Case 0) が優良解となっているかどうかを確認するため、他の配置モデルとの比較を行った結果を示す。また、Table 2 は、Fig.5 に示す各ケースの最大応答変位の最大値 (Maximum displacement), 平均値 (Average displacement), 層間変位の最大値 (Maximum inter-story displacement), 層間変位の平均値 (Average inter-story displacement) を示す。表より、Case 0 のこれらの値は概ね最適値になっており、少なくとも、本解析法で一般的な配置よりも良い解が得られることがわかる。

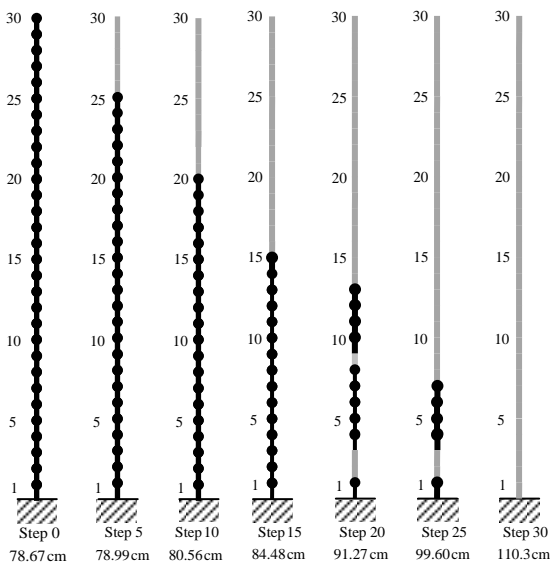


Fig.3 Damper removal process by ESO method (Analysis example 1)

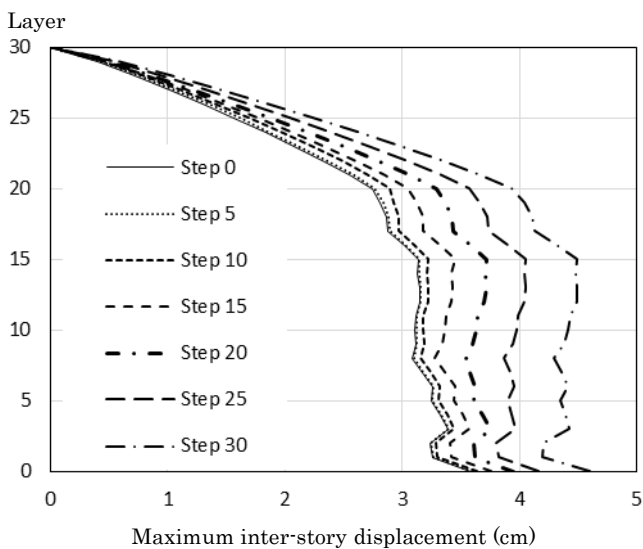


Fig.4 Maximum inter-story displacement at each step

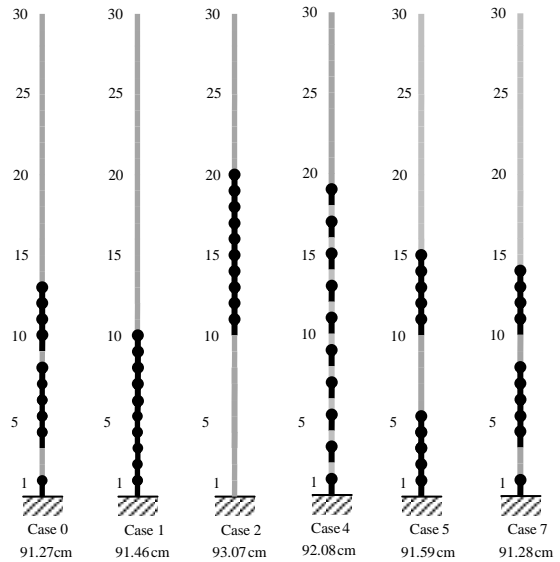
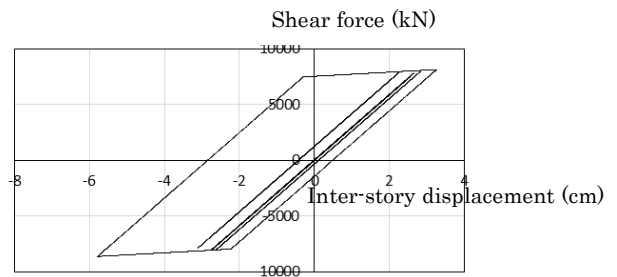


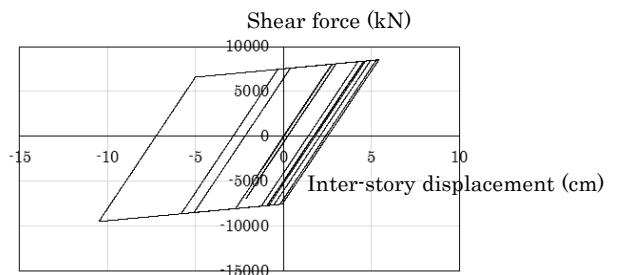
Fig.5 Comparison with other placement models

	Case0	Case1	Case2	Case4	Case5	Case7
Maximum disp.	91.27	91.46	93.07	92.08	91.59	91.28
Average disp.	51.59	51.73	52.71	52.11	51.80	51.60
Max inter-disp.	3.944	3.962	4.024	3.972	3.949	3.944
Ave. inter-disp.	2.979	2.984	3.029	3.001	2.985	2.979

次に、同じ地震波で弾塑性解析を行う。Fig.6 は、全層にダンパーを投入した場合 (a) とダンパー投入量 0 の場合 (b) の第 1 層のせん断力と層間変位の関係を示している。図より、この場合どちらの場合も塑性化が生じていることがわかる。



Arrange in all layers (a)



Not arranged at all layers (b)

Fig.6 Hysteretic behavior of 1st layer

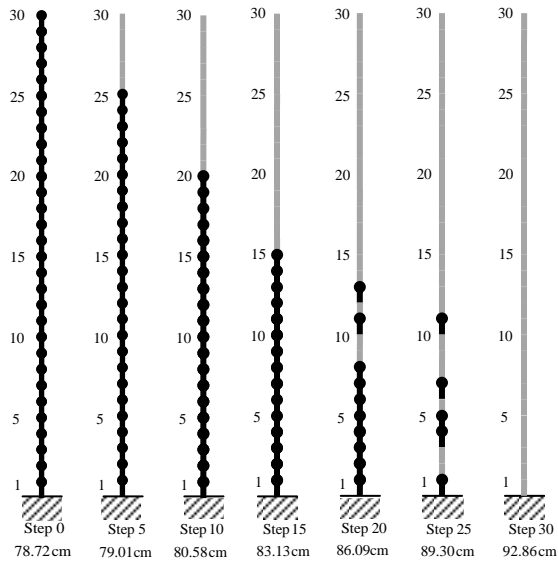


Fig.7 Dampener removal process by ESO method (Analysis example 2)

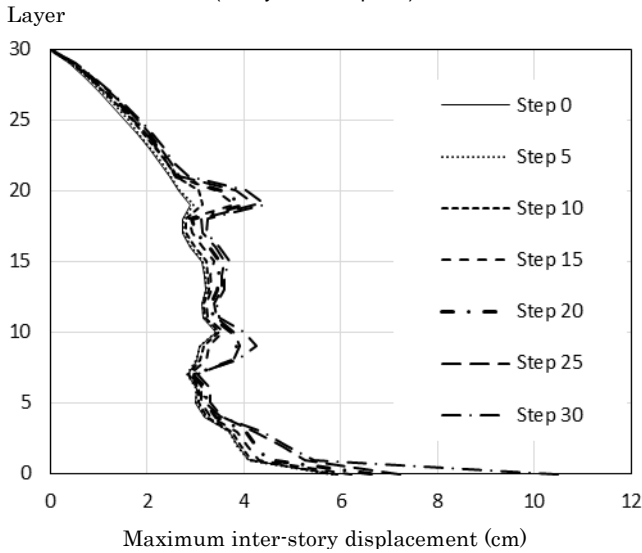


Fig.8 Maximum inter-story displacement at each step

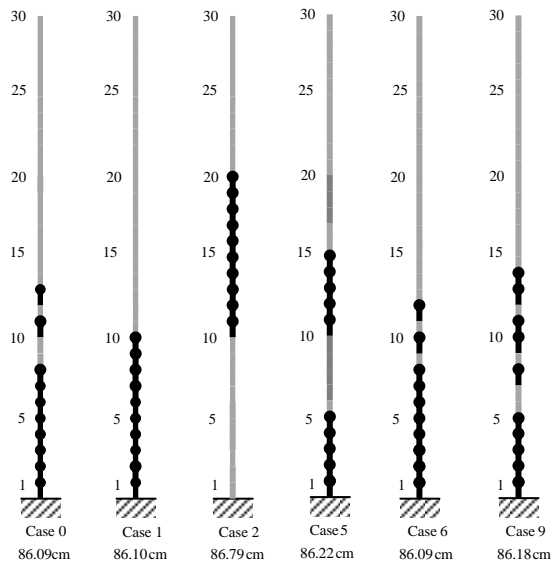


Fig.9 Comparison of with other placement models

Table3 Results of analysis example 2 (cm)

	Case0	Case1	Case2	Case5	Case6	Case9
Maximum disp.	86.09	86.10	86.79	86.22	86.09	86.18
Average disp.	50.18	50.19	51.25	50.25	50.19	50.22
Max inter-disp.	6.616	6.648	9.269	6.694	6.912	6.684
Ave. inter-disp.	2.978	2.982	3.019	2.979	3.006	2.973

Fig.7 は弾塑性解析の除去過程を示す. 図に示すように, Step15 までは, 弾性解析と同じ結果になるが, Step20 以降は弾性解析とはやや異なる傾向が見られる. また, Fig.8 は Fig.7 に示す各ステップにおける各層の最大層間変位を示している. 図に示すように, Step 10 以降に 19 層, Step 15 以降に 9 層が塑性化し, 層間変位が大きくなっている.

Fig.9 は, Fig.8 の Step 20 の解 (Case 0) が優良解となっているかどうかを確認するため, 他の配置モデルとの比較を行った結果を示す. なお, Case 9 は, 塑性化が大きい層に集中的にダンパーを配置した場合である. また, Table 3 は, Fig.9 に示す各ケースの最大応答変位と, その平均変位, 最大層間変位, 平均層間変位を示す. 表より, 弾塑性解析の場合も, Case 0 のこれらの値は概ね最適値になっていることがわかる.

3.3 各層のダンパー投入量を 2 種類とした場合の解析

次に, 各層のダンパー投入量を 2 種類とし, より分散的な配置が可能となる条件での解析を行う. この場合, $\rho_i (i=1, L, N)$ は, 1, 0.5, 0 の 3 種となる.

Fig.10 は, 弾性解析の除去過程を示す. 図では, $\rho_i = 1$ の層を黒丸と太線で表し, $\rho_i = 0.5$ の層を黒菱形と太線で表している. また, 図中の Step の下の数値は頂部の最大応答変位を示している. 図より, Step 30 までは, Fig.3 の結果と同じとなり, Step 40 では, $\rho_i = 0.5$ が 2 層含まれているが, 配置的には Fig.3 の Step.20 と類似したものになっている. さらに, Step.50 も, Fig.3 の Step.25 と同じ配置になっている.

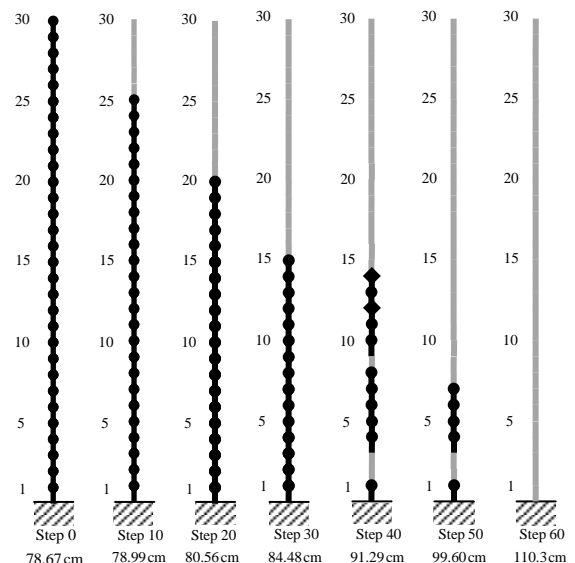


Fig.10 Dampener removal process by ESO method (Analysis example 3)

Fig.11 は, Fig.10 の Step 40 の解 (Case 0) が優良解となっているかどうかを確認するため, 総ダンパー投入量が等しい他の配置モデルとの比較を行った結果を示す. なお, この場合の比較モデルには, $\rho_i = 0.5$ を多用したモデルを用いている. また, Table 4 は, Fig.11 に示す各ケースの最大応答変位と, その平均変位, 層間変位, 平均層間変位を示す. 表より, この場合も Case 0 の値は概ね最適値になっている.

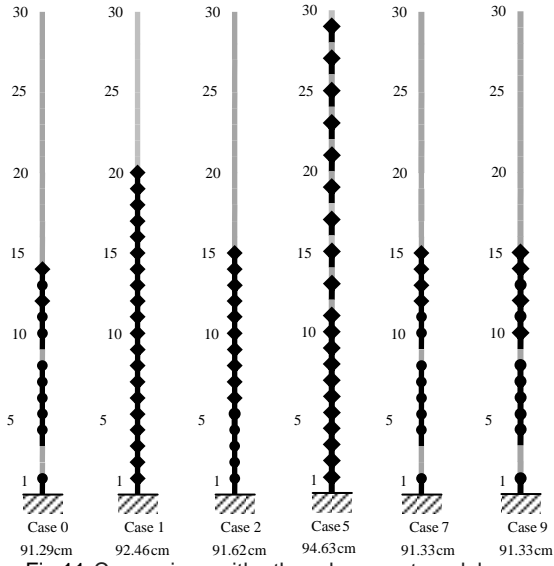


Fig.11 Comparison with other placement models

Table4 Results of analysis example 3 (cm)

	Case0	Case1	Case2	Case5	Case7	Case9
Maximum disp.	91.29	92.46	91.62	94.63	91.33	91.33
Average disp.	51.60	52.34	51.83	53.66	51.63	51.63
Max inter-disp.	3.944	3.990	3.953	40.47	3.945	3.944
Ave. inter-disp.	2.980	3.010	2.987	3.073	2.981	2.980

次に, 同じ地震波で弾塑性解析を行う. Fig.12 は弾塑性解析の除去過程を示す. 図に示すように, この場合は, Step 30, 40, 50 で, 弾性解析よりは $\rho_i = 0.5$ が増え, やや分散的な配置になることがわかる. また, Fig.13 は Fig.12 に示す各ステップにおける各層の最大層間変位を示している. 図に示すように, Step 20 以降に 19 層, Step 30 以降に 9 層が塑性化し, 層間変位が大きくなっており, これは Fig.8 と同様である.

Fig.13 は, Fig.12 の Step 20 の解 (Case 0) が優良解となっているかどうかを確認するため, 他の配置モデルとの比較を行った結果を示す. なお, この場合の比較モデルには, $\rho_i = 0.5$ を多用したモデルを用いている. また, Case 10 は, 塑性化が大きい層に集中的にダンパーを配置した場合である. また, Table 5 は, Fig.13 に示す各ケースの最大応答変位と, その平均変位, 層間変位, 平均層間変位を示す. 表より, 弾塑性解析の場合も, Case 0 のこれらの値は概ね最適値になっていることがわかる.

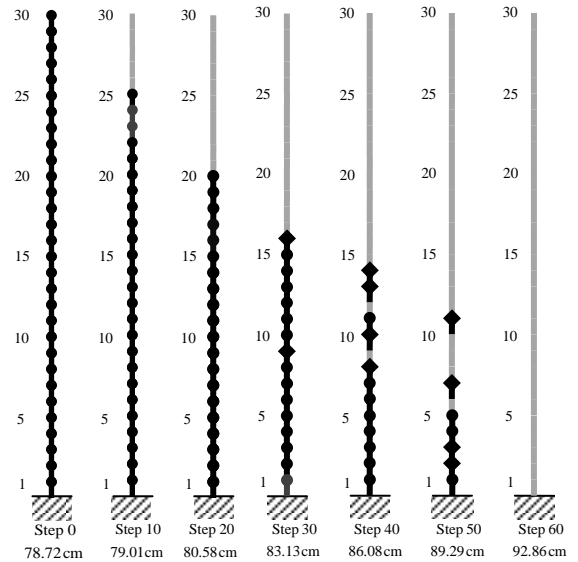


Fig.12 Damper removal process by ESO method (Analysis example 4)

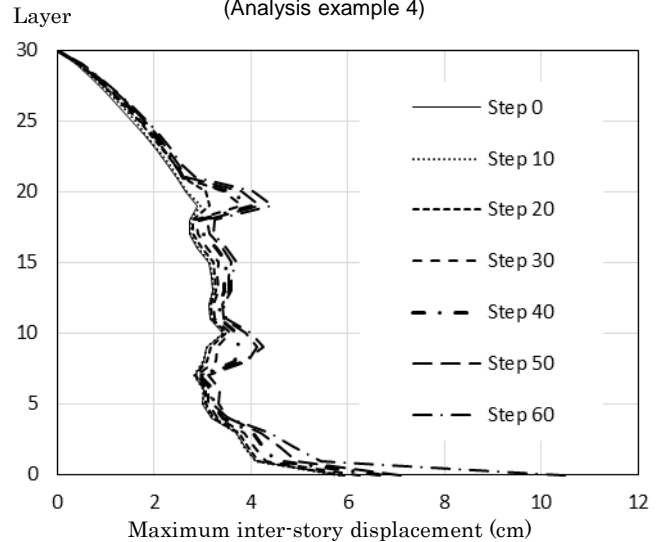


Fig.13 Maximum inter-story displacement at each step

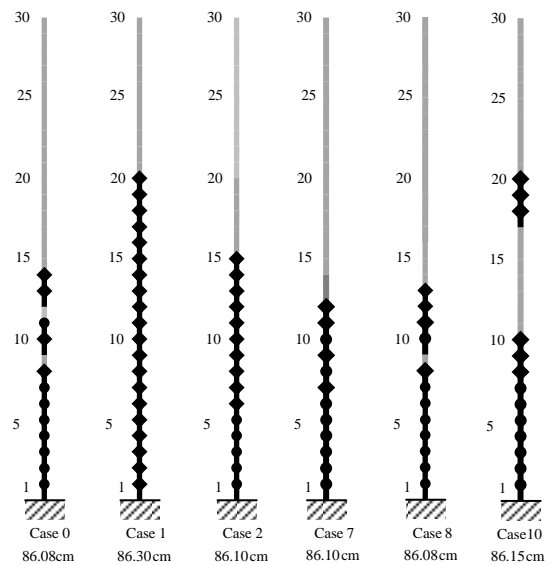


Fig.13 Comparison with other placement models

Table5 Results of analysis example 3 (cm)

	Case0	Case1	Case2	Case7	Case8	Case10
Maximum disp.	86.08	86.30	86.10	86.10	86.08	86.15
Average disp.	50.17	50.55	50.17	50.17	50.17	50.35
Max inter-disp.	6.648	7.769	6.656	6.674	6.679	6.718
Ave. inter-disp.	2.974	2.990	2.970	2.978	2.976	2.987

4. まとめ

本論文では、文献 11)で提案した ESO 法を用いた高層ビル構面の制振ダンパーの最適配置手法を、せん断多質点系モデルを用いた解析に応用し、高層ビル各層のダンパー投入量の最適配置を求める手法を提案した。そして、文献 11)でも用いている実際の鋼構造建物の設計例からせん断多質点系モデルを作成し、提案手法の有効性の検討を行った。その結果、まず、各層のダンパー投入量を一定とし、特定の層に集中的に制振ダンパーを配置する場合について以下の知見が得られた。

- ・弾性解析、弾塑性解析共に、上層から順にダンパーは除去されるが、中層以下では、やや分散的な配置になる。また、中層以下の配置に関しては、弾性解析と弾塑性解析でやや異なる配置となる。
- ・弾性解析、弾塑性解析共に、本最適化で得られた配置は、他の一般的な配置と比較して応答量が概ね最小となる優良解になる。

次に、各層のダンパー投入量を 2 種類とし、より分散的な配置が可能となる場合では以下の知見が得られた。

- ・弾性解析の除去過程は、各層のダンパー投入量が 1 種類の場合とほぼ同じであり、多層への分散配置よりも、特定の層への集中配置の方が応答を小さくできる。
- ・弾塑性解析の除去過程では、弾性解析と比較すると、ダンパー投入量をやや分散的に配置する方が効果的であるという結果となった。
- ・弾性解析、弾塑性解析ともに、本最適化で得られた配置は、他の一般的な配置と比較して応答量が概ね最小となる優良解となる。

以上の結果より、ESO 法による非常に単純な計算アルゴリズムにより、高層ビル各層の最適ダンパー投入量の配置計画が行えることが確かめられた。ただし、文献 11)でも示されているように、本解析では、地震波によって制振ダンパーの最適配置は異なる場合があ

るので、建物の建設される地盤特性を考慮した地震波によって配置計画を行う必要がある。また、提案手法は、一方的に除去するアルゴリズムであるため、特に弾塑性解析では、除去後に塑性化した層にはダンパーを再付加する等の双方向アルゴリズムを検討する必要があると考えられるが、これは今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Tsuji, M. and Nakamura, T.: Optimum viscous dampers for stiffness design of shear buildings, *J. Structural Design of Tall Buildings*, Vol.5, pp.217-234, 1996
- 2) Takewaki, I.: Optimal damper placement for minimum transfer functions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.26, pp.1113-1124, 1997
- 3) 竹脇 出: 地盤との連成を考慮した曲げ-せん断型構造物モデルの地震時有効ダンパー配置法, 日本建築学会構造系論文集, No.530, pp.77-84, 2000.4
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 辻 聖晃, 国分宏樹, 吉富信太, 竹脇 出: 非線形復元力特性を有する制振ダンパーの構造縮約モデルを用いた最適配置法, 日本建築学会構造系論文集, No.658, pp.2143-2152, 2010.12
- 8) 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
- 9) 山上雄平, 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
- 10) 川本泰斗, 藤田皓平, 辻 聖晃, 竹脇 出: セットバックを有する建物のねじれ制御を目的とした粘性ダンパー最適配置, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), p.20188, 2016.9
- 11) 野村将貴, 松本慎也, 崎野良比呂, 藤井大地: ESO 法を用いた高層ビルの制振ダンパーの構面配置の最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.742, 2017.12
- 12) 日本建築学会: 長周期地震動と超高層建築物の対策—建築家として知っておきたいこと—, 日本建築学会, 2013