

## ESO 法を用いた木造骨組における 接合部装着型ダンパーの最適配置問題

永岡伊玖磨<sup>†1</sup>, 松本 慎也<sup>†2</sup>, 藤井 大地<sup>†2</sup>

### Optimal placement problem of joint damper in wood frame using ESO method

Ikuma NAGAOKA<sup>†1</sup>, Shinya MATSUMOTO<sup>†2</sup> and Daiji FUJII<sup>†2</sup>

#### Abstract

Kyomachiya is a symbol of the history and culture of Kyoto City, and supporting the lives of people living in Kyoto. However, due to the Kumamoto earthquake, about 30% of the town house in Kumamoto was destroyed and disassembled. One of damping device type is a joint damper. However, it is difficult to judge to which joint of the frame the damper should be placed. In this paper, we propose a method to obtain the optimal placement of the damper using ESO method and Ground structure method then we will examine its effectiveness. Earthquake response analysis is performed on the model of Kyomachiya. The seismic waves used for analysis are the Kumamoto earthquake and El Centro. As a result, it was confirmed that this proposed method is an effective means for seeking excellent placement of joint damper of Kyomachiya frame

**Keywords:** Optimal placement, ESO method, Ground structure method, Vibration damping device, Kyo-machi-ya

#### 1. はじめに

京町家等の木造建築は京都のまちの歴史・文化の象徴であり、多くの現代的な住宅がある中で依然として住民の生活を支えている。一方で、2016年4月14日および4月16日に熊本県で発生した熊本地震では、熊本市にある町家の約3割が地震で損壊し解体された。これに対して、熊本市では、歴史ある町家を残していくために1500万円を上限に町家復旧費の半額を補助して街並みの保存を図っている。このようなことは京都市にとっても切実な課題である。京町家等の伝統的な木造住宅は耐力が乏しい

ため変形能力を活かした限界耐力計算を用いて補強や設計が行われている。京町家のような町家型の伝統的な木造住宅では、典型的な軸組架構が存在しているため、耐震補強や制振補強が困難である。その中で京町家の耐震補強に関する実験的研究<sup>1)</sup>で耐震補強案や補強設計法等が提案されてきているが、制振装置の最適な配置がわからないといった問題は残っているという現状がある。京都市では京町家を保存していくための取り組みとして京町家の制振補強を推進している。その背景として、現代の都市環境の中で、京都市をはじめとした伝統的な街並

<sup>†1</sup> 近畿大学大学院システム工学研究科

<sup>†2</sup> 近畿大学工学部建築学科

Graduate School of System Engineering,  
Kindai University  
Department of Architecture, Faculty of Engineering  
Kindai University

みや景観の保全が重要視されている一方で地震や火災等の災害に対する補強が求められているという現状がある。京都都心における防災性能を備えた木造住宅の設計手法と伝統的町家の耐震化に関する考察<sup>2)</sup>として仕ロダンパーを使用し京町家特有のコンセプトを考慮した制振補強の提案がされている。しかし、この提案でも、制振装置のみでの補強は困難であるため、鉄骨ブレースを使用した補強案となっている。そのような中、京都市でも制振補強とその制震補強の例として仕ロダンパー等の制振装置を取り付けることを推奨している。仕ロダンパーは制震ダンパーの1種であり、粘弾性ダンパーに分類される制震ダンパーである。仕ロダンパーの特徴として、安価で、軽量、木の経年変化による軸組の変形に粘弾性体の特性が逆らわないこと等があり、新築の改修にも向いていると考えられる。また、仕ロダンパーは大型のオイルダンパーと異なり、1個当たりの大きさが15cm~30cmと小さくなっている。これは、景観的理由で耐震壁を増設することが困難な京町家に適している制震補強と言える。そういった面もあり仕ロダンパーそのものに関する研究<sup>3)</sup>も行われてきた。そういった接合部制振装置を制振補強として建物の設置可能箇所に全て配置するのが理想ではあるが、コストの面を考えると非常に困難であり、京町家の骨組のどの仕口に制振装置を配置すれば、より効果的な制振ができるのかはよくわかっていない実情がある。また、制振構造の設計においても接合部制振装置の適切な配置を見つけることは容易ではなく、豊富な設計経験と解析的な試行錯誤が必要となってくる。藤井らは、解析上すべての設置可能箇所に制振装置を配置し、数値計画法を用いて接合部制振装置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困難なため、ここでは地震力を静的な外力(Ai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では、制振ダンパーの最適配置が全体剛性を最大化する制振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、様々な周期特性を持つ地震波については考慮することができない。そこで、本論文では、同じグラウンドストラクチャ法に、感度解析の必要ない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振装置の最適配置を求める方法<sup>4)</sup>を用いて、京町家における接合部制振装置の最適もしくは優良な配置を計算する。本方法は、まず、京町家の骨組みモデルでのすべての接合部の配置可能箇所に接合部制振装置を配置し、この骨組モデルの動的応答解析によって各接合部制振装置の累積減衰エネルギー計算し、この減衰エネルギーの小さい順に接合部制振装置から除去していくという非常に単純な方法である。本報告では上述したESO法とグラウンドストラクチャ法を用いた接合部制振装置の最適配置を

求める方法を提案し、その有効性を検討する。

## 2. ESO法とグラウンドストラクチャ法を用いた解析方法

本報告で用いる手法は、文献4)で提案されているものである。まず、設計上すべての設置可能箇所に制振装置を配置する。なお、本報告では、これをグラウンドストラクチャと呼んでいる。次に、制振装置をダッシュポットに置き換えて地震応答解析(時刻歴応答解析)を行い、各制振装置の累積減衰エネルギーを計算し、それが最も小さい制振装置を除去する。骨組に対して再度地震応答解析を行い、累積減衰エネルギーが最も小さい制振装置を除去する。以上の過程をすべての制振装置が除去されるまで繰り返す。そして、設計者が骨組の最大変位や最大層間変位等を参考に、以上の除去過程で得られた制振装置の配置の中から適当なものを選択する。解析には骨組有限要素法を用いるものとして、以上の過程の定式化を示すと次のようになる。まず、設置可能な制振装置数を $N$ とし、各制振装置をダッシュポットに置き換えた時のダッシュポットの粘性減衰係数を $c$ とする。このとき、ダッシュポットの減衰力は、次のように定義できる。

$$\begin{Bmatrix} f_{ci}^{(k)} \\ f_{cj}^{(k)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^{(k)} & -c^{(k)} \\ -c^{(k)} & c^{(k)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i^{(k)} \\ v_j^{(k)} \end{Bmatrix}, \quad (k=1, \dots, N) \quad (1)$$

ここに、 $f_{ci}^{(k)}, f_{cj}^{(k)}$ は $k$ 番目要素の節点 $i, j$ の減衰力(内力)、 $v_i^{(k)}, v_j^{(k)}$ は $k$ 番目要素の節点 $i, j$ の速度を表す。次に、 $k$ 番目要素の減衰係数マトリクスを、設計変数 $\rho_k$ を用いて次のように表す。

$$\mathbf{c}_k = \rho_k \mathbf{c}_k^0, \quad \rho_k = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad \mathbf{c}_k^0 = \begin{bmatrix} c^{(k)} & -c^{(k)} \\ -c^{(k)} & c^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $\rho_k$ はダンパーが残存する場合は1、制振装置が除かれる場合は0となる。ここに各ステップで除去する制振装置を決定する指標として、本研究では、次式の累積減衰エネルギー $E_k$ を用いる。

$$E_k = (1/2) \int_0^{t_g} (\mathbf{d}_k^T \rho_k \mathbf{c}_k^0 \mathbf{d}_k) dt, \quad \mathbf{d}_k = \begin{Bmatrix} v_i^{(k)} \\ v_j^{(k)} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 $t_g$ は時刻歴応答解析の解析時間である。

本研究では、時刻歴応答解析法として平均加速度法を用いる。また、(3)式の時間積分は、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。以上の準備のもとで、ESO法による接合部制振装置の除去過程は次のようになる。

- ① グラウンドストラクチャの地震応答解析を行い、各制振装置の累積減衰エネルギーを計算する。
- ② 最も累積減衰エネルギーの小さい制振装置を除去す

る。なお、同じ累積減衰エネルギーの制振装置が複数ある場合は対称性を保つため、同時に除去する。

また、同じ設計変数番号の要素は同時に除去される。

- ③ 制振装置が除去された骨組に対して、再度地震応答解析を行い、残存する接合部制振装置の累積減衰エネルギーを計算する。
- ④ すべての接合部制振装置が無くなるまで、②、③の過程を繰り返す。
- ⑤ 表示ソフトを用いて、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接合部制振装置数及び配置を決定する。

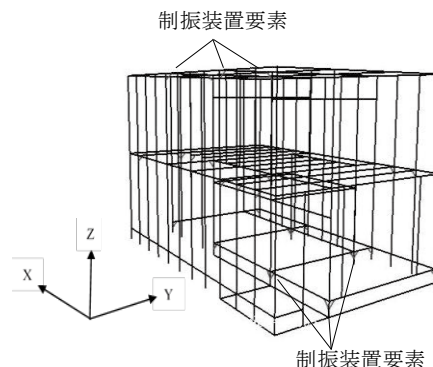


図2 解析モデル

以上に示されるように、本手法は、最適化問題を解いているわけではないため、各ステップの解が、その制振装置数で最大変位や最大層間変位を最小にする最適解（最適配置）であるという保証はない。しかし、得られた解が、最大変位や最大層間変位を最小化する最適解あるいは最適解に近い優良解であるならば、構造計画段階で用いる手法としては十分有用であると考えられる。

### 3. 接合部装着型ダンパーのモデル化

本研究では接合部の相対回転角に対して作用する接合部装着型ダンパーを図1に示すようなビーム要素によるブレース置換モデルによりモデル化する。

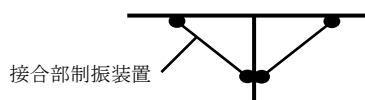


図1 ダンパーのモデル図

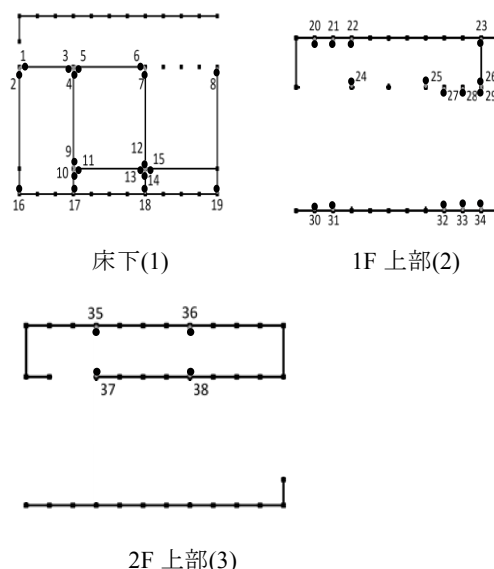


図3 接合部制振装置の配置図（層番号）

### 4. 解析モデル

図2に木造骨組をもとにした解析モデルを示す。解析モデルは、京町家を参考に作成したものであり、モデルの土壁や小壁については、ブレース置換を行いモデル化している。また各接点に負担面積ごとの集中荷重を与えることで解析モデル1次固有周期を0.48秒となるようにした。ここで、制振装置の設置箇所を示すため、筋交いや壁等の部材を図から除いて表示しているものが図2である。図3は、接合部制振装置の層ごとの配置図であり、配置図上に記入している番号は、接合部制振装置の番号である。また図3の1F 上部と2F 上部に示す線が壁であり、丸くなっている場所に制振装置を設置する。表1は、部材断面の諸元を示す。ここでは、制振装置の粘性減衰係数を  $33\text{N}\cdot\text{s}/\text{mm}$  とし、解析では2017年4月16日にK-NET 熊本県益城町観測地点で計測された熊本地震波（KMMH16EW）と日本建築センター模擬波レベル1（BCJ-L1）としている。

表1 部材断面の諸元

	部材断面 (mm×mm)
柱	110×110
梁及び桁	120×240
貫	15×90
筋交い	45×90

4.1 解析 1

表 2 は、本手法による接合部制振装置の除去過程を示している。表の左がステップ数で右がそのステップでの除去された番号を示している。表 2 より、除去過程の傾向として、まず 2F 上部の半数が消え、1F 上部、2F 上部の半数、床下の順に接合部制振装置が消えて行き、最終的には床下中央付近に集中して接合部制振装置が残るような傾向が見られる。

表 2 接合部制振装置の除去過程

ステップ数	除去番号				
1	38(3)	14	1(1)	27	16(1)
2	37(3)	15	32(2)	28	2(1)
3	24(2)	16	22(2)	29	19(1)
4	25(2)	17	26(2)	30	9(1)
5	20(2)	18	15(1)	31	4(1)
6	21(2)	19	33(2)	32	12(1)
7	31(2)	20	27(2)	33	17(1)
8	30(2)	21	35(3)	34	12(1)
9	6(1)	22	28(2)	35	17(1)
10	5(1)	23	11(1)	36	18(1)
11	29(2)	24	36(3)	37	14(1)
12	34(2)	25	23(2)	38	8(1)
13	3(1)	26	13(1)		

\*かっこ内の数値は層数を表す。

各ステップと最大変位の関係を示したグラフを図 4 に示す。このグラフから Step29 から最大変位が急激に増加していることがわかるため、ここでは、Step29 の接合部制振装置の数が 9 個の場合の検討を行う。図 5 は、提案手法の接合部制振装置の配置を示す。ただし、図では、接合部制振装置の配置が見えやすいようにアングルを変えている。

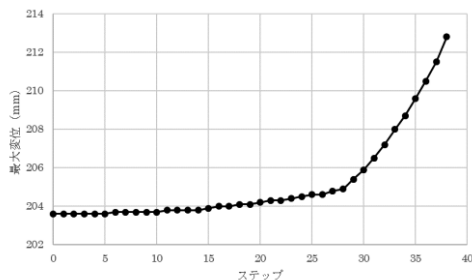


図 4 最大変位—ステップ数の関係

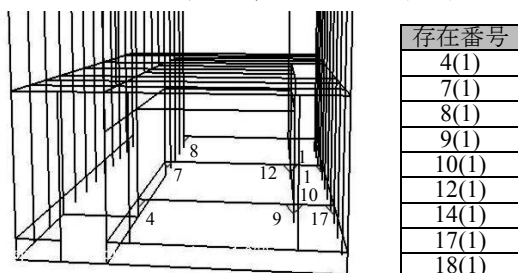


図 5 提案手法による Step29（接合部制振装置 9 個）の配置

次に、提案手法によって得られた解が、最適解あるいは優良解であることを確かめるために、接合部制振装置の数を同じとした比較モデルを人為的に作成する。それぞれのモデルに対し時刻歴応答解析を行い、最大応答を算出、比較することで提案手法によるモデルが最適解あるいは優良解であることを確かめる。また、表 3 に、比較モデルの接合部制振装置の配置を示す。ただし、モデル 1 は接合部制振装置を外周に配置し、モデル 2 は接合部制振装置を X 方向にできるだけ配置し、モデル 3 は接合部制振装置を通り庭上部に配置したモデルとしている。表 4 は、これらのモデルに対して時刻歴応答解析を行い、最大層間変位を比較したものである。

表 3 比較モデルの接合部制振装置の配置

配置番号	配置番号	配置番号
1(1)	1(1)	20(2)
2(1)	3(1)	21(2)
3(1)	5(1)	22(2)
5(1)	6(1)	23(2)
6(1)	8(1)	24(2)
7(1)	11(1)	25(2)
8(1)	13(1)	26(2)
16(1)	15(1)	27(2)
19(1)	16(1)	28(2)

モデル 1                      モデル 2                      モデル 3

表 4 最大層間変位の比較[単位：mm]

	提案手法	モデル 1	モデル 2	モデル 3
床下	40.52	41.48	41.78	41.95
1F	119.8	122.5	123.2	123.9
2F	100.4	102.7	103.3	103.9
Rank	1	2	3	4

表 4 により、提案手法による配置が他の比較モデルの配置と比べて、最大層間変位が最小になっていることがわかる。また、提案手法の場合、その他のモデルよりも約 3.3%も減少できるため提案手法の優劣を示すことができた。これにより、京町家の場合でのダンパー数が 9 個しか設置できない場合は、提案手法による設置方法が優良であることが確認された。

4.2 解析 2

解析 2 では、日本建築センター模擬波レベル 1 (BCJ-L1) を用いて解析を行い解析 1 と比較し、地震波による違いや共通点を把握することで、本提案手法の有効性の検証を行う。表 5 は、本手法による接合部制振装置の除去過程を示している。表 5 より、除去過程の傾向として、まず 2F 上部の半数が消え、1F 上部、2F 上部の半数、床下の順に接合部制振装置が消えて行き、最終的には床下中央付近に接合部制振装置が残るような傾向が見られる。解析 1 と比較して、ステップ数の中盤では消え方の順番は異なるものの後半では残り方は同じで解析 1 と 2 はほぼ同じであるという知見を得た。

表 5 接合部制振装置の除去過程

ステップ数	除去番号				
1	38(3)	14	33(2)	27	11(1)
2	37(3)	15	27(2)	28	13(1)
3	24(2)	16	35(3)	29	19(1)
4	25(2)	17	28(2)	30	9(1)
5	20(2)	18	6(1)	31	4(1)
6	21(2)	19	36(3)	32	12(1)
7	31(2)	20	5(1)	33	17(1)
8	30(2)	21	23(2)	34	12(1)
9	29(2)	22	3(1)	35	17(1)
10	34(2)	23	1(1)	36	18(1)
11	32(2)	24	15(1)	37	14(1)
12	22(2)	25	16(1)	38	8(1)
13	26(2)	26	2(1)		

\*かっこ内の数値は階数を表す。

またここでも、提案手法によって得られた解が、最適解あるいは優良解であることを確かめるために、接合部制振装置の数を同じとした比較モデルを人為的に作成し、それぞれのモデルに対し時刻歴応答解析を行い、最大応答を算出、比較することで最適解あるいは優良解であることを確かめる。各ステップと最大変位の関係を示したグラフを図 6 に示す。このグラフから解析例 1 同様に解析例 2 でも Step29 から最大変位が急激に増加していることがわかるため、ここでも、Step29 の接合部制振装置が 9 個の場合の検討を行う。提案手法の接合部制振装置の配置は解析例 1 と同様であるため、図 5 である。また、モデル 1, 2, 3 の比較モデルの接合部制振装置の配置も解析例 1 と同様であるため、表 3 である。以上のような条件を用いて時刻歴応答解析を行った結果が表 6 である。表 6 は人為的に作成した比較モデルの最大層間変位を比較したものである。

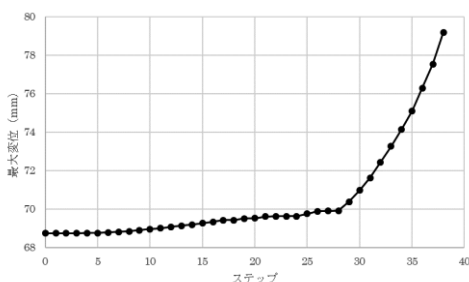


図 6 最大変位—ステップ数の関係

表 6 最大層間変位の比較[mm]

	提案手法	モデル 1	モデル 2	モデル 3
床下	14.2	15.1	15.4	15.7
1F	41.2	44.2	45.2	46.0
2F	34.52	37.1	38.0	38.9
Rank	1	2	3	4

表 6 より、地震波を変えた場合でも提案手法による配置が他の比較モデルの配置と比べて、最大層間変位が最小になっていることが確認できる。また、提案手法の場合、

その他のモデルよりもどの階でも約 10.1%も小さくでき、比較モデルと比較して大きいところでは約 10.4%程度最大層間変位が小さいということが確認されたため提案手法の優良さを示すことができた。これにより、解析 1 と地震波を変えた解析 2 の場合も京町家の場合での接合部制振装置が 9 個しか設置できない場合は、提案手法による設置方法が優良であることが確認されたため、本手法の有効性が検証できたと考える。

### 5. 考察

本研究では、ESO 法とグラウンドストラクチャ法を用いて、京町家骨組の接合部制振装置の最適配置を求める手法を提案し、提案手法の解析により得られた解と、人為的に配置したモデルの解との比較を行った。その結果、本手法の方が比較モデルよりも、最大層間変位を低減できていることがわかり、本手法の有効性が確かめられた。なお、本報告では解析 1 として 2016 年 4 月 16 日に熊本地震 (KMMH16EW) を用いたもの、解析 2 として日本建築センター模擬波レベル 1 (BCJ-L1) を用いた解析を示し、優良解が得られることが確かめられている。このような結果から本提案手法が京町家骨組の接合部制振装置の優良な配置を求めるために有効な手段であることが確認された。

### 参考文献

- 1) 小池哲郎, 大村早紀, 杉野未奈, 林康裕: 京町家の耐震補強に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 82(736), 843-852, 2017-06
- 2) 小林広英, 梶田洋子, 桑原由美子, 小林正美: 京都都心部における防災性能を備えた木造住宅の設計手法と伝統的町家の耐震化に関する考察, 日本建築学会技術報告集, 第 17 号, 355-358, 2003.6
- 3) 野島千里, 榎原健一, 鈴木祥之: 木造軸組に付加する制震装置の評価法について, 学術講演梗概集. C-1, 構造 III, 木質構造, 鉄骨構造, 鉄骨鉄筋コンクリート構造 2003, 133-134, 07-30
- 4) 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構面配置の最適化, 日本建築学会構造系論文集 82(742), 1885-1891, 2017