

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	鋼材・粘性ダンパー混在型のパッシブ制振設計法 その2 多質点系へのダンパー分配方法と設計精度の検証
Title(English)	Design method for passive control system using steel and oil damper (Part.2) Distribution method to multi-story and verification of proposed design
著者(和文)	渡井一樹, 前田周作, 笠井和彦, 佐藤大樹, 鈴木庸介, 飯野夏輝
Authors(English)	Kazuki Watai, Shusaku Maeda, Kazuhiko Kasai, Daiki Sato, Yousuke Suzuki, Natsuki Iino
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , pp. 877-878
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , pp. 877-878
発行日 / Pub. date	2020, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

鋼材・粘性ダンパー混在型のパッシブ制振設計法

その2 多質点系へのダンパー分配方法と設計精度の検証

正会員	○渡井一樹 ^{*1}	同	前田周作 ^{*2}
同	笠井和彦 ^{*1}	同	佐藤大樹 ^{*1}
同	鈴木庸介 ^{*2}	同	飯野夏輝 ^{*2}

パッシブ制振構造 設計法	鋼材ダンパー 性能曲線	粘性ダンパー 等価線形化
-----------------	----------------	-----------------

1. はじめに

本報では、その1で示した等価1質点系の性能曲線を用いて算定した目標層間変形角を満たすダンパー量を、多質点系に分配する方法を示す。また、設計した制振構造の設計精度を時刻歴応答解析により検証する。

2. 多質点系へのダンパー分配方法

本手法は、変形角の一樣化を鋼材ダンパー、応答値の低減を鋼材・オイルダンパーに期待する設計法である。そのため、まずは鋼材ダンパーを分配して任意外力に対して変形角を一樣にし、そのシステムに対してオイルダンパーを分配することで全体的な応答低減を図る。

2.1 鋼材ダンパーの分配

任意の質量・剛性分布を持つ非制振構造に対して、地震時の最大層間変形角を一樣にし、かつ目標層間変形角 $\theta_{\max}$ と等しくする i 層のダンパー等価剛性 K_{ai} を求める。任意の層せん断力 Q_i に対して層間変形角 θ_i とシステム塑性率 μ_a を等しくするための K_{ai} は文献1から層剛性非比例分配の場合は次式で与えられる。

$$K_{ai} = \frac{Q_i}{h_i} \frac{\sum_{i=1}^N (K_{fi} h_i^2)}{\sum_{i=1}^N (Q_i h_i)} \left\{ \frac{K_a}{K_f} + \mu_a \right\} - \mu_a K_f \quad (1)$$

ここに、 h_i は階高、 N は層数である。式(1)を用いた場合に負のダンパー剛性 ($K_{ai} < 0$) が算出された場合、当該層に $K_{ai,op} = 0$ を与え、次式を用いて再計算を行う。

$$K_{ai} = \frac{Q_i}{h_i} \frac{1}{\sum_A (Q_i h_i)} \left\{ \frac{K_a}{K_f} \sum_N (K_{fi} h_i^2) + \mu_a \sum_B (K_{fi} h_i^2) - \sum_A (K_{ai,op} h_i^2) \right\} - \mu_a K_f \quad (2)$$

ここに、 $\sum_N$ は全層、 $\sum_A$ は $K_{ai,op} = 0$ として任意のダンパー剛性を指定する層、 $\sum_B$ はダンパー剛性を非比例分配する層の総和を表す。式(1)から $K_{ai} < 0$ が算出された層は、層間変形角を一樣にするためには層剛性の削減が望ましいことを意味するが、式(2)では当該層の鋼材ダンパーをゼロとして計算を行うことで、主架構の特性を変えずにダンパー量を最適化することが可能である。そのため、式(2)では全ての層で $K_{ai} \geq 0$ となるまで計算を繰り返すが、 $K_{ai,op} = 0$ を指定した層の変形角は $\theta_{\max}$ よりも小さな値になることに注意されたい。次に、 $\theta_{\max}$ を用いて鋼材ダンパーの降伏変位 u_{ayi} と降伏耐力 F_{ayi} を次式から得る。

$$u_{ayi} = \theta_{\max} h_i / \mu_a, \quad F_{ayi} = K_{ai} u_{ayi} \quad (3a,b)$$

2.2 線形粘性要素の分配とバイリニア粘性要素への変換

鋼材ダンパーが塑性化したときの等価円振動数 ω_{eq} に対して、線形粘性要素の粘性係数 C_{dLi} を等価剛性 $K_{eqi} = K_{fi} + K_{ai} / \mu_a$ に比例分配する。

$$C_{dLi} = 2h_i' (K_{fi} + K_{ai} / \mu_a) / \omega_{eq} \quad (4)$$

ここに、 h_i' は μ_a を考慮して求めた粘性要素による等価減衰定数 h_i' から主架構の減衰定数 h_0 を引いた、線形粘性要素により付加される等価減衰定数である。なお、本手法では簡便のため h_0 は μ_a によらず一定としている。

次に、文献2の「骨格曲線等価則」を用いて線形粘性要素をバイリニア粘性要素に変換する。オイルダンパーの2次粘性比を p_d 、リリーフ率を μ_d とすればバイリニア要素の粘性係数 C_{di} を次式から得る。

$$C_{di} = C_{dLi} / \left\{ p_d + \frac{2(1-p_d)}{\mu_d} - \frac{(1-p_d)}{\mu_d^2} \right\} \quad (5)$$

ω_{eq} における等価則であることを考慮すれば、リリーフ荷重 F_{dyi} とリリーフ速度 $\dot{u}_{dyi}$ を次式から得る。

$$F_{dyi} = C_{di} \dot{u}_{dyi} = C_{di} u_{i,max} \omega_{eq} / \mu_d, \quad \dot{u}_{dyi} = F_{dyi} / C_{di} \quad (6a,b)$$

3. 制振構造の設計と設計精度の検証

本報その2でも建物モデルおよび設計対象地震動はその1と同様とする。

3.1 鋼材ダンパーとオイルダンパーの分配

その1で $T_{el} / T_f = 0.90$, $\mu_a = 4.0$ として求めた付加系弾性剛性比 $K_a / K_f = 0.235$ および粘性減衰による等価減衰定数 $h_d' = 0.047$ を多質点系に分配する。まず、鋼材ダンパーの分配に用いる任意の層せん断力 Q_i は、非制振構造に設計対象地震動である BCJ-L2 波を入力したときの各層の最大層せん断力とする。図1a)には式(1),(2)を用いて鋼材ダンパーを分配した結果、図1b)には K_{fi} , Q_i , K_{ai} をそれぞれの最大値で基準化した値を示す。式(1)から算出した K_{ai} は下層および上層で著しく大きな負の剛性が算出されているが、前述(2.1節)の通り当該層を $K_{ai,op} = 0$ として再計算することで1~2層および26~37層で鋼材ダンパーが設置されない結果となった。また、式(1)は負の値を考慮してダンパー量を満たそうとするが、 $K_{ai} < 0$ を消去することで再分配

後の K_{ai} の最大値も低減されている。また、図 1b) に示すように、基準化した K_{fi} と Q_i の差が大きな層で、大きな K_{ai} が算出されることが、層剛性非比例分配の特徴である。

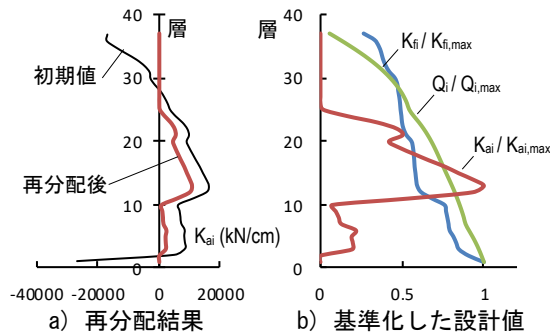


図 1 鋼材ダンパーの分配

次に、線形粘性要素の分配を行う。線形粘性要素はシステムの等価剛性に対して比例分配するため、鋼材ダンパーが設置されていない層に対しても分配される。本検討では $p_d = 0.02$, $\mu_d = 2.0$ としてバイリニア粘性要素へ置換するため、 C_{dLi} と C_{di} の比率は $C_{dLi}/C_{di} = 0.755$ となる。

3.2 建物最大応答の設計精度

前節で求めたダンパーを設置した制振構造の時刻歴応答解析を行い、層間変形角を目標通りに制御できるか検証する。なお、本検討では比較のためにダンパーを設置しない非制振構造、オイルダンパーを線形粘性要素とした制振構造（以下、制振構造(リニア)）、オイルダンパーをバイリニア粘性要素とした制振構造（以下、制振構造(バイリニア)）の 3 種類について検討する。

図 2 には各モデルに BCJ-L2 波を入力したときの最大応答を示す。制振構造は非制振構造に対して最大応答が低減できており、2 種の制振構造の応答低減効果は同程度である。また、鋼材ダンパーが設置されている 3~25 層の層間変形角は目標の θ_{max} にほぼ等しい。このときの鋼材ダンパー設置層における層間変形角 θ_i の θ_{max} に対する低減率 θ_i/θ_{max} の平均、標準偏差、変動係数を表 1 に示す。低減率の平均は $\pm 20\%$ 以内に収まっており、そのばらつきは小さいことから十分な設計精度が得られていると判断できる。

3.3 ダンパー挙動の設計精度

次に、鋼材ダンパーの塑性率 μ_a 、オイルダンパーのリリーフ率 μ_d を確認する。2 種の制振構造について、全層の平均値を求めたところ、制振構造(リニア)の場合 $\mu_{a,ave} = 4.4$, $\mu_{d,ave} = 1.0$ であり、制振構造(バイリニア)の場合 $\mu_{a,ave} = 4.7$, $\mu_{d,ave} = 4.4$ であった。鋼材ダンパーの μ_a は変形角が θ_{max} よりもやや大きい設計値の 4.0 よりも若干大きくなったが層ごとのばらつきは小さかった。一方、オイルダンパーの μ_d は設計値との差だけでなく層ごとのばらつきも大きく、制振構造(バイリニア)における最大値は 6.9 であった。2.2 節で用いた等価則は定常応答を想定しているのに対し、本検討ではランダム応答を対象としたことによる

高次モードの影響が考えられる。解析から得た制振構造(リニア)の線形粘性要素の最大速度は 5.6cm/s であったが、予測した最大速度は $u_{i,max}\omega_{eq} = 3.5\text{cm/s}$ と明らかに小さく、 F_{dyi} を小さく評価したことが μ_d を増加させた要因である。この誤差を解消するためには、予備解析として制振構造(リニア)の時刻歴応答解析により線形粘性要素の最大力を求め、文献 2 の式(14)を用いてリリーフ荷重比 α を求めてから C_{di} を算出することが有効である。この予測誤差は建物が高層化するほど顕著になり、 μ_{di} が大きくなるとダンパーの許容速度を超えて破壊に至ることはないが、最大荷重が予測より 10% 程増加するため注意が必要である

なお、紙面の都合上本報には掲載しないが、文献 3 の建物高さ 20, 40, 80m および在来・トリムタイプのテームストラクチャー計 6 種に対して様々なダンパー量の組合せで設計を行い、良好な設計精度が得られたことをここに記しておく。

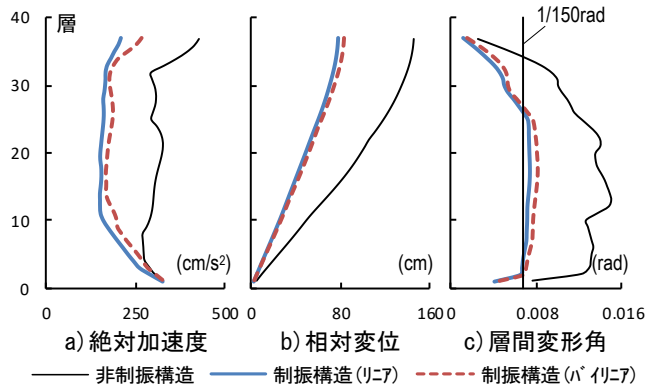


図 2 最大応答値

表 1 設計精度検証（鋼材ダンパー設置層）

オイルダンパー	平均	標準偏差	変動係数
線形	1.086	0.031	0.029
バイリニア	1.161	0.045	0.039

4. まとめ

性能曲線から求めた目標層間変形角を満たす等価 1 質点系のダンパー量を多質点系に分配する方法を示し、設計した制振構造が目標通りの応答低減効果を得られることを示した。

謝辞

本研究は東京工業大学と竹中工務店との共同研究であり、一部は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 笠井和彦, 伊藤浩資: 弾性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調整による制振構造の応答制御手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 595 号, pp.45-55, 2005.9
2) 笠井和彦, 小椋崇之, 西村忠宗: リニア粘性要素とバイリニア粘性要素の制振効果における等価則, 日本建築学会構造系論文集, 第 611 号, pp.29-37, 2007.1
3) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 3 版, 2013.1

*1 東京工業大学
*2 竹中工務店
*1 Tokyo Institute of Technology
*2 Takenaka Corporation