非線形型粘弾性ダンパーを有する間柱型制振構造の多質点系モデルによる簡易評価

SIMPLE EVALUATION BY MULTI DEGREE OF FREEDOM SYSTEM MODEL OF STUD TYPE VIBRATION CONTROL STRUCTURE WITH NONLINEAR VISCOELASTIC DAMPER

鈴木公平 — * 1 津之下 睦 — * 2
中尾貞治 — * 2 高島英幸 — * 3

Kohei SUZUKI — * 1 Atsushi TSUNOSHITA — * 2
Sadaharu NAKAO — * 2 Hideyuki TAKASHIMA — * 3

キーワード：
非線形型粘弾性ダンパー, 間柱型, 簡易評価手法, 多質点系モデル, Pushover 解析

Keywords:
Nonlinear viscoelastic damper, Stud type, Simple evaluation, Multi degree of freedom system model, Pushover analysis

The simple evaluation method of stud type vibration control structure with nonlinear viscoelastic damper was shown. In this method, loss displacement of stud type damper can be appropriately considered by replacing the damper with an elasto-plastic spring and performing pushover analysis. By reflecting the loss displacement in the multi degree of freedom system model, simple and accurate dynamic analysis is made possible. The accuracy of this method was proved by a case study in a real building.

1. はじめに

制振装置が設置された建物の耐震性能の構造計算は, 一般的に時刻歴応答解析に基づき行われる。時刻歴応答解析に用いる振動モデルには, 部材ごとにモデル化することで比較的精密な解析を可能とする立体系振動モデルと, せん断棒モデルや曲げせん断棒モデルなどの簡易的な多質点系振動モデルがある。

建物の基本計画時に制振装置の配置や設置数量をシミュレートする際には, 立体系振動モデルはハンドリングが悪く, 検討に相当の時間を必要とする。それに対して多質点系振動モデルを用いて制振装置の効果を精度良く評価することができれば, 基本計画の段階で質の高いケーススタディを実行できる。

多質点系振動モデルを用いて制振装置の効果を精度良く評価するためには, 制振装置の実効変形比を適切に評価しなければならない。実効変形比は, 架構の層間変形に対する制振装置の変形の割合を表したものであり, 周辺架構の剛性や制振装置の設置位置, 更には制振装置の設置方法などによって値が増減することが明らかとなっている¹⁾²⁾³⁾。特に制振装置を間柱型で設置する場合, 実効変形比は上下大梁の剛性に大きく影響を受けることとなる。立体系振動モデルではこの影響を考慮して制振装置の効果を検討することが可能であるが, 多質点系振動モデルではこれらの影響を直接的に評価することは出来ないため, これを解決する方法が必要である。

線形 Kelvin-Voigt モデルでモデル化される粘弾性型の制振装置を用いた研究⁴⁾⁵⁾では, 連層壁形式の制振装置を等価な弾性ばねに置換し, 静的解析を行うことで, 実効変形比の近似値を推定できることが示されている。更に, この実効変形比を考慮した等価粘性減衰係数と等価ばね定数により, 簡易な振動モデルで立体系振動モデルに

近い応答結果が得られることが示されている。また, 非線形型の粘性系の制振装置を用いた研究⁶⁾では, 同様の方法により, 求められた実効変形比から多質点系振動モデル上に設置する制振装置のモデルを補正することで, 高い精度の応答結果が得られることが示されている。

文献⁷⁾では, 実用頻度の高い, ブレース型の鋼材・オイル・粘弾性系の制振装置, 及び間柱型の粘性系の制振壁を用いて, 制振装置の種別や設置方法を網羅する検討がなされている。また, 簡易モデルの理論的背景や適用範囲について示されており信頼性が高い。多層制振構造に適用可能な付加系せん断棒モデルの提案がなされており, 主架構の骨組み特性値に制振装置の影響を直接的に含まないモデルであるため, 制振装置の諸元を変えるだけでパラメータスタディを容易に実行できることが特長である。文献⁸⁾では, 上述した付加系モデルを用いて, 更にパラメーター検証を行うなど, モデルの適用性について確認している。間柱型制振構造を対象としており, 制振装置の性能・設置量・不均一配置による影響を検討し, 立体系振動モデルに対し誤差が生じるケースについて報告されている。

間柱型の履歴系の制振装置を用いた研究⁹⁾では, 制振装置と周辺架構のモデル化の違いにより, 応答値が異なることを示したのものもある。具体的には, 反曲点位置に焦点を絞り, 反曲点位置の移動が考慮される部材モデルと, 考慮されないせん断ばね置換モデルの応答値について考察がなされている。

このような背景と既往の研究を踏まえ, 本研究では非線形型粘弾性ダンパーを用いた間柱型制振構造を対象として, 多質点系振動モデルによる精度の高い簡易的な評価手法を提案し, その妥当性を証明することを目的とした。

¹⁾ ㈱コンステック研究開発本部構造ソリューション部 部長・修士 (工学)
(〒140-0001 東京都品川区北品川1-8-11)

²⁾ ㈱コンステック研究開発本部構造ソリューション部

³⁾ 関東学院大学建築・環境学部 教授・工博

¹⁾ General Manager, Research and Development Headquarters, Structure Solutions Dept., Constec Engi, Co., M. Eng.

²⁾ Research and Development Headquarters, Structural Solutions Dept., Constec Engi, Co.

³⁾ Prof., Dept. of Arch. and Env., Kanto Gakuin Univ., Dr. Eng.

2. 簡易評価手法

2.1 簡易評価方針と評価フロー

図1に提案する簡易評価手法のフローチャートを示す。本評価手法の手順を以下に列記する。

(1) Pushover 解析

ダンパーが無い状態の建物を立体フレームにモデル化し、Pushover 解析を行う。

(2) 固有値解析

Pushover 解析から得られる $Q-\delta$ 曲線に基づき、多質点系の曲げせん断棒モデルを作成する。作成した曲げせん断棒モデルの固有値解析を行い、一次固有周期を算出する。

(3) ダンパー置換モデル作成

ダンパーの性能評価試験から得られた減衰力-変形関係に基づき、スケルトンカーブを作成する。なお、ダンパーの減衰力-変形関係には、(2)で得られた一次固有周期に基づき周波数依存性を考慮する。作成したスケルトンカーブをトリリニアにモデル化し、スプリングモデル（ダンパー置換モデル）を作成する。

(4) ダンパー置換モデル付き立体フレームの Pushover 解析

(1)で作成した立体フレームモデルに、ダンパー置換モデルを付加して Pushover 解析を行う。

(5) ダンパーの損失変形量算出

Pushover 解析の結果から、層間変形とダンパーを置換したスプリングの変形量を算出する。また、層間変形とスプリング変形の差分

図1 簡易評価手法のフローチャート

からステップ毎の損失変形量を算出する。

(6) 損失変形に関する弾性バネ剛性算出

ダンパーの減衰力と損失変形の関係から弾性バネ剛性を算出する。

(7) 損失変形を考慮したダンパーモデルの作成

ダンパーの力学モデルである三要素モデルに(6)で算出した弾性バネ剛性を直列に接合し、損失変形を考慮したダンパーモデルを作成する。

(8) 時刻歴応答解析

(2)で作成した多質点系の曲げせん断棒モデルに(7)で作成したダンパーモデルを組み合わせ、時刻歴応答解析を実行する。

2.2 非線形型粘弾性ダンパーの動的特性と力学モデル

本研究で対象としているダンパーの形状を図2、ダンパーを間柱型で組み込んだ架構の姿を図3に示す。粘弾性体は400mmの辺を持つ2層の正形状で厚みは15mmである。減衰力 F_d と変位 δ_d の関係を図4に示す。試験条件¹⁰⁾は、温度 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 、周波数 0.1Hz、歪 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 50\%$ 、 $\pm 100\%$ 、 $\pm 200\%$ 、 $\pm 300\%$ の正弦波加振を行っており、各歪ステージにおける3サイクル目加振時の履歴ループを示している。水平変位の増加に伴い等価剛性が小さくなっており、歪依存性を有する非線形型粘弾性ダンパーであることがわかる。なお、歪100%の加振時における等価せん断弾性係数 G_{eq} が $0.76(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、等価粘性減衰定数 h_{eq} が 0.33 である。図5には等価

図2 ダンパー形状

図3 間柱型ダンパー付き架構

図4 減衰力と変位

図5 等価せん断弾性係数と歪

図6 スケルトンカーブ

図7 トリリニアモデル

せん断弾性係数 G_{eq} と歪 γ の関係を示す。等価せん断弾性係数 G_{eq} は γ を変数とした(4)式で近似できる。

$$G_{eq} = 0.71 \gamma^{0.511} \quad (1)$$

また、動的解析における当ダンパーの力学モデルには三要素モデルが用いられる。三要素モデルは、(1)～(3)式に示す弾塑性要素 K_1 、弾性要素 K_2 、粘性要素 C_1 の三つの要素を並列にしたモデルであり、当ダンパーの履歴特性を精度良く数値解析することが可能である¹¹⁾。

$$\text{弾塑性要素 } K_1 \quad \tau_1 = 0.63 \gamma^{0.51} \quad (2)$$

$$\text{弾性要素 } K_2 \quad \tau_2 = 0.20 / (\gamma_{\max}^{0.65}) \gamma \quad (3)$$

$$\text{粘性要素 } C_1 \quad \tau_3 = 0.13 \nu^{0.5} \quad (4)$$

ここで、 γ ：せん断歪み

$\gamma_{\max}$ ：経験した最大せん断歪み

ν ：歪み速度 (1/sec.)

2.3 ダンパー置換モデル

Pushover 解析時に用いるダンパーの置換モデルは、ダンパーの減衰力 F_d と変位 δ_d の関係を包絡するスケルトンカーブで表し、トリリニアの弾塑性スプリングとして模擬化する。図6にスケルトンカーブを示す。スケルトンカーブを作成する際のダンパー減衰力 F_d と変位 δ_d は、(5)～(7)式のように求められる。

$$\delta_d = \gamma t_d \quad (5)$$

$$F_d = K_{eq} \delta_d \quad (6)$$

$$K_{eq} = G_{eq} A_s / t_d \quad (7)$$

ここで、 t_d ：粘弾性体の厚み (mm)

K_{eq} ：ダンパーの等価剛性 (kN/mm)

A_s ：ダンパーのせん断断面積 (mm²)

図7にトリリニアモデルを示す。トリリニアモデルを作成する際の初期剛性は、原点とスケルトンカーブ上の歪5%の点を結ぶ割線剛性とし、歪5%時点を第一折れ点とする。第三剛性は、層間変形角 $R = 1/100$ rad.の時点のスケルトンカーブ上の点を接線とする直線の勾配とする。第二剛性は、スケルトンカーブとトリリニアモデルで囲まれる範囲の面積 $area A$ と $area B$ が等しくなる勾配及び第二折れ点とする。

2.4 損失変位を考慮したダンパーモデル

図6に前節に示したダンパー置換モデル（弾塑性スプリングモデル）の上下階大梁への取り付け方法を示す。を用いて Pushover 解析を行い、建物の層間変形 δ に対する弾塑性スプリングの損失変位 δ_{loss} を(8)式のように算出する。

$$\delta_{loss} = \delta - \delta_{spr} \quad (8)$$

$$\delta_{spr} = \delta_{spr}' + (R_{yA} + R_{yB})h / 2 \quad (9)$$

ここで、 δ_{spr} ：弾塑性スプリングモデルの実効（せん断）変位 (mm)

δ_{spr}' ：弾塑性スプリングモデルの変位 (mm)

図8 スプリングの設置

図9 スプリング応力と損失変位

R_{yA}, R_{yB} ：節点 A,B の回転変位 (rad.)

h ：節点 A,B 間の高さ (mm)

弾塑性スプリングは2節点間（図8においては節点 A, B）に配置するため、(9)式に示すように節点 A, B の回転変位による並進変位を除くことで、曲げ変形の影響を除きせん断変形にのみ作用させることができる。

図9に弾塑性スプリングの応力 F_{spr} と損失変位 δ_{loss} の関係を示す。図中の点線は、層間変形角 $R=1/100$ の時の損失変位 δ_{loss} を示しており、この損失変位時における F_{spr} と原点を結んだ割線剛性を本簡易評価手法において損失変位に関する弾性バネ剛性 K_{loss} と定義した。

多質点系振動モデルに設置する損失変位を考慮したダンパーモデルは、2.2 節に示した当ダンパーの力学モデルである三要素モデルと弾性バネ剛性 K_{loss} を直列に接合して評価を行う。図10に損失変位を考慮したダンパーの力学モデルを示す。本モデルを建物の曲げせん断棒モデルの層間（上下層の質点間）に並列で接続することによって、ダンパーの効果を適切に表す簡易評価モデルができる。

図10 損失変位を考慮したダンパーモデル

3. 実建物モデルにおける簡易評価手法の検証

本章では、実建物を模擬した立体フレームモデルにおいて、非線形型粘弾性ダンパーを有する間柱型制振を架構内に配置して時刻歴応答解析を行う。この立体フレームモデルの解析結果を基準として、本報にて提案する簡易評価手法による多質点系モデルの解析結果との比較を行い、妥当性の検証を行う。本簡易評価手法では Pushover 解析を行う必要があるが、その際の外力分布は A_i 分布に基づく外力分布を用いた。なお、比較する項目は層間変形角および実効変形比とした。

3.1 解析モデル概要

検討用の解析モデルは、頂部高さ 36.92m、地上 10 階建ての鉄骨造純ラーメン構造とした。階高は 1 階が 4.0m、2～10 階の標準階は 3.5m とし、各階の平面形状は同一とした。図11に対象建物の略伏図、図12に代表架構（ダンパーを設置する X1, X4 通り）の軸組図、各部材断面を表1に示す。床構造は 1 階を除く全階において、デッキプレート捨て型枠による鉄筋コンクリートスラブとし、RF には 9,500N/m²（固定荷重:7,600、積載荷重:1900）、2～10F の一般階には 4,580N/m²（固定荷重 3,780、積載荷重:800）の床荷重を地震用荷重として見込んだ。

3.2 解析ケースの設定

本検討では、ダンパーの配置方法をパラメーターとして、以下の4ケースについて解析を行った。

Case0：ダンパーを設置していないモデル

Case1：各階のスパン中央にダンパーを連層配置したモデル

Case2：1～5 階のスパン中央にダンパーを連層配置したモデル

Case3：6～10 階のスパン中央にダンパーを連層配置したモデル

Case4：4～7 階のスパン中央にダンパーを連層配置したモデル

図 1 3 に、Case1～Case4 のダンパー配置図を示す。配置したダンパーの諸元、形状は 2 章に示すとおりである。解析上の条件として、温度 20℃にと仮定した。ダンパーの設置量は、いずれのモデルにおいても各階 2 基ずつを X1,X4 フレームに設置した。

3.3 立体フレームモデルのモデル化および解析方針

解析モデルは、剛床仮定に基づく立体フレームモデルとし、基礎は浮上り・圧壊共に生じないものと仮定した。地震動の入力は X 方向のみとし、各層の重心位置に水平 2 自由度、振れ 1 自由度とそれ

図 1 1 略伏図 図 1 2 軸組図 図 1 3 ダンパー配置図

表 1 部材形状

(a)柱

階	C1,C4	C2,C3
6～10	□-500×16	□-500×16
3～5	□-500×19	□-500×19
1～2	□-500×25	□-500×28

(b)梁

階	GX1,GX4	GX2,Gx3
RF	H-600×200×9×12	H-600×250×9×16
9～10	H-600×250×9×16	H-600×250×9×16
5～8	H-600×300×12×22	H-600×300×12×22
2～4	H-600×300×12×28	H-600×300×12×28

階	GY1	GY2	GY3
RF	H-600×200×9×12	H-600×200×9×19	H-600×200×9×16
9～10	H-600×200×9×12	H-600×200×9×22	H-600×200×9×19
5～8	H-600×250×9×19	H-600×200×9×22	H-600×250×12×19
2～4	H-600×250×12×22	H-600×250×12×22	H-600×250×12×22

図 1 4 速度応答スペクトル

図 1 5 エネルギースペクトル

に対応した質量を集約させた。建物の内部減衰は、瞬間剛性比例型の内部粘性減衰系とし、1 次固有振動に対して 2%の減衰定数を有するものとした。各部材のモデル化は間柱型制振のモデル化は、文献¹¹⁾に示す通りとした。

時刻歴応答解析は、Newmark β 法 ($\beta=0.25$)による直接積分法を用いて行った。解析プログラムは、「SNAP ver.7/構構造システム」を用い、解析演算刻みは 1/1500～1/3000 秒とした。入力地震動は、解放工学的基盤における極稀に発生する地震動レベルの告示波（継続時間：120sec.）とし、位相特性は乱数、1968 八戸 EW, 1995 JMA 神戸 NS を採用した。入力地震動の速度応答スペクトルを図 1 4、エネルギースペクトルを図 1 5 に示す。

3.4 解析結果

(1) 最大応答層間変形角 R

図 1 6 に、解析ケースごとの各階最大応答層間変形角 R を示す。ダンパーが設置されていない Case0 では、立体フレームモデルと多質点系モデルの最大層間変形角がほぼ同じとなることが確認された。これに対して、Case1 では、より高い精度で最大層間変形角が一致することが確認された。これは、ダンパーにより建物の変形が抑えられ、梁の塑性化が多質点系モデルの精度に及ぼす影響が小さくなったためであると思われる。Case2 および Case3, Case4 では、いずれもダンパーを設置した階の層間変形角は精度良く一致しているものの、ダンパー設置の有無が切り替わる境目で最大層間変形角の差が大きくなることが確認された。これは、ダンパー剛性が付与された階とダンパーを設置していない階の剛性の差が大きくなったことが要因である。多質点系モデルは、ダンパー剛性が付与されていない建物の復元力特性を用いており、ダンパーが周辺架構に与える影響を考慮できていないことが原因であると推察される。

(2) 実効変形比 $\alpha_e (= \delta_d / \delta)$

表 2 に、告示乱数位相を入力した時の各階の平均実効変形比および立体フレームモデルに対する多質点系モデルの実効変形比の割合を示す。

立体フレームモデルと多質点系モデルの実効変形比を比較すると、上層階は立体フレームモデルの方が大きく、低層階は多質点系モデルの方が大きい傾向が確認された。これは、ダンパーの損失変形を Pushover 解析により算出した時の外力分布と告示乱数位相を入力した場合の外力分布が異なることが原因と思われる。参考として、告示乱数位相の入力に対する立体フレームモデルの応答層せん断力分布を用いて作成した、修正多質点系モデルとの比較を表 2 Case1 の中で()付きで示すが、若干ながら精度の向上が認められる。立体フレームモデルと多質点系モデルの実効変形比は、最大で Case2 の 1 階において 25%の差が生じているが、ダンパー変形量では 1.5mm 程度であり、ダンパーのエネルギー吸収能力にとって僅かな差である。よって、本報の簡易評価手法において、実効変形比の精度は妥当であると判断する。これは、当該階の最大層間変形角の精度が高いことから確認できる。

4. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 非線形型粘弾性ダンパーを有する間柱型制振構造は、ダンパーの履歴特性をトリリニアの弾塑性スプリングモデルに模擬化す

ることによって、Pushover 解析にて層間変形に対するダンパーの損失変位を吟味することが可能である。

(2) ダンパーの損失変位を適切に考慮した多質点系モデルによる簡易評価手法は、立体フレームモデルの時刻歴応答解析結果と近い解析結果が得られた。これより、本簡易手法による評価は概ね妥当であると思われる。

本報では、最大応答層間変形角と実効変形比の比較によって簡易評価手法の精度を評価しているが、最大応答加速度についても同様の精度を確認している。また、今後の課題として、より多くの建物モデルを用いた検証を行い、本簡易手法の適用限界を見極める必要がある。

参考文献

1)倉本洋, 小平渉, 加藤清也, 松井智哉, 中村博志, 所健, 植松工, 笠井和彦, 和田章:粘弾性ダンパー付き間柱を設置した鉄骨フレームの動的挙動, 日本建築学会構造系論文集 第 606 号, pp. 97~104, 2006. 8

2)古谷慶, 添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一:履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価, 構造工学論文集 Vol. 58B, pp. 197~207, 2012. 3

3)佐藤弦太, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 渋谷政斗, 有間雄太, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太, 石井正人:周辺架構の剛性が間柱型ダンパーの制振効果に与える影響の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp. 759~760, 2015. 9

4)石井正人, 北村春幸, 和田章, 笠井和彦:粘弾性型制振部材付き架構のモデル化に関する検討, 日本建築学会構造系論文集 第 531 号, pp. 55~62, 2000. 5

5)多田有輝, 石井正人, 太田弘俊, 北村春幸:静的解析による実効変形比に着目した速度依存型制振部材付き架構のモデル化に関する研究(その 1)~(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp. 57~60, 2004. 8

6)石井正人, 太田弘俊, 北村春幸:多質点系簡易解析モデルに適用する非線形粘性ダンパーのモデル化手法(その 1)~(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp. 947~950, 2005. 9

7)石井正人, 笠井和彦:多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集 第 75 巻 第 647 号, pp. 103~112, 2010. 1

8)鈴木壮, 會田裕昌, 梁川幸盛, 宇佐美祐人, 木村まどか:間柱型制振構造物の多質点系振動モデル化に対する適用性の検討(その 1)~(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp. 685~688, 2014. 9

9)戸張涼太, 渡辺泰成, 松井征生, 佐藤利昭, 北村春幸, 佐藤大樹, 宮川和明, 植木卓也, 村上行夫:間柱型履歴ダンパーのモデル化の違いが建物応

答に与える影響(その 1)~(その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ, pp. 761~766, 2015. 9

10)鈴木公平, 高島英幸:非線形性を有する高減衰ゴムを用いた粘弾性ダンパーの減衰性能評価試験, 関東学院大学工学総合研究所報 第 43 号, pp. 11~21, 2015. 3

11)鈴木公平, 中尾貞治, 津之下睦, 高島英幸:非線形型粘弾性ダンパーを有する間柱型制振架構の減衰性能評価と動的挙動, 日本建築学会構造系論文集 第 83 巻 第 745 号, pp. 373~383, 2018. 3

表 2 実効変形比

階	Case1			Case2		
	立体	質点	質点/立体	立体	質点	質点/立体
10	0.167	0.125	74% (80%)	-	-	-
9	0.250	0.215	86% (90%)	-	-	-
8	0.336	0.309	92% (92%)	-	-	-
7	0.413	0.389	94% (94%)	-	-	-
6	0.476	0.457	96% (98%)	-	-	-
5	0.515	0.519	101% (102%)	0.629	0.599	95%
4	0.560	0.579	103% (105%)	0.558	0.588	105%
3	0.589	0.650	110% (110%)	0.597	0.657	110%
2	0.582	0.664	114% (116%)	0.586	0.680	116%
1	0.444	0.535	121% (119%)	0.444	0.556	125%

※ () 付きは, 告示乱数位相の層せん断力分布を外力分布とした時の値

階	Case3			Case4		
	立体	質点	質点/立体	立体	質点	質点/立体
10	0.177	0.112	63%	-	-	-
9	0.252	0.217	86%	-	-	-
8	0.339	0.324	96%	-	-	-
7	0.408	0.406	100%	0.510	0.459	90%
6	0.607	0.544	90%	0.476	0.472	99%
5	-	-	-	0.522	0.529	101%
4	-	-	-	0.674	0.662	98%
3	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-

図 16 最大層間変形角

図 1 6 最大層間変形角

[2018年6月5日原稿受理 2018年8月2日採用決定]