

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	十字モデルに基づく間柱型ダンパーの簡易性能評価
Title(English)	
著者(和文)	佐藤弦太, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太
Authors(English)	Toshiaki Sato, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA, Yuta WATANUKI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 481-484
Citation(English)	, , , pp. 481-484
発行日 / Pub. date	2016, 3

十字モデルに基づく間柱型ダンパーの簡易性能評価

構造—応用力学・構造解析—設計力学・理論

制振間柱 仮想仕事法

十字モデル 実効変形 静的解析

正会員 ○ 佐藤弦太^{*1} 正会員 佐藤利昭^{*1}
 正会員 佐藤大樹^{*2} 正会員 北村春幸^{*1}
 正会員 山口路夫^{*3} 正会員 脇田直弥^{*3}
 正会員 綿貫雄太^{*3}

1. はじめに

制振構造は、地震時における建物の損傷を制御するために中低層建物から超高層建物まで幅広く適用され、多様なダンパーが提案されている。ダンパーの制振効果には、周辺架構の特性をはじめ、制振部材の配置計画や投入量、入力地震動などが知られ、時刻歴応答解析を通してその性能評価を試みた研究も少なくない(例えば 1) 2)。制振ダンパーは、ブレース型や間柱型等があり、ブレース型の制振部材による層剛性の増加分は、容易に推定できる。一方、間柱型の制振部材による層剛性の増加分を推定することは難しい。

本研究は、間柱型鋼材ダンパー(以後、間柱型ダンパー)の構面内設置位置および周辺架構が、ダンパー設置による層剛性の増加およびダンパーの制振効果に与える影響を、簡易的に推定することを目的とする。本稿では、基本的な検討により検討式の妥当性を示すため、立体フレームモデルによる静的解析との比較により検討する。ダンパーの制振効果の評価は、静的な検討から算出できる層間変形に占める有効なダンパーの変形の割合である実効変形比³⁾を用いる。

検討式の算出には、和田らにより提案されている十字モデルによる仮想仕事法の式⁴⁾を参照する。

2. 十字モデル概要

文献 4)と同様に、反曲点は部材中央とする。間柱型ダンパー設置時には、隣接する柱とダンパー設置位置の中央に梁の反曲点があるものとする。十字モデルは、各部材の反曲点位置で部材を区切り作成する。図 1 に架構の十字モデルの概要を示す。以降、各外力、変形、および添え字を次のように定義する。

Q :せん断力 V :垂直方向の反力
 H :十字モデル高さ L :十字モデル幅
 h :柱の内法高さ l :梁の内法長さ
 D :パネルゾーンせい B :パネル幅
 E :ヤング係数 G :せん断弾性係数
 A :断面積 I :断面 2 次モーメント
 M :モーメント δ :水平変位
 t :部材厚さ τ :せん断応力度
 θ :回転角 k :剛性

<右下添え字>

 c :柱 G :梁 p :シャーパネル B :曲げ s :せん断 p_l :塑性化部 a_c :ダンパー取付部材

<左下添え字>

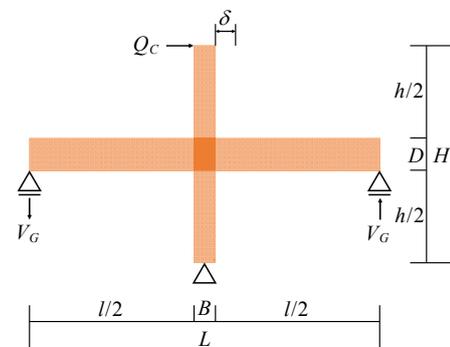
 d :ダンパー部の十字モデルまたは T 字モデル

図 1 十字モデル概要

3. 十字モデルに倣った間柱型ダンパー付与に伴う層剛性の増加分と実効変形比の算出

間柱型ダンパーとダンパー取付梁より、ダンパー部の十字モデルおよび T 字モデルを作成する。間柱型ダンパーが上下階で同位置の際には、十字モデルを用い、上下階で、異なる場合には、T 字モデルを用いる。両モデルでは、間柱型ダンパーからダンパー取付梁に伝達する応力が異なるため、一部の算出式を区別して扱う。ダンパーの塑性化部は、せん断バネとする。梁の部材長さの和 d_l は、式 (1) のように定義し、塑性化部上下のダンパー取付部材の部材長さの和 d_h は、式 (2) のように表す。

$$d_l = d_l L - d_c B \quad (1)$$

$$d_h = h - H_{p_l} \quad (2)$$

ここで、 $d_c B$:ダンパー取付部材のせい、 H_{p_l} :塑性化部の高さである。なお、本稿において、間柱型ダンパーの付与により、隣接する架構の十字モデルの梁の部材長さが短くなったことによる剛性の増加は、簡易化のため考慮しない。

3.1 間柱型ダンパー付与に伴う層剛性の増加分

図 2 にスパン中央に間柱型ダンパーを連層配置する場合のイメージを示し、図 4 に千鳥配置で間柱型ダンパーを設置する場合のイメージを示す。図 3, 5 にそれぞれのダンパー部の十字モデルおよび T 字モデル概要を示す。以降では、ダンパー部の両モデルの水平剛性の算出過程を示す。

梁両端の反力 ${}_dV_G$ は、式 (3) のように表せる。

$${}_dV_G = \frac{H}{X_d L} {}_dQ_{Pl} \quad (\text{十字} : X=1, \text{T 字} : X=2) \quad (3)$$

各部材の変形を以下に示す。

- ・ダンパー取付部材の曲げ変形による ${}_d\delta : {}_d\delta_{dCB}$

$$\begin{aligned} {}_d\delta_{dCB} &= 2 \int_0^{0.5_d h} \frac{\overline{MM}}{E_{dC} I_{dC}} dx \\ &= 2 \int_0^{0.5_d h} \frac{{}_dQ_{Pl}}{E_{dC} I_{dC}} \left(x + \frac{H_{Pl}}{2} \right) dx \\ &= \frac{{}_d h}{{}_{12} E_{dC} I_{dC}} \left\{ ({}_d h + H_{Pl})^2 + H_{Pl} ({}_d h + 2H_{Pl}) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

- ・ダンパー取付部材のせん断変形による ${}_d\delta : {}_d\delta_{dCS}$

$$\begin{aligned} {}_d\delta_{dCS} &= 2 \int_0^{0.5_d h} \frac{\overline{QQ}}{G_{dC} A_{dC}} dx = 2 \int_0^{0.5_d h} \frac{{}_dQ_{Pl}}{G_{dC} A_{dC}} dx \\ &= \frac{{}_dQ_{Pl} {}_d h}{G_{dC} A_{dC}} \end{aligned} \quad (5)$$

- ・梁の曲げ変形による ${}_d\delta : {}_d\delta_{dGB}$

$$\begin{aligned} {}_d\delta_{dGB} &= 2X \int_0^{0.5_d l} \frac{\overline{MM}}{E_G I_G} dx \\ &= 2X \int_0^{0.5_d l} \frac{{}_dQ_{Pl}}{E_G I_G} \left(\frac{H}{X_d L} \right)^2 x^2 dx \\ &= \frac{{}_dQ_{Pl} H^2 {}_d l^3}{12 X E_G I_G {}_d L^2} \end{aligned} \quad (6)$$

(十字 : $X=1$, T 字 : $X=2$)

- ・梁のせん断変形による ${}_d\delta : {}_d\delta_{dGS}$

$$\begin{aligned} {}_d\delta_{dGS} &= 2X \int_0^{0.5_d l} \frac{\overline{QQ}}{G_G A_G} dx \\ &= 2X \int_0^{0.5_d l} \frac{{}_dQ_{Pl}}{G_G A_G} \left(\frac{H}{{}_d L} \right)^2 dx \\ &= \frac{{}_dQ_{Pl} H^2 {}_d l}{X G_G A_G {}_d L^2} \end{aligned} \quad (7)$$

(十字 : $X=1$, T 字 : $X=2$)

- ・シャープパネルのせん断変形による ${}_d\delta : {}_d\delta_{dPS}$

柱の曲げモーメントをフランジに集中する偶力と考へ、そこから梁のせん断力を減じ、シャープパネルに働くせん断力 ${}_dQ_P$ が式 (8) で求められる。

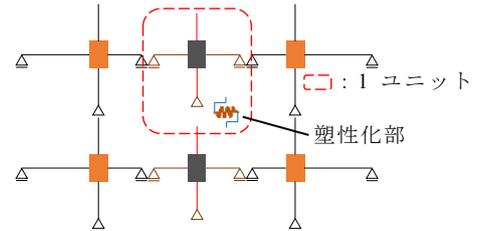


図 2 上下層の同位置に間柱型ダンパー付与する場合のイメージ (スパン中央配置)

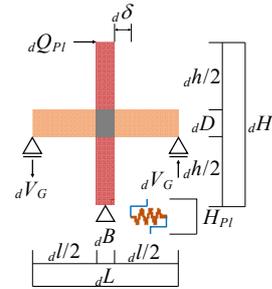


図 3 ダンパー部の十字モデル概要 (スパン中央配置の 1 ユニット)

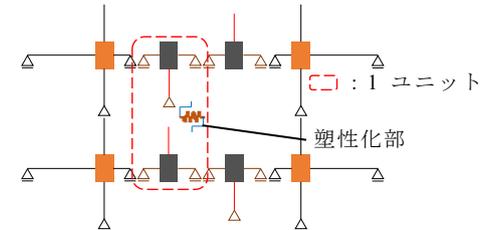


図 4 上下層の同位置に間柱型ダンパー付与しない場合のイメージ (千鳥配置)

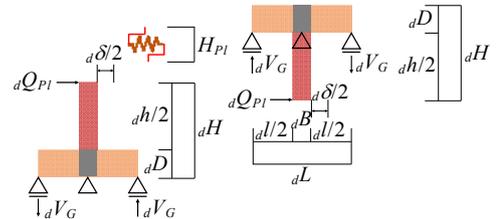


図 5 ダンパー部の T 字モデル概要 (千鳥配置の 1 ユニット)

$$\begin{aligned} {}_dQ_P &= X_1 \frac{{}_dQ_{Pl} h/2}{{}_d B} - Q_G = \frac{{}_dQ_{Pl} h}{X_{2d} B} - \frac{H}{X_{2d} L} {}_dQ_{Pl} \\ &= \frac{{}_d l h - {}_d B {}_d D}{X_{2d} B ({}_d B + {}_d l)} {}_dQ_{Pl} \end{aligned} \quad (8)$$

(十字 : $X_1=2$, $X_2=1$, T 字 : $X_1=1$, $X_2=2$)

${}_dQ_P$ をシャープパネルの断面積 ${}_d D \times {}_d t_P$ で除し、シャープパネルのせん断応力度 τ_S は、式 (9) で求められる。

$$\tau_S = {}_dQ_P / ({}_d D {}_d t_P) \quad (9)$$

幾何学的な条件より、ダンパー取付部材の回転角 θ_{dC} 、梁の回転角 θ_G は、式 (10) の関係にあり、 ${}_d\delta_{dPS}$ は、式 (11) で表せる。

$${}_d B \theta_{dC} = {}_d l \theta_G \quad (10)$$

$${}_d \delta_{PS} = h \theta_{dC} - X {}_d D \theta_G \quad (\text{十字} : X=1, \text{T字} : X=2) \quad (11)$$

θ_{dC} , θ_G の和を γ_S とし, 式 (12) に示す。式 (10)~(12) より, 式 (13) が得られる。

$$\gamma_S = \theta_{dC} + \theta_G \quad (12)$$

$${}_d \delta_{PS} = \frac{{}_d l h - X {}_d B {}_d D}{X {}_d B + {}_d l} \gamma_S \quad (\text{十字} : X=1, \text{T字} : X=2) \quad (13)$$

ここで, γ_S と τ_S は, 式 (14) の関係にあるため, ${}_d \delta_{PS}$ は, 式 (15) のように表せる。

$$\gamma_S = \tau_S / G_S \quad (14)$$

$$\begin{aligned} {}_d \delta_{PS} &= \frac{{}_d l h - X {}_d B {}_d D}{{}_d B + {}_d l} \frac{{}_d Q_P}{G_S {}_d D t_S} \\ &= \frac{({}_d l h - X {}_d B {}_d D)({}_d l h - {}_d B {}_d D)}{X({}_d B + {}_d l)^2} \frac{{}_d Q_{Pl}}{G_S {}_d B {}_d D t_S} \end{aligned} \quad (15)$$

(十字 : $X=1$, T字 : $X=2$)

・塑性化部のせん断変形による ${}_d \delta : {}_d \delta_{Pl}$

$${}_d \delta_{Pl} = {}_d Q_{Pl} / k_{Pl} \quad (16)$$

以上より, 十字モデルおよび T 字モデルの水平変位 ${}_d \delta$ は, 式 (17) で求める。

$${}_d \delta = {}_d \delta_{dCB} + {}_d \delta_{dCS} + {}_d \delta_{dGB} + {}_d \delta_{dGS} + {}_d \delta_{PS} + {}_d \delta_{Pl} \quad (17)$$

間柱型ダンパーを設置することによる層剛性の増加分 ΔK_D を式 (18) に示す。

$$\Delta K_D = {}_d Q_{Pl} / {}_d \delta \quad (18)$$

3.3 実効変形比の算出

ダンパー設置位置における上下端の節点の変位差 ${}_d \delta$ を層間変形 δ とすると十字モデルおよび T 字モデルによる実効変形比 ${}_c \alpha_e$ は式 (19) で表せる。

$${}_c \alpha_e = {}_d \delta_{Pl} / \delta \quad (19)$$

4. 静的解析による検証

本章では, ダンパー部の十字モデルにより算出した付加層剛性および実効変形比の式の妥当性を確認する。立体フレームモデルにおける静的解析による結果と比較することで検証する。静的解析に用いる外力は, Ai 分布に基づくものとする。

4.1 検討対象建物概要

本報では, 地上 5 階, 建物高さ $4.5 + 4.2 \times 4 = 21.3$ m, 長辺 (X) 方向 $6.4 \times 8 + 7.2 \times 2 = 65.6$ m, 短辺 (Y) 方向 $11.75 \times 2 + 7.2 = 30.7$ m の鋼構造建物⁵⁾ を検討の対象

とする。図 6, 7 に, 基準階伏図とダンパー設置構面の軸組図を示す。基準とする柱梁の部材断面を表 1 に示す。検討方向は X 方向で, 主架構のみの 1 次固有周期 $fT_1 = 1.23$ s である。主架構は弾性で, 各階に剛床を仮定する。

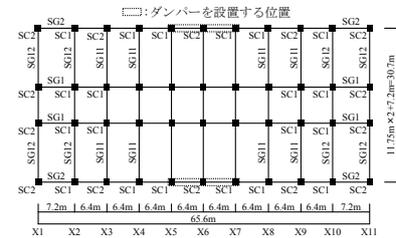


図 6 基準階伏図

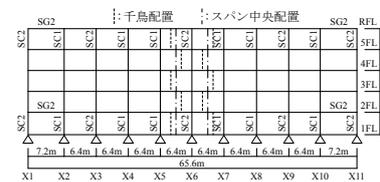


図 7 Y1, Y4 通り軸組図

表 1 梁の部材断面

符号	階	部材断面
SG1	2~R	H-600×250×12×22
SG2	2~R	H-600×200×11×17
SG11	2~R	H-800×300×13×26
SG12	2~R	H-800×300×16×28
種類		SN490B

表 2 柱の部材断面

符号	階	部材断面
	5	□-450×450×16
SC1	3~4	□-450×450×19
	1~2	□-450×450×22
SC2	4~5	□-450×450×16
	1~3	□-450×450×19
種類		BCR295

4.2 間柱型ダンパー概要

間柱型ダンパーは, 図 7 に示すように, Y1, Y4 通りの X5~X7 通りに 2 基ずつ配置する。せん断パネルには LY225 材を用い, 復元力特性は完全弾塑性型とする。第 1 層のダンパーの降伏せん断力 ${}_d Q_{y1}$ は,

$${}_d Q_{y1} = {}_d \alpha_{y1} \cdot W \quad (30)$$

により算出する。ここに, ${}_d \alpha_{y1}$: 第 1 層のダンパーの降伏せん断力係数, W : 建物の総重量である。以降, ${}_s \alpha_{y1}$ をダンパー量と呼び, ${}_d \alpha_{y1} = 0.01, 0.03, 0.07$ を対象に検討を行う。ダンパーの降伏せん断変位は 1.02 mm と

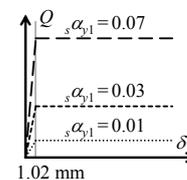


図 8 せん断パネルの復元力特性

表 3 せん断パネルの初期剛性および取付部材断面

${}_s \alpha_{y1}$	初期剛性 [kN/mm]	取付部材
0.01	180.5	H-600×200×9×12
0.03	541.5	H-600×250×12×28
0.07	1263.5	H-750×350×16×32

した。図 8 に各ダンパー量におけるせん断パネルの復元力特性を, 表 3 に初期剛性およびダンパー取付部材の断面を示す。ダンパー取付部材は, せん断パネル降伏時に降伏しない断面とする。

4.3 検討結果

以降の検討結果は, 中間層である第 3 層の値とする。一例として, 図 9 に ${}_s \alpha_{y1} = 0.03$ において, ダンパー取付部材の断面 2 次モーメント I_{ac} を β 倍させた

際のダンパー部の十字モデルおよびT字モデルによる各変形の割合を示す。静的解析による検討は、図 9 より十字モデルにおいて割合の大きい $a\delta_{dCB}$, $a\delta_{dGB}$ に着目し、 I_{dC} , I_G をパラメータとする。

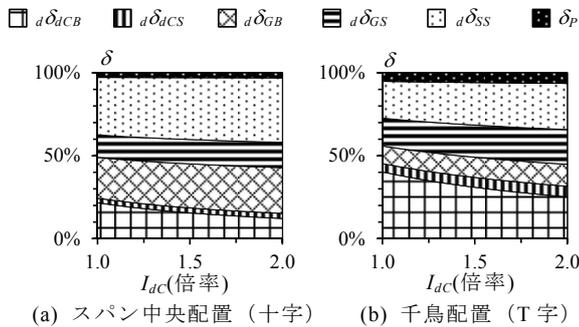


図 9 ダンパー取付部材の断面 2 次モーメントとダンパー部の十字モデルおよび T 字モデルの水平変形成分の関係

図 10(a)は I_{dC} のみを 1.0 ~ 2.0 倍に変化させた場合の実効変形比 $e\alpha_e$ (式(19)) の変化を、図 10(b)は I_G のみを 1.0 ~ 2.0 倍に変化させた場合の結果を示している。なお、図中には本手法の精度検証のため静的解析による実効変形比 α_e を併記している。図 10(a), (b)より、本手法は静的解析と概ね同様の値を示すことが確認できる。若干精度の劣る部分は、本手法で仮定した反曲点位置と静的解析の反曲点位置に差が生じること、ダンパーの負担せん断力増加に伴い、全体曲げを大きくすることが影響していると考えられる。

図 11(a)は I_{dC} のみを 1.0 ~ 2.0 倍に変化させた場合の層剛性の増加分 ΔK_D (式(18)) の変化を、図 11(b)は I_G のみを 1.0 ~ 2.0 倍に変化させた場合の結果を示している。なお、図中には本手法の精度検証のため静的解析による層剛性の増加分を併記している。図 10(a), (b)より、 ΔK_D に関しても $e\alpha_e$ と同様に、静的解析と概ね同様の値を示すことが確認できる。これに関しても、 $e\alpha_e$ と同様の理由と考えられる。

検討結果から、提案した手法により、図 9 に示すような検討を行い、ダンパー周辺部材の断面検討を行うことのできる可能性を示した。

5. まとめ

中低層建物に間柱型せん断パネルダンパーを設置する際の実効変形比および剛性増加を簡易的に推定する方法を提案し、立体フレームモデルの静的解析により、その妥当性を検証した。

- (1) ダンパー部の十字モデルにより算出した実効変形比および剛性増加と立体モデルの静的解析結果が同様の傾向を示すことを確認した。
- (2) 提案式により、簡易的にダンパー周辺部材の断面検討を行うことのできる可能性を示した。

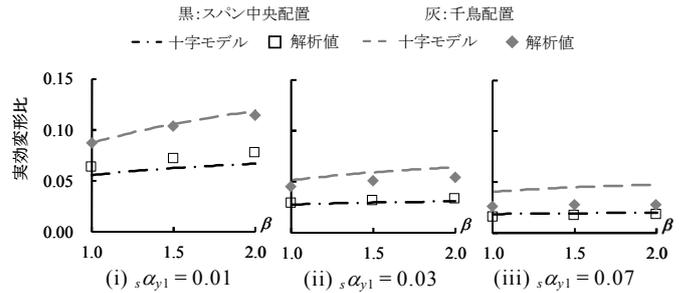


図 10(a) I_{dC} と実効変形比の関係

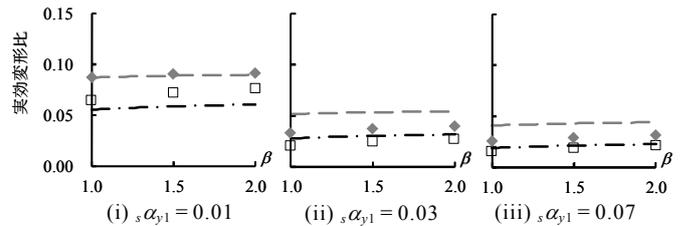


図 10(b) I_G と実効変形比の関係

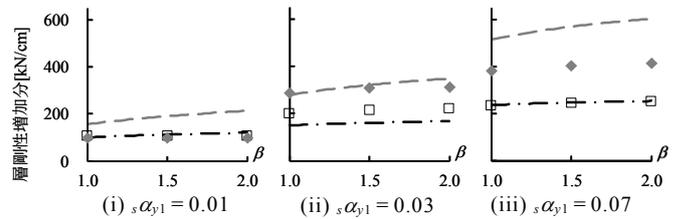


図 11(a) I_{dC} と層剛性増加分の関係

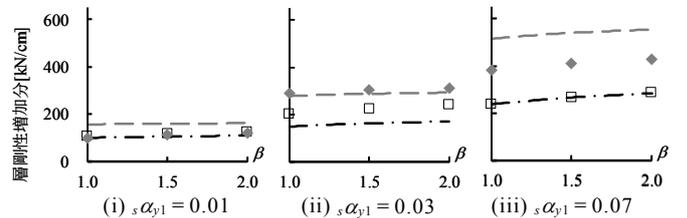


図 11(b) I_G と層剛性増加分の関係

謝辞

本稿は、新日鉄住金エンジニアリング株式会社、東京理科大学北村研究室、東京工業大学佐藤研究室によるエネルギー法研究会の成果の一部を用いたものです。また、株式会社日建設計の石井正人氏、吉江慶祐氏には多くのご指導・ご助力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石田琢志, 佐藤大樹, 北村春幸, 佐々木和彦, 宮崎充, 吉江慶祐, 石井正人, 藤田隆史: 履歴型・粘性型ダンパーをハイブリッドに配置した 10 層フレームの振動台実験, 構造工学論文集, Vol.55B, 2009.3
- 2) 戸張涼太, 佐藤大樹, 古谷慶, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 骨組特性値を用いた履歴型ダンパーを有する建物の制振性能評価, 構造工学論文集, Vol.59B, 2013.3
- 3) 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
- 4) 堀井昌博, 和田章: 構造設計のためのメモランダム・7-ラーメンの変形と部材のプロポーシオン, 建築技術, No.349, 155-164, 1980.9
- 5) 松澤祐介, 佐藤大樹, 栗林晃司, 北村春幸, 山小路夫, 西本晃治: 履歴型ダンパー配置が中低層鋼構造建物の地震応答性状に与える影響, 構造工学論文集, Vol.58B, 2012.3

- *1 東京理科大学
- *2 東京工業大学
- *3 新日鉄住金エンジニアリング株式会社