

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	変形増幅機構を有する制振フレーム試験体のモデル化
Title(English)	
著者(和文)	小川晋平, 松田頼征, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐
Authors(English)	Yoriyuki MATSUDA, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Masato Ishii, Keisuke Yoshie
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 313-316
Citation(English)	, , , pp. 313-316
発行日 / Pub. date	2018, 3

変形増幅機構を有する制振フレーム試験体のモデル化

構造—振動

正会員○小川晋平\*1 同 松田頼征\*1 同 佐藤大樹\*2  
同 北村春幸\*1 同 石井正人\*3 同 吉江慶祐\*3

制振構造 実効変形 粘性制振壁  
動的加振試験 変形増幅機構

1. はじめに

間柱型の制振装置は、それが取り付く梁の曲げ変形により機能が損なわれる<sup>1)</sup>。著者らは、この問題について、粘性制振壁を対象に梁の中間にピン接合を設けた架構（以下、変形増幅機構と呼ぶ）を考案し、その有用性を調べてきた<sup>2)</sup>。変形増幅機構は図1に示すように、ピン間の梁を幾何学的に回転させることで、ダンパーに生じる変形（以下、実効変形と呼ぶ）を増幅するものである。既報<sup>2)</sup>では、変形増幅機構を有する制振構造システムの動的加振試験によって実効変形の増大を確認した。動的加振試験ではダンパーを中央に設置した中央フレームと左寄せに設置した左寄せフレームの2種類を実施した。図2にダンパーを設置した試験状況を示す。試験結果より、左寄せフレームの方が僅かではあるが、実効変形比の低下が見られた<sup>2)</sup>。左寄せフレームの実効変形比が低下する要因として、左右の跳ね出し梁の変形が考えられる。本報の目的は、解析的に部材変形が実効変形比の低下に及ぼす影響を分析するためのモデルを作成することである。尚モデル化については、フレームは線材モデルとし、ダンパーは正弦波を対象としていることから、kelvin 体モデルとする。

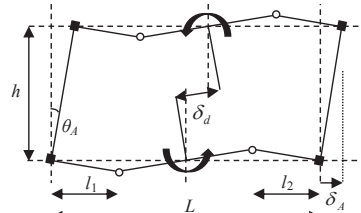


図1 変形増幅機構概要

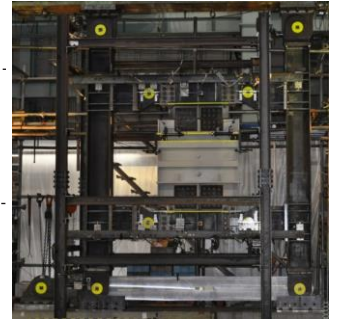


図2 フレームの試験状況

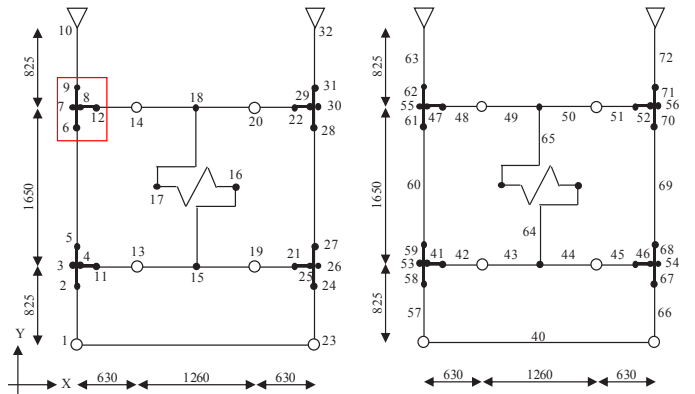


図3 接点番号を示すモデル図 図4 要素番号を示すモデル図

2. 試験フレーム及び粘性制振壁のモデル化

2.1 試験フレームのモデル化

図3に接点番号を示すモデル図を示す。図3のピン支持である節点10, 32のX方向とY方向並進を拘束している。

図4に要素番号を示すモデル図を示す。図4には40~72の要素番号を与えた。40~52は梁要素, 53~56は回転バネ要素), 57~72は柱要素とした。粘性制振壁は接点番号16-17間に設置する。

表1に要素表を示す。図5にパネルゾーンの詳細図を示す。図5で示す接点番号7番と8番は同一座標上にあるものとする。7-8間には回転バネ要素が設定されている。接点番号7-8は回転変位を共有するように回転バネを設定してモデル化を行った。パネルゾーンの変形を忠実に再現するために、図5で柱梁交点の接点番号7と梁端の接点番号12の回転変位を共有させた。同様に図5で柱梁交点の接点番号8と柱端の接点番号6, 9の回転変位も共有させる。各パネルゾーンでも同様の処理を行った。回転バネの剛性 $pK$ は下式を用いて算出する。

$$pK = G \cdot pV \quad (1) \quad pV = d_c \cdot d_b \cdot t_p \quad (2)$$

ここで、 $G$ はせん断弾性係数、 $d_c$ は柱フランジの板厚中心間距離、 $d_b$ は梁フランジの板厚中心間距離、 $t_p$ はH形断面のウェブ板厚である。

図6にはパネルゾーン変形図を示す。図6の様に接点8は

表1 要素表

No	部材名	種類	i端	j端	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
40	ビーム	剛域	ピン	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
41	左下パネルゾーン	剛域	剛	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
42	左下跳出し梁	梁	剛	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
43	左下中央梁	梁	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
44	右下中央梁	梁	剛	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
45	右下跳出し梁	梁	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
46	右下パネルゾーン	剛域	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
47	左上パネルゾーン	剛域	剛	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
48	左上跳出し梁	梁	剛	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
49	左上中央梁	梁	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
50	右上中央梁	梁	剛	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
51	右上跳出し梁	梁	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
52	右上パネルゾーン	剛域	ピン	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
53	左下パネルゾーン	回転バネ	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
54	右下パネルゾーン	回転バネ	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛
55	左上パネルゾーン	回転バネ	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛	剛

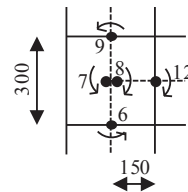


図5 パネルゾーン詳細図

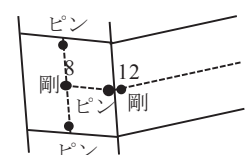


図6 パネルゾーン変形図

剛としたが、接点12ではパネルゾーン側をピン、梁側を剛とすることで、パネルゾーンの変形に梁が追従することなく梁のせん断変形を考慮出来るようになっている。

表 2 には使用する部材の部材表を示す。図 4 のパネルゾーンを構成する要素 (41, 58, 59etc) は剛体とした。パネルゾーンを構成する要素は断面積 A, 断面 2 次モーメント I は十分に大きな値を設定した。また, 図 4 のダンパー取り付け部である要素 (64, 65) も剛体と設定した。

表 2 部材表

部材	A(mm <sup>2</sup> )	I(mm <sup>4</sup> )	E(kN/mm <sup>2</sup> )	L(mm)	該当要素番号
跳ね出し梁	11230	202560000	205	480	42, 45, 48, 51
中央梁	11850	202000000	205	675	43, 44, 49, 50
柱	11850	202000000	205	675	57, 63, 66, 72
				1350	60, 69
剛体	∞	∞	205	150	41, 46, 47, 52, 58, 59
				825	61, 62, 67, 68, 70, 71
					64, 65

## 2.2 粘性制振壁のモデル化

本節では前節図 3 の接点番号 16-17 間に設置する粘性制振壁のモデル化について述べる。制振壁のモデル化にあたっては, ダンパーを設置したフレーム加振試験の結果を基に解析パラメータを設定する。試験は正弦波加振試験として, 層間変形  $\delta_d$  の最大振幅に関して 3.3, 8.3, 11, 16.5, 23.6 mm の 5 通り, 振動数に関して 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 Hz の 4 通りを用いて, 4 サイクルずつの加振を行った。図 7 に中央フレームのダンパー設置加振試験の履歴ループを示す。図 7 にはダンパー剛性  $K_d$  を加えて示す。図 7 に示すダンパー剛性  $K_d$  は, ダ

ンパーの実効変形  $\delta_d$  - ダンパー粘性抵抗力  $F_d$  の傾きを示し, 式(3)の最小 2 乗法によって次式で算出できる。

$$K_d = \frac{n \sum \delta_d^{(i)} \cdot F_d^{(i)} - \sum \delta_d^{(i)} \sum F_d^{(i)}}{n \sum (\delta_d^{(i)})^2 - (\sum \delta_d^{(i)})^2} \quad (3)$$

ここで,  $i$  はステップ数,  $n$  は総数とする。

図 8 に図 7 から求めたダンパー剛性  $K_d$  の速度領域関係を示す。ここで, ダンパー最大速度を  $V_{dmax}$  とする。図 8 よりダンパー速度によるダンパー剛性  $K_d$  は, 振動数ごとに  $x$  軸及び  $y$  軸を漸近線に取るような形で, 曲線上にプロットされる。それぞれの振動数条件において累乗近似で数式化を行い, その結果で図 8 に併せて示す。図 8 より振動数・振幅によって  $K_d$  が変化する複雑な特性を持っていることが分かる。本報では特定の振動数及び振幅を対象とした正弦波加振試験に着目して, Kelvin 体にてモデル化を行う。図 9 のように非線形粘性要素と弾性要素を並列に繋ぐ Kelvin 体モデルでダンパーを表す。ここで,  $C_d$  は内部粘性,  $K_d$  はダンパー剛性,  $\delta_d$  はダンパー全体の変形とする。Kelvin 体モデルにおけるダンパー力  $F_d$  は式 (4) により示される。

$$F_d = F_C + F_K = C_d |V_d|^n \cdot \text{sgn}(V_d) + K_d \cdot \delta_d \quad (4)$$

ここで,  $F_C$  は図 9 のダッシュポットに働く力,  $F_K$  は図 9 のばねに働く力,  $V_d$  をダンパー速度とする。

次に, ダンパーのモデル化に必要なパラメータ設定につい

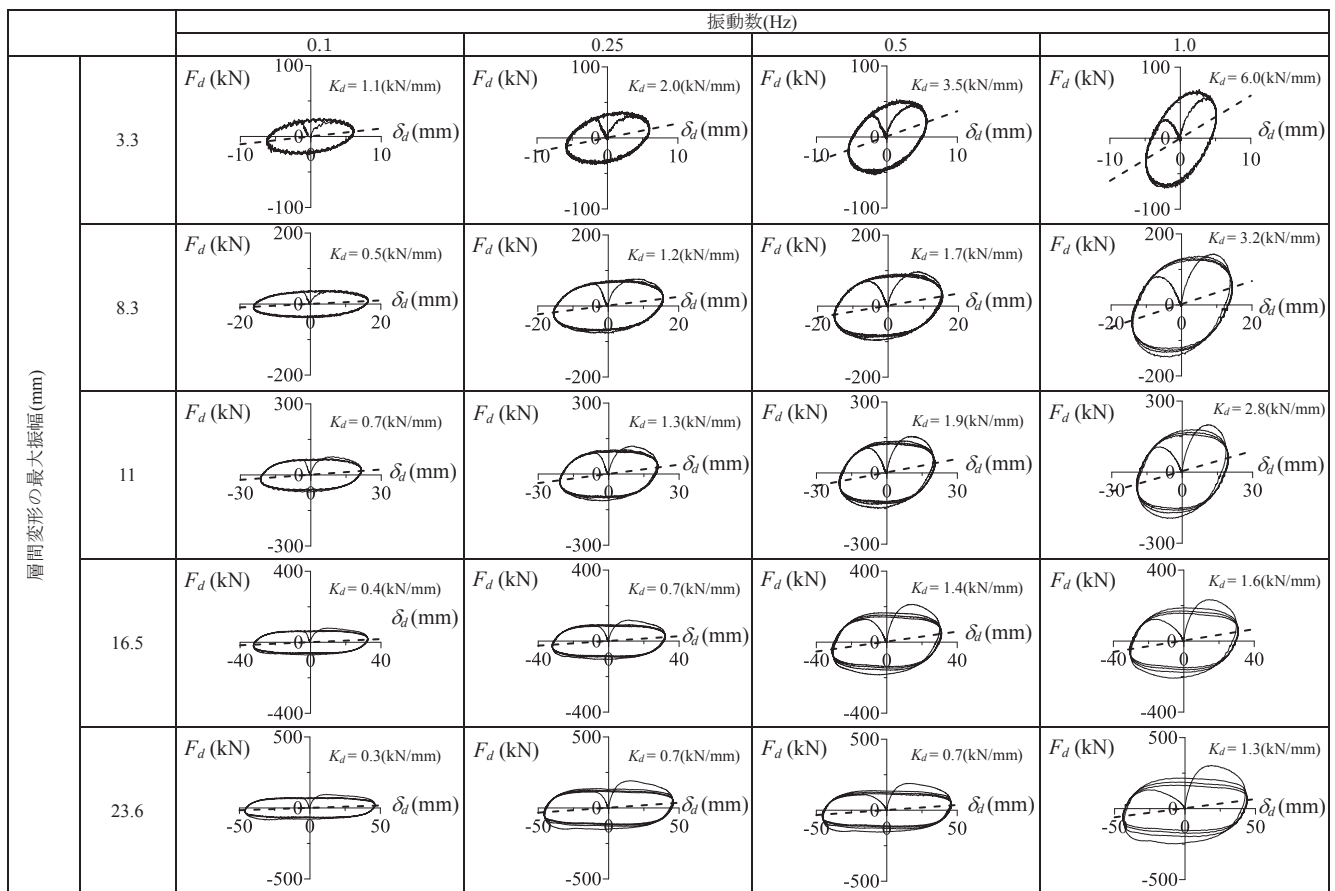


図 7 中央フレームにおける  $F_d$  と  $\delta_d$  の関係

て述べる。ダンパー剛性  $K_d$  は図 8 より求めた累乗近似式を用いて算出を行った。表 3 に解析で使用するダンパー剛性  $K_d$  をまとめて示す。その他のパラメータ ( $\alpha, C_d$ ) についてはダンパーを設置したフレーム加振試験の結果より同定を行った。ステップ  $i$  , 時刻  $t_i$  の計測値  $\delta_{d,i}$  を用い、計測値  $F_{d,i}$  とモデル式 (6) から得る  $F_d(t_i, \alpha, C_d, K_d)$  の差の 2 乗和、

$$R = \sum_{i=1}^N (F_{d,i} - F_d(t_i, \alpha, C_d, K_d))^2 \quad (5)$$

が最小化するように、モデルのパラメータ  $\alpha, C_d$  値を様々に仮定しながら同定する非線形最小 2 乗法を用いる。ここで、 $N$  は実験載荷ステップの総数である。ここに、 $N$  は実験載荷ステップの総数である。ステップの範囲を設定するにあたって、粘性体の温度上昇の影響がもっとも少ないと考えられる 1/2 サイクルから 3/2 サイクルの正弦波を範囲として設定した。

図 10 に式 (5) による同定結果を示す。図 11 に中央フレーム加振試験における試験時の温度を示す。図 12 にモデル化を行うダッシュの粘性抵抗力について示す。粘性制震壁の粘性係数  $C_d$  には、下式を採用する<sup>4)</sup>。

$$C_{d1} = 41.2e^{-0.043t} (S/d) \quad (\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}) \quad (0 \leq V_d/d < 1) \quad (6a)$$

$$C_{d2} = 41.2e^{-0.043t} (S/d^{0.59}) \quad (\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}) \quad (1 \leq V_d/d < 10) \quad (6b)$$

$$C_{d3} = 63.7e^{-0.043t} (S/d^{0.4}) \quad (\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}) \quad (10 \leq V_d/d) \quad (6c)$$

上式で、 $t$ : 温度、 $d$ : 粘性制震壁のせん断隙間、 $S$ : せん断面積である。本検討では  $t=20^\circ\text{C}$ 、 $d=0.004\text{ m}$  とする。

図 13 に同定結果よりダッシュポットの粘性抵抗力  $F_c$  を算出し、図 12 の式 (6) より求めた粘性抵抗力と比較を示す。図 13 には図 11 の最低温度 ( $15^\circ\text{C}$ )、最高温度 ( $23^\circ\text{C}$ ) を式 (6) に代入した粘性抵抗力と実験結果の関係を示す。図 13 より概ね最低温度と最高温度の線の上に実験結果が収束していることから、ダンパーで設定したパラメータの妥当性を確認できた。

図 14 では図 11 (a) ~ (b) で求めたパラメータよりダンパーモデルを作成し、フレームモデルに組み込み解析を行う。ダンパー設置中央フレーム加振試験との荷重変形関係を比較する。図 14 より試験結果と解析による履歴ループは概ね一致する。解析によるエネルギー吸収量  $E_d'$  と実験によるエネルギー吸収量  $E_d$  を比較するために、図 15 に  $E_d'/E_d$  を示す。図 15 ではすべてのパラメータにおいて  $E_d'/E_d$  の値が概ね 1 に集まっていることが確認できる。

同様に解析による最大ダンパー力  $F_d'$  と実験によるエネルギー吸収量  $F_d$  を比較するために、図 16 に  $F_d'/F_d$  を示す。図 16 でもすべてのパラメータにおいて  $F_d'/F_d$  の値が概ね 1 に集まっていることが確認できる。

### 3. 解析結果と実験結果の実効変形比による比較

本章では作成したモデルの妥当性を確認するために実験による実効変形比と解析結果の実効変形比を比較する。解析モデルは 2 章で示した中央フレームの解析モデルに加えて、ダ

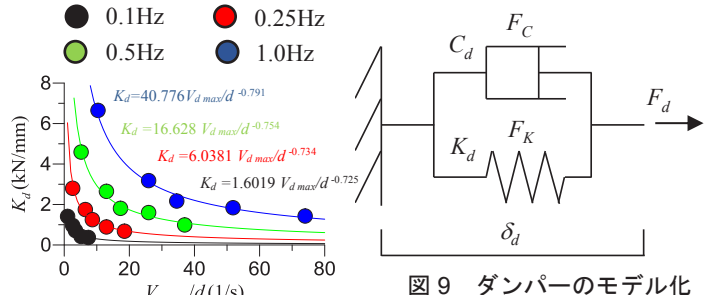


図 8  $K_d$  の速度領域関係

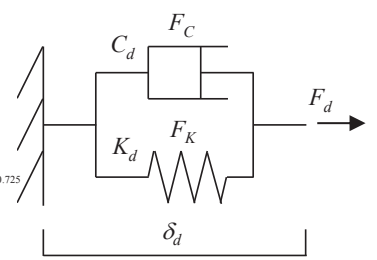
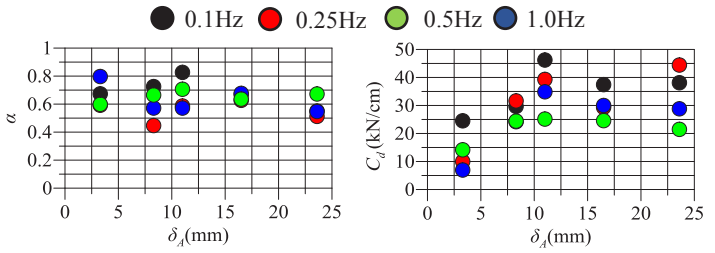


図 9 ダンパーのモデル化



(a)  $\alpha$  の同定結果 (b)  $C_d$  の同定結果

図 10 全パラメータの同定結果

表 3 ダンパー剛性  $K_d$  (解析で使用する値)

$K_d$ (kN/cm)	振動数			
	0.1	0.25	0.5	1.0
3.3	11.1	20.3	35.4	60.0
8.3	5.0	12.3	16.9	32.5
11	7.3	13.0	18.9	28.4
16.5	4.3	6.7	14.0	16.0
23.6	3.4	7.0	7.1	12.8

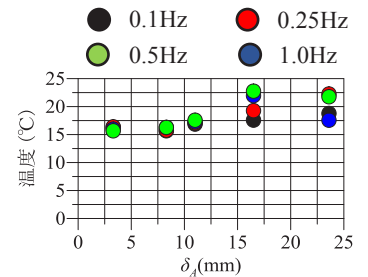


図 11 中央フレーム試験温度

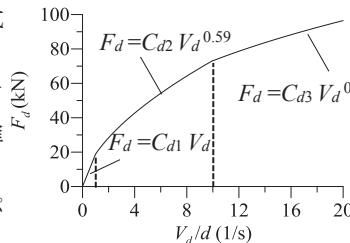


図 12 ダッシュポットの粘性

抵抗力 ( $20^\circ\text{C}$ )

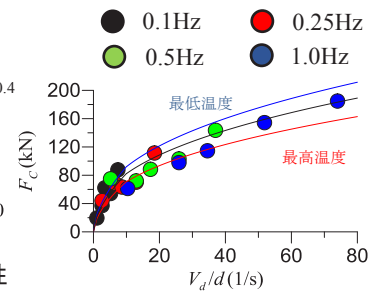


図 13 温度による粘性抵抗力比較

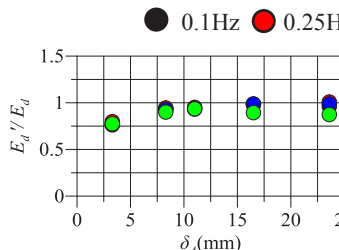


図 15  $E_d'/E_d$

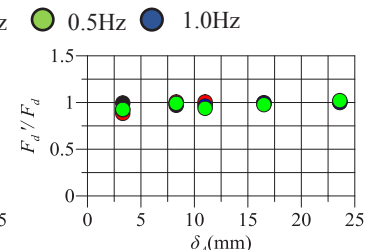


図 16  $F_d'/F_d$

ンパーを左寄せに設置した左寄せフレームのモデルを同様に作成した。既報<sup>3)~5)</sup>にて左寄せフレームの方が実効変形比の低下が最も見られた 1.0Hz の加振条件の下、実験結果と解析結果の比較を図 17 に示す。図 17 より解析モデルでも左寄せ

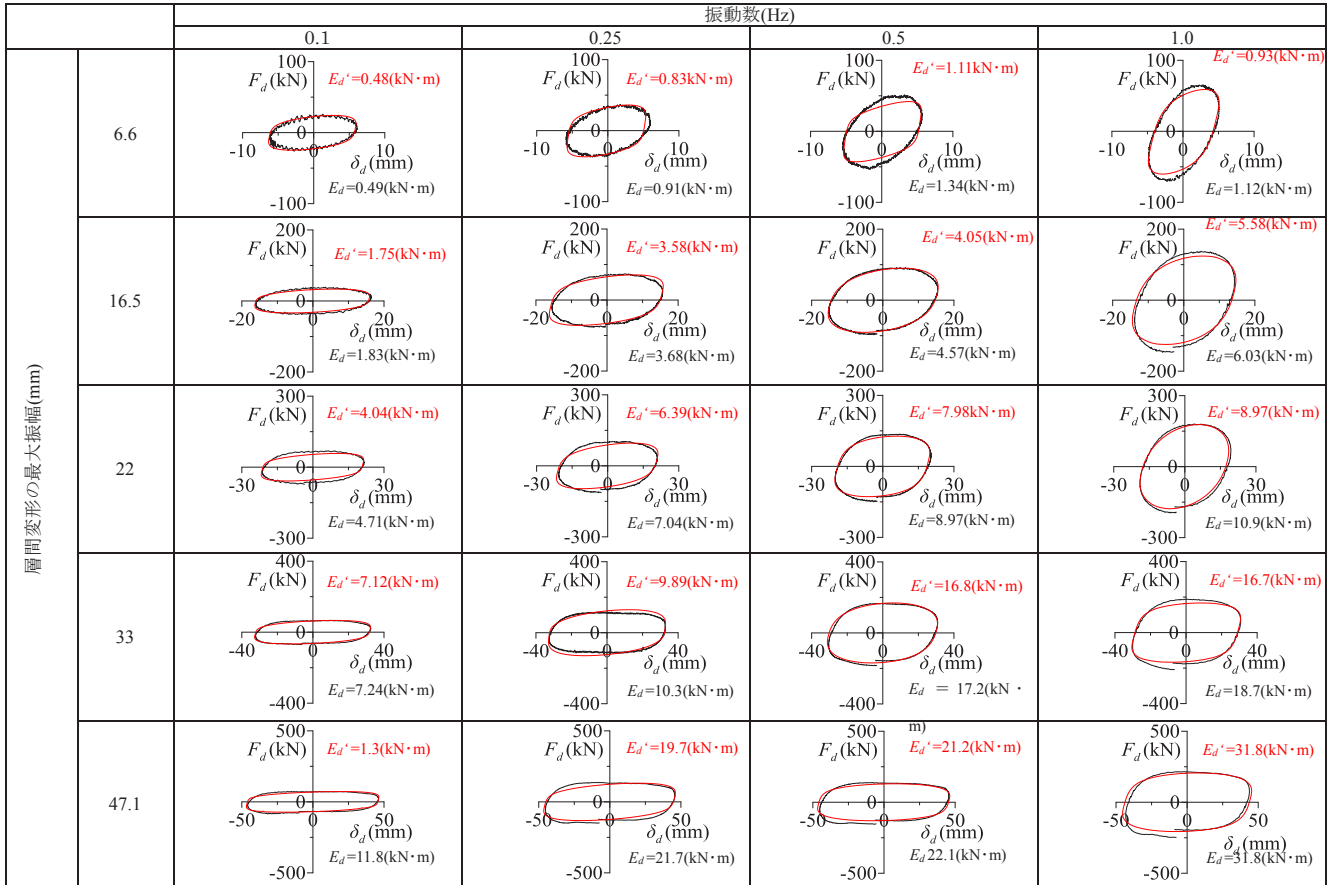


図 14 中央フレーム実験結果と解析結果の履歴ループ比較

フレームの方が中央フレームの実効変形を下回ることが確認できた。また、解析と実験結果による実効変形比を比較することで、概ね等しい値を示しており、振幅による傾向も同様であることが確認できた。よって、本報で示した解析モデルの妥当性が示された。

はエネルギー吸収量としても概ね一致した。

- (3) 中央フレーム、左寄せフレームの解析モデルでは、実効変形比が左寄せフレームにて小さくなることが再現出来ていた。また、実験と解析で振幅による実効変形比の傾向は概ね一致した。
- (4) ダンパーのモデル化にあたっては、正弦波加振試験を対象として行ったが、本モデルの入力波をランダム波で適用するには今後の課題となる。

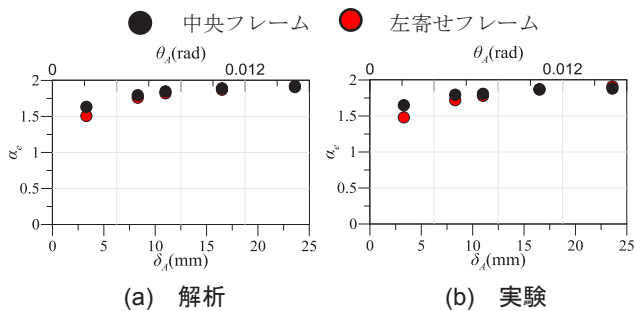


図 17 実効変形比の比較 (1.0Hz)

#### 4. まとめ

本論文では、解析的に部材変形が実効変形比の低下に及ぼす影響を分析するためのモデルを作成した。以下に得られた知見を示す。

- (1) ダンパーを設置したフレーム加振試験では、履歴ループによるダンパー剛性  $K_d$  は振動数ごとに  $x$  軸及び  $y$  軸を漸近線に取るような形で、曲線上に表れる。
- (2) 中央フレーム試験結果と解析モデルによる履歴ループ

#### 謝辞

本研究は、株式会社日建設計、オイレス工業株式会社、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共同研究の成果の一部である。

#### 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, No.606, pp.97-104, 2006.8
- 2) 戸張涼太, 後上和也, 石井正人, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一, 北村春幸, 佐藤利昭, 吉江慶祐: 変形増幅機構を有する制振構造システムの提案(その1), (その2), 日本建築学会関東支部研究報告集 2014.2
- 3) 小川晋平, 岩崎雄一, 石井正人, 佐々木和彦, 佐藤大樹, 北村春幸, 佐藤利昭, 松田頼征, 吉江慶祐: 変形増幅機構を有する制振フレーム試験体の動的加振試験, 日本建築学会構造系論文集, vol.63B, pp285-293, 2017
- 4) パッシブ制振構造設計・施工マニュアル・第2版, (社) 日本免震構造協会(JSSI), 2005.

\*1 東京理科大学 \*2 東京工業大学 \*3 (株) 日建設計