

# 間柱型粘弾性ダンパーの開発

## Development of Stud-type Viscoelastic Damper

戸張 涼太 TOBARI Ryota JFE シビル システム建築事業部 商品開発部 商品開発グループ (主任)  
金城 陽介 KANESHIRO Yosuke JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部  
吉永 光寿 YOSHINAGA Mitsutoshi JFE シビル システム建築事業部 商品開発部 商品開発グループ長 (副部長)

### 要旨

鋼材やオイルなどをエネルギー吸収材料とする制振ダンパーが数多く開発されている。その中でも、粘弾性ダンパーは微小振幅から大振幅まで幅広く制振効果を発揮するため汎用性が高い。JFE シビルと JFE スチール (以下、JFE グループ) では、新たに間柱型粘弾性ダンパーを開発し、従来保有している建築構造用低降伏点鋼材を利用した鋼材ダンパーを中心とする、制振ダンパーのラインナップに追加した。本報では、本間柱型粘弾性ダンパーの基本特性を、縮小サンプル試験体および実大試験体を用いた各種試験により評価した。さらに、せん断ひずみ、温度、振動数の依存性を考慮できる詳細な時刻歴応答解析用履歴モデルを提案するとともに、簡便さを考慮してより簡易なモデルとの対応を確認し、その有効性を示した。

### Abstract:

A number of response control devices using energy absorbing materials such as steel and oil have been developed. Among them, the viscoelastic damper is highly convenient because it exhibits a wide range of response control effect from small to large amplitude. JFE Group has newly developed stud-type viscoelastic damper and added it to the lineup of response control devices, mainly steel damper using the low yield point steel. In this report, first, the basic performance of the stud-type viscoelastic damper is evaluated by various tests using small sample specimens and full scale specimens. Then, we propose a detailed analysis model for time history response analysis that can take into consideration the dependence of shear strain, temperature, and frequency. Furthermore, considering practicality, we confirmed matching between simplified model and detailed model and showed its effectiveness.

## 1. はじめに

地震や風などの外力による建築物の損傷を軽減するためには制振構造が有効である。制振ダンパーのエネルギー吸収部には、主に鋼材、オイル、粘性体などの材料が用いられている。JFE グループでは、建築構造用低降伏点鋼材 (JFE-LY100, JFE-LY225) を利用したブレース型、間柱型、壁型の制振ダンパー<sup>例えば1, 2)</sup>を順次開発し商品化してきたが、今回新たに間柱型の粘弾性ダンパーを開発した。図1に間柱型粘弾性ダンパーの概要図を示す。「間柱型粘弾性ダンパー」は上下の梁の間に設置する制振装置で、粘弾性パネルとH形鋼を用いた上下支持部材で構成されている。粘弾性パネルは、内鋼板と外鋼板間に粘弾性体が接着されており、主に粘弾性体のせん断抵抗機構により外部エネルギーを吸収する。粘弾性体には、減衰性能を強化した新開発の高減衰ゴムを採用している。粘弾性ダンパーは、風荷重などの微小変形から大地震まで、幅広く減衰性能を発揮する点が一つの特徴である。一方、鋼材ダンパーは地震による

大振幅時に高い制振効果が得られるという特徴があり、粘弾性ダンパーは風荷重などの小振幅領域からも幅広く制振効果を発揮するため、両者組み合わせることでより合理的な制振構造の実現が期待できる。

粘弾性ダンパーは一般的に振幅や温度などの依存性を有することから、実験により各種の依存性を適切に評価した上で、設計時に使用する解析モデルにも反映させる必要がある。そこで本報では、本間柱型粘弾性ダンパーについて、

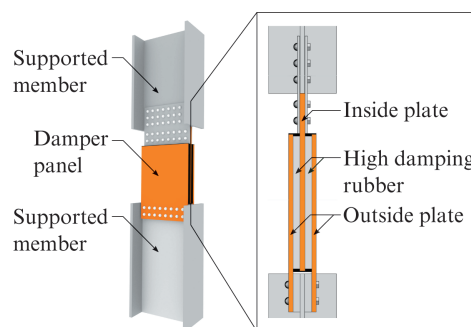


図1 間柱型粘弾性ダンパーの概要

Fig. 1 Outline of stud-type viscoelastic damper

2018年9月27日受付

縮小サンプルおよび実大の試験による基本的性能の評価と、時刻歴応答解析用の履歴モデルについて述べる。

## 2. 実験による性能評価

### 2.1 縮小サンプル試験

#### 2.1.1 試験概要

ダンパーに用いる粘弾性体のせん断ひずみ依存性、温度依存性、振動数依存性を評価するため、粘弾性体の縮小サンプルを用いた試験を実施した。粘弾性体の性能評価は実大試験体を用いることが望ましい<sup>3)</sup>が、実験時の温度管理等の都合上、粘弾性体の基本的な性能の評価においては縮小試験体を用いる。実大試験との整合性については次節で述べる。

図2に縮小サンプル試験体の形状を、表1に試験条件を示す。縮小サンプル試験体の高減衰ゴム部分は、□40 mm × 40 mm、厚さ 8 mm の2面せん断である。試験条件は表1に示すとおり、せん断ひずみ  $\gamma=100\%$ 、温度  $T=20^\circ\text{C}$ 、振動数  $f=0.33\text{ Hz}$  を基準に、せん断ひずみ、温度、振動数の各依存性評価のため対象の項目を変数とする。加力は全て4サイクルの正弦波加振とし、試験はいずれも温度が一定に管理された恒温槽内で実施した。

図3に、高減衰ゴムのせん断応力度  $\tau$ –せん断ひずみ  $\gamma$  の関係の模式図を示す。等価せん断弾性率  $G_{eq}$  および等価減衰定数  $H_{eq}$  は  $\tau$ - $\gamma$  関係を用いて次式で定める。

$$G_{eq} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (1)$$

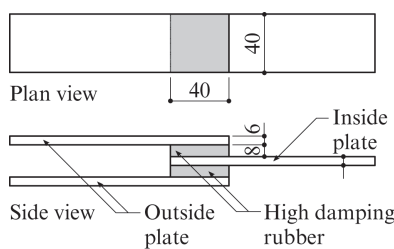


図2 縮小サンプル試験体

Fig. 2 Small sample test specimen

表1 縮小サンプル試験体の試験条件

Table 1 Test conditions of small sample test specimen

Evaluation categories	Shear strain $\gamma$ (-)	Temperature $T$ ( $^\circ\text{C}$ )	Frequency $f$ (Hz)
Shear strain dependence	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0	20	0.33
Temperature dependence	1.0	0, 20, 40	0.33
Frequency dependence	1.0	20	0.1, 0.33, 2.0

$$H_{eq} = \frac{2\Delta W}{\pi \cdot G_{eq} (\gamma_{max} - \gamma_{min})^2} \quad (2)$$

なお、 $\Delta W$ は図3で示すようにせん断応力度  $\tau$ –せん断ひずみ  $\gamma$ 履歴の面積である。

#### 2.1.2 試験結果

各種依存性の評価試験で得られたせん断応力度  $\tau$ –せん断ひずみ  $\gamma$ 関係を図4に示す。いずれも4サイクル加振のうちの3サイクル目の履歴であり、これらの履歴曲線から式(1)～式(2)に従い、等価せん断弾性率  $G_{eq}$  と等価粘性減衰定数  $H_{eq}$  を計算した。図5に  $G_{eq}$  と  $H_{eq}$  の各依存性を、以下に依存性の評価試験結果に合わせた  $G_{eq}$  および  $H_{eq}$  の回帰式を示す。

せん断ひずみ依存性

$$G_{eq} : 0.42960 + 2.6355e^{-\gamma/0.65317} + 5.5626e^{-\gamma/0.10130} \quad (3a)$$

$$H_{eq} : 0.91686 + 0.105231\gamma - 0.0160280\gamma^2 - 0.0060662\gamma^3 \quad (3b)$$

温度依存性

$$G_{eq} : -9.029 \times 10^{-5} T^2 - 1.668 \times 10^{-2} T + 1.3697 \quad (4a)$$

$$H_{eq} : -2.108 \times 10^{-4} T^2 + 5.958 \times 10^{-3} T + 0.9652 \quad (4b)$$

振動数依存性

$$G_{eq} : 1.1836 + 0.3813 \log_{10}(f) \quad (5a)$$

$$H_{eq} : 1 \quad (5b)$$

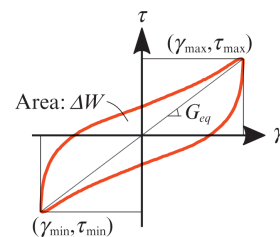


図3  $\tau$ - $\gamma$ 関係

Fig. 3  $\tau$ - $\gamma$  relationship

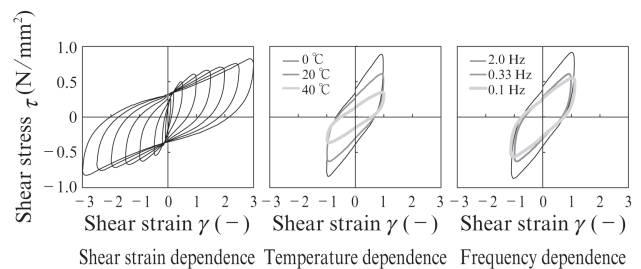


図4 依存性の評価試験結果

Fig. 4 Result of dependence evaluation test

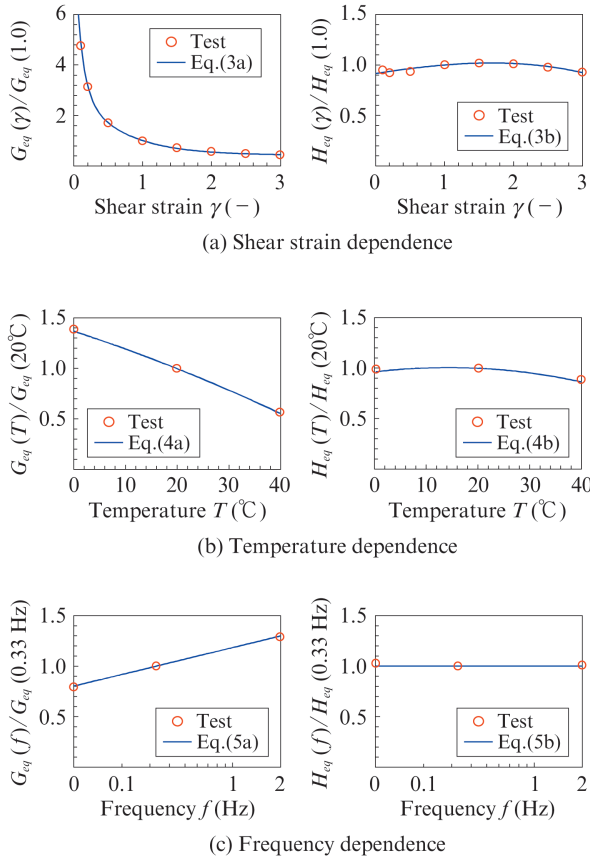


図5  $G_{eq}$  と  $H_{eq}$  の各依存性

Fig. 5 Dependence of  $G_{eq}$  and  $H_{eq}$

図5には、式(3a)～式(5b)をそれぞれ実線で表している。各回帰式は、せん断ひずみ依存性は $\gamma=1.0$ 、温度依存性は $T=20^\circ\text{C}$ 、振動数依存性は $f=0.33\text{ Hz}$ で基準化した。

図5より、等価せん断弾性率 $G_{eq}$ は比較的依存性が大いだが、等価粘性減衰定数 $H_{eq}$ は依存性が小さく、小振幅領域でも安定してエネルギーを吸収することがわかる。また、各回帰式は試験結果をほぼ再現できている。

## 2.2 実大試験

### 2.2.1 試験概要

縮小サンプル試験と実大試験体の整合性の確認、および繰返し性能の確認のための実大試験について述べる。図6(a)に試験体を、図6(b)に荷重装置を示す。試験体は、実際の間柱型粘弾性ダンパーを想定しており、高減衰ゴム部の大きさは $\square$ -500 mm $\times$ 500 mmで、厚さ16 mmの内鋼板と外鋼板で挟み込まれている。図6(a)の試験体に対して、図6(b)の荷重装置によって動的荷重を行う。試験条件を表2に示す。パラメータは、高減衰ゴムの厚さ、せん断ひずみ、振動数、および繰返しサイクル数である。No.1～No.4は縮小サンプル試験と同様に各4サイクルの正弦波加振とする。No.5は100サイクルを連続で10セット加振後、翌日4サイクルの合計1004サイクルの正弦波加振とする。

### 2.2.2 試験結果

図7、図8、図9に実大試験と縮小サンプル試験の比較を示す。図7は3サイクル目のせん断応力度 $\tau$ -せん断ひずみ $\gamma$ 関係の比較、図8は3サイクル目の $G_{eq}$ 、 $H_{eq}$ の高減衰ゴムの厚さの依存性とせん断ひずみ依存性の比較、図9は振動数依存性の比較を表している。なお、実大試験では温度を一定値に管理できないため、No.1～No.4は、式(4a)、式(4b)

表2 実大試験体の試験条件

Table 2 Test conditions of full scale test specimen

Test specimen	Rubber thickness (mm)	Shear strain $\gamma(-)$	Frequency $f$ (Hz)	Test purpose
No.1	25	0.1, 0.5,	0.33	Rubber thickness dependence, Shear strain dependence
No.2	20	1.0, 1.5,		
No.3	15	2.0, 2.5, 3.0		
No.4	25	1.0	0.01, 0.1, 1.0	Frequency dependence
No.5	25	2.0	0.33	Multi-cyclic performance

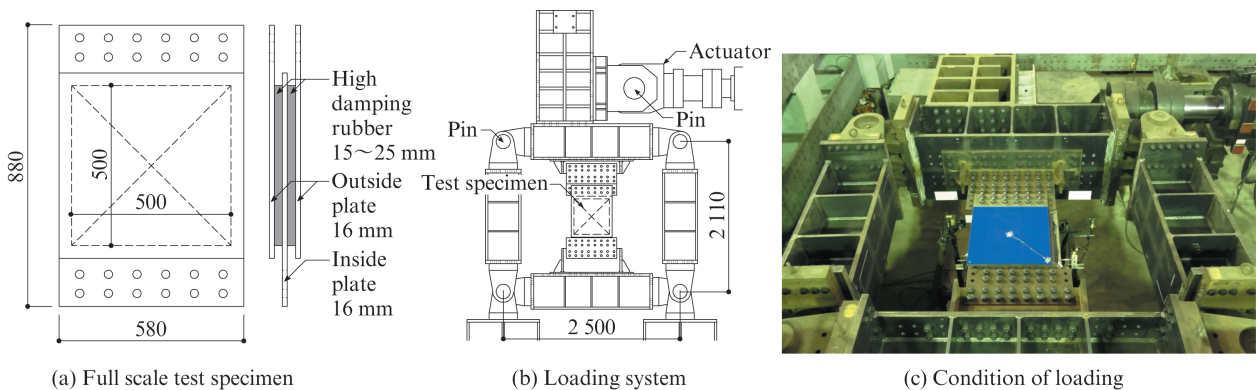


図6 試験体および荷重装置

Fig. 6 Test specimen and loading system

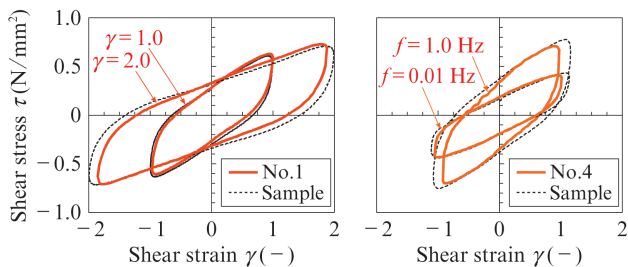


図7 実大試験と縮小サンプル試験のτ-γ関係の比較

Fig. 7 Comparison of τ-γ relationship between full scale and small sample

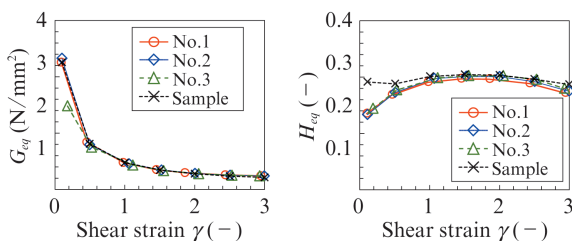


図8 実大試験と縮小サンプル試験のせん断ひずみ依存性の比較

Fig. 8 Comparison of shear strain dependence between full scale and small sample

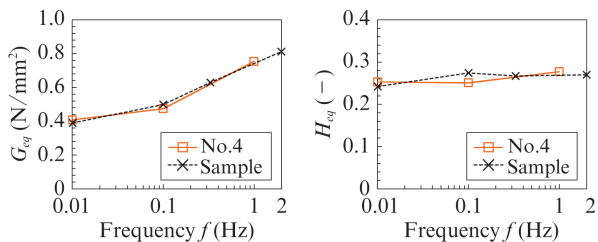


図9 実大試験と縮小サンプル試験の振動数依存性の比較

Fig. 9 Comparison of frequency dependence between full scale and small sample

により、 $T=20^{\circ}\text{C}$ での値に換算してサンプル試験と比較した。図7、図8より、粘弾性体の高減衰ゴムの厚さの依存性はなく、実大試験と縮小サンプル試験のせん断ひずみ依存性は良好な対応を示していることがわかる。また、図7、図9より、実大試験と縮小サンプル試験の振動数依存性も同様、概ね良い対応が確認される。ただし、 $\gamma=0.1$ の時の $H_{eq}$ において差異が見られるが、これは縮小サンプル試験では粘弾性パネルに直接せん断変形を与えているのに対し、実大試験では上下の梁に層間変形を生じさせることで粘弾性パネルにせん断変形を与えており、小振幅载荷ではアクチュエータのストロークの許容誤差やピンののがたの影響が大きく、正確な正弦波加振が行えていないことに起因すると考えられる。なお、式(3a)～式(5b)は、前節の縮小サンプル試験の結果と合わせ、各依存性を評価するための設計式として提案している。

図10に、No.5の $G_{eq}$ 、 $H_{eq}$ の3サイクル目の値に対する

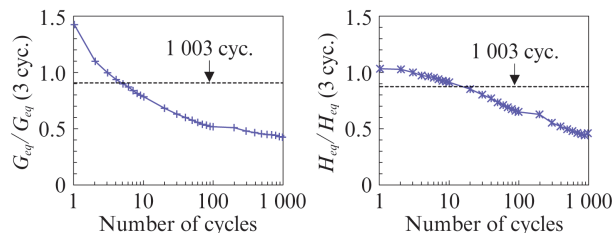


図10 繰返し载荷時の $G_{eq}$ と $H_{eq}$ の推移

Fig. 10 Changes in  $G_{eq}$  and  $H_{eq}$  during cyclic loading

比率の推移を示す。同図には、1, 2, ..., 10, 20, ..., 103, 203, ..., 1000サイクル目の値をプロットした。さらに、 $G_{eq}$ 、 $H_{eq}$ の繰返し载荷前後の値を比較するため、1003サイクル目の値を3サイクル目の温度( $20.8^{\circ}\text{C}$ )に換算して点線で示した。図10より、繰返し载荷により $G_{eq}$ 、 $H_{eq}$ ともに低下していくが、 $\gamma=2.0$ での1000サイクル载荷後も、 $G_{eq}$ 、 $H_{eq}$ ともに初期値の約90%まで回復することがわかる。なお、 $G_{eq}$ 、 $H_{eq}$ の低下は、繰返し载荷に伴う高減衰ゴムの温度上昇によるものであるが、昨今では長周期・長時間地震動に伴う免制振部材の性能の変化の影響が指摘されており<sup>4)</sup>、より詳細な繰返し性能の評価については今後の課題である。

### 3. 時刻歴応答解析用履歴モデル

粘弾性ダンパーは複雑な依存性を示すことから、各粘弾性材料に合わせた時刻歴応答解析用履歴モデルが数多く提案されている(例えば5)。図11に本ダンパーの解析モデルの概念図を、表3に解析モデルの適用範囲を示す。本モデルは、図11に示すような4要素モデルであり、せん断ひずみ、温度、振動数の各依存性に加えて、過去の経験ひずみによる剛性、減衰の低減効果を考慮できるモデルとなっている。

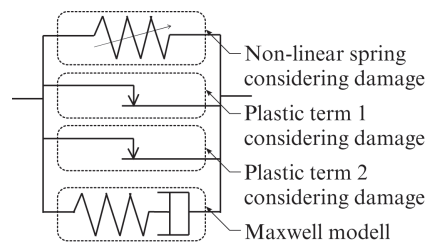


図11 解析モデルの概念図

Fig. 11 Pattern diagram of analysis model

表3 解析モデルの適用範囲

Table 3 Application range of analysis model

Index	Application range
Shear strain $\gamma$ (-)	0.1~2.7
Temperature $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0~40
Frequency $f$ (Hz)	0.1~2.0

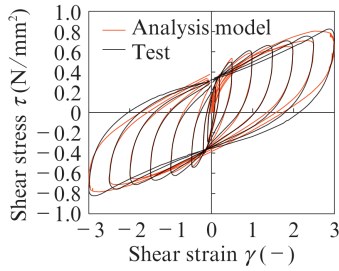


図 12 試験結果と解析モデルの比較

Fig. 12 Comparison between test result and analysis model

図 12 に、縮小サンプル試験におけるせん断ひずみ依存性の試験結果と、本解析モデルにおけるせん断応力度  $\tau$ —せん断ひずみ  $\gamma$  関係の比較を示す。本解析モデルの  $\tau$ — $\gamma$  履歴は、縮小サンプル試験のせん断ひずみと同じ時刻歴を解析モデルに入力して得られた履歴である。図 12 より、実験結果と本履歴モデルによる解析結果は良く対応していることがわかる。なお、他の依存性評価試験の結果と本解析モデルとの比較も別途行っており<sup>6)</sup>、精度良く対応することを確認している。

#### 4. 簡易履歴モデルの検証

前章では、開発した粘弾性ダンパーの各種依存特性を再現可能な解析モデルを提案し、試験結果と比較してその妥当性を示した。本章では、提案した解析モデル（以下、詳細モデル）が汎用計算プログラム等において使用できない状況も考慮して、簡便な解析モデル（以下、簡易モデル）との対応を時刻歴応答解析により検証する。

##### 4.1 検討条件

検討モデルの主架構は、制振構造テーマストラクチャーの 10 層・トリムタイプ<sup>3)</sup>をベースとする建物モデルとする。伏図および軸組図を図 13 (a) に示す。構造種別は鉄骨造で、長辺方向 38.4 m、短辺方向 22.4 m、高さ 42.0 m の事務所ビルとなっている。本検討では長辺方向を対象とし、主架構のみの一次固有周期は 1.86 秒である。応答解析は立体骨組モデルにより行い、主架構は弾塑性、減衰は一次固有周期に対する初期剛性比例型 ( $h=2\%$ ) として設定する。

対象とする間柱型粘弾性ダンパーを図 13 (b) に示す。粘弾性体のサイズは 484×484 mm、厚さ 25 mm で、支持部材は H-650×300×16×25 の H 形鋼である。図 14 (a) に間柱型粘弾性ダンパー周辺の解析モデル図を、図 14 (b) に粘弾性ダンパーの簡易モデルを示す。上階梁・下階梁と階中央に設けた節点をそれぞれ剛体棒で結び、階中央の節点同士を粘弾性体の履歴モデルと、支持部材を表す弾性ばねで接続したモデルとする。粘弾性体の履歴モデルには詳細モデルまたは簡易モデルを使用する。支持部材剛性  $K_c$  は間柱型

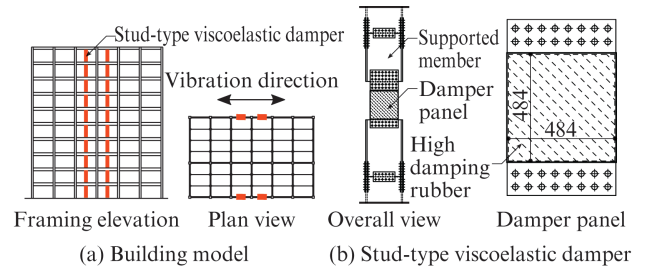


図 13 検討建物条件

Fig. 13 Building conditions

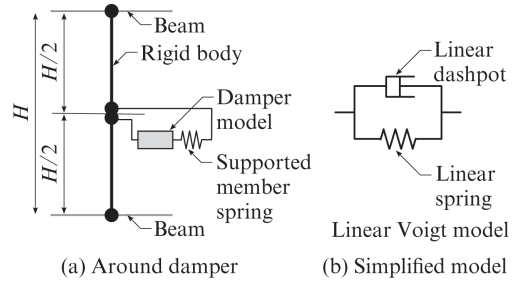


図 14 間柱型粘弾性ダンパーのモデル化

Fig. 14 Modeling stud-type viscoelastic damper

粘弾性ダンパー高さ中央に反曲点が位置するモーメント分布を仮定し、曲げとせん断変形を考慮して算定した。粘弾性体の簡易モデルは図 14 (b) に示す線形 Voigt モデルとし、 $K_d$  と  $C_d$  は次式により算出する。

$$K_d = \frac{G_{eq} \cdot A_r}{d} \dots\dots\dots (6a)$$

$$C_d = \frac{2H_{eq}}{\omega_1} K_d \dots\dots\dots (6b)$$

$A_r$ : 高減衰ゴム部の面積、 $d$ : 高減衰ゴム厚さ、 $\omega_1$ : 固有円振動数である。 $G_{eq}$  および  $H_{eq}$  を定める際の粘弾性体温度  $T$  は 20℃、 $\omega_1$  は主架構の一次固有振動数  $f_1=0.50$  Hz を用いて算定する。なお、厳密には固有円振動数にはダンパーを設置した状態の値を用いるべきであるが、ここでは簡略的に主架構のみの一次固有振動数とした。また、最大せん断ひずみは応答解析によって得られる値であることから、収斂計算を行うものとする。図 15 に応答解析の収斂計算フローを示す。収斂条件は、各階のせん断ひずみの入力値  $i\gamma_{in}$  に対する解析結果  $i\gamma_{out}$  の比が  $1 \pm 0.05$  以内とした。本検討では、地震波により 3~5 回計算を繰返すことで全層のせん断ひずみは収斂した。

##### 4.2 詳細モデルと簡易モデルの比較

詳細モデルと簡易モデルの応答解析結果の比較にあたり、解析には、(株)構造システムの SNAP Ver.7 を用いた。検討用地震動は、レベル 2 の告示模擬地震動 2 波（位相特性：

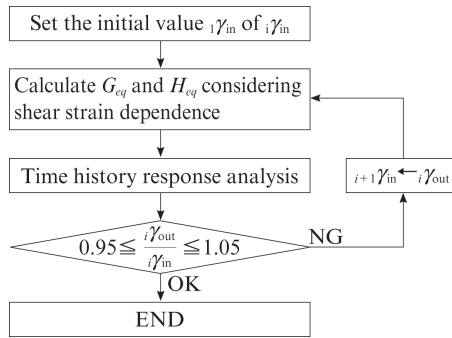


図 15 応答解析の収斂計算フロー

Fig. 15 Flow of iterative calculation in response analysis

八戸（告示波 1）、神戸（告示波 2）と、最大速度を 50 cm/s に基準化した観測地震動 3 波（El Centro, Taft, Hachinohe）の計 5 波とし、いずれも解析時間刻みは 1/1 000 秒とした。

図 16、図 17、図 18 に、詳細モデルと簡易モデル解析結果について、最大応答値の比較、地震終了時のエネルギーの比較、ダンパー履歴の比較を示す。図 16、図 17、図 18 より、簡易モデルは詳細モデルと概ね良い対応を示しており、応答およびエネルギーは適切に評価できていることがわかる。一方で、図 17 のダンパーの履歴に着目すると、簡易モデルは詳細モデルと比べてせん断力を大きく、せん断ひずみを小さく評価する傾向にあり、設計時にダンパーに生じる最大せん断ひずみを評価する際には注意が必要である。

## 5. おわりに

JFE グループが開発した間柱型粘弾性ダンパーについて、基本的な性能の評価結果、時刻歴応答解析用履歴モデルの概要、より簡便な解析モデルの有効性について述べた。以下にまとめを記す。

- 1) 縮小サンプル試験を実施し、せん断ひずみ、温度、振動数の依存性を表す設計式を提案した。
- 2) 実大の間柱型粘弾性ダンパーを想定した試験を行い、縮小サンプル試験と実大試験体の整合性を確認した。
- 3) 時刻歴応答解析用履歴モデルを提案し、各試験結果との比較によりその妥当性を示した。
- 4) 詳細モデルと簡易モデルを用いた応答解析結果の比較を行い、簡易モデルの有効性を示した。

今回、JFE グループでは粘弾性タイプのダンパーを開発したことにより、従来保有している低降伏点鋼材を用いた鋼材タイプのダンパーと合わせて、それぞれのメリットを生かした部材提案が行えるようになった。

本論文は、(株)ブリヂストンとの共同研究開発の成果の一部を使用したものである。ここに感謝の意を表します。

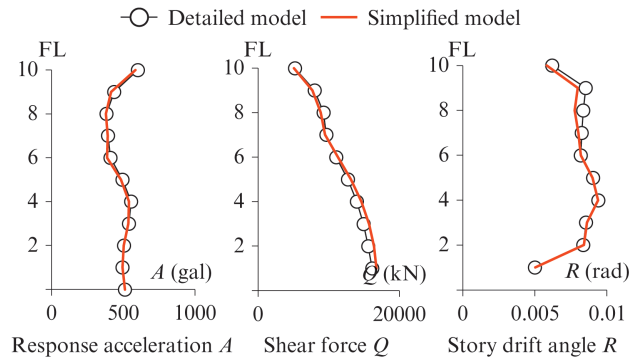


図 16 応答値の比較

Fig. 16 Comparison of response

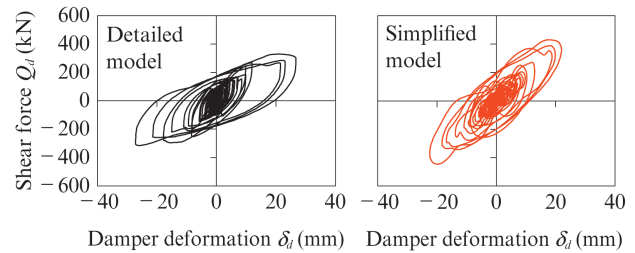


図 17 ダンパーの荷重変形関係の比較

Fig. 17 Comparison of shear damper force-deformation relationship

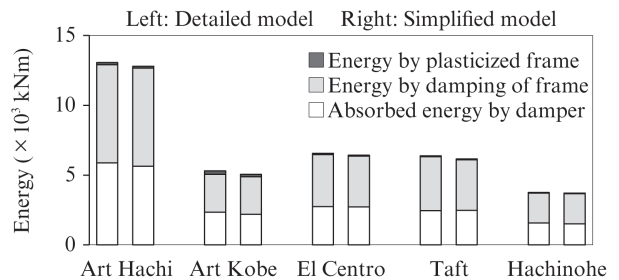


図 18 地震終了時のエネルギーの比較

Fig. 18 Comparison of energy end point of earth quake

## 参考文献

- 1) 伊藤茂樹, 加村久哉, 下川弘海, 形山忠輝, 廣田実, 植木卓也. ダンパー用極軟鋼を用いた履歴型制震デバイス. NKK 技報. 2000, no. 170, p. 67-74.
- 2) 石井匠, 高木伸之, 藤澤一善, 清水孝憲, 宮川和明, 喜多村亘. 二重鋼管座屈補剛プレースの低サイクル疲労性能 その 1~2. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2012, p. 783-784.
- 3) (社)日本免震構造協会(編). パッシブ制振構造設計・施工マニュアル. 第 3 版, (株)日本免震構造協会, 2013, 561p.
- 4) 飯場正紀, 長島一郎, 日比野浩, 竹中康雄, 近藤明洋, 中西啓二, 猿田正明, 山本雅史, 嶺脇重雄, 小豆畑達哉, 井上波彦. 免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究. 建築研究資料. 2016, no. 170.
- 5) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健. 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した構成則(その 1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化). 日本建築学会構造系論文集. 2001, vol. 66, no. 543, p. 77-86.
- 6) 森隆浩, 櫻井祐, 加藤亨二, 戸張涼太, 吉永光寿, 金城陽介. 高減衰ゴムを用いた間柱型粘弾性ダンパー ~その 2 時刻歴応答解析用履歴モデル~. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 2017, p. 597-598.



戸張 涼太



金城 陽介



吉永 光寿