

ハイブリッドブレースダンパーの開発と適用

—実大試験体の動的載荷実験と適用建物における振動実験—

欄木 龍大^{*1}・成原 弘之^{*2}・木村 雄一^{*3}・小山 実^{*3}・一色 裕二^{*3}

Keywords : hybrid damper, elasto-plastic damper, visco-elastic damper, structural safety, habitability, performance verification test

複合ダンパー, 弾塑性ダンパー, 粘弾性ダンパー, 構造安全性, 居住性, 性能確認試験

1. はじめに

地震時や強風時における建物の応答低減のため、多くの種類の制振ダンパーが実用化され適用されている。これらは変位依存性の履歴系ダンパーと速度依存性の粘性系ダンパーに大別でき、相異なった特徴を有している。

履歴系ダンパーは安定した力学的特性を有し、信頼性にも優れることから、大地震時の構造安全性を高める地震力低減用ダンパーとして数多くの実績を持つ。しかし、小振幅の揺れに対する効果をもたないため、強風時の揺れや地震時による後揺れを防止する居住性改善用ダンパー（TMD等）を建物に別途設置する必要がある。

一方、粘性系ダンパーは、振幅の大きさに依らず広範な効果を発揮するため、居住性改善から地震力低減まで幅広い目的で利用されている。しかし、粘性系ダンパーには、振動数依存、温度依存等の複雑な力学的特性を有するものが多く、性能の設定が難しいこと、また、履歴系ダンパーに比べて性能/価格比が劣ること等が要因となり、適用事例は限られている。

筆者らは、地震力低減用の座屈拘束ブレース「SHAPEUP-BRACE」（履歴系ダンパー）¹⁾と居住性改善用の「粘弾性ダンパー」（粘性系ダンパー）を適切に組み合わせることで、日常的な風振動から構造安全性に関わる大地震時の応答まで広範な制振効果を有する複合制振ダンパー「ハイブリッドブレースダンパー」を開発し、9階建ての事務所ビルに適用した。

本報では、ダンパーの性能確認を目的に実施した、実大試験体の動的載荷実験と適用建物における振動実験の概要および結果を報告する。

2. 装置の概要

2.1 ハイブリッドブレースダンパーの構成

図-1 にハイブリッドブレースダンパーの全体外観を、図-2 にその力学モデルを示す。粘弾性ダンパーと滑り機構と弾性バネが直列に接合され、さらに弾塑性ダンパーがこれと並列に結合されている。

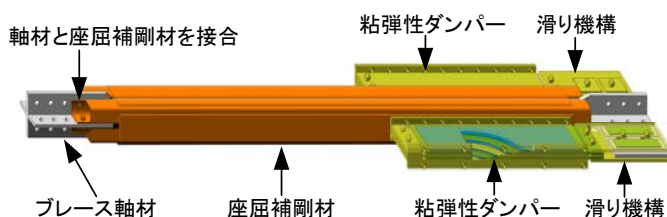


図-1 ハイブリッドブレースダンパーの外観
Overview of Hybrid Brace Damper

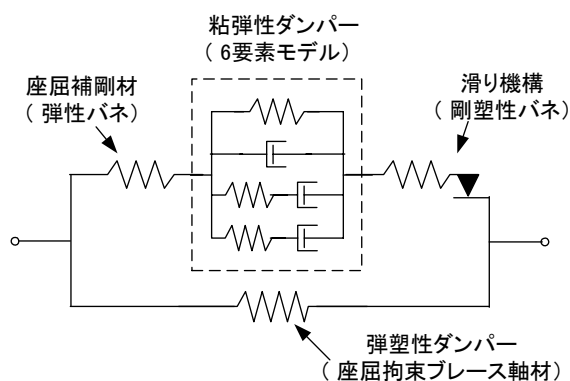


図-2 ハイブリッドブレースダンパーの構成
Mechanical model of Hybrid Brace Damper

(a) 弾塑性ダンパー

弾塑性ダンパーには座屈拘束ブレース¹⁾が利用される。この座屈拘束ブレースは十字断面の鋼材を芯材とするブレースの周りを適切な隙間を設けて4本の角形鋼管を束

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室
*2 技術センター建築技術研究所構工法研究室
*3 設計本部構造グループ

ねた座屈補剛材が囲んでおり、圧縮時引張時とも安定した塑性変形能力を有する。従来の座屈拘束ブレースは、軸材と座屈補剛材は互いに滑動可能であり座屈補剛材には軸力は生じないが、ハイブリッドブレースダンパーは、図-1 に示すように、座屈拘束ブレースの左端側でブレース軸材と座屈補剛材を高力ボルトで接合することによって、両者間の相対変位を図中の右端側のみに生じさせ、その相対変位を粘弾性ダンパーに付与する仕組みにしている。相対変形を効率良く粘弾性ダンパーに伝えるためには、座屈補剛材の軸剛性は十分に剛である必要がある。

(b) 粘弾性ダンパー

粘弾性ダンパーはフランジ付きの外殻と 3 枚の内部鋼板とが 4 枚の粘弾性体を挟んで積層構造をなしたものである。粘弾性ダンパーの減衰力は S/d (S : 粘弾性体の貼付面積、 d : 同厚さ) に比例するので、 d が薄いほどダンパーの減衰性能が上がる。そこで今回は、製作方法に工夫を凝らし、従来の実大粘弾性ダンパーの約 1/5 の厚さとなる $d = 2\text{mm}$ まで薄くして、粘弾性ダンパーの小型化を実現した。粘弾性ダンパーには振幅依存性が小さいアクリル系 (ISD111)、ジェン系 (SDM1) の粘弾性体を採用している (写真-1)。粘弾性ダンパー 2 体を一組として座屈拘束ブレースの上下両側面に抱かせ、粘弾性ダンパー外殻のフランジの一方を座屈補剛材に接合し、粘弾性ダンパーの内部鋼板を座屈拘束ブレースの軸材の端部継手部分に接合している。

(c) 滑り機構

上記継手部は、中板にスロット孔をあけた高力ボルトによる二面せん断の摩擦接合をなし、所定の荷重で滑るように設定される。添え板と中板の間の摩擦面にはモールド系摩擦材とステンレス板 (SUS304) を挟んでいる。

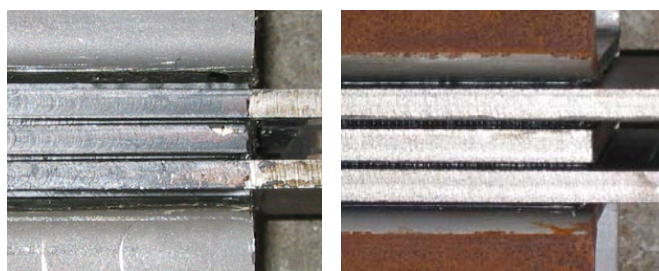


写真-1 粘弾性ダンパー (左: ジェン系, 右: アクリル系)
Macro photography of visco-elastic damper

2.2 各構成要素の役割

ハイブリッドブレースダンパーの各構成要素の役割を要約すると次のようになる。

(a) 弾塑性ダンパー

建物の構造安全性に関わるような大地震時の比較的大

振幅の応答に対しては、座屈拘束ブレース軸材の降伏後の塑性変形による履歴減衰により、建物の損傷を最小限に抑える。

(b) 粘弾性ダンパー

強風時の風振動や中小地震時の揺れのように比較的頻繁で座屈拘束ブレースが弾性範囲に留まるような小振幅の応答に対しては、粘弾性ダンパーの粘性減衰によって応答を低減し、居住性を改善する。

(c) 滑り機構

比較的大振幅の応答時には滑り機構が滑るので、これと直列に配された粘弾性ダンパーへ発生する減衰力やひずみが過大にならず、粘弾性ダンパーやその接合部などの損傷や破壊を防止する。また、滑り機構の滑り荷重は弾塑性ダンパーの復元力に付加される。

3. 実大試験体の動的載荷試験

3.1 実験概要

実部材としての性能を確認するため、ハイブリッドブレースダンパーの実大試験体を用いて微小変形から大変形に渡る動的載荷実験 (弾性～弾塑性加振) を行った。

3.1.1 試験体

図-3 および図-4 に試験体形状を示す。座屈拘束ブレースの十字断面は、 $100 \times 80 \times 12$ (SN400B) で、降伏区間の長さは 2720mm である。鋼材の引張試験結果によると、降伏点は 283N/mm^2 、引張強さは 447N/mm^2 、伸びは 30.4% である。従って、ブレース軸材の軸降伏変形は 3.7mm、降伏軸力は 503kN である。粘弾性ダンパーは、ジェン系 2 体とアクリル系 2 体を各 1 組ずつ用い計 4 体のハイブリッドブレースダンパー試験体を製作した。粘弾性ダンパーの形状は幅 140mm × 長さ 1000mm × 厚さ 2mm の 4 層で、ハイブリッドブレースダンパー 1 体で $S/d=56000\text{cm}$ を実現した。また、滑り機構の高力ボルト (F10T-2 × M20) には、標準ボルト張力の 50% の軸力 ($89\text{kN} \times 2 = 178\text{kN}$) を導入した。摩擦材の面圧は約 10MPa で、摩擦係数は約 0.2 である。中板のスロット孔長さは 100mm で、滑動可能変位は $\pm 40\text{mm}$ である。

3.1.2 加力装置

図-5 に加力装置を示す。試験体を基礎梁と加力用柱の間にブレース状に斜めに設置し、動的アクチュエータ (最大荷重 $\pm 1\text{MN}$ 、最大変位 $\pm 200\text{mm}$ 、最大速度 22cm/s) を用いて柱頭部を水平に載荷した。制御変位はブレース両側継手間 (3800mm) の変位とした。

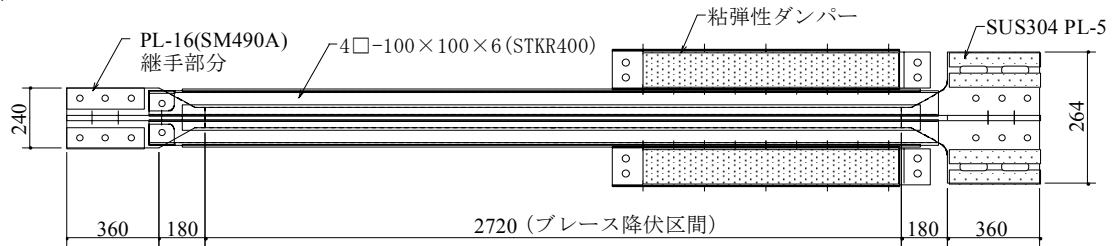
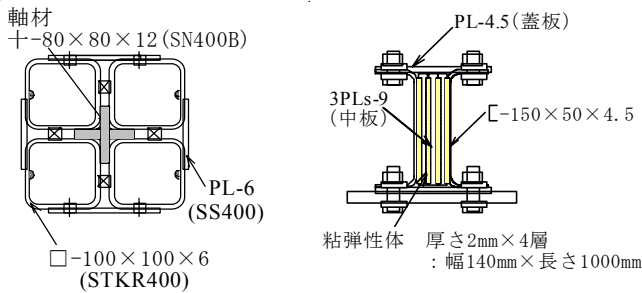


図-3 ハイブリッドブレースダンパー試験体

Figure of specimen



(a) ブレース部断面

(b) 粘弾性ダンパー断面

図-4 ハイブリッドブレースダンパー試験体

Figure of specimen

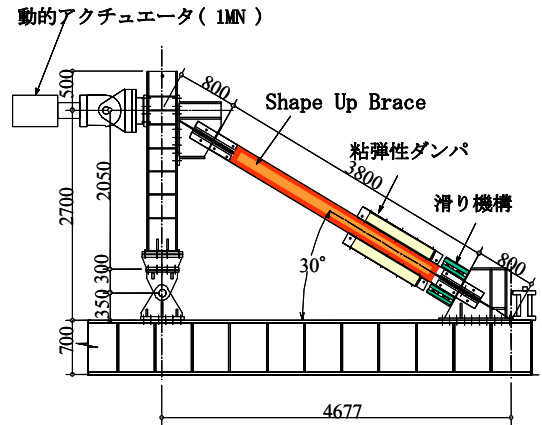


図-5 加力装置

Test setup

3.1.3 計測項目

ハイブリッドブレースダンパー各部の荷重-変形関係の評価するための計測を行った。変形に関しては、試験体の全体変形、粘弾性ダンパー、滑り機構の変形を計測した。荷重に関しては、ブレース軸材の弾性区間（拡幅部）に歪みゲージを貼付してブレース部の荷重を計測した。また、座屈補剛材、粘弾性ダンパーおよび滑り機構の直列ダンパー部（以後、図中ではダンパー部と表記）の荷重は、アクチュエータの荷重計より幾何学的に算出したハイブリッドブレースダンパーの全体荷重からブレース部荷重を差し引いて評価した。また、粘弾性体の温度、滑り機構のボルト張力も計測した。

3.1.4 試験ケース

表-1 に試験条件一覧を示す。種々の振幅の正弦波による定常加振および、風応答・地震応答解析波形を用いたプログラム加振を行った。

表-1 試験条件一覧

List of loading tests

ひずみ(変位) 振動数(周期)	弾性加振					弾塑性加振		
	±5%	±10%	±20%	±30%	±50%	±100%	滑り共	滑り共
±0.1mm	±0.2mm	±0.4mm	±0.6mm	±1mm	±2mm	±10mm	±30mm	
0.25Hz(4s)	○	○	○	○	○	○	○	○
0.33Hz(3s)	○	○	○	○	○	○	○	○
0.5Hz(2s)	○	○	○	○	○	○	○	○
漸増漸減波(3s)	-	-	-	-	-	-	-	◎
風応答波(4s)	-	◎	◎	◎	-	-	-	-
風応答波(2s)	-	◎	◎	◎	-	-	-	-
地震応答波(八戸,4s)	-	-	-	-	-	◎	◎	◎
地震応答波(八戸,2s)	-	-	-	-	-	◎	◎	◎

○: 10サイクル正弦波加振, ●: 60分繰り返し加振, ◎: プログラム加振(風応答波は330秒間)

3.2 加振結果

3.2.1 弾性加振

図-6 にジェン系試験体に対する正弦波加振（振幅 0.2mm、振動数 0.33Hz）より得られた履歴曲線を、図-7 にアクリル系試験体に対する風応答波加振（固有周期 4秒モデル、最大変形 0.6mm）より得られた履歴曲線を示す。荷重-変形関係は、ハイブリッドブレースダンパー全体および、荷重を直列ダンパー部とブレース部に分離したものを示す。また、図-8 に風応答波加振時の荷重、変形、粘弾性体温度の時刻歴波形を示す。日常的な風揺れを対象とした微小振幅加振のため、ブレース軸材は弾性範囲、滑り機構もすべり発生前であるが、直列ダンパー部が線形粘弾性体特有の楕円ループを描くため、振幅 0.2mm（粘弾性体歪み 10%）の微小変形に対しても、ハイブリッドブレースダンパーは安定した履歴ループを描いていることが確認できる。また、時刻歴波形より、試験体両端に生じる相対変形は、座屈補剛材が十分に剛であるため、粘弾性体に集中していることがわかる。加振による粘弾性体の温度変化は無視できるくらい小さい。

3.2.2 弾塑性加振

図-9 にジェン系試験体に対する正弦波加振（振幅 30mm、振動数 0.33Hz）の結果を、図-10 および図-11 にアクリル系試験体に対する八戸応答波加振（固有周期 4秒モデル、最大変形 30mm）の結果を示す。荷重-変形関係は、ハイブリッドブレースダンパー全体、荷重を直

列ダンパー部とブレース部に分離したもの、直列ダンパー部の変形を粘弾性ダンパーと滑り機構に分離したものを示す。時刻歴波形は、荷重、変形、滑り機構のボルト軸力および粘弾性体温度を示す。地震を対象とした大変形加振のため、ブレース部は鋼材系履歴ダンパーとしての安定した紡錘形履歴を描き、直列ダンパー部は滑り機構に滑りが生じて弾塑性型の履歴を示している。直列ダンパー部の荷重は滑り荷重により制限されるため、粘弾性体の最大ひずみは 250% (変形 5mm) に抑制されており、限界ひずみ 500% (変形 10mm) に対して十分に余裕がある。加振により粘弾性体温度は 0.5℃ 上昇したが、ボルト軸力はほとんど変動が無かった。

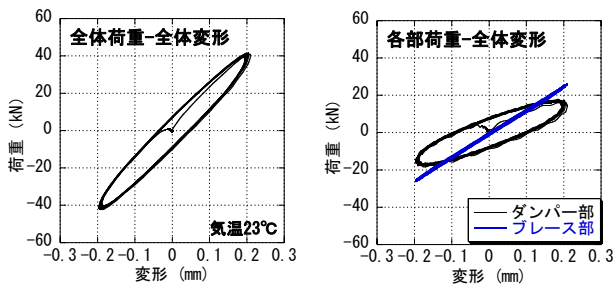


図-6 正弦波 0.2mm 加振による履歴曲線 (ジェン系)
Load-deformation relationships (sin loading : 0.2mm)

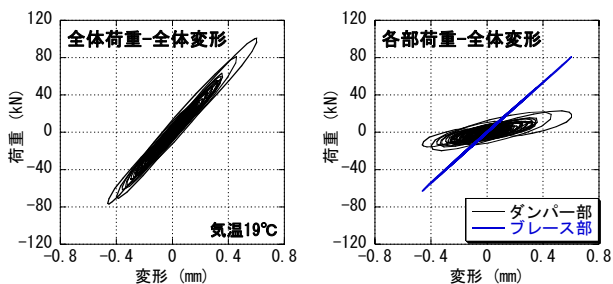


図-7 風応答波加振による履歴曲線 (アクリル系)
Load-deformation relationships (wind response loading)

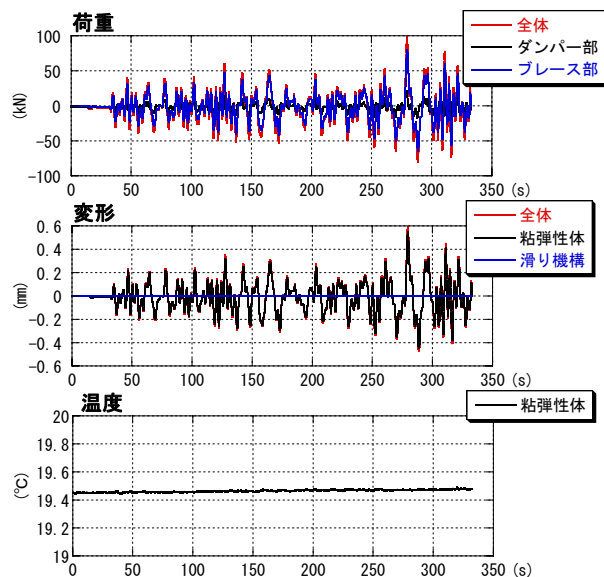


図-8 風応答波加振による時刻歴波形 (アクリル系)
Time history waveform (wind response loading)

3.3 加振結果より評価したダンパーの力学的性状

3.3.1 微小振幅における力学的特性

図-12 に正弦波 0.33Hz 加振 (3 サイクル目) より得られた試験体全体の微小振幅時履歴曲線を示す。図-13 に実験結果より評価した試験体各部の貯蔵剛性と等価減衰定数を示す。ジェン系粘弾性体の貯蔵剛性はアクリル系に比べて約 1.5 倍大きい²⁾ため、試験体全体の貯蔵剛性はアクリル系試験体に比べて若干大きくなっているが、等価減衰定数は同程度であることから、両試験体は同等のエネルギー吸収能力を有することがわかる。また、両試験体共に振幅依存性は小さく、振幅 0.1mm (粘弾性

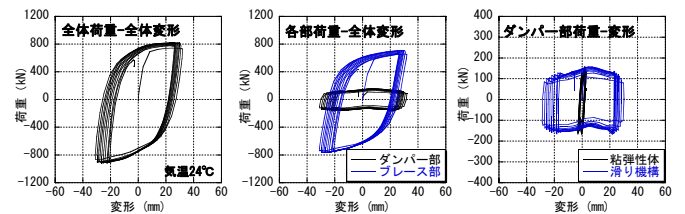


図-9 正弦波 30mm 加振による履歴曲線 (ジェン系)
Load-deformation relationships (sin loading : 30mm)

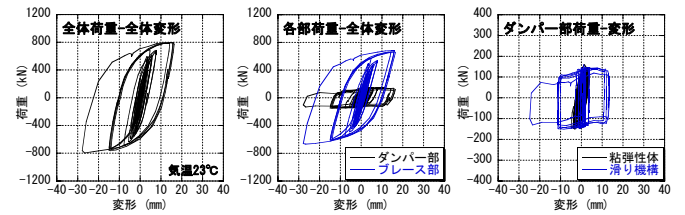


図-10 八戸応答波加振による履歴曲線 (アクリル系)
Load-deformation relationships (earthquake response loading)

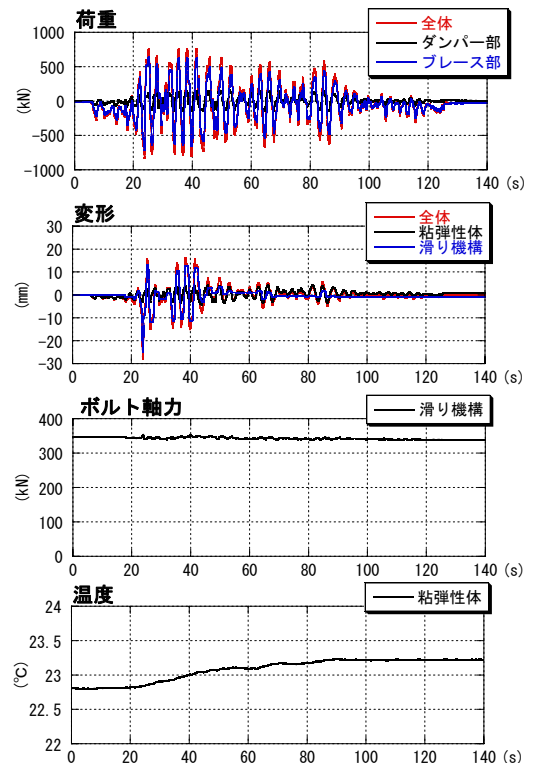


図-11 八戸応答波加振による時刻歴波形 (アクリル系)
Time history waveform (earthquake response loading)

体歪み 5%) の微小変形においても安定した剛性とエネルギー吸収能力を有することがわかる。なお、0.2mm 以下の微小振幅で等価減衰定数が若干大きくなる理由として、試験装置の摩擦の影響が考えられる。

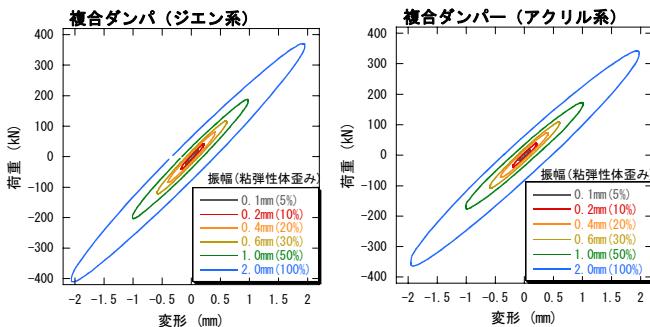


図-12 正弦波加振による履歴曲線 (加振振動数 0.33Hz)
Load-deformation relationships (sin wave loading)

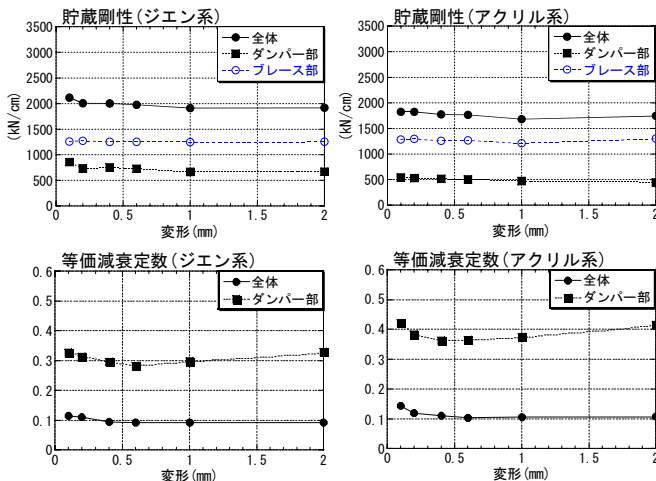
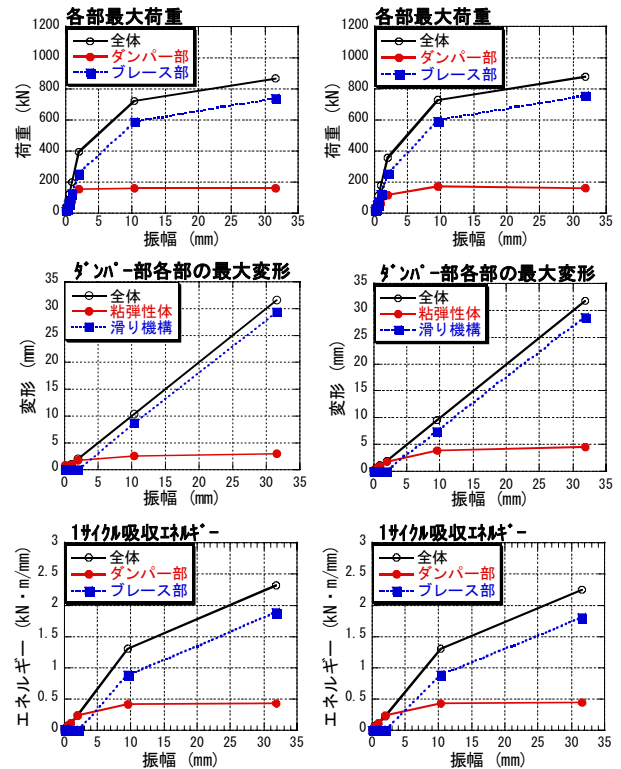


図-13 ダンパーの振幅依存性 (微小振幅時)
Amplitude dependence of Hybrid Brace Damper

3.3.2 入力レベルと各部の挙動

図-14 に正弦波 0.33Hz 加振時 (気温約 20℃) の加振振幅とジェン系、アクリル系試験体各部の最大荷重、最大変形、単位振幅当たりの 1 サイクル吸収エネルギーの関係を示す。両試験体とも振幅 2mm 以下の微小振幅加振では、ブレース部は弾性範囲内のためエネルギー吸収能力が無く、直列ダンパー部でエネルギー吸収が行われている。直列ダンパー部各部の最大変形図より、滑り機構は滑らず、粘弾性体のみが変形してエネルギーを吸収していることがわかる。一方、加振振幅 10mm、30mm の大振幅加振では、ブレース部は鋼材系履歴ダンパーとして機能するため、ブレース部のエネルギー吸収量が急激に増大している。直列ダンパー部の荷重は滑り機構によって一定値に制限されている。直列ダンパー部の変形は、加振振幅が大きくなるにつれて滑り機構の変形が支配的となり、粘弾性体の変形量がほぼ一定値に抑制されることがわかる。ジェン系に比べて剛性が低いため、ア

クリル系粘弾性体の変形量が若干大きくなっているが、限界ひずみ 500% (変形 10mm) に対して十分余裕がある。



(a) ジェン系試験体 (b) アクリル系試験体

図-14 加振振幅と各部の荷重、変形、吸収エネルギー
Load, deformation and absorbed energy of each parts

3.4 シミュレーション解析

3.4.1 解析モデル

図-15 にハイブリッドブレースダンパーの解析モデルを示す。ブレース部はバイリニアモデルとし、1 次剛性および降伏軸力は鋼材の引張試験結果を元に設定した。また、2 次剛性は 1 次剛性の 1/20 を仮定した。粘弾性ダンパーは材料の振動数依存特性を考慮するため Maxwell モデルと Voigt モデルを組み合わせた 6 要素モデルとした。Maxwell モデルと Voigt モデルを組み合わせた理由は、Maxwell モデルのみでは粘弾性ダンパーの低速度における特性 (静的剛性) が表現できず、滑りが生じた際の粘弾性ダンパーの挙動を再現できないからである。力学モデルの係数は、粘弾性ダンパー単独の試験体による歪み 100% のホワイトノイズ (0.1Hz~10Hz) 変位加振結果から評価した貯蔵弾性率、損失弾性率 (20℃) を用いて、非線形最小二乗法により決定している²⁾。滑り機構は剛塑性型の履歴特性を与えたバイリニアモデルとした。滑り荷重は摩擦材の摩擦係数 0.2 (平均面圧 10MPa) とボルト軸力 89kN×4 本の積から 142kN と設定した。

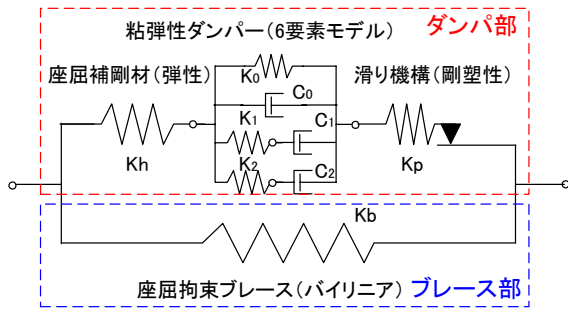


図-15 解析モデル
Analytical model

3.4.2 解析結果

実験結果と解析結果を比較し、解析モデルの有効性を検証する。図-16 に最大振幅 0.2mm、30mm の正弦波 (0.33Hz) 加振時のジェン系試験体各部の履歴曲線を比較して示す。解析結果は実験結果と良く対応しており、提案した解析モデルの妥当性を確認することができた。

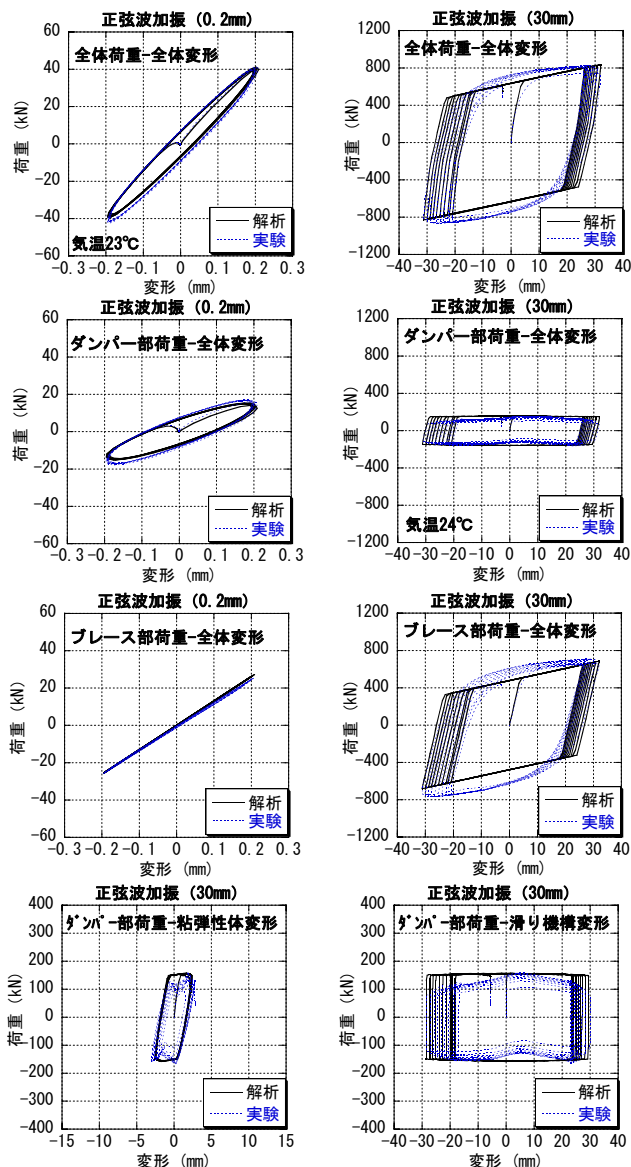


図-16 解析値と実験値の比較 (ジェン系試験体)
Comparison of the analytical results and experimental results

4. 建物の振動実験

4.1 建物概要

本報で紹介する実施例は、東京都内に建設された地上 9 階建て高さ約 40m の鉄骨造の事務所建築である。表-2 に建物概要、図-17 に建物外観パース、図-18 に構造概要図を示す。梁間方向は約 9m の 1 スパンで、桁行方向は両サイドに配したコアの内側は細柱を配して、採光面積の広い解放感に満ちた空間を構成している。

強風時の風揺れを低減して居住快適性を向上させるため、梁間方向のブレースには、「ハイブリッドブレースダンパー」を採用した。ダンパーは、平面的なバランスを考慮して、両サイドの 2 構面に 1 階～9 階の全層に 3 台ずつ (合計 27 台) 配置した。粘弾性ダンパーの形状寸法は、前述した実大試験体と同一である。写真-2 にハイブリッドブレースダンパーの設置状況を示す。一方、桁行方向のブレースには、従来型の座屈拘束ブレース「SHAPEUP-BRACE」をコア周りの 4 構面に配している。

ブレースとラーメンの剛性分担比は、桁行方向で 0.5～0.8、梁間方向で 0.25～0.40 である。建物の設計周期は両方向とも約 1.1 秒である。複素固有値解析により算出したハイブリッドブレースダンパーによる付加減衰は、温度 20℃の時で $\eta = 1.2\%$ である。

表-2 建物概要
Outline of the building

名称	東陽テクニカ 日本橋別館
竣工年月	2004年3月
用途	事務所
面積	建築面積339m ² 、延床面積3,226m ²
階数	地下1階、地上9階、塔屋1階
構造種別	地下部：SRC造、地上部：S造
最高高さ	39.3m



図-17 建物外観図
Perspective view

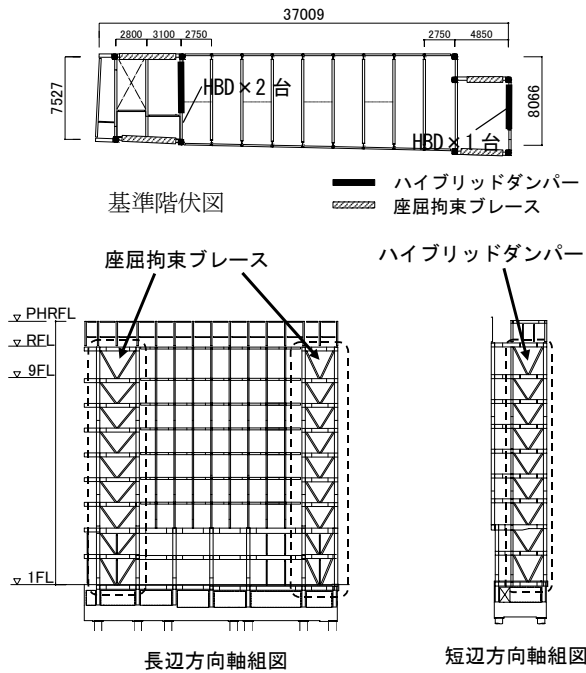


図-18 構造概要図
Figure of structural outline



写真-2 設置状況
Installation condition

4.2 実験概要

風揺れの微小振幅に対するダンパーの動作性と建物の風応答性能を評価する目的で、建物の振動実験を実施した。実験はダンパー設置完了時の2003年10月と竣工直前の2004年2月に実施した。前者の試験は、微小振幅におけるダンパーの動作状況を把握する目的で、後者の試験は、建物の風応答性能評価に必要となる建物の振動特性を評価する目的で実施した。

4.2.1 計測方法

図-19にセンサーの設置箇所を示す。3階ダンパーの粘弾性ダンパー部に変位計と歪みゲージ式荷重計を設置して履歴ループを測定し、その上下階床に設置した振動センサー(速度計)の相対速度から、ダンパー設置階の層間変形を算出した。また、振動センサーを9階床の中央および両端部に設置して建物の加速度を計測した。なお、竣工時試験においては、9階加速度のみを計測した。

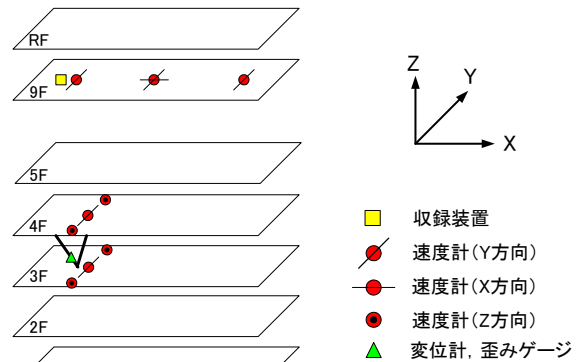


図-19 センサーの設置箇所
Sensor arrangement

4.2.2 加振方法

9階に人員数名を配置し、左右の体重移動により建物を水平方向に加振した。建物の揺れが所定の振幅に達した後、加振を停止して建物を自由振動させた。加振はY(短辺)方向の1次モードを対象とし、加振の振動数は1.1Hzを目標とした。加振レベルは再現期間1年の風揺れ(頂部加速度で 3cm/s^2 程度)を目標とした。

4.3 実験結果

4.3.1 建物振幅と粘弾性ダンパーの動作状況

図-20にダンパー設置完了時試験におけるY方向加振時の9階加速度と3階の層間変形および粘弾性ダンパー変形波形を示す。また、図-21に自由振動1周期毎に求めた3階の層間変形、粘弾性ダンパー軸変形、粘弾性ダンパー減衰力の最大値を9階の最大加速度値と比較して示す。 1cm/s^2 程度の微小な揺れに対してもダンパーには層間変形に比例した変形が生じており、ダンパーが有効に動作していることが確認できた。層間変形に対する粘弾性ダンパー軸変形の比率は約20%ある。なお、再現期間1年の強風時(頂部加速度 3cm/s^2)に生じる粘弾性ダンパーの軸変形および減衰力は、 0.015mm と 1.4kN である。図-22に粘弾性ダンパーの荷重-変形曲線を示す。ダンパーは 0.01mm 以下の微小振幅に対しても安定した履歴ループを描いていることが確認できた。

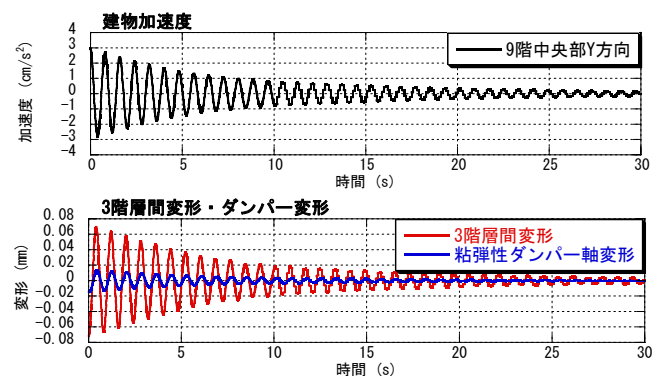


図-20 短辺方向の自由振動波形
Free vibration records

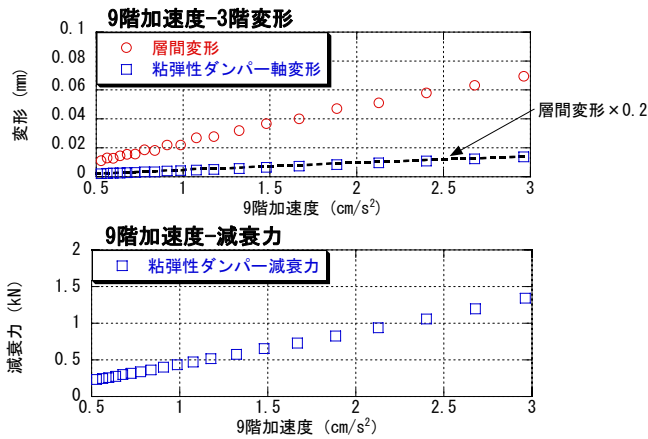


図-21 頂部加速度と粘弾性ダンパー動作状況
Working condition of the visco-elastic damper

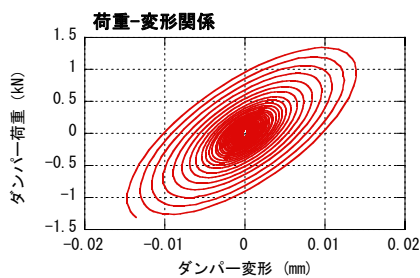


図-22 粘弾性ダンパーの荷重-変形関係
Load-deformation relationships

4.3.2 建物の振動特性

図-23 に竣工時試験における 9 階加速度の自由振動波形と対数減衰率の理論曲線のフィッティング結果を示す。波形より求めた固有振動数は 1.05Hz、減衰定数は 2.0% であった。

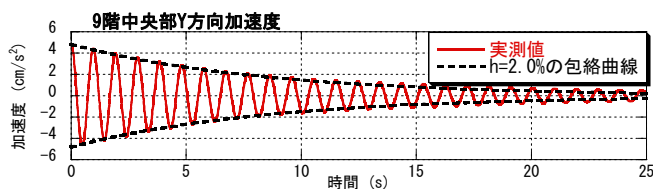


図-23 自由振動波形と対数減衰率
Free vibration record and fitting result

4.4 実験結果に基づく風応答性能評価

竣工時の振動試験で得られた建物の振動特性を元に作成した振動解析モデルに対して、1 年再現期待値風速 16.17m/s 時の居住性能検証解析を実施した。学会荷重指針の風力スペクトルに適合する年最大風速の模擬風力波形を作成し、多質点等価せん断モデルを用いて、風方向の風による短辺方向の時刻歴応答計算を行った。応答評価点は 9 階とした。図-24 に日本建築学会の居住性能評価指針³⁾の水平振動に関する性能評価基準グラフに応答値をプロットした結果を示す。粘弾性ダンパーのない場合（構造減衰 1.0%）に比べ最大応答加速度は 60%程

度に低減されている。居住性能は、目標性能であるランク III 以下を満足しており、ハイブリッドブレースダンパーの有効性を確認することができた。

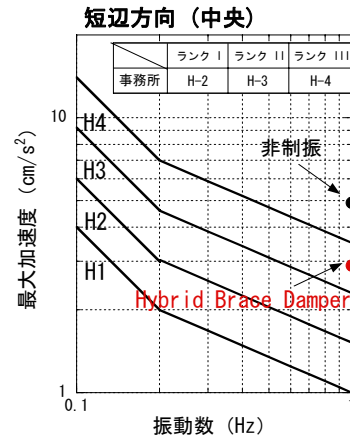


図-24 居住性能（1 年再現期待値風速）
Evaluation of habitability

5. まとめ

弾塑性ダンパーと粘弾性ダンパーを一体化したハイブリッドブレースダンパーの性能を実大試験体の動的載荷実験と建物の振動実験により確認した。このハイブリッドブレースダンパーを利用することにより、弾塑性ダンパー部による大地震時の構造安全性の確保とともに、粘弾性ダンパー部によって風応答振動を低減して居住性を向上させることが可能である。ハイブリッドブレースダンパーは従来の居住性改善用ダンパー（TMD等）と比較すると、余分な設置スペースが不要・維持管理コストが不要などの利点が挙げられる。今後は、超高層建物等、様々な構造形式への適用を展開してゆく予定である。

本研究開発に関して東京工業大学和田章教授からご指導を頂きました。実大試験体の動的実験では、神奈川大学建築学科大熊武司教授のご指導を頂き、実験施設を使用させて頂きました。昭和電線電纜㈱、住友 3M㈱、曙ブレーキ工業㈱の各社からは、試験体に用いた粘弾性体および摩擦材の素材特性データをご提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 成原弘之，辻田修，聲高裕治：座屈拘束ブレースに関する実験的研究（その1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.911-914，2000年
- 2) 欄木龍大，辻田修，成原弘之，高山正春，木村雄一，一色裕二：弾塑性・粘弾性複合ダンパーの開発（その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.761-762，2002 年
- 3) 日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説，1991 年