

ダンパーを柱に内蔵するアウトフレーム型制振補強工法に関する研究

A Study on Seismic Retrofit Method by Outer Frame Type of Column with Built-in Damper

泉澤 喬* 高橋 孝二*
 Takashi Izumizawa Koji Takahashi
 飯塚 信一**
 Shinichi Iizuka

要 約

本論文では、粘弾性ダンパーシステム（粘弾性ダンパーおよび軸力伝達機構から構成される）を柱に内蔵した場合のフレームおよびダンパーシステムの耐震性能を確認するため、ダンパーシステムを柱に内蔵した1層1スパンの実大フレームを対象とした静的載荷実験を行った。その結果、ダンパーシステムは所定の性能を示し、耐震性能を有することを確認した。また、実験を模擬する解析モデルを提案し、実験結果と比較することによりその妥当性について検証した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 水平載荷実験
- § 3. 軸力伝達機構の性能確認実験
- § 4. 解析モデルの妥当性の検証
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

本工法は、既存建物の外周部に粘弾性ダンパーシステム¹⁾を柱に内蔵する鉄骨フレームを設け、増設 RC スラブにより既存建物と接合させるアウトフレーム工法（本工法を Built-in Damper (BiD) フレーム工法と称す）である。アウトフレーム工法はアウトフレームの長期軸力や地震時の変動軸力をアウトフレーム柱で負担できるため躯体への負荷が小さく、開口部の採光や避難突入口を妨げることなく補強できることに特徴がある。尚、この粘弾性ダンパーシステムは、上述の軸力を負担する軸力伝達機構を有し、建物各階に生じるせん断変形を粘弾性ダンパーユニットに集中させることで、地震時のエネルギーを吸収する。また、本ダンパーシステムは、実大載荷試験によりその性能の確認およびダンパーシステムの履歴挙動を再現する解析モデルの提案がされている¹⁾。

本論文では、この粘弾性ダンパーシステムを柱に内蔵した1層1スパンの実大フレームを対象とした静的載荷実験を行い、フレームを含めたダンパーシステムの性能について確認するとともに、実験との比較により解析モデルの妥当性について検証を行った。

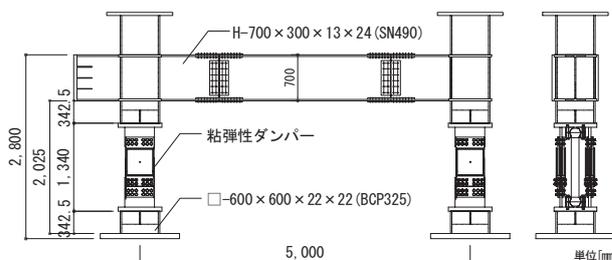


図-1 試験体形状

表-1 材料試験結果

	形状	降伏点耐力 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
柱	600□	336	514
梁	700H	357	523
ダイヤフラム	t=32	377	528

§ 2. 水平載荷実験

2-1 試験体概要

試験体形状を図-1に示す。形状は想定階高 2800 mm およびスパン 5000 mm の1層1スパンの実大平面フレームである。柱は□-600×600×22 (BCP325) の鋼管柱、梁は H-700×300×13×24 (SN490) を用いる。ダンパーシステムは図-1に示すように柱中央位置に配置され、上下のプレート (t=60) を介して柱と接合されている。表-1に柱および梁の材料試験結果を示す。粘弾性ダンパーの詳細図を図-2に示す。粘弾性体には厚さ 15 mm の高減衰ゴムを使用し、軸力伝達機構の高さは回転軸(拳骨部)の芯-芯間長さで 1050 mm とし、上下プレートで一体化させた構成となっている。上下プレートには軸力をスムーズに伝達させるため、十字型の補強リブが取付いている。

* 建築設計部構造課

** 技術研究所

2-2 実験方法

加力装置の概要を図-3、図-4に示す。水平力は載荷能力2000kNの静的アクチュエータ（ストローク±300mm）による正負交番漸増繰返し载荷とし、各柱の上部に設置した3000kN油圧ジャッキにより、初期軸力として圧縮軸力および引張軸力を作用させた。圧縮軸力は図-3のように柱の上に油圧ジャッキを設置し、上方の加力フレームで反力を取ることで柱に圧縮力を与え、引張軸力は図-4のように加力フレーム梁の上にジャッキを設置し、柱1本あたり4本のPC鋼棒を通して引張力を柱に与えた。ダンパーシステム部の計測計画の概要を図-5に示す。変位については粘弾性ダンパーシステム上部・下部プレートの水平変位、および鉛直変位、粘弾性ダンパーの水平変位（ダンパー変位）を計測した。制御対象変位となる層間変位は梁のスパン中央部においてマグネスケールを用いて計測した。また、熱電対を用いて粘弾性体の内部温度を計測した。ひずみについては、柱・梁の材端、軸力伝達機構の中央・上下端、パネル部分にひずみゲージを添付して計測した。

加力ケース一覧を表-2に示す。試験体の各柱にはダンパーシステムの圧縮側の長期許容鉛直荷重にあたる-2000kNを限度とし、圧縮軸力3ケース、引張軸力3ケースの初期軸力を作用させた。HC-0およびHT-0は実験の安全上、それぞれ-100kN、100kNの軸力を作用させて水平载荷を行った。

加力スケジュールを図-6に示す。加力スケジュールは制御対象変位を層間変形角として1/500~1/75まで加力した。層間変形角は試験体の階高を2800mmとして求め、各変形角において圧縮軸力ケースでは3ループずつ、引張軸力ケースでは2ループずつ加力した。

2-3 実験結果

層せん断力-層間変位関係およびせん断力-ダンパー変位関係を図-7、図-8に示す。層せん断力はアクチュエータの値、せん断力は層せん断力の1/2の値を用いる。尚、図-7、図-8のHT-50の実験結果は他の加力ケースと比べて小さなループを示しているが、これは加力治具の制約上、大きな引張軸力をかけられず、加力を層間変形角1/100までとしたためである。

図-7より、図中には载荷開始から終了までのダンパー平均温度も示す。図より、層せん断力-層間変位関係に軸力の違いによる有意な差は見られない。1ループ目の荷重が2ループ目、3ループ目の荷重と比べてわずかに大きな値を示すが、同じ層間変位においてループ形状に有意な差は見られない。HC-0が他の加力ケースに比べ各サイクルとも大きな荷重を示しているが、これは高減衰ゴムの特性で、初期载荷に見られる荷重の増大と考えられる。（※高減衰ゴムは製造時に内部残留する応力や分子間の絡み等により、初期载荷時は荷重が増大すると考えられている。²⁾）

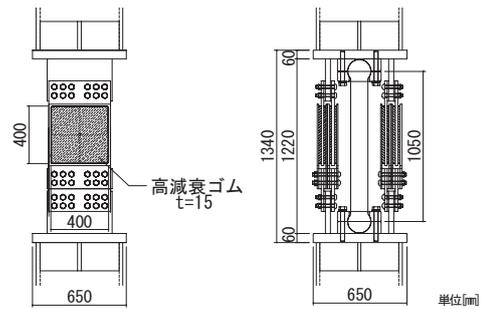


図-2 粘弾性ダンパー詳細図

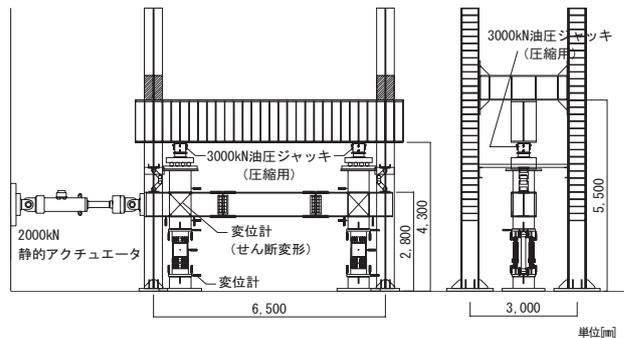


図-3 加力装置（圧縮軸力）

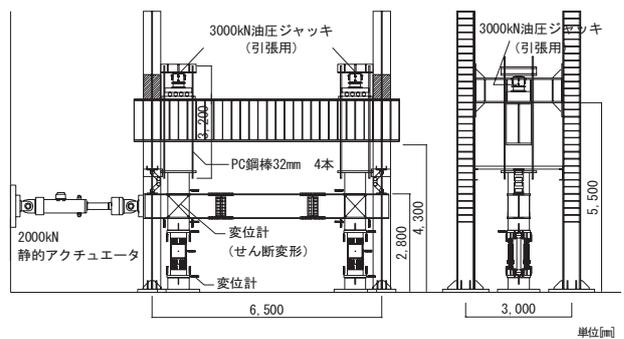


図-4 加力装置（引張軸力）

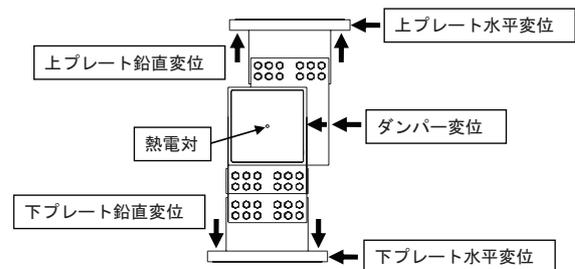


図-5 ダンパーシステム部の計測計画

表-2 加力ケース一覧

加力ケース	圧縮軸力	加力ケース	引張軸力
HC-0	0 kN (-100kN)	HT-0	0 kN (100kN)
HC-100	-1000 kN	HT-30	300 kN
HC-200	-2000 kN	HT-50	500 kN

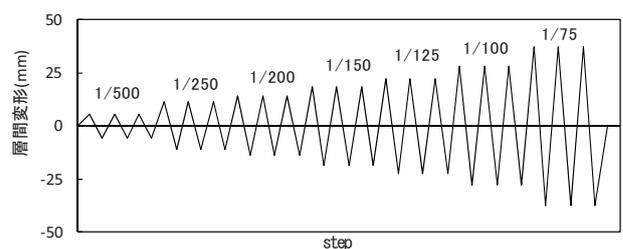


図-6 加力スケジュール

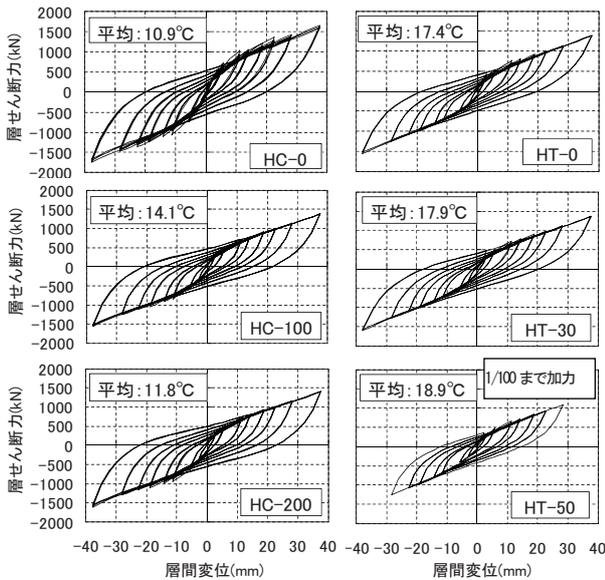


図-7 層せん断力-層間変位関係

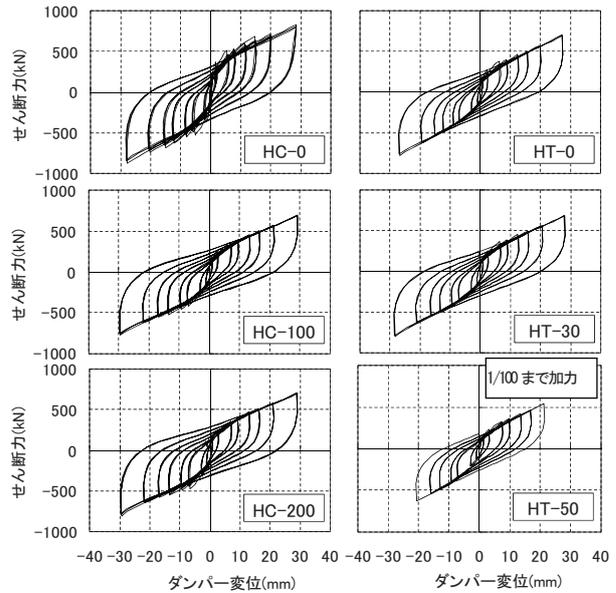


図-8 せん断力-ダンパー変位関係

図-8より、前述のようにHC-0には初期荷荷に見られる荷重の増大が見られるが、全ケースにおいて有意な差は見られない。図-7の層間変位と比較するとダンパー変位はわずかに小さな値となっている。これは水平荷荷によってダンパーユニットに回転が生じたため、粘弾性体のせん断変形が層間変位と比べて小さくなったと考えられる。層間変位に対するダンパー変位の割合は層間変形角 1/500, 1/150, 1/75 でそれぞれ約 0.50, 0.70, 0.77 と、層間変位が増加する程層間変位に対するダンパー変位の割合は大きくなる。

粘弾性ダンパーのせん断ひずみ（粘弾性体の厚さ 15 mm に対するダンパー変位の割合）を表-3に示す。ダンパーのせん断ひずみは設計クライテリアの層間変形角 1/150 で約 90%，層間変形角 1/100 で約 140%を示す。

実験結果から算出した等価剛性 (K_{eq}) および等価粘性減衰定数 (H_{eq}) とダンパーのせん断ひずみの関係を図-9, 図-10にそれぞれ示す。等価剛性としてはせん断力-ダンパー変位関係上で最大変位点と原点を結ぶ直線の勾配を用いた。等価粘性減衰定数は Biggs の略算法（モード歪エネルギー法）より求めた³⁾。尚、等価剛性と等価粘性減衰定数の算出には各振幅の 3 ループ目（引張軸力ケースでは 2 ループ目）の実験結果を用いており、

温度依存性を直線近似して算出した 20°C での換算値としている。また、図中には実大静的荷荷実験結果の近似曲線と、粘弾性ダンパーの性能評価試験結果⁴⁾の近似曲線もあわせて示している。性能評価試験はダンパー温度 20°C, 周波数 0.1 Hz の正弦波を入力波とした動的実験である。図-9より、HC-0は他の加力ケースよりやや剛性が高くなっているがどの加力ケースでも概ね同様の傾向を示している。ひずみが 0%~100%の間では、ひずみが増大する程に等価剛性は低下するが、ひずみ 100%以降では 25 kN/mm~30 kN/mm 程度と概ね一定の値を示している。また、HC-0の場合にはひずみが微小な領域では

表-3 ダンパーのせん断ひずみ
(a) 圧縮軸力ケース

層間変形角 (rad)	1/500	1/250	1/200	1/150	1/125	1/100	1/75
せん断ひずみ (%)	19	48	63	89	111	143	194

(b) 引張軸力ケース

層間変形角 (rad)	1/500	1/250	1/200	1/150	1/125	1/100	1/75
せん断ひずみ (%)	19	47	62	86	108	138	187

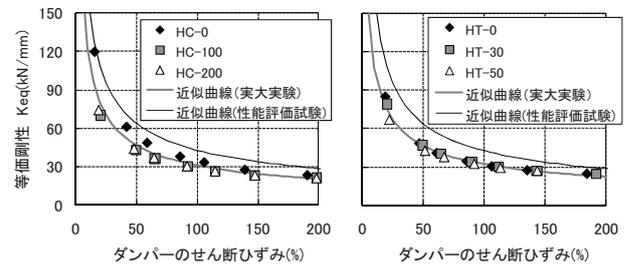


図-9 等価剛性 (K_{eq})

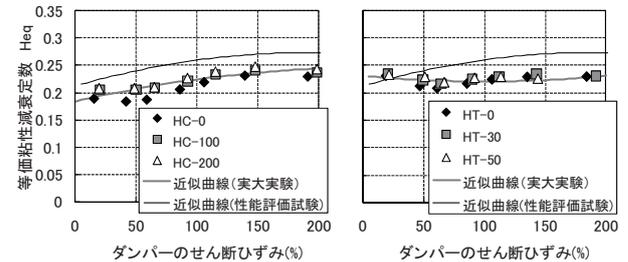


図-10 等価粘性減衰定数 (H_{eq})

HC-100, HC-200より比較的高い等価剛性値を示すが、ひずみ 100%以降の領域では全ての加力ケースで概ね同様な値を示している。これはHC-0は最初に行った実験であり、粘弾性体が加力を受けていないため繰返し劣化の影響が少なく、他の加力ケースと比較して剛性が高くなったためと考えられる。また、図-10より、等価粘性減衰定数は圧縮軸力ケース、引張軸力ケースにかかわらず全てのひずみ領域で 0.2~0.25 程度と概ね一定の値を示しており、等価剛性、等価粘性減衰定数とも軸力の違い

による大きな差は見られず、性能評価試験から得られた近似曲線よりも小さな傾向を示す。これは参考文献2)での実験結果(※粘弾性体の載荷試験(周波数0.001 Hzと0.1 Hz)が行われており、比較的載荷速度の速い0.1 Hzの試験体の履歴ループの傾きがより大きく高剛性となり、履歴の膨らみも大きくエネルギー吸収が大きくなることが示されている)においても同様の検証がなされており、今回用いた高減衰ゴムについても同様な振動数依存性を有しているため、等価剛性・等価粘性減衰定数ともに実大静的載荷実験の結果が性能評価試験結果より小さな値になったと考えられる。

§3. 軸力伝達機構の性能確認実験

3-1 試験体概要

試験体形状を図-11に示す。試験体は図-1の水平載荷実験で用いた試験体と同じだが、軸力伝達機構の性能を確認するため、両側柱に取付いている粘弾性ダンパーユニットを取り外し、軸力伝達機構のみで水平力を負担するようにした。

3-2 実験方法

加力装置および計測計画についても基本的には図-3、図-4および図-5の水平載荷実験と同じである。

加力ケース一覧を表-4に示す。試験体の各柱には圧縮軸力3ケース、引張軸力3ケースの初期軸力を作用させた。加力スケジュールは水平変位を±30 mmで2ループの振幅を与えた。VC-0およびVT-0は実験の安全上、それぞれ-100 kN, 100 kNの軸力を作用させて水平載荷を行った。

3-3 実験結果

鉛直変位-水平変位関係を図-12に示す。鉛直変位はダンパーシステム上下プレートの鉛直変位の差分、水平変位はダンパーシステム上下プレートの水平変位の差分を用いる。図より、実験では水平変位が正負両側に振幅すると鉛直変位が負側に増加している。これは軸力伝達機構の幾何学的変形挙動により、軸力伝達機構が回転することで鉛直変位が負側に増加したと考えられる。軸力伝達機構の回転の概要を図-13に示す。軸力伝達機構は両端が球状となっているため、水平変形が生じたときに軸力伝達機構の長さを半径、軸力伝達機構の下端を中心として回転する円弧を描き、このときに鉛直変位が負側に増加したと考えられる。図-12中には式(1)で算出した円弧も示しており、VC-150と一致している。VT-50については円弧と若干の差が見られるが、これはVT-50の場合軸力伝達機構が上部に引張られているため、鉛直変位の差分が小さくなったと考えられる。

軸力-水平変位関係を図-14に示す。図中には軸力値として軸力伝達機構に貼付したひずみゲージより算出し

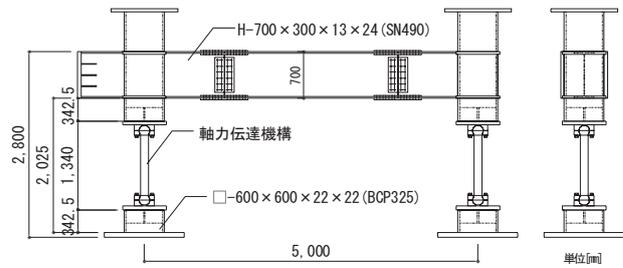


図-11 試験体形状

表-4 加力ケース一覧

加力ケース	圧縮軸力	加力ケース	引張軸力
VC-0	0 kN (-100 kN)	VT-0	0 kN (100 kN)
VC-50	-500 kN	VT-30	300 kN
VC-100	-1000 kN	VT-50	500 kN

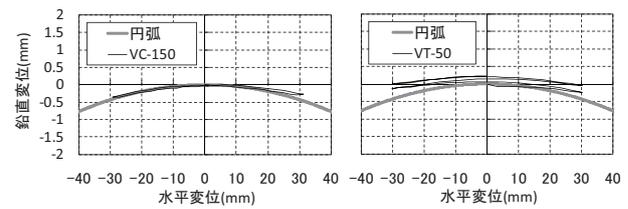


図-12 鉛直変位-水平変位関係

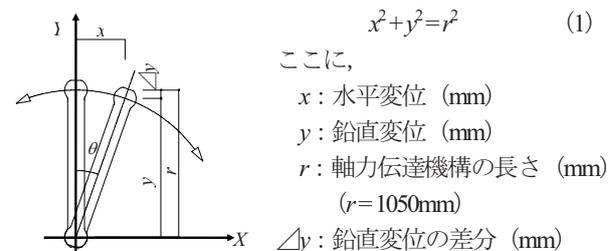


図-13 軸力伝達機構の回転

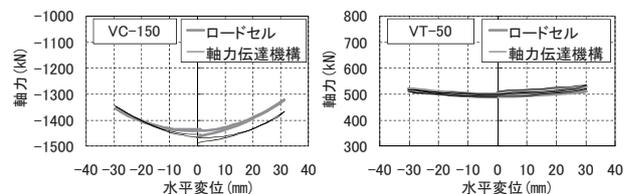
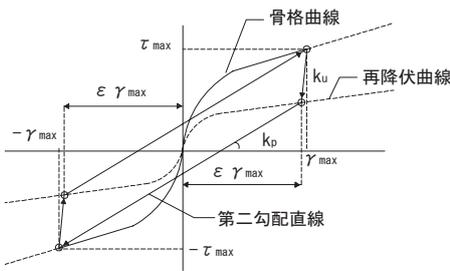
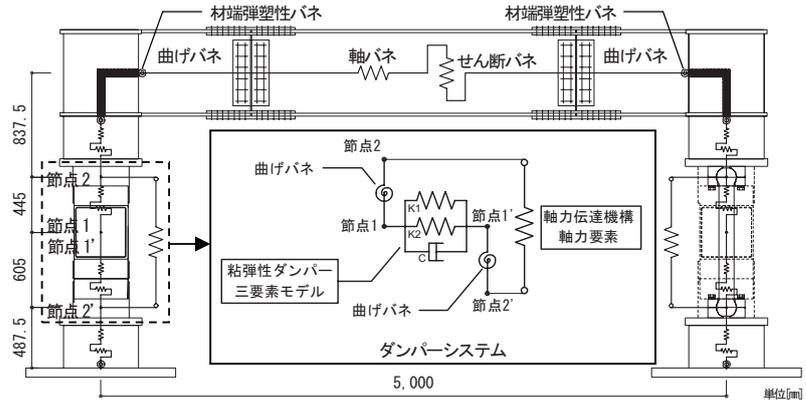


図-14 軸力-水平変位関係

た軸力と、柱上部に設置したロードセルから得た値の2つを重ねている。また、軸力負側は圧縮軸力、正側は引張軸力を表している。VC-150において水平変位正側で軸力伝達機構とロードセルの値に若干の差が見られるが全体的に軸力伝達機構とロードセル値は一致しており、軸力伝達機構は軸力を負担できている。水平変位が正負両側に振幅すると軸力が減少しているが、これは鉛直変位-水平変位関係でも述べたように、軸力伝達機構が回転することで鉛直変位が負側に増加し、柱上部に設置してある油圧ジャッキの荷重が抜けたためと考えられる。引張軸力を与えているVT-50についてもその傾向が見られるものの、軸力の変動は圧縮軸力を与えているVC-150と比べて小さい。これは引張軸力では軸力伝達機構が上部に引張られているため、鉛直変位の負側への増加分が小さく軸力の変動もさほど見られないと考えられる。



図一15 弾塑性要素の履歴特性



図一16 実験フレーム解析モデル

表一4 ダンパー温度

	HC-0	HC-200	HT-30
ダンパー温度(℃)	10.9	11.8	17.9

§4. 解析モデルの妥当性の検証

4-1 解析モデルおよび解析緒元

粘弾性ダンパーシステムの解析モデルは、水平方向の粘弾性ダンパーユニットの水平方向バネと軸力伝達機構の軸方向バネを配置した解析モデルである。水平方向バネは、振幅や速度が連続的に変化する非定常荷重においても精度よく復元力を模擬するため、谷等⁵⁾が提案した変位に依存する弾塑性要素と弾性要素、速度に依存する粘性要素(ダッシュポット)を並列配置した三要素モデルで定義されている。尚、本論文での解析モデルの妥当性については、実大フレームに粘弾性ダンパーシステムを組み込んだ場合の静的解析を対象としており、粘性要素を考慮せずに実験値と解析値の比較を行う。弾塑性要素の履歴特性を図一15に示す。骨格曲線上の最大点から再降伏曲線まで除荷すると、反対側の最大点を指向して直線上を再載荷する。除荷後の再降伏曲線は、骨格曲線と比例するように設定する。過去の最大せん断ひずみを超えない除荷と再載荷はノーマルバイリニア復元力特性を描く。その他、履歴ルール等の詳細は参考文献1)を参照されたい。

粘弾性ダンパーシステムを柱に内蔵した1層1スパンの実大フレームの解析モデルを図一16に示す。ダンパーシステムは上下柱の間に組み込まれ、粘弾性ダンパーユニットと軸力伝達機構を個々にモデル化した要素を配置する。ダンパーシステムの上下節点位置である節点2および節点2'は軸力伝達機構の上下端部にある回転軸(拳骨部)の芯-芯間長さ(1050 mm)に設ける。粘弾性ダンパーの水平バネである三要素モデルは、節点2および節点2'から曲げバネを介して、ダンパーシステムの中央位置に同一座標として設けた節点1-節点1'間に配置する。これは、ダンパーユニットの水平変形挙動は、実大フレームの静的荷重実験で明らかになったように、水平変形と同時にわずかに回転変形する。そのため、上下プレートの水平変形=ダンパー変形の関係にはならない。そこで、節点1-節点2および節点1'-節点2'間に曲げバネを設け、ダンパーユニットの回転変形を表現できる

ようにした。ここで、バネに用いる曲げ剛性Iは実験から得られた値を用いる。また、節点1と節点1'はモーメントのみ伝達するように回転成分は従属させる。柱・梁ともビーム要素でモデル化し、パネルゾーンには剛域を設ける。尚、本解析モデルではトラス要素に生じる水平分力を架構全体の層せん断力に加えることでP-Δ効果を考慮している。

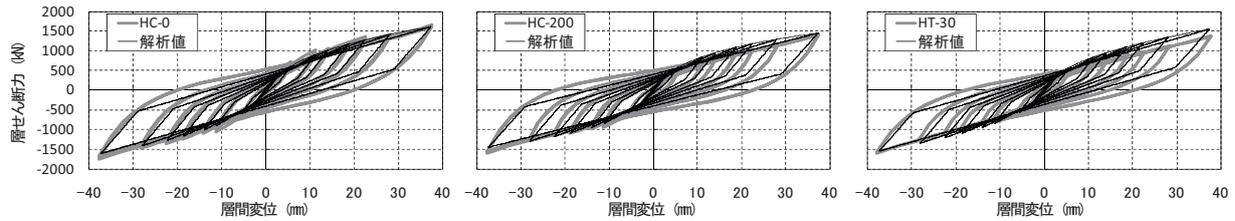
解析ケースは3ケースとし、圧縮軸力時の水平荷重実験HC-0、HC-200と、引張軸力時の水平荷重実験HT-30を対象とした。加力スケジュールは実験と同様に図一6に示すように、層間変形角として1/500~1/75まで3ループずつとし、上部両節点に強制変位を与えて解析した。ダンパー温度は表一5のようにそれぞれ実験時の平均ダンパー温度に合わせて解析した。

4-2 実験結果と解析結果の比較

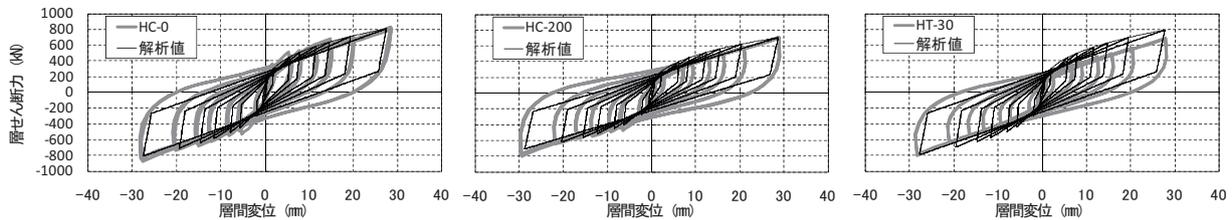
各加力ケースにおける層せん断力-層間変位関係の実験値と解析値を図一17に示す。各加力ケースとも変形が大きい場合、解析の履歴ループの大きさが実験に比べて小さい傾向が見られるが、各ループの最大変位における層せん断力は概ね一致している。HC-200とHT-30において、実験の正側と負側で荷重値に違いが見られるのは、各加力ケース連続して荷重を開始した時点で粘弾性体の原点復帰性が不足していたのが原因と考えられる。

各加力ケースにおけるせん断力-ダンパー変位関係の実験値と解析値を図一18に示す。各加力ケースとも変形が大きい場合、解析の履歴ループの大きさが実験に比べて小さい傾向が見られるが、各ループの最大変位におけるせん断力は概ね一致している。HC-200とHT-30において実験の正側と負側で荷重値に違いがあるが、これは図一17の層せん断力-層間変位関係で記述した理由と同じである。

HC-200におけるせん断力-ダンパー変位関係のエネルギー吸収量の実験値と解析値の比較を図一19に示す。エネルギー吸収量は、各層間変位における3ループ目の



図一17 層せん断力-層間変位関係



図一18 せん断力-ダンパー変位関係

せん断力-ダンパー変位関係の履歴ループのエネルギー吸収量である。層間変形角の増大に伴うエネルギー吸収量が增大する割合は、解析結果と実験結果は同様の傾向を示している。

§5. まとめ

本論文では、軸力伝達機構を有する粘弾性ダンパーシステムを柱に内蔵した1層1スパンの実大フレームを対象とした静的荷重実験を行い、実大フレームの影響を考慮した粘弾性ダンパーおよび軸力伝達機構の力学的挙動を確認した。また、静的荷重実験を模擬した解析モデルの妥当性について検証を行い、以下の結果を得た。

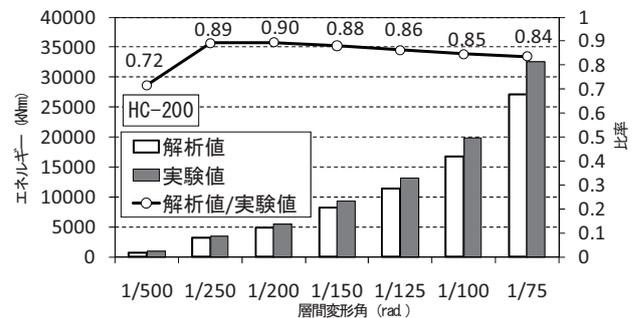
1) 水平荷重実験より、本ダンパーシステムの復元力特性は鉛直荷重の大きさや圧縮軸力・引張軸力にかかわらず履歴形状に有意な差は見られなかった。

2) 水平荷重実験より、本ダンパーシステムのダンパー変位は、ダンパーユニットに回転が生じたため層間変位に対してダンパー変位が小さくなった。その割合は層間変形角 1/500, 1/150, 1/75 でそれぞれ 0.50, 0.70, 0.77 となった。

3) 水平荷重実験より、本ダンパーシステムの等価剛性および等価粘性減衰定数は、軸力の違いによる有意な差は見られなかった。また、今回の実験による等価剛性および等価粘性減衰定数は、参考文献3)の粘弾性ダンパーの性能評価試験と比べて荷重速度の違いにより小さい値となった。

4) 軸力伝達機構の性能確認実験より、水平変位によって軸力伝達機構が回転し鉛直負方向に変位が生じるが、ロードセルの値とひずみから算出した軸力伝達機構の軸力値が概ね一致したことから、軸力伝達機構が軸力を負担できていることを確認できた。

5) 静的荷重実験を模擬した解析より、層せん断力-層間変位関係、せん断力-ダンパー変位関係、エネルギー吸収量について解析値と実験値は概ね一致したことから、



図一19 エネルギー吸収量

提案されている解析モデルの妥当性を確認できた。

謝辞：本技術の開発にあたり、構造計画研究所 山下忠道氏、梁川幸盛氏および住友ゴム工業 田中和宏氏のご協力を頂きました。ここに記して御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 山下忠道, 川端淳, 二宮正行, 犬伏徹志, 田中和宏, 服部学: 軸力伝達機構を有する粘弾性ダンパーシステムを用いた工法開発に関する研究 (その1. 粘弾性ダンパーシステムに対する二軸荷重試験の結果), 日本建築学会技術報告集, 第37号, 2011.10.
- 2) 笠井和彦, 西澤恵二, 大木洋司, 田中克往, 田中和宏, 西本晃治, 山崎久雄: 制振用高硬度ゴムの静的・動的荷重実験と時刻歴解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第662号, pp.785-794, 2011.4.
- 3) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 第2版, 森北出版株式会社, 2004.10.
- 4) 建築技術性能証明評価概要報告書: 「超高減衰型粘弾性ダンパーシステム (改定)」, SRI ハイブリッド株式会社, 日本建築総合試験所, 2009.5.
- 5) 谷翼, 辻聖晃, 吉富信太, 竹脇出, 松本達治: 高硬度ゴム粘弾性体の極微小変形から大変形までのひずみ・振動数依存性のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第629号, pp.1079-1086, 2008.7.