

# 長尺型制震ブレースの開発

岸本 剛\* 岡 靖弘\*\*  
安井健治\* 高橋道弘\*

## 1. まえがき

近年、建築物の架構（柱梁フレーム）内に制震ダンパーを設置して地震動や風などの外乱に対する構造物の挙動を制御する研究が数多く行われている。制震ダンパーには極低降伏点鋼を利用した変位依存型（弾塑性）ダンパーや粘性体の抵抗力を利用した速度依存型ダンパーなどがあり、これらは一般に架構内の柱梁接合部にダンパーとブレースを一体化した制震ブレースとして使用される例が多い。また、今後建物の高層化、大スパン化に伴い、制震ブレースの長さは通常の使用形態より更に長くなる（長尺化する）と考えられる。しかし、制震ブレースを長尺化することによる構造性能への影響については現状では不明な点が多い。

そのため図-1に示す制震ブレースを通常の使用より長くした長尺型制震ブレースの構造性能を確認するため要素実験、接合部実験、架構実験を行った。要素実験においては、ダンパー単体及びブレース付きの特性、長尺とした場合の面外変形等の影響、ピン接合部の挙動等を把握した。接合部実験においては制震ブレースの取り付くガセットプレートの補強方法の妥当性を検証した。また、架構実験においては架構に組み込んだ制震ブレースの挙動、架構が地震時に面外変形を受けたときの性能を確認した。なお、長尺型制震ブレースを構成するダンパーには軟塑性体の流動抵抗性を利用した速度依存型のビンガムダンパーを採用した。図-2にビンガムダンパーの形状、特性を示す。ビンガムダンパーは減衰力が速度の0.1乗に比例するため、減衰力がある速度までは急激に増加しそれ以上の速度では変化が緩やかになる特性がある。

実験は加振機の性能を考慮し実建物への使用が予定されている架構の1/2縮小サイズにて実施した。各種実験により制震ブレースを長尺型とした場合の性能、架構に組み込んだ際の性能が把握できた。また、解析モデルの適用妥当性が検証された。以下にその概要を報告する。

## 2. 要素実験

### 2.1 実験概要

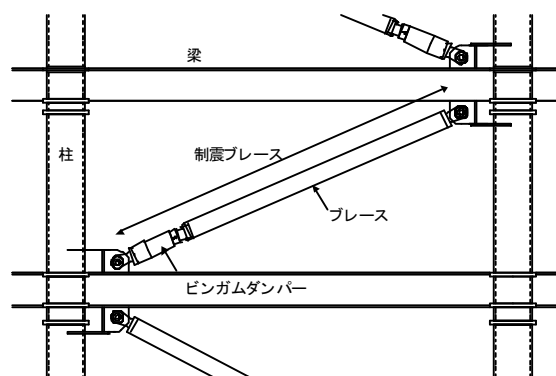


図-1 長尺型制震ブレース

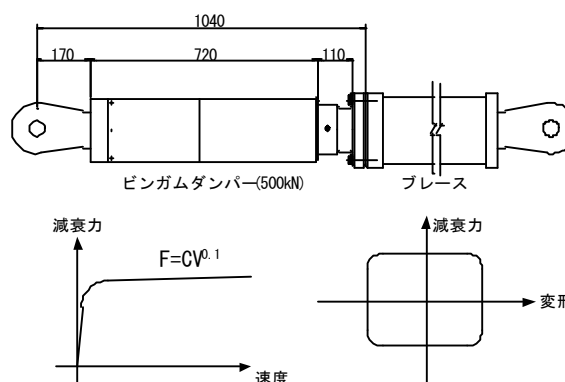


図-2 ビンガムダンパー形状及び特性

表-1 ビンガムダンパー仕様

ダンパー	300kN	500kN	備考
減衰係数(kN/cm/s)	218.0	363.4	F=CV <sup>0.1</sup> 速度 20cm/s 時
設計減衰力(kN)	294	490	
ストローク(mm)	±100	±100	
シリンダー直径(mm)	155	195	

表-2 実験ケース（要素実験）

試験ケース	ビンガムダンパー	ブレース		備考
		長さ(mm)	部材	
1	500kN	-	-	単体試験
2	500kN	2819	φ216*8.2	標準長
3	500kN	4749	φ216*5.8	1.5倍長
4	300kN	-	-	単体試験
5	300kN	2819	φ216*8.2	標準長

\*耐震研究室 \*\*東京支社建築設計部

ア. 試験体

要素実験に使用したビンガムダンパーの設計仕様を表-1に示す。設計により建物には1500, 2000kNの減衰力を持つビンガムダンパーを配置する必要がある結果を得た。そのため、実験で使用したダンパーは架構実験における縮尺を考慮し300, 500kNの減衰力を有するものとした。実験ケースを表-2に示す。実験はダンパー単体とダンパーにブレースを取り付けた制震ブレース試験体で行った。制震ブレースにおけるブレースの長さは1/2縮小サイズの架構に組み込む長さを標準とし、長さによる影響を確認するため500kNダンパーにてブレース長さを標準の1.5倍とした実験も行った。

イ. 加振方法・加振パターン

加振方法を図-3に示す。加振は反力壁に取り付けた1000kN加振機によって行い、先端にダンパーの軸方向以外の変形を拘束する2方向拘束スライド装置を設置した。その2方向拘束スライド装置と反力台の間に制震ブレースを設置し実験を行った。なお、制震ブレース両端の接合部は建物に配置する際に使用されるユニバーサルジョイントにて取り付けている。

加振は変位制御とし、ダンパーに与える速度をパラメータとした正弦波加振と地震波加振の2タイプで実施した。加振パターンを表-3に、加振波形例を図-4に示す。正弦波加振は加振周波数1.0, 2.0Hzとし、波数は全体で16サイクルとし最初と最後に3サイクルずつにテーパーを設定し、加振時の急加振、急停止を回避した。各試験体とも正弦波加振により、各試験パターンにおける減衰力-変位(速度)関係を、地震波加振により地震時の性能を把握した。

2.2 実験結果及び考察

ア. 減衰力-速度関係

各ダンパーに標準長ブレースを取り付けた試験体の正弦波加振時の減衰力と速度の関係を●印で図-5に示す。なお、同図にはビンガムダンパーの設計性能特性とその±10%を併記した。速度が1.2cm/s以下の微小速度時には、接合部の変位(ピン部の変形、ガタ)の影響のためわずかではあるが設計性能を下回ったが、それ以上では設計性能通りの減衰力を示し中小地震を含め地震時においては問題のないレベルであることが確認できた。

500kNダンパーに標準長ブレースを取り付けた試験体の各速度における正弦波加振時の減衰力と変形関係を図-6に示す。変位はダンパー、ブレース及び両端ピンジョイントを含んだ全変位で示す。併せて同図には減衰要素とバネ要素を直列に連結したMaxwellモデルにより算出した解析値も併記している。Maxwellモデルのバネ要素はダンパー圧縮剛性(Kd)、ブレース軸剛性(Kb)及び接合部剛性(Ks)を直列にしたモデル( $1/K = 1/Kd + 1/Kb + 1/Ks$ )で評価した。

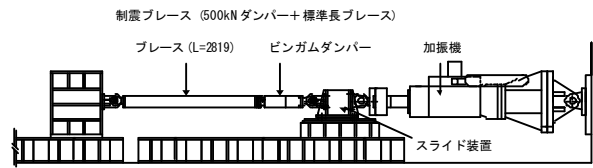


図-3 要素実験加振方法

表-3 加振パターン

	加振レベル
正弦波加振	0.3, 0.6, 1.2, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, 40.0 cm/s (1.0, 2.0Hz)
地震波加振	El-Centro NS 50cm/s BCJ-L1, 2 入力時床応答波

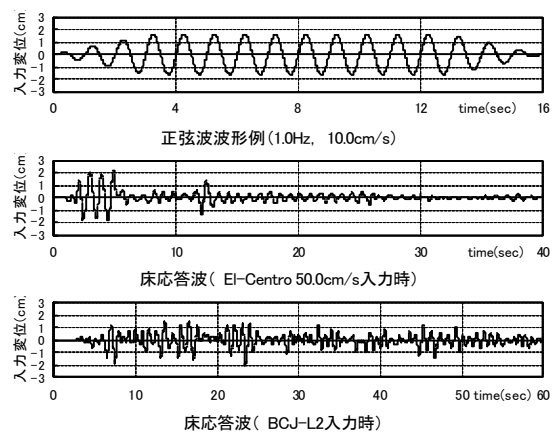


図-4 加振波形

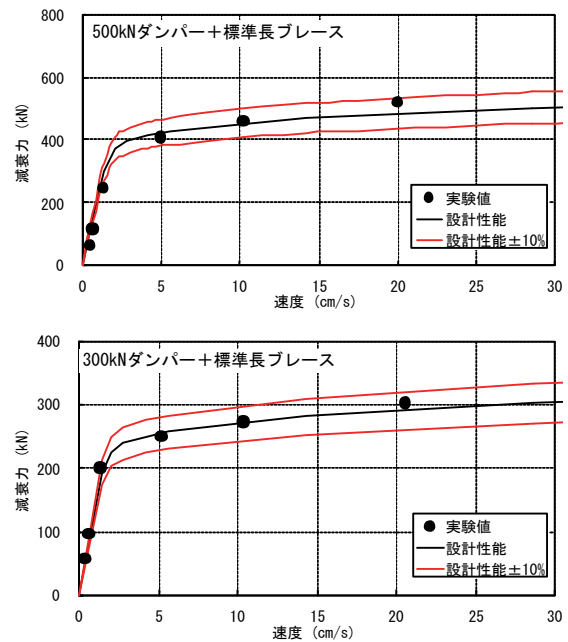
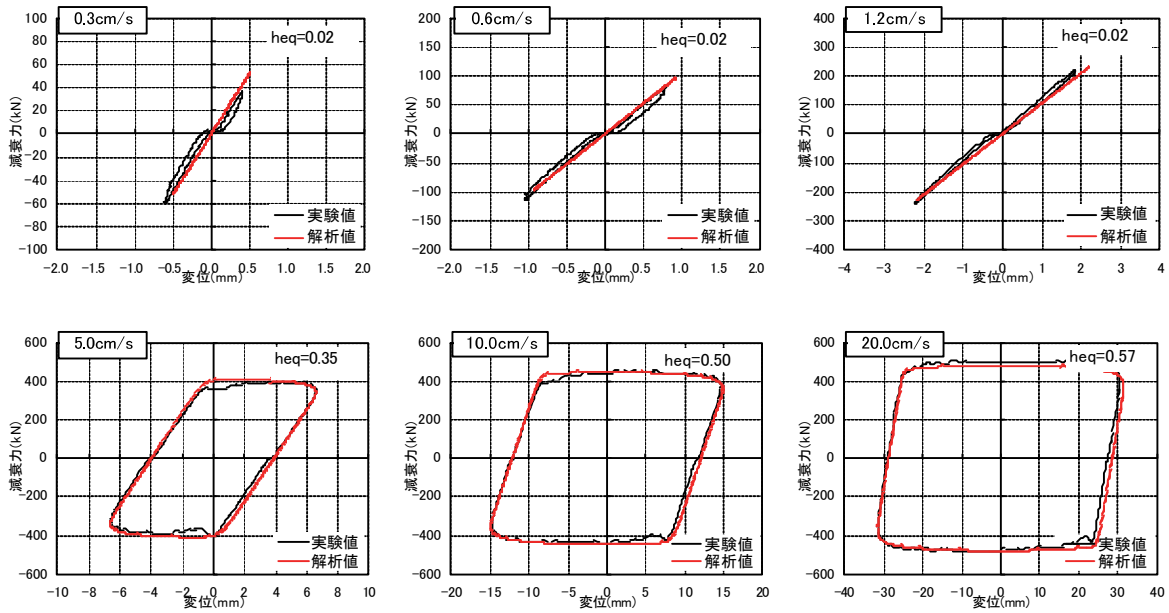


図-5 減衰力-速度関係



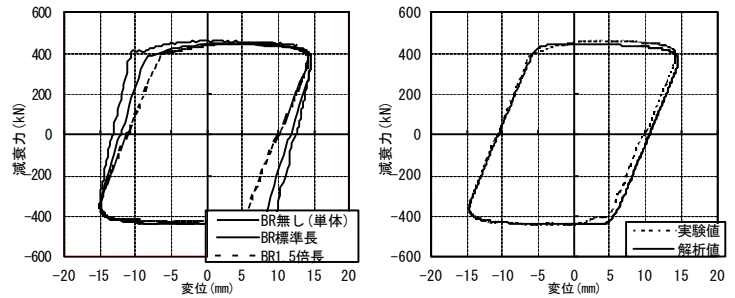
$$heq = 1/4\pi (\Delta W/We) \quad \Delta W = \text{ループの1サイクルの面積} \quad We = \text{等価ポテンシャルエネルギー}$$

図-6 減衰力-変位関係

ダンパーの速度が 1.2cm/s 以下ではダンパーやブレースの剛性の影響で減衰力と変位は、ほぼ線形関係であるが、速度がそれ以上になると安定した平行四辺形に近い履歴ループを描きエネルギーを吸収する結果となった。併せて各速度におけるエネルギー吸収能力を等価減衰定数 (heq) で示す。等価減衰定数 (heq) は速度 1.2cm/s 以下においてはエネルギー吸収能力は殆どないのに対し、それ以上では速度の増大に伴い大きくなる事が分かる。また、解析モデルはこれらの現象を精度良く表しており Maxwell モデルによる解析の妥当性が検証された。

b. ブレース長による減衰力・剛性への影響について  
 図-7 a) に 500kN ダンパーのブレース長の違いによる速度 10cm/s 時における減衰力-変位関係を示す。剛性はブレースが長くなるにつれて小さくなるが、各ダンパーの最大減衰力に大きな差は見られなかった。また図-7 b) に 1.5 倍長ブレースにおける解析値との比較を示す。ブレースが長くなることによる軸剛性の低下を考慮した解析と実験値とほぼ一致した。表-4 に各ケースにおける正弦波加振 1.0Hz, 10cm/s 時のダンパー及びブレースの面外変形量を示す。標準長のブレースのついた 300kN ダンパーの面外変形が大きく、500kN ダンパーについては、それより小さく長尺にすることによる差はあまり見られなかった。他の速度においても同様の傾向を示した。

c. 時刻歴応答結果

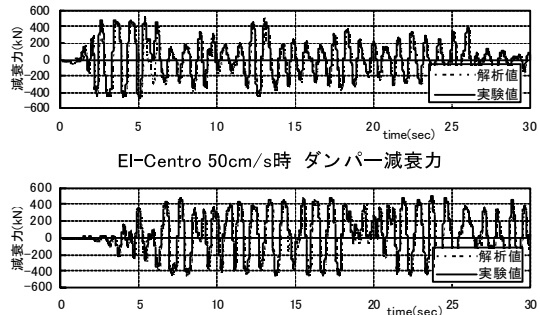


a) ブレース長による比較      b) 解析との比較 (1.5 倍長)

図-7 減衰力-変位関係

表-4 面外変形量 (1.0Hz, 10cm/s 時)

試験体	面外変形量 (mm)	
	水平方向	鉛直方向
300kN ダンパー+標準長ブレース	2.00	2.80
500kN ダンパー+標準長ブレース	0.45	1.40
500kN ダンパー+1.5 倍長ブレース	0.40	1.20



El-Centro 50cm/s 時 ダンパー減衰力  
 BCJ-L2 時 ダンパー減衰力  
 図-8 地震波時刻歴応答

図-8に500kNダンパーに標準長ブレースを組込んだ試験体のEl-Centro、BCJ-L2床応答波における減衰力の時刻歴応答図を示す。図には実線で実験値を、破線で解析値を示している。実験では制震ブレースは各地震波においてわずかな変形から減衰力を発揮していることが分かる。また、時刻歴応答においても解析値は実験値とほぼ一致することが確認できた。

### 3. 接合部実験

#### 3.1 実験概要

##### a. 試験体

接合部実験は制震ブレースを柱梁接合部に取り付けるガセットプレートを取り出した形式で行った。試験体を図-9に示す。試験体は実際に実建物に適用する形状であるガセットプレートに補強リブを取り付けた試験体G-1と補強リブの効果を検証するため比較用の補強リブ無し試験体G-2、補強リブ無しで板厚を薄くした試験体G-3の3体で実建物で使用形状の1/2に縮小したものとした。

##### b. 加力方法・加力パターン

加力方法を図-10に示す。加力は1000kN加振機により、2方向拘束スライド装置から鋼管(φ216.3\*20.0)を介し接合部試験体を静的押し引きする方法とした。加力は荷重制御とし、荷重速度は10.0(kN/s)の漸増波とし、最大で800kNまで加力した。

#### 3.2 実験結果及び考察

##### a. 補強プレートを取り付けた試験体の主応力度

図-11に各試験体の800kN載荷時の最大主応力度分布を示す。最大主応力は図の計測点位置に貼り付けた3軸歪みゲージの値より算出している。G-1試験体の引張時の最大ひずみはジョイントと梁フランジの間⑥に生じ、最大主ひずみ値 $\epsilon$ は約 $870\mu$ 、最大主応力度 $\sigma$ は168MPaであった。実建物ではダンパーの減衰力によりガセットプレートは約2000kNの引張、圧縮力を受け、これは相似則により縮小試験体が500kNの引張、圧縮力を受けた時に相当する。今回の実験では縮小試験体に発生した最大主応力度は800kN載荷時に168MPaと短期許容応力度(330MPa)以下であったため500kN時では十分安全であることが確認できた。また、ジョイント回りの計測点の最大主ひずみ値は $630\sim 870\mu$ であり、ひずみ値に大きな差異はみられなかった。ガセットプレートは横長な形状をしているが、補強プレートにより拘束したことで、応力伝達は比較的均一に分散している。引張時はクレビス側のプレートが引っ張られ、ジョイントの外周に沿って応力伝達し、応力は分散している。

圧縮時の最小ひずみはブレース軸芯上の梁側②に生じ、最大ひずみ値 $\epsilon$ は約 $910\mu$ 、最大主応力度 $\sigma$ は179MPaであった。この主ひずみの方向は軸芯方向に

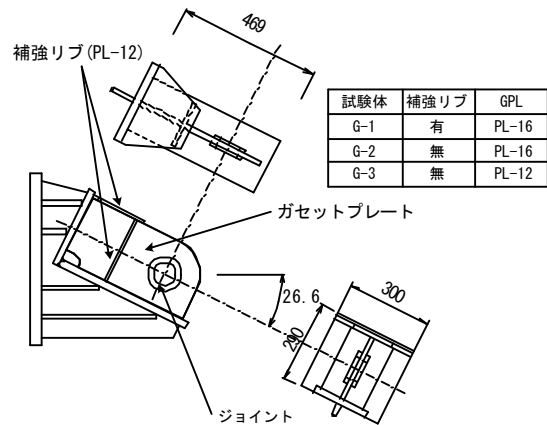


図-9 接合部試験体

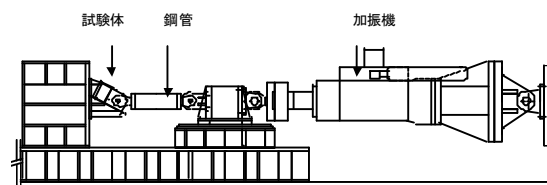


図-10 接合部実験加力方法

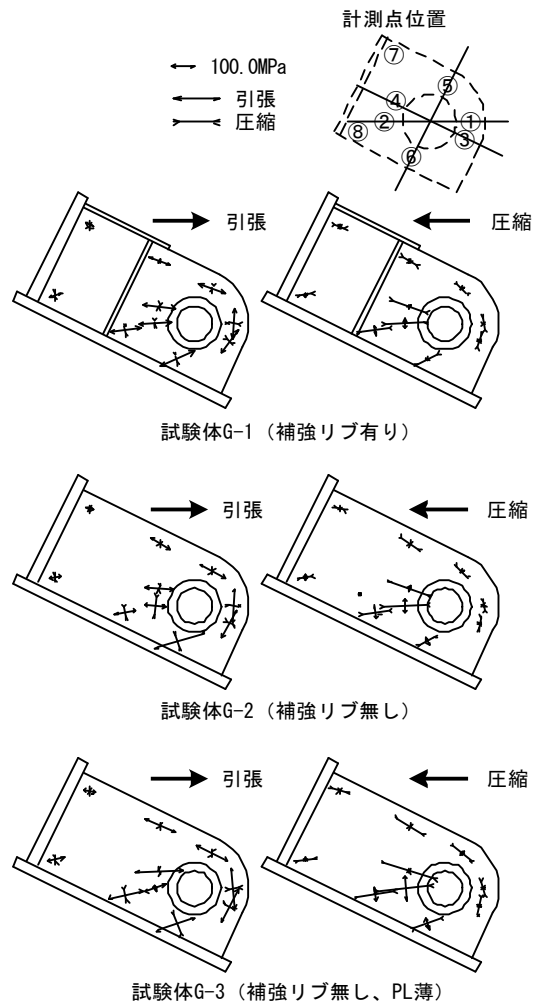


図-11 最大主応力度

沿っていた。またガセット外周近傍の最大主ひずみ値は180~330 $\mu$ で、計測点②と比べて1/5~1/3程度であり、加力側プレート外周面に発生する応力は小さいことがわかる。

b. 補強プレートの有無による影響

引張時には補強リブ近傍にあった計測点⑧の主応力度は132MPaから100MPaに低下したが、梁近傍の計測点⑥の主応力度は168MPaから193MPaに上昇した。拘束性がなくなった事により、ブレース軸芯方向の応力伝達が弱まり、ジョイント部から梁への応力伝達が強まる傾向がみられた。一方、圧縮時にはこれらの傾向はみられず主応力度はほぼ同じであった。表-5に最大主歪みと主応力関係を示す。補強リブを取り付けることにより最大主応力が低下していることが確認できた。

また、試験体G-3は、傾向はG-2とほぼ同じであるが、板厚が薄くなった分だけ応力度は上昇し、最大主応力度は300MPaであった。G-3試験体はガセットプレートを薄くした試験体であるが、圧縮時の座屈などは見られなかった。

4. 架構実験

4.1 実験概要

a. 試験体

架構実験試験体を図-12に示す。試験体の寸法及び形状は実建物の1/2縮小サイズである。また、試験体の片側の下部ガセットプレートは架構が面外方向に変形を受けたときの制震ブレースの性能を確認するため芯より45.0mmずらして取り付けられている。

b. 加振パターン・加振方法

加振は要素試験と同様に架構に与える速度をパラメータとした正弦波加振とランダム波加振の2タイプを架構頂部より変位制御にて入力した。

実験ケースを表-6に示す。実験は架構の特性を把握するため制震ブレース無しの状態に加振実験を実施し、その後制震ブレースを取り付けて実施した。架構実験に使用した制震ブレースは標準タイプ(芯ずれ無し)、芯ずれの有るタイプとも500kNビンガムダンパーに要素実験時の標準長ブレース(L=2829)を取り付けたものとした。

加振方法を図-13に示す。試験体上部には面外方向の動きを拘束するため面外振止め装置を設けた。また、芯ずれの有る実験は制震ブレースを盛り替え、反対側のガセットプレートに取り付け加振した。

4.2 実験結果

a. 全体復元力-架構変位関係

制震ブレース付き架構試験体(芯ずれ無し)正弦波加振時(10.0, 20.0cm/s)の復元力と変形関係を図-14に示す。併せて同図にはMaxwellモデルによる解析値も併記している。架構の剛性は弾性範囲内であるため履歴

表-5 最大主歪みと主応力関係

試験体	最大歪み位置	主歪み ( $\mu$ )	主応力度 (MPa)
G-1	引張 ⑥	869	168
	圧縮 ②	913	179
G-2	引張 ⑥	993	193
	圧縮 ④	1109	214
G-3	引張 ⑥	1243	234
	圧縮 ④	1563	300

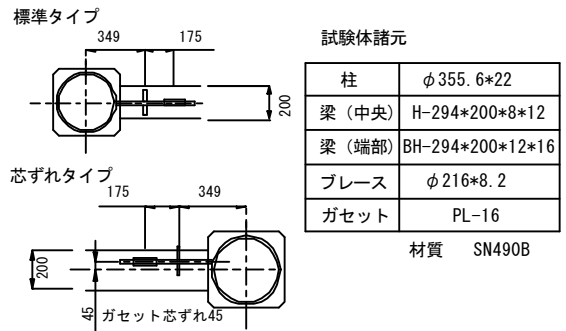
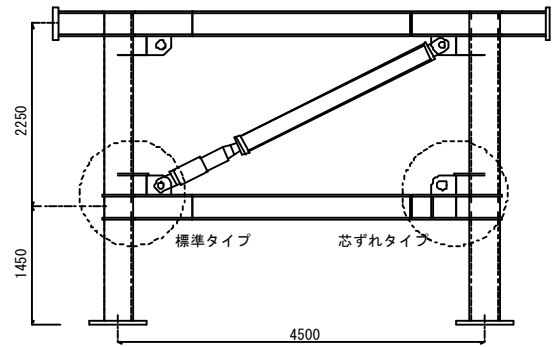


図-12 架構試験体

表-6 実験ケース (架構実験)

試験ケース	制震ブレース	備考
1	無し	架構のみ (架構特性の確認)
2	500kN ダンパー	標準
3	+ 標準長ブレース	芯ずれ有り (面外変形の影響確認)

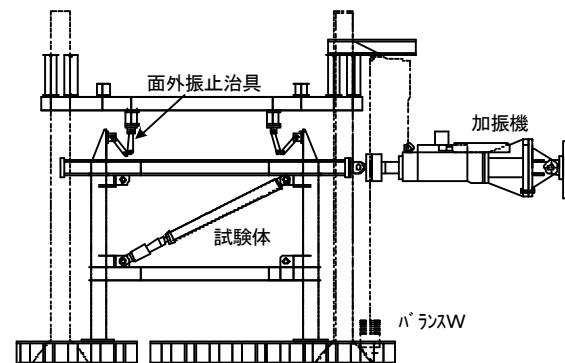


図-13 架構実験加力方法

ループはダンパーを含めた制震ブレースによるものとなり、速度 10.0cm/s で等価減衰定数 (heq) は 15%、20.0cm/s で 19%とほぼ解析通りの性能が得られた。

b. 面外変形による影響

制震ブレースはピン接合にて架構に組み込まれている。そのため地震時に直交方向の変形により面外変形を受けた場合に制震ブレースの挙動に悪影響を及ぼさないか芯ずれさせた架構実験にて検討した。速度 20.0cm/s における架構復元力-架構変位関係、ダンパー減衰力-ダンパー変位関係を図-15 に示す。比較のため芯ずれのないタイプを併せて示す。ダンパー減衰力と架構全体の復元力、剛性は芯ずれの有無によらずほぼ同じ結果となり、地震時の直交方向外力による制震ブレースへの影響は見られなかった。

c. 要素実験時減衰力との比較

図-16 に架構実験時及び要素実験時のダンパー減衰力-変位関係を示す。図には架構実験時に制震ブレースが受ける速度と要素実験時に制震ブレースが受ける速度を併せて表示している。10.0cm/s の場合、入力加振速度に差があったため架構実験時の変形が大きくなっているが 20.0cm/s では制震ブレースをフレームに組み込むことによる影響は殆ど見られなかった。

5. まとめ

ビンガムダンパーを用いた制震ブレースの性能を把握するため要素実験、接合部実験、架構実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- i. 要素実験よりビンガムダンパーを用いた制震ブレースは、設計性能通り減衰力が速度の 0.1 乗に比例し、履歴も安定したループを描くことが確認できた
- ii. Maxwell モデルにより解析を行った結果、ほぼ実験値と一致する結果が得られ、これにより解析モデルの妥当性及び設計への適用妥当性が確認できた
- iii. 制震ブレースは長尺化に伴い剛性の低下以外には減衰力への影響は無いことが確認できた
- iv. 制震ブレースの要素実験より制震ブレースの面外変形は 300kN ダンパーを使用した方が大きかったが減

衰力は設計値通りの値を示した

- v. 接合部補強法を検証するため実配置を想定した縮小試験体にて接合部実験を行った結果、補強リブにより接合部の応力を低減することが確認できた
- vi. 要素実験と制震ブレースを組み込んだ架構実験より制震ブレースを架構に組み込むことによる性能への影響は無かった
- vii. 制震ブレースが地震時に直交方向の変形を受け面外方向に変形した状態を想定して芯ずれさせた架構実験の結果からは、芯ずれ無しの場合と比較し顕著な差は見られなかった
- viii. 制震ブレースを架構に組み込んだ解析モデルは Maxwell モデルにより評価できることが確認できた

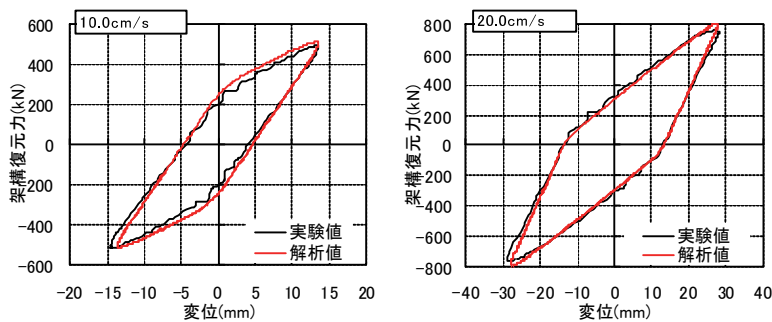
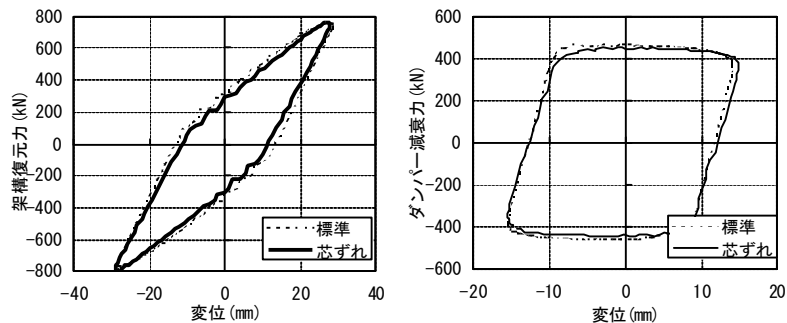


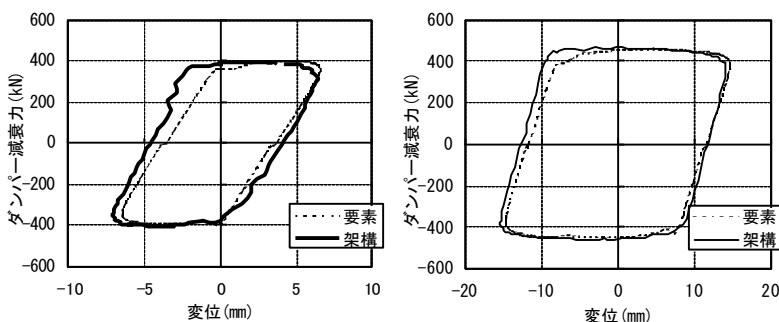
図-14 全体復元力-架構変位関係



a) 全体比較

b) ダンパー減衰力での比較

図-15 芯ずれによる復元力、減衰力への影響



a) 架構実験 10.0cm/s

b) 架構実験 20.0cm/s

図-16 ダンパー減衰力-ダンパー変位関係 (要素実験時との比較)