

面外変形が「ブレーキダンパー®」の構造性能に及ぼす影響

鈴 井 康 正 佐 野 剛 志 平 田 寛
大 出 大 輔 内 海 良 和 後 閑 章 吉
(本社建築本部) (本社設計本部)

Influence of Out-of-Plane Deformation on Structural Performance of “Brake Damper®”

Yasumasa Suzui Takeshi Sano Hiroshi Hirata
Daisuke Ode Yoshikazu Utsumi Shokichi Gokan

Abstract

“Brake damper®” is a commonly applied friction-slip damper for buildings that uses high-tension bolts. During an earthquake, the brake damper absorbs a building’s vibration energy using friction between a brake pad and a stainless-steel plate fastened with high-tension bolts. This paper presents experimental and analytical results for the structural performance of a brake damper under out-of-plane deformation during an earthquake. Dynamic loading tests were carried out using full-scale brace-type and stud-type brake dampers. Experimental results indicated that out-of-plane deformations had negligible impact on the structural performance of a brake damper. Analytical results employing finite element methods corresponded with experimental results.

概 要

当社は架構内の高力ボルト接合部に摩擦板(ブレーキ材)とステンレス板を一對にして挟み込み、地震時の建物の振動エネルギーを摩擦熱に変換することにより、建物の応答を低減する「ブレーキダンパー®」を開発し、既に多くの建物に適用している。建物の架構内に設置されたブレーキダンパーには、地震時に面内方向だけでなく面外方向にも変形が生じるが、これまでに実施した性能確認実験は面内方向のみを対象としていた。そこで、面外変形がブレーキダンパー(ブレース型、間柱型)の構造性能に及ぼす影響を確認するために、実大試験体を用いた載荷実験を実施した。その結果、1) 地震時に想定される面外変形がブレーキダンパーの面内方向の構造性能に及ぼす影響は小さいこと、2) FEM解析により、実験時の荷重-変形関係や変形モードを再現できることを確認した。

1. はじめに

建物の主架構内に組み込んだ制振デバイスにより建物の損傷や応答を制御する技術が各方面で開発されている。当社は1990年代後半より高力ボルト摩擦接合滑りダンパー(以下、ブレーキダンパーと称す)の開発に着手し、多くの実験により構造性能を確認し、実建物への適用を重ねてきた^{1)~5)}。

これまでに報告したブレーキダンパーを実大架構に組み込んだ状態での実験では、いずれも架構の面内方向の一方向のみの載荷を行ってきた。しかし、実際の地震時には、建物の架構内に設置したダンパー部材には面内方向だけでなく面外方向にも変形が生じる。面外変形下でのダンパーの性能確認実験を行った事例として、座屈拘束ブレース⁶⁾や粘弾性ダンパー⁷⁾を対象とした事例が一部見られるものの、検討例は少ない状況である。

そこで、ブレーキダンパー(ブレース型、間柱型)の面外変形下の構造性能を確認することを目的とした動的載荷実験を実施した。

本報では、その実験結果と併せて実施したFEM解析の結果について報告する。

2. ブレーキダンパーの基本的な構成と特徴

ブレーキダンパー(2面タイプ)の基本構成をFig. 1に示す。ブレーキダンパーは、ブレースや間柱などの耐震要

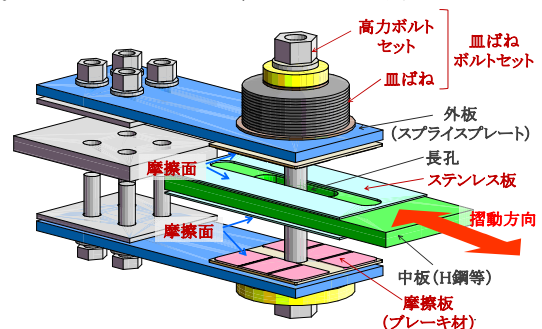


Fig. 1 ブレーキダンパー(2面タイプ)の基本構成
Basic Composition of Brake Damper
(2-Shear-Surface Type)

Table 1 試験体一覧
List of Test Specimens

試験体名	試験体タイプ	断面形状		ダンパー摩擦面数	皿ばねボルトセット数	ダンパー部目標滑り荷重 (kN)
		支持部材	ダンパー部			
B-1	ブレース	H	H	2面	10	1000
B-2		□	+		6	600
S-1	間柱	H	PL		6	600
S-2		H	PL		7	700

素を構成する中板と外板の間に摩擦板(ブレイキ材)とステンレス板とを一对にして挟み込んだ制振システムである。自動車等のディスクブレーキの技術を応用しており、一定の滑り荷重で撓動することで建物の振動エネルギーを摩擦熱に変換し、建物の応答や損傷を低減することができる。

摩擦板を構成するブレイキ材には摩擦係数の安定した複合摩擦材(フェノール系樹脂)を使用している。ブレイキダンパーの撓動面を皿ばね[®]を介した高力ボルト(以下、皿ばねボルトセットと称す)で締付けするため、ブレイキ材の摩耗等に伴うボルト軸力の変動を低減することができる。このため、安定した滑り荷重を得ることができる。

3. 面外変形下での動的載荷実験

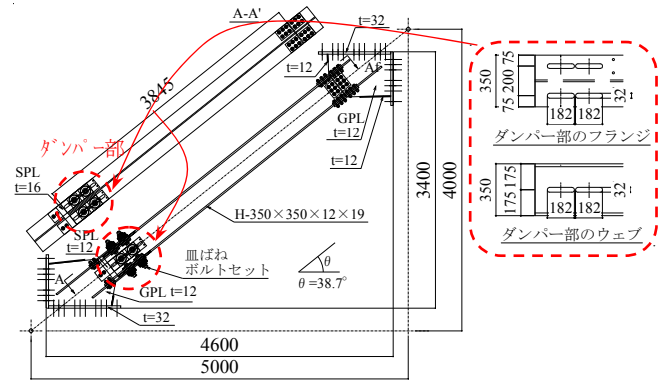
3.1 目的

ブレイキダンパー(ブレース型、間柱型)の面外変形下での構造性能を確認するために、動的載荷実験を実施した。

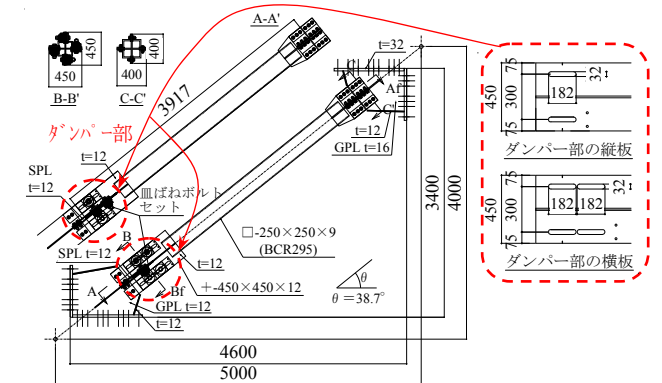
3.2 実験計画

3.2.1 試験体 試験体一覧をTable 1、試験体形状・寸法をFig. 2に示す。試験体はブレース型2体、間柱型2体の計4体で、いずれも実大サイズに相当する。試験体に使用するダンパー基本ユニットは、いずれも2面摩擦タイプとする。ブレース型の試験体B-1は、ブレース材断面をH-350×350×12×19とし、ダンパー部のH形鋼フランジに4×2(上下)=8セット、ウェブに2セット計10セットのダンパー基本ユニットを配置し、ブレース材軸方向の目標滑り荷重を1000kNとした。試験体B-2は、ブレース材断面を角形鋼管□-250×250×9、ダンパー部断面を+450×450×12とし、十字断面の縦板に2×2=4セット、横板に1×2=2セット計6セットのダンパー基本ユニットを配置し、ブレース材軸方向の目標滑り荷重を600kNとした。角形鋼管と十字断面の組み合わせは、よりコンパクトな断面でダンパー部材としての剛性や耐力を確保するのに適している。

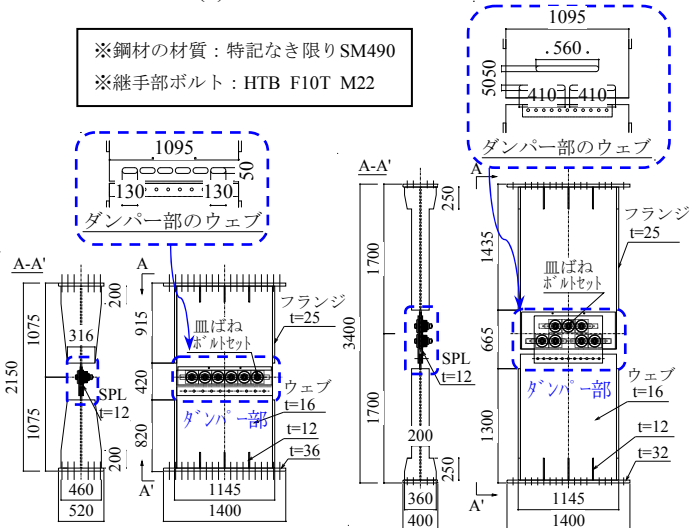
間柱型の試験体S-1、S-2は、間柱高さを各々2.15m、3.4mとし、ダンパー部にダンパー基本ユニットを6セットないし7セット配置し、間柱せん断方向の目標滑り荷重を600kNないし700kNとした。実際の建物で使用される間柱



(a) 試験体B-1



(b) 試験体B-2



(c) 試験体S-1

(d) 試験体S-2

Fig. 2 試験体形状・寸法
Configuration and Dimensions of Test Specimens

Table 2 使用鋼材の機械的性質
Mechanical Properties of Steel Material

鋼種	板厚 (mm)	降伏点 または 耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	試験片 形状	備考 (主な適用箇所)
SM490A	12	364	552	26.3	JIS Z2241 1A号	ダンパー部SPL(間柱型) ダンパー部SPL(ブレース型) ブレースGPL
	16	367	537	25.7		間柱材ウェブ ダンパー部SPL(ブレース型)
	19*	331**	527	26.8		ブレース材フランジ

※ 降伏点または耐力、引張強さ、伸びの値は、試験片3本の平均値を示す。

※ *はH-350×350×12×19のフランジより採取したこと、**は0.2%オフセット値を示す。

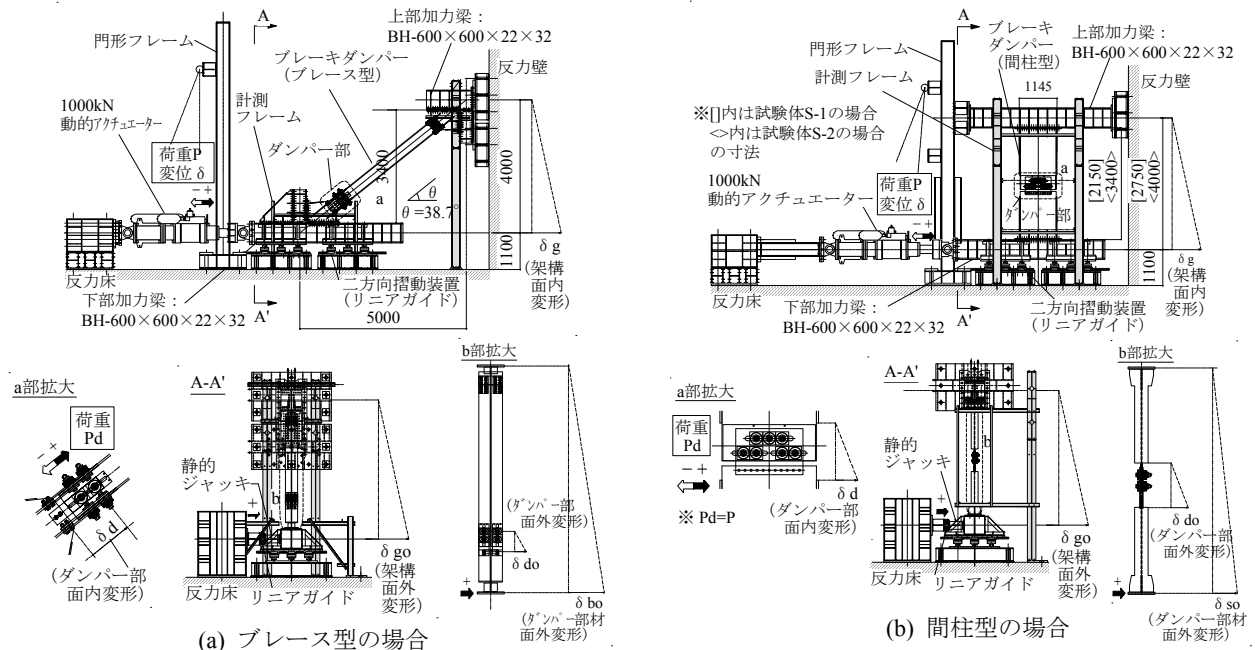


Fig. 3 荷重装置概要
Outline of Loading Apparatus

Table 3 荷重メニューの例
Example of Loading Program

試験体名	波形	周期 T (sec)	架構目標 面内変形 δ_g (mm)	架構目標 面外変形 δ_{go} (mm)	定常部 波数 Nc	荷重方法
B-1	正弦波	2	± 40	0	10	面内
B-2		2	± 40	40	10	面内+面外
S-2		2.5	± 80	40	5	
S-1	正弦波	4.3	± 40	0	10	面内
		4.3	± 40	40	10	面内+面外

注) ・本報に掲載した図に関連する荷重メニューのみ掲載
・架構面内変形・架構面外変形の定義については、Fig. 3 (a),(b)を参照のこと。

型のブレイキダンパーで、比較的面外剛性が大きい場合と小さい場合を参考に間柱高さを設定した。ダンパー基本ユニットには、高力ボルトF8T M27と12枚並列重ねの皿ばね(外径130mm,内径65mm,板厚3.6mm)を組み合わせた皿ばねボルトセットを使用した。ダンパー部の高力ボルト本締め時の導入軸力は皿ばね高さで管理し、ボルト張力150kNを目標に軸力を導入した。試験体の主な使用鋼材の機械的性質をTable 2に示す。

3.2.2 荷重・計測方法 荷重装置概要をFig. 3に示す。試験体を上下の加力治具の間に設置する。上部加力治具は、ブレース型(Fig. 3(a))では反力壁側のみに固定し、間柱型(Fig. 3(b))では、反力壁と門形フレームとの間に上部加力梁として設置した。また、下部加力梁は、リニアガイドを直交配置した二方向摺動装置の上に設置した。

架構の面外方向に静的ジャッキ(油圧ジャッキとキリンジャッキ各2台)を用いて所定の面外変形を強制的に与えた状態で、下部加力梁の端部に接続した1000kN動的アクチュエーターを用いて面内方向に動的荷重を行った。

荷重メニューの例をTable 3, 荷重波形の例をFig. 4に示す。一般的な高層・超高層建物を想定して荷重周期を設定し、架構面内変形を $\pm 40\text{mm}$ (層間変形角 $R=1/100$ 相当)

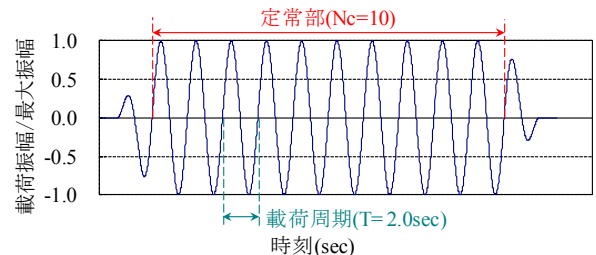


Fig. 4 荷重波形の例
Example of Loading Wave

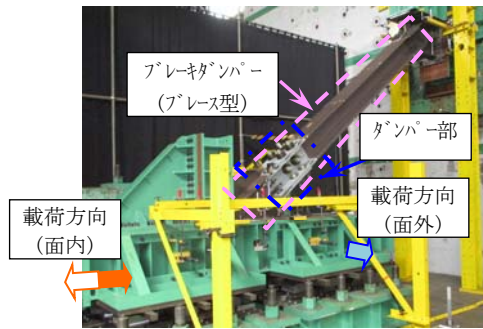
あるいは $\pm 80\text{mm}$ ($R=1/50$ 相当), 架構面外変形を 0mm あるいは 40mm ($R=1/100$ 相当)とした。面内方向の荷重波形を定常部10波あるいは5波の正弦波で構成した(ただし、波形の前後にエンベロープ波各1波を含む)。また、面内変形と面外変形を同時に与える荷重だけでなく、比較用として面内変形のみを与える荷重を併せて実施した。

さらに、試験体各部の変位を高感度変位計およびレーザ変位計により、ひずみをひずみゲージにより計測した。

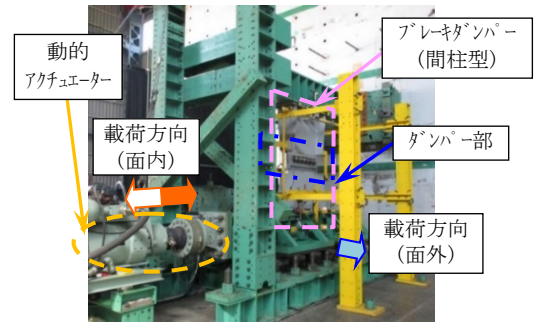
3.3 実験結果

3.3.1 実験経過 ブレース型(試験体B-1,B-2)の荷重状況をPhoto 1に示す。試験体B-1では、面外変形の増大とともにH形断面のブレース材が弱軸方向に緩やかに変形し、周期2sec, 架構面内変形 $\pm 40\text{mm}$, 架構面外変形 40mm の荷重時に上部ガセットプレート(GPL)に局所的な面外変形が生じた。また、試験体B-2では、角形鋼管のブレース材と十字断面のダンパー部が面外変形に追従し、荷重中にGPLの局所的な面外変形は見られなかった。

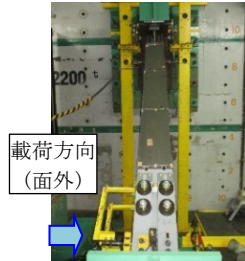
間柱型(試験体S-1,S-2)の荷重状況をPhoto 2に示す。試験体S-1,S-2とも、架構の面外変形の増大とともに、ダン



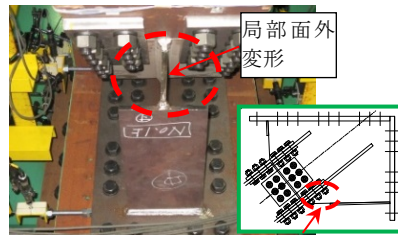
(a) 荷重装置(試験体B-1)



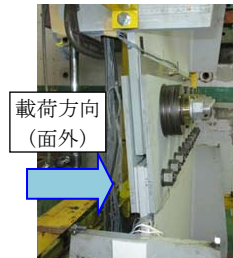
(a) 荷重装置(試験体S-1)



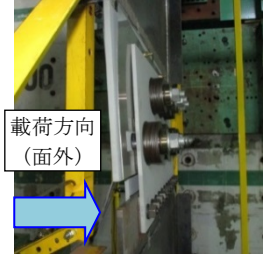
(b) 面外変形状況 (試験体B-1)



(c) 上部GPL局部面外変形状況 (試験体B-1)



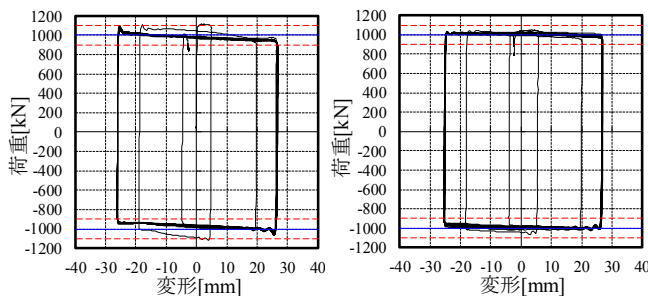
(b) 面外変形状況 (試験体S-1)



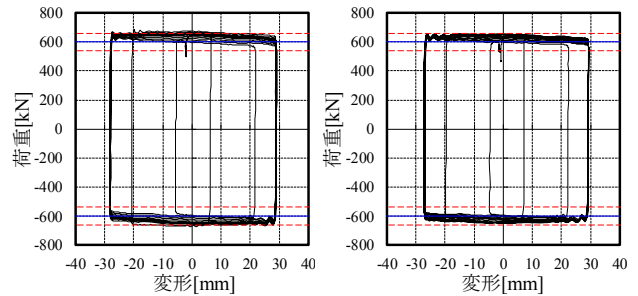
(c) 面外変形状況 (試験体S-2)

Photo 1 荷重状況(ブレース型)
View of Loading Test (Brace Type)

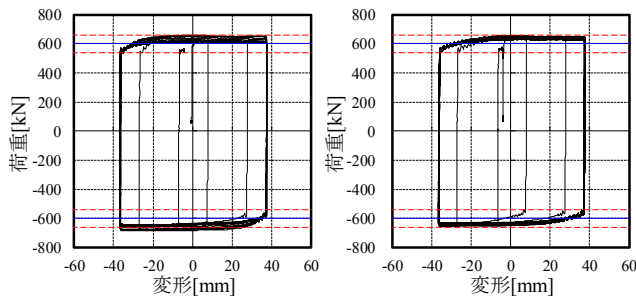
Photo 2 荷重状況(間柱型)
View of Loading Test (Stud Type)



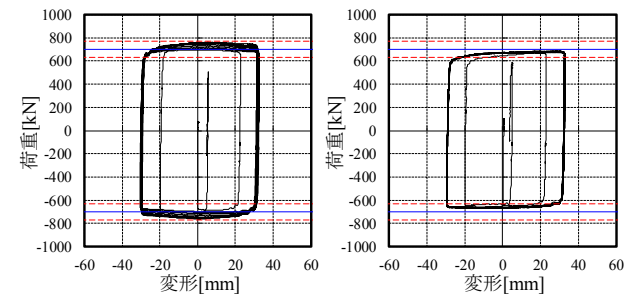
架構面外変形0mm 架構面外変形40mm
(a) 試験体B-1 (周期2sec, 架構面内変形±40mm)



架構面外変形0mm 架構面外変形40mm
(b) 試験体B-2, 周期2sec, 架構面内変形±40mm



架構面外変形0mm 架構面外変形40mm
(c) 試験体S-1(周期4.3sec, 架構面内変形±40mm)



架構面外変形0mm 架構面外変形40mm
(d) 試験体S-2, 周期2sec, 架構面内変形±40mm

注) 架構, ダンパー部の面内変形・面外変形の定義については, Fig. 3 (a),(b)を参照のこと。

Fig. 5 ダンパー部面内方向の荷重-変形関係の比較
Comparison of Load-Deformation Relationship of the Damper

パー部のウェブプレートに面外方向の曲げせん断変形が集中して増大した。また, ダンパー部ウェブプレート上下端近傍の局部的なひずみ以外のひずみは弾性範囲内であった。なお, いずれの試験体も面外変形を与えた状態でもダンパー自体は終始スムーズに作動した。

3.3.2 荷重-変形関係 架構面内変形±40mmでの

面外変形の有無によりダンパー部の面内方向荷重-変形関係を比較した例をFig. 5に示す。また, 架構面内変形±80mm, 架構面外変形40mmでのダンパー部の面内方向荷重-変形関係をFig. 6に示す。

ここで, ダンパー部の面内方向の荷重と変形は, ブレース型ではブレース材軸方向の荷重と変形, 間柱型では

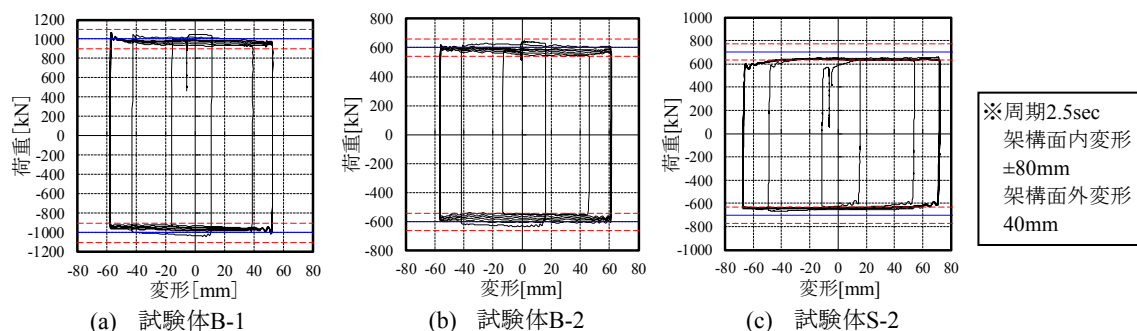


Fig. 6 大変形時のダンパー部面内方向の荷重－変形関係
Load-Deformation Relationship under Large Displacement

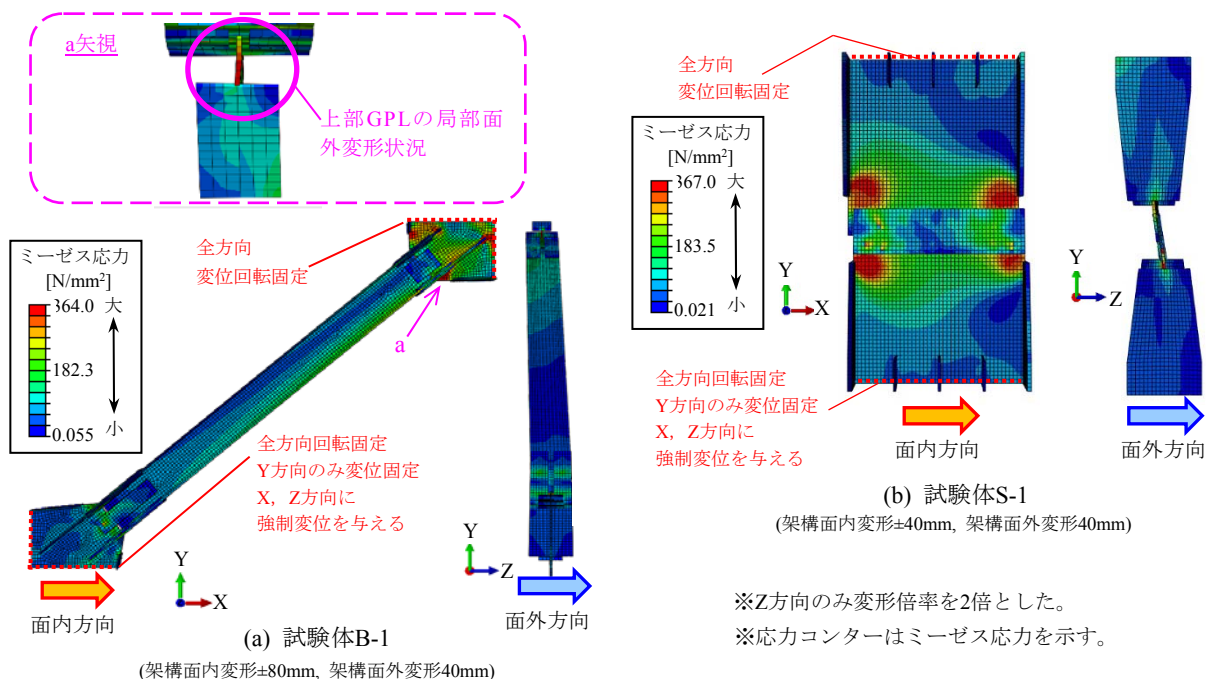


Fig. 7 FEM解析による応力・変形図
Stress Contour Maps and Deformation Figure by Finite Element Analysis

間柱の面内せん断方向の荷重と変形を表す。

ブレースに作用する軸力は、動的アクチュエーター内蔵荷重計の指示値からブレースのせん断力(ブレース材に貼り付けたひずみゲージより算出)の水平成分を差し引き、その値をブレース材軸方向の値に変換して算出した。また、間柱の面内方向のせん断力は、動的アクチュエーター内蔵荷重計の指示値とした。

Fig. 5, Fig. 6には、ダンパーの目標滑り荷重を青線で、その±10%の荷重を赤破線で併記している。Fig. 5よりダンパーの荷重－変形関係は、剛塑性型の復元力特性を示しており、その滑り荷重は概ね目標滑り荷重±10%を満足している。Fig. 5の架構面外変形が0mmと40mmの場合を比較すると、面外変形がダンパーの面内方向の荷重－変形関係に与える影響は小さい。

また、Fig. 6によると、架構面内変形±80mm、架構面内変形40mmの場合でも、ダンパーの荷重－変形関係は剛塑性型の復元力特性を示し、その滑り荷重は概ね目標滑り荷重±10%を満足している。従って、このような場合も面外変形が面内方向の荷重－変形関係に与える影響

Table 4 解析対象とした载荷メニュー
Loading Program for Analysis

試験体名	波形	周期 T (sec)	架構目標 面内変形 δ_g (mm)	架構目標 面外変形 δ_{θ} (mm)	定常部 波数 Nc	载荷方法
B-1	正弦波	2	±40	40	10	面内+面外
B-2		2.5	±80	40	5	
S-1	正弦波	4.3	±40	40	10	面内+面外
S-2		2	±40	40	10	

は小さい。

3.4 解析検討

3.4.1 解析概要 実験時の応力・変形を詳細に検討するためにFEM解析を実施した。解析ソフトにはAbaqus6.12⁹⁾を用いた。シェル要素によって試験体全体をモデル化し、材料特性には材料試験結果を反映し、降伏点を折れ点とし、二次勾配を0とするバイリニア型モデルを用いた。また、皿ばねボルトセットの位置でブレース母材とスプライズプレートとをコネクター要素で結合することでダンパー部をモデル化した。このコネクター要素

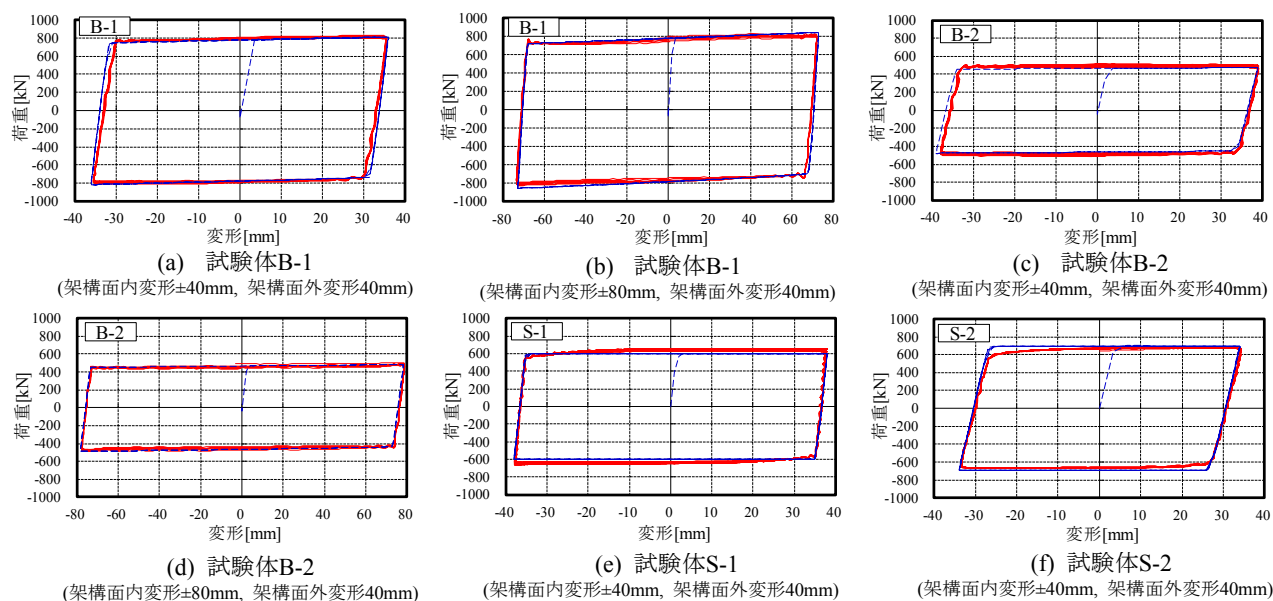


Fig. 8 実験と解析による荷重－変形関係の比較
Comparison of Load-Deformation Relationship by Test and Analysis

は平面内の任意の方向に対してダンパーの目標滑り荷重に相当する摩擦力が生じ、ボルト軸方向の距離が変化しない特性とした。

解析対象とした载荷メニューをTable 4に示す。各試験体について実験で得られたダンパー部材としての面外変形、面内変形を解析モデルに強制変位として与えた。

3.4.2 応力・変形状況 試験体B-1, S-1のFEM解析による応力・変形図の例をFig. 7に示す。試験体B-1に関して、ブレース上部GPLの局部面外変形(Photo 1(d))を解析で再現できた。また、試験体S-1に関して、ダンパー部に面外方向の曲げせん断変形が集中する状況(Photo 2(b))を解析で再現できた。

3.4.3 荷重－変形関係の比較 各試験体について実験と解析による荷重－変形関係を比較した結果をFig. 8に示す。評価対象とする荷重は水平方向の面内荷重(実験では、アクチュエーター内蔵荷重計の指示値)、変形はダンパー部材全体の水平方向の面内変形とした。また、解析結果との比較を容易にするため、実験結果からエンベロープ波分の荷重－変形関係を除去している。Fig. 8より、実験と解析での履歴ループはほぼ一致しており、FEM解析により実験時の荷重－変形関係を再現できている。

4. まとめ

建物の主架構内に設置されたブレーキダンパーが地震時に面外変形を受けた状態で、面内方向に安定した構造性能を発揮できるかどうかを検証するため、強制的に面外変形を与えた状態で動的载荷実験を実施した。実験では、実大のブレース型および間柱型のブレーキダンパーを対象とした。本報の結論は以下の通りである。

- 1) 層間変形角1/100相当の面外変形がブレーキダンパーの面内方向の構造性能に及ぼす影響は小さい。

- 2) 面外変形がダンパー部以外の部位に集中する変形モードが一部の試験体に見られたが、ダンパー自体は終始スムーズに作動した。

- 3) FEM解析により、実験時のダンパー部材の荷重－変形関係や変形モードを再現できた。

今回の一連の検証により、実際の地震時により近い条件下で、ブレーキダンパーが安定した構造性能を発揮し得ることを確認できたと考える。

参考文献

- 1) 鈴木康正, 他: 改良型ブレーキダンパーの開発, 大林組技術研究所報, No.73, 2009.12
- 2) 鈴木康正, 他: 4面摩擦「ブレーキダンパー®」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, 2011.12
- 3) 鈴木康正, 他: 多様な要求性能を実現する「ブレーキダンパー®」, 大林組技術研究所報, No.76, 2012.12
- 4) 平田寛, 他: 中小地震から大地震まで幅広く効果を発揮する多段階「ブレーキダンパー®」の開発, 大林組技術研究所報, No.77, 2013.12
- 5) 例えば, 高橋泰彦, 他: 高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発 その1～その7, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.979-992, 2000.9
- 6) 渡辺厚, 他: 接合部を考慮した座屈拘束ブレースの機構安定性 その10～その13, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.1085-1092, 2015.9
- 7) 平田裕一, 他: 粘弾性ダンパーを内蔵したRC壁に対する面外変形の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.47-48, 2004.8
- 8) 例えば, ばね技術研究会: 第3版 ばね, 丸善株式会社, pp.283-292, 1982
- 9) Abaqus/Standard User's Manual Version 6.12, 2012