

高力ボルト摩擦接合滑りダンパー（ブレーキダンパー[®]）の開発（その2）

—実物大ブレース型・間柱型ブレーキダンパーの性能確認試験—

佐野 剛志 野村 潤
(本社建築本部特殊工法部)

Development of Friction Slip Damper using High Tension Bolts (Part 2)

— Performance Test with Full-Scale Brace Type and Stud Type Brake Damper —

Takeshi Sano Jun Nomura

Abstract

Many vibration control systems have been developed to reduce damage to buildings during earthquakes. We developed a friction-slip damper using high-tension bolts in the latter half of 1990's and applied it to a building. This damper absorbs a building's vibration energy using the frictional energy consumed by a brake pad and a stainless plate fastened with the high-tension bolts. The main application form of this damper has been as a brace, but the number of stud-type application forms is increasing. Performance confirmation tests have been performed on full-scale brace-type and stud-type dampers set in a steel frame. This paper describes their energy absorption performances.

概要

各種の大地震対応架構内設置型制震技術が数多く実用化されている。当社は1990年代後半より架構内のボルト接合部に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ブレーキ材とステンレス板が相対変位することによって消費される摩擦熱に変換し建物の応答や損傷を低減する高力ボルト摩擦接合滑りダンパーを開発し建物に適用している。本ダンパーの主な適用形態はブレース型によるものだが、近年は建物の使用性に及ぼす影響が少ない間柱型ダンパーに対するニーズが増加している。このたび地震時の建物主架構の変形状態を模擬する鉄骨フレームに実物大のブレース型および間柱型ダンパーを設置し、鉄骨フレームが変形した際のダンパー性能を確認する試験を実施した。その結果、ブレース型および間柱型の各適用形態で本ダンパーが安定したエネルギー吸収性能を有することを確認した。

1. はじめに

建物の主架構内に組込んだ制震デバイスにより建物の応答や損傷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、基本力学特性を確認^{1)~4)}した後、適用実績を重ねてきた。

ブレーキダンパーの主な適用形態はブレース型で、実物大ブレース型ブレーキダンパーの動的加力実験⁵⁾などにより性能を実証してきた。近年は建物の使用性に及ぼす影響が少ない間柱型による適用例も増加している。

このたび実物大のブレース型・間柱型ブレーキダンパーを鉄骨フレームに設置し、建物の応答層間変形を模擬した変形を与えた際の各ダンパー性能を確認する試験を実施するとともに、実物大試験体と同一ロットから抜き出した材料を用いて実施した要素試験結果との比較を試みたので結果について報告する。

2. ブレーキダンパーの構成と特徴

Fig. 1にブレーキダンパーの基本的な構成を示す。ブレ

ーキダンパーはブレースや間柱などの耐震要素内や耐震要素と主架構との接合部の中板と外板の間にブレーキ材とステンレス板を一對にして挟み込んだ制震システムである。自動車等のディスクブレーキを応用したもので、一定の耐力を発揮するとともに、耐力を一定に保ちながら摺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可能となる。

安定した滑り耐力（摩擦力）を得るため、安定した摩擦係数が得られる材料（ブレーキ材とステンレス板）を用いるとともに、ダンパー作動時に摺動摩擦面の面圧を所定の範囲内に安定させる技術が必要となる。ブレーキダンパーの摺動摩擦面は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）で締め付けるため、ブレーキ材の摩耗等に伴いボルト締め付け長さが多少変化しても軸力（面圧）変動を少なくすることができ、安定した摩擦減衰特性（復元力特性）が得られる。

ブレーキ材と外板間、ステンレス板と中板間の接触面はブレーキ材とステンレス板間の摺動面より摩擦係数が十分大きくなるよう特殊な表面処理を施し、ブレーキ材とステンレス板を乾式で挟み込むだけで施工できるように工夫が施されている。

3. 試験体と加力用鉄骨フレーム

3.1 ブレーキダンパー部試験体

3.1.1 ブレース型ブレーキダンパー 試験体概要をFig. 2に示す。M20高力ボルトと13枚並列重ねの皿ばね（外径100mm，内径50mm，厚さ2.6mm）で構成した皿ばねボルトセットを使用した。ボルト1本の目標導入軸力は83.3kNである。予め皿ばねのたわみ量と皿ばね反発力の関係を確認し，皿ばねのたわみ量を計測することで軸力の管理を行った。

ブレーキ材には繊維を樹脂で固めた厚さ3mmの複合摩擦材を，滑り板には厚さ2mmのステンレス板を用いた。

皿ばねボルトセットは上下フランジに8セット，ウエブに4セットの計12セットを用いた。導入軸力は計1,000kN（=83.3kN×12セット）で，摩擦係数 μ を0.32とすれば摩擦力は640kN（=1,000kN×0.32×2面滑り）である。

3.1.2 間柱型ブレーキダンパー 試験体概要をFig. 3に示す。M27高力ボルトと13枚並列重ねの皿ばね（外径130mm，内径65mm，厚さ3.6mm）で構成した皿ばねボルトセットを使用した。ボルト1本の目標導入軸力は158.1kNである。皿ばねボルトセットは計7セットで導入軸力は計1,107kN（=158.1kN×7セット）で，摩擦係数 μ を0.32とすれば摩擦力は709kN（=1,107kN×0.32×2面滑り）である。本試験体は実建物対応相当品で本来11セットの皿ばねボルトセットで構成されるが動的アクチュエータの加振能力（1,000kN）を超えない様にFig. 3に赤で示す皿ばねボルトセットを完全に緩めて試験を実施した。

なおブレーキ材，ステンレス板の材質，導入軸力の管理方法はブレース型ブレーキダンパーと同様である。

3.2 加力用鉄骨フレーム

ダンパー試験体を組込んだ加力用鉄骨フレームの状況をFig. 4, Fig. 5 およびPhoto 1, Photo 2に示す。加力用鉄骨フレームは実建物の主架構サイズを模擬しスパン5,000mm，高さ3,710mmとした。動的アクチュエータの加振能力に限りがあるため，ダンパーの滑り耐力を大きくするには鉄骨フレームの水平剛性を小さくする必要がある。そ

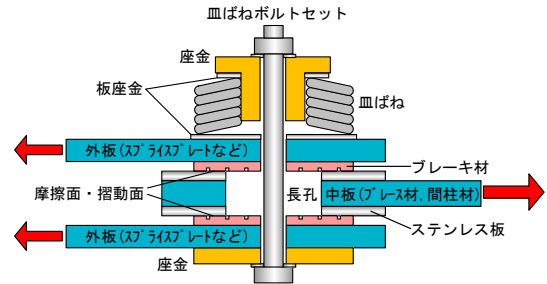


Fig. 1 ブレーキダンパーの基本構成
Basic Composition of Brake Damper

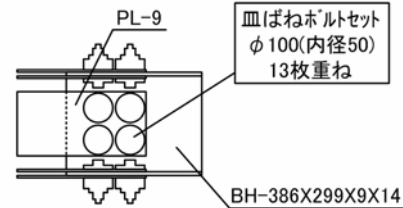


Fig. 2 ブレース型ブレーキダンパー部の概要
Outline of Brace Type Brake Damper

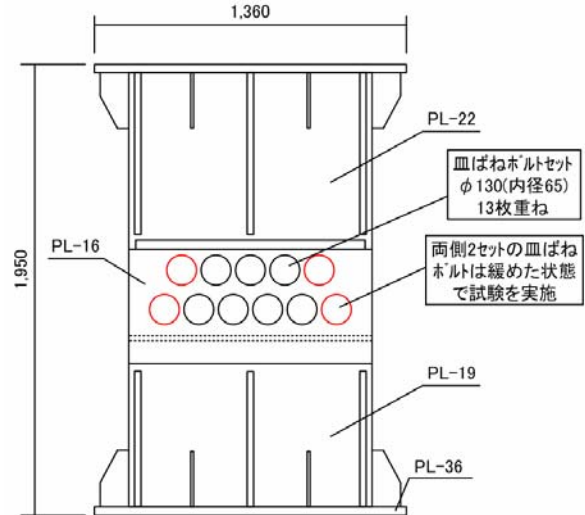


Fig. 3 間柱型ブレーキダンパー部の概要
Outline of Stud Type Brake Damper

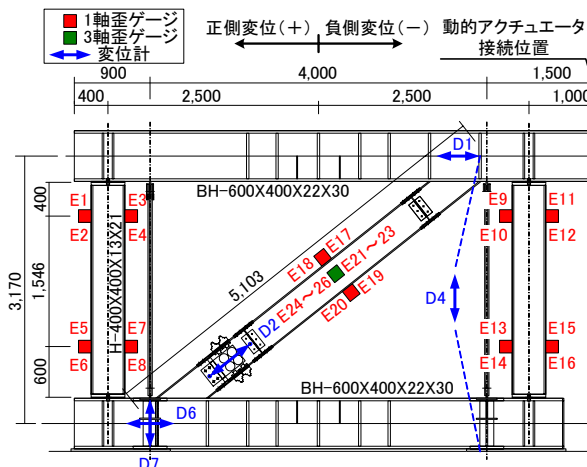


Fig. 4 ブレース型ダンパー用鉄骨フレームと計測計画
Loading Frame for Brace Type Brake Damper

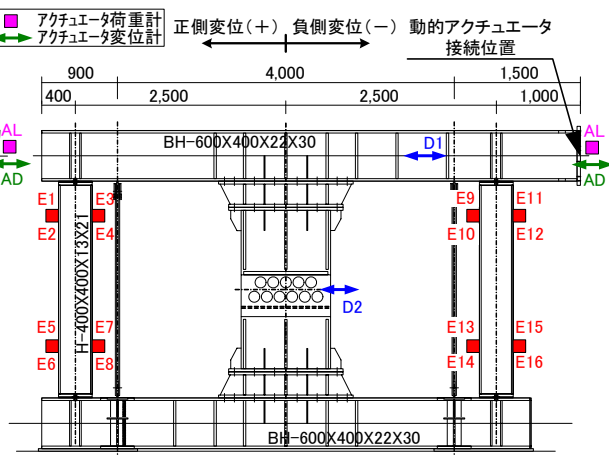


Fig. 5 間柱型ダンパー用鉄骨フレームと計測計画
Loading Frame for Stud Type Brake Damper

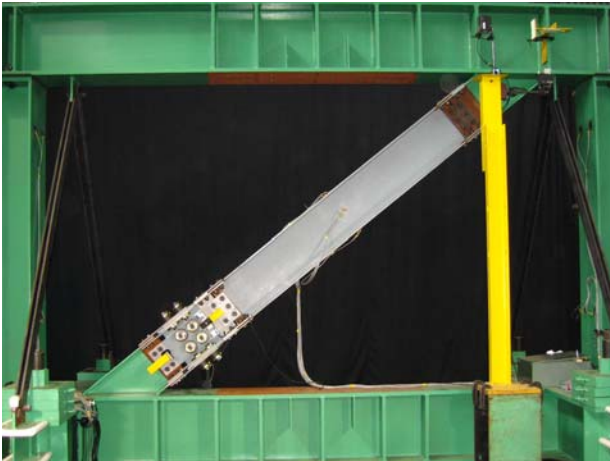


Photo 1 ブレース型ダンパー用鉄骨フレーム
Loading Frame for Brace Type Brake Damper



Photo 2 間柱型ダンパー用鉄骨フレーム
Loading Frame for Stud Type Brake Damper

Table 1 試験ケース一覧表
List of Test Case

試験体名	試験名	波形	鉄骨フレーム 層間変形
B ブレース型	B-1	正弦波	±10mm
	B-2		±20mm
	B-3		±30mm
	B-4		
	B-5		±40mm
	B-6		
S1 間柱型	S1-1	正弦波	±10mm
	S1-2		±20mm
	S1-3		±30mm
	S1-4		
	S1-5		±40mm
	S1-6		
S2 間柱型	S2-1	正弦波	±20mm
	S2-2		
	S2-3		
	S2-4	三角波	±40mm
	S2-5	正弦波	
	S2-6	三角波	

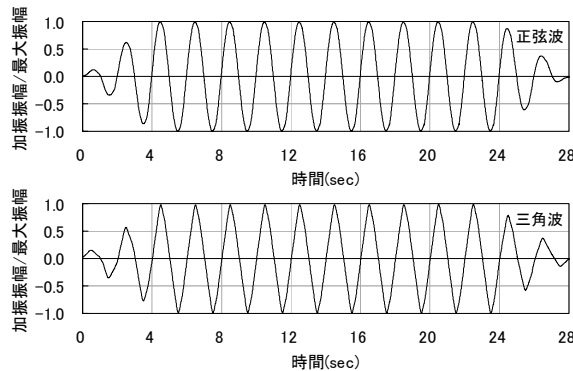


Fig. 6 加振波形

Wave for Excitation Test



Photo 3 要素試験
Element Test

のため柱の柱頭・柱脚と上部加力梁・下部基礎梁との接合部に厚さ12mmのゴムシートを挿入し柱中心位置のみボルトで締付ける構造とした。また、挿入したゴムシートがボルトの締付けにより鉛直方向に縮むのを防止するためボルト近傍にはゴムシートと同じ厚みの小型鋼製スペーサーを挿入した。加力用鉄骨フレームのみの試験結果より水平剛性が概ね6kN/mmであることを確認した。

4. 加振計画と計測計画

4.1 加振計画

4.1.1 加力方法 加力はFig. 4, Fig. 5に示すように加力用鉄骨フレームの上部加力梁の一端に動的アクチュエータを接続し、変位制御で加振波形を与える方法とした。

4.1.2 試験ケース 試験ケースをTable 1に、加振波形をFig. 6に示す。加振波形には建物の地震時応答層間変形を模擬した、立上り部2波、定常部10波、減衰部2波の周期2秒の正弦波ならびに三角波を用いた。ブレーキダンパーの摩擦熱によって上昇した鋼材の温度が常温に戻るまで適宜インターバルを設けて各試験を実施した。

4.2 計測項目と摩擦力の算定

試験体の計測項目をFig. 4, Fig. 5に示す。

ブレース型ダンパーの軸方向摩擦力は動的アクチュエータ内内蔵荷重計の指示値から鉄骨柱のせん断力（歪ゲージより算出）とブレース材のせん断力（ウェブ3軸歪ゲージより算出）の水平方向成分を差し引いて求めた。

間柱型ダンパーの摩擦力は動的アクチュエータ荷重計の指示値から鉄骨柱のせん断力を差し引いて求めた。

なお加力用鉄骨フレームのみの試験で、動的アクチュエータ荷重計の指示値と歪ゲージから求めた鉄骨柱のせん断力が一致することを確認した。また慣性力の影響は最大1.6kN程度と非常に小さいため補正は省略した。

5. 試験結果と考察

5.1 要素試験結果

実物大ブレーキダンパーの試験に先立ち、同一ロットから取り出した皿ばねボルト2セット、ブレーキ材、ステンレス板からなる要素試験体で摩擦力の確認を行った。要素試験の様子をPhoto 3に、試験結果をTable 2に示す。ダンパー部の変形がゼロ（原点位置）の時の最大摩擦力（Table 2に赤字で示す）と最小摩擦力（Table 2に青字で示す）の平均値で各試験ケースの摩擦力を評価し、摩擦係数 μ に換算するとブレース型が0.28～0.31、間柱型が0.30～0.31程度の値を示した。

Table 2 要素試験結果
Result of Element Test

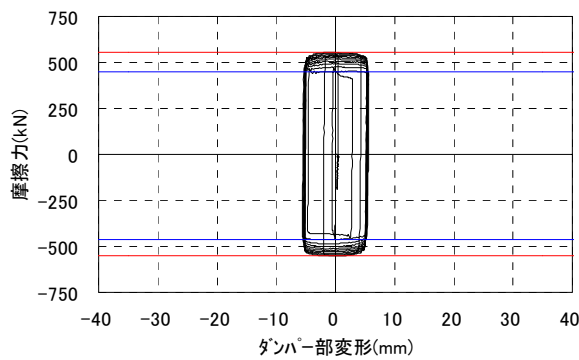
試験体名	波形 (振幅) (速度)	サイクル数	正側摩擦係数		負側摩擦係数		平均摩擦係数 ($\mu(+)+\mu(-)$)/2
			上段:最大値 下段:最小値	$\mu(+)$	上段:最大値 下段:最小値	$\mu(-)$	
要素試験 ブレース型 用	三角波 (±30mm) (6.28cm/s)	1~20	99 84	0.275	101 84	0.277	0.276
		21~30	100 91	0.286	103 93	0.294	0.290
		31~40	102 93	0.292	106 96	0.302	0.297
		41~50	103 95	0.297	108 98	0.308	0.303
		51~60	105 97	0.303	110 100	0.316	0.309
		61~70	105 96	0.301	111 100	0.316	0.309
		71~80	106 99	0.307	113 102	0.321	0.314
要素試験 間柱型用	三角波 (±30mm) (5cm/s)	1~20	199 181	0.301	201 184	0.304	0.302
		21~40	201 192	0.311	201 190	0.309	0.310
		41~60	208 186	0.312	210 182	0.310	0.311

5.2 ブレース型ブレーキダンパー試験結果

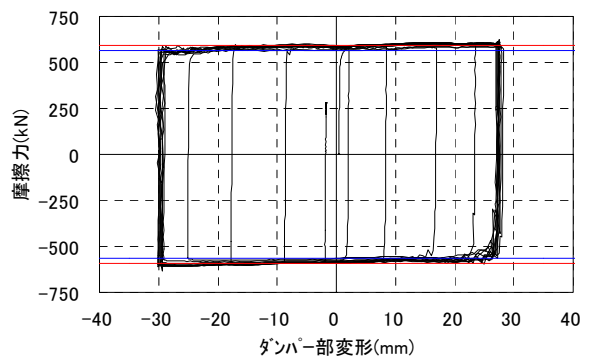
ブレース型ブレーキダンパーの摩擦力-ダンパー部軸変形関係をFig. 7に、試験結果をTable 3に示す。全ての試験ケースで摩擦力-ダンパー部軸変形関係が安定した

Table 3 ブレース型ブレーキダンパー試験結果
Test Result of Brace Type Brake Damper

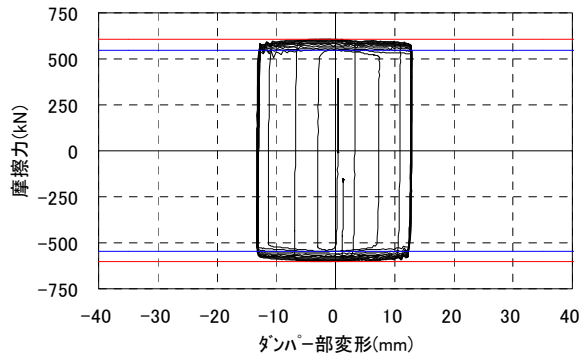
試験体名	試験名	波形	鉄骨フレーム 層間変形	正側摩擦係数		負側摩擦係数		平均摩擦係数 ($\mu(+)+\mu(-)$)/2
				上段:最大値 下段:最小値	$\mu(+)$	上段:最大値 下段:最小値	$\mu(-)$	
B ブレース型	正弦波	±10mm	±10mm	553	0.251	552	0.254	0.252
				450		463		0.252
				606	0.288	602	0.288	0.288
				544		548		0.288
				614	0.300	605	0.296	0.298
				584		580		0.298
±40mm	594	0.291	590	0.290	0.290			
	570		568		0.290			
	602	0.282	596	0.282	0.282			
	525		532		0.282			
	606	0.284	607	0.287	0.285			
	531		539		0.285			



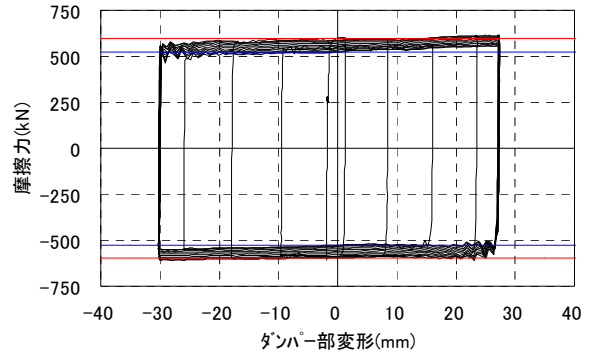
(a) B-1 層間変形±10mm(正弦波)



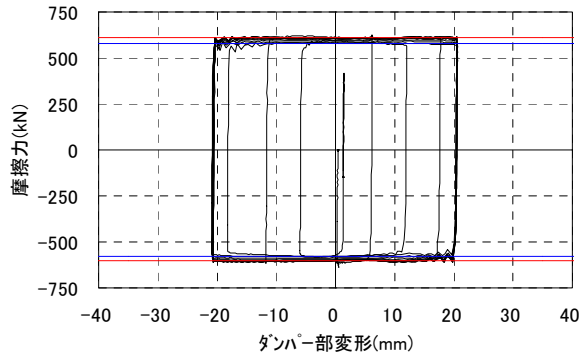
(d) B-4 層間変形±40mm(正弦波)



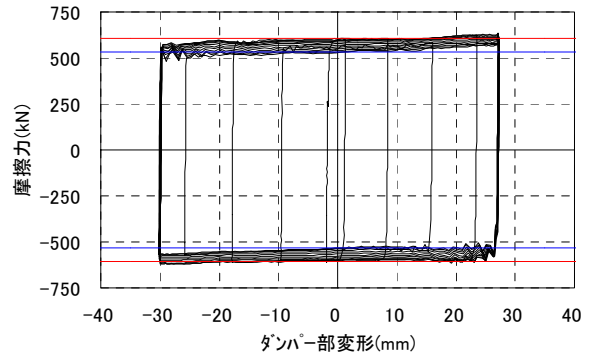
(b) B-2 層間変形±20mm(正弦波)



(e) B-5 層間変形±40mm(正弦波)



(c) B-3 層間変形±30mm(正弦波)



(f) B-6 層間変形±40mm(正弦波)

Fig. 7 摩擦力-ダンパー部軸変形関係 (ブレース型)
Relation between Frictional Force and Transformation (Brace Type)

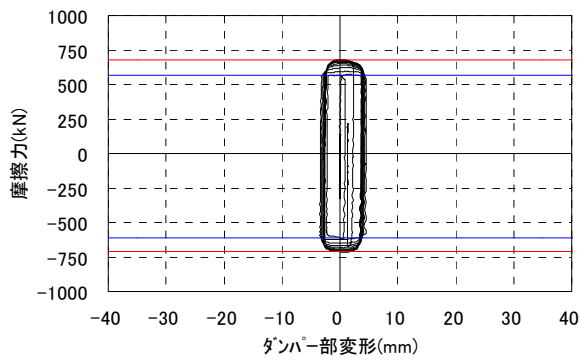
剛塑性型履歴特性を示すことを確認した。要素試験結果と同様の評価手法で最大摩擦力 (Fig. 7中に赤線で、Table 3に赤字で示す) と最小摩擦力 (Fig. 7に青線で、Table 3に青字で示す) の平均値で各試験ケースの摩擦力を評価し、摩擦係数 μ に換算すると試験開始直後のダンパー部軸変形が6mm未満のケースB-1を除き0.29~0.30程度となり要素試験の摩擦係数と良く一致する。ダンパー部の変形が鉄骨フレーム層間変形より小さいのはブレースの取り付け角度と鉄骨部材の弾性変形の影響によるものである。

5.3 間柱型ブレーキダンパー試験結果

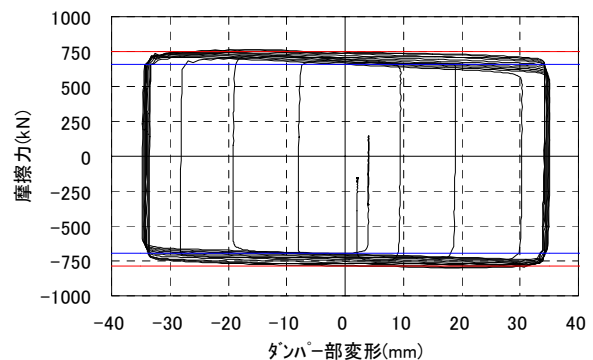
間柱型ブレーキダンパーS1試験体の摩擦力-ダンパー部せん断変形関係をFig. 8に、試験結果をTable 4に示す。全ての試験ケースで安定した剛塑性型履歴特性を示すこ

Table 4 間柱型ブレーキダンパー試験結果
Test Result of Stud Type Brake Damper

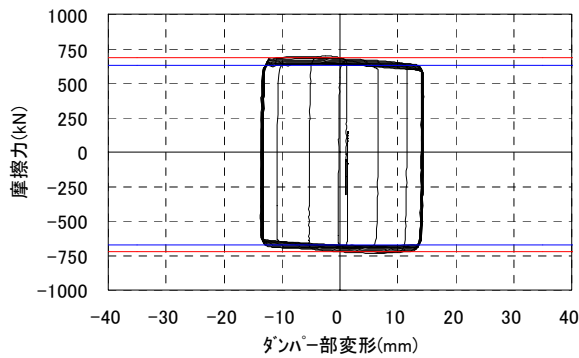
試験体名	試験名	波形	鉄骨フレーム層間変形	正側摩擦力 (kN)		正側摩擦係数 $\mu(+)$	負側摩擦力 (kN)		平均摩擦係数 $(\mu(+) + \mu(-))/2$
				上段: 最大値	下段: 最小値		上段: 最大値	下段: 最小値	
S1 間柱型	S1-1	正弦波	±10mm	679	569	0.282	714	623	0.302
				685	631		723	635	
	S1-2	正弦波	±20mm	740	682	0.321	763	695	0.329
				747	657		787	701	
	S1-3	正弦波	±30mm	744	654	0.317	776	672	0.336
				745	658		782	677	
S1-4	正弦波	±40mm	792	618	0.316	822	624	0.327	
			618	787		677	705		
S2 間柱型	S2-1	正弦波	±20mm	857	735	0.331	844	737	0.349
				857	735		844	737	
	S2-2	正弦波	±40mm	801	730	0.360	789	693	0.357
				730	789		732	712	
	S2-3	三角波	±40mm	789	732	0.346	784	712	0.335
				732	773		712	709	
S2-4	三角波	±40mm	773	717	0.344	774	709	0.338	
			717	773		709	736		
S2-5	三角波	±40mm	717	717	0.337	709	709	0.330	
			717	717		709	709		
S2-6	三角波	±40mm	717	717	0.337	709	709	0.336	



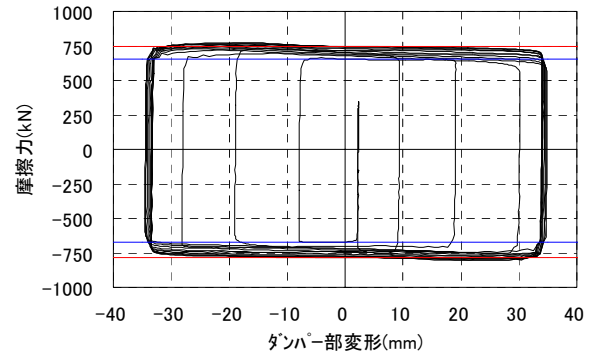
(a) S1-1 層間変形±10mm(正弦波)



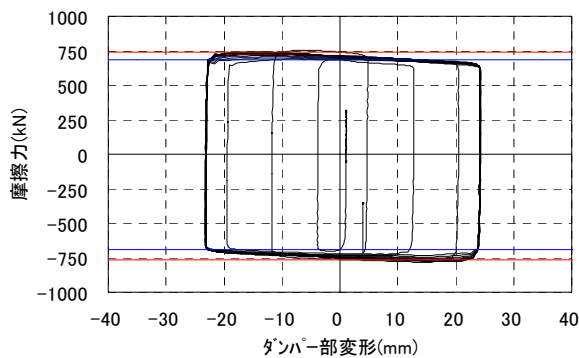
(d) S1-4 層間変形±40mm(正弦波)



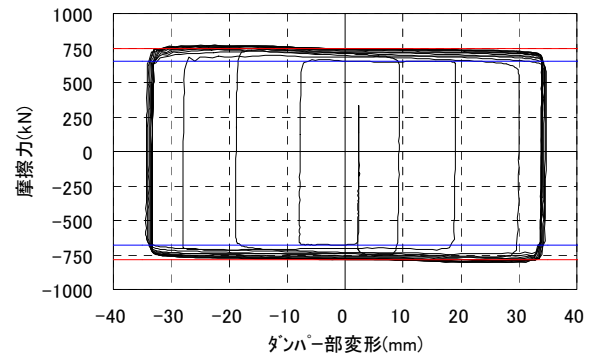
(b) S1-2 層間変形±20mm(正弦波)



(e) S1-5 層間変形±40mm(正弦波)



(c) S1-3 層間変形±30mm(正弦波)



(f) S1-6 層間変形±40mm(正弦波)

Fig. 8 摩擦力-ダンパー部せん断変形関係 (間柱型)
Relation between Frictional Force and Transformation (Stud Type)

とを確認した。ブレース型と同様に最大摩擦力（Fig. 8に赤線，Table 4に赤字で示す）と最小摩擦力（Fig. 8に青線，Table 4に青字で示す）の平均値で各試験ケースの摩擦力を評価し，摩擦係数 μ に換算すると0.29～0.36程度となり要素試験の摩擦係数とほぼ一致する。ダンパー部の変形が鉄骨フレーム層間変形より小さいのは間柱材および上下鉄骨梁の弾性変形の影響によるものである。

Fig. 9に同一加振振幅で実施した正弦波と三角波による試験結果を比較して示す。加振波形の違いによる差がないことが確認できた。

5.4 摩擦摺動部材料の状況と摺動音等について

Photo 4に試験終了後のブレース型ブレーキダンパーのブレーキ材，ステンレス板の状況を示す。ブレーキ材が摩擦してステンレス板に転写されたためステンレス板が黒く変色しているが摩擦性能に影響する損傷がないことを確認した。間柱型ダンパーのブレーキ材，ステンレス板も同様の状況であった。

ブレース型ブレーキダンパーではダンパー部の変形方向が反転した直後，スティック-スリップ現象⁶⁾が原因と思われる音が多少発生したが実用上に問題とならない程度であった。間柱型ブレーキダンパーでは音の発生は認められなかった。

6. まとめ

加力用鉄骨フレームに設置した実物大のブレース型および間柱型ブレーキダンパーの性能確認試験を実施し以下のような結果を得た。

- 1) ブレース型ブレーキダンパー，間柱型ブレーキダンパーとも安定した摩擦カーダンパー部変形関係を呈し，摩擦係数は概ね0.29～0.36（概ね0.32±10%）となる。
- 2) 要素試験による摩擦係数は，実物大ブレーキダンパーの性能確認試験で得られた摩擦係数とほぼ一致する。

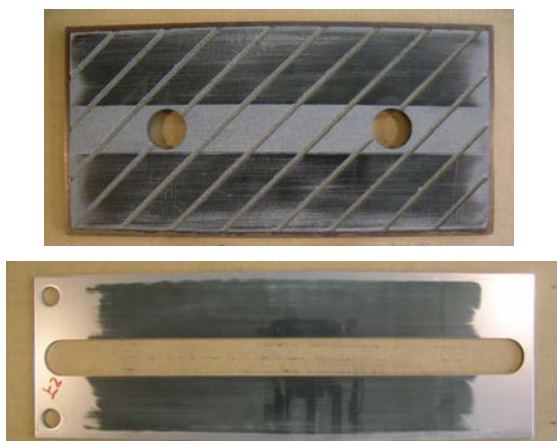
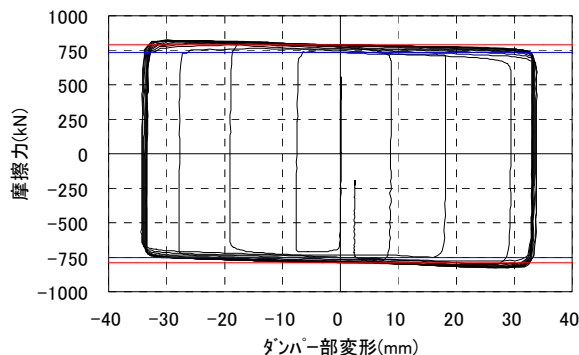
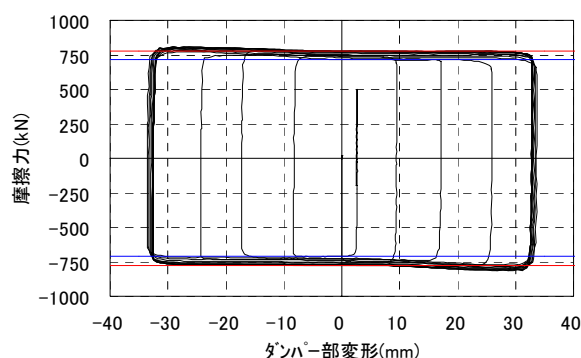


Photo 4 ブレーキ材，ステンレス板の試験後状況
(ブレース型)
Situation of Brake Pad and Stainless Plate
(Brace Type)



(a) S2-5 層間変形±40mm(正弦波)



(b) S2-6 層間変形±40mm(三角波)

Fig. 9 摩擦カーダンパー部せん断変形関係（間柱型）
Relation between Frictional Force
and Transformation (Stud Type)

- 3) ブレーキ材，ステンレス板ともに目立った損傷は生じない。また実用上に問題となる音は発生しない。

参考文献

- 1) 高橋,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)
- 2) 佐野：高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発その8，日本建築学会大会学術講演梗概集C-1，pp.639～640，(2001.9)
- 3) 佐野：高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発その9，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，pp.981～982，(2005.9)
- 4) 佐野,他：高力ボルト摩擦接合滑りダンパー（ブレーキダンパー）の開発－ブレーキダンパーの性能確認実験と実建物への適用－,大林組技術研究所報，pp.13～20，No.62，(2001)
- 5) 秋山，他：慣性加力装置を用いた構造要素の実大振動台実験方法，日本建築学会構造系論文集，pp.139～146，No.505，(1998.3)
- 6) 田中久一郎：摩擦のおはなし，日本規格協会，pp.83～94。(1985.3)