

4面摩擦「ブレーキダンパー®」の開発と実用化

鈴井 康正 佐野 剛志
野村 潤 内海 良和
(本社建築本部) (本社建築本部)

Development and Practical Application of a Brake Damper with Four-fold Shear Faces

Yasumasa Suzui Takeshi Sano
Jun Nomura Yoshikazu Utsumi

Abstract

A “brake damper” is a friction-slip damper that uses high-tension bolts. It was developed in the latter half of the 1990s, and it has been applied to many buildings. During an earthquake, the brake damper absorbs a building’s vibration energy using the frictional energy consumed by a brake pad and a stainless steel plate fastened with high-tension bolts. This paper presents two new types of brake dampers with fourfold shear faces that increase the magnitude of the sliding load of the brake damper and make it compact. The structural performance of brake dampers of the brace type and stud type were confirmed by dynamic loading tests using a practically sized steel frame. Furthermore, onsite construction and the application of brake dampers during building are described.

概 要

大林組は架構内のボルト接合部に摩擦板(ブレーキ材)とステンレス板を一对にして挟み込み、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)を開発し、既に多くの建物に適用している。既報¹⁾では、摩擦面を従来の2面から4面に増設した荷重伝達機構の異なる2種類(基本型、パイプ利用型)の4面摩擦ブレーキダンパーを考案し、要素実験により基本的な構造性能を確認した。本報では、架構への取付け方法が異なる2種類(ブレースタイプ、間柱タイプ)の4面摩擦ブレーキダンパーを対象として、実大架構を模擬した鉄骨フレームに組み込んだ状態で動的載荷実験を実施し、目標とする滑り荷重、安定した履歴特性、高い繰返し耐久性が得られることを確認した。さらに、建設現場での施工方法を確立した上で実建物に適用した結果、従来よりも施工効率が向上した。

1. はじめに

建物の主架構内に組み込んだ制震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。大林組は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)~3)}。最近では適用範囲の拡大に伴い、より一層の性能向上が要望されている。また、長周期地震動により建物が長時間にわたり大きく揺れる可能性が指摘されており⁴⁾、ダンパーの多数回繰返し特性を把握することも重要と考えられる。

既報¹⁾では、ブレーキダンパーの高荷重化・コンパクト化を目的として、摩擦面を従来の2面から4面に増設した荷重伝達機構の異なる2種類(基本型、パイプ利用型)の4面摩擦ブレーキダンパーを考案し、要素実験により基本的な構造性能を確認した。本報では、架構への取付け方法が異なる2種類(ブレースタイプ、間柱タイプ)の4面摩擦ブレーキダンパーを対象として、実大架構を用いた鉄骨フレームに組み込んだ状態で動的載荷実験を実施し、

構造性能(滑り荷重、エネルギー吸収特性、多数回繰返し特性)を確認した結果について報告する。また、建設現場での施工方法や実建物への適用状況について併せて報告する。

2. 4面摩擦ブレーキダンパーの構成と特徴

従来の2面摩擦ブレーキダンパーの基本的な構成をFig. 1(a)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素を構成する中板と外板の間に摩擦板(ブレーキ材)とステンレス板とを一对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の技術を応用しており、一定の滑り荷重で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できる。

摩擦板を構成するブレー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。ブレーキダンパーの摺動面を皿ばね⁵⁾を介した高力ボルト(以下、皿ばねボルトセットと称す)で締付けるため、ブレー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。

摩擦板とステンレス板は、それぞれ摺動面の反対側表面に摩擦係数が十分大きくなるような特殊な表面処理を施し、摩擦板や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している。

摩擦面数を従来の2面から4面に増設した2種類の4面摩擦ブレーキダンパーをFig. 1 (b), (c)に示す。Fig. 1 (b)の基本型(以下、4面Nタイプ)では、ダンパーに作用する荷重の全てを4つの摺動面の摩擦で直接伝達する。摩擦面の増設により、皿ばねボルトセット数を従来の1/2に減らすことができ、ダンパーのコンパクト化に繋がる。

Fig. 1 (c)のパイプ利用型(以下、4面Pタイプ)では、滑り荷重の1/2を高強度の鋼管(以下、パイプ)と中板および板座金との支圧を利用して伝達する。すなわち、外板に作用する荷重の1/2を「①外板・板座金間での摩擦板とステンレス板の摺動摩擦→②板座金とパイプの支圧→③パイプのせん断→④パイプと中板の支圧」により中板まで伝達する。従って、ボルトにせん断力は作用せず、導入軸力を一定に保つ役割のみを担う。また、4面Pタイプでは4面Nタイプで必要な固定側高力ボルト継手を省略でき、更なるコンパクト化が可能である。

3. ブレースタイプの動的载荷実験

3.1 目的

ブレーキダンパーが実建物に制震用ブレースとして組み込まれる場合、ブレース両端部の固定度によりダンパーに軸力と同時にせん断力が作用するため、当該条件下での滑り荷重やエネルギー吸収特性を確認する必要がある。ここでは、実大架構を模擬した鉄骨フレームにブレースタイプの4面摩擦ブレーキダンパーを組み込み、動的载荷実験により構造性能を確認する。

3.2 実験計画

3.2.1 試験体 試験体形状・寸法をFig. 2、ブレーキダンパー部分をFig. 3に示す。ブレースの断面サイズはBH-400×350×12×19、取付け角度(Fig. 2の θ)は38.4°である。4面Nタイプ、4面Pタイプのブレーキダンパーの試験体を各1体用意した。試験体は、皿ばねボルトセット、摩擦板(ブレーキ材)、ステンレス板などで構成されている。皿ばねボルトセットは高力ボルトM27と13枚並列重ねの皿ばね(外径130mm、内径65mm、板厚3.6mm)で構成されており、各試験体に計5組の皿ばねボルトセットを使用した。ボルト1本あたりの目標導入軸力を4面Nタイプで156.3kN、4面Pタイプで166.6kNとした。予め皿ばねのたわみと反発力との関係を確認し、皿ばねのたわみを計測することでボルト導入軸力を管理した。4面Pタイプに使用するパイプは、クロムモリブデン鋼鋼管SCM435TK(JIS G3441)とし、熱処理により強度を高めて使用した。

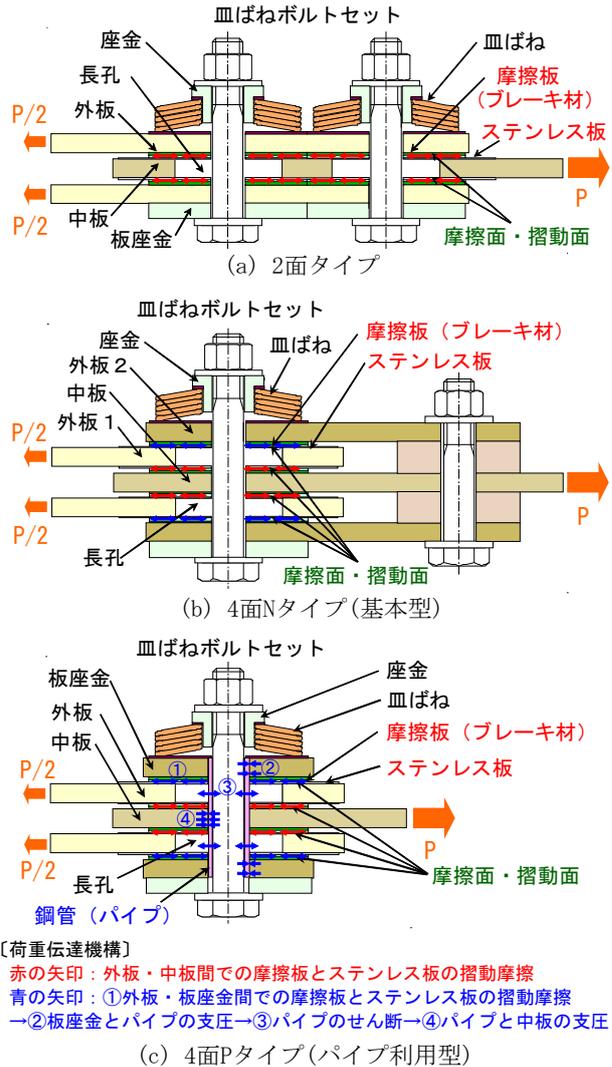


Fig. 1 ブレーキダンパーの構成
Composition of Brake Damper

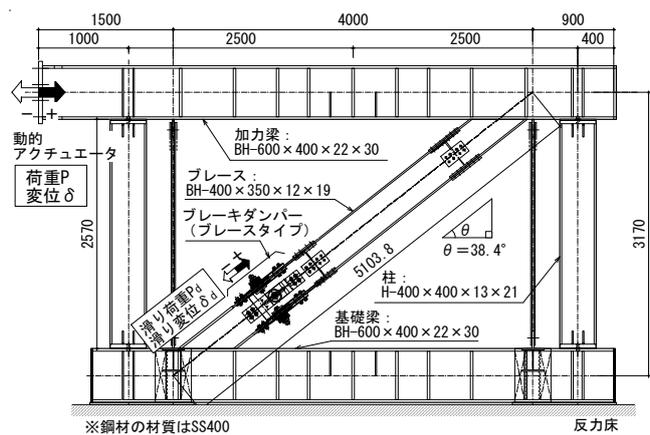
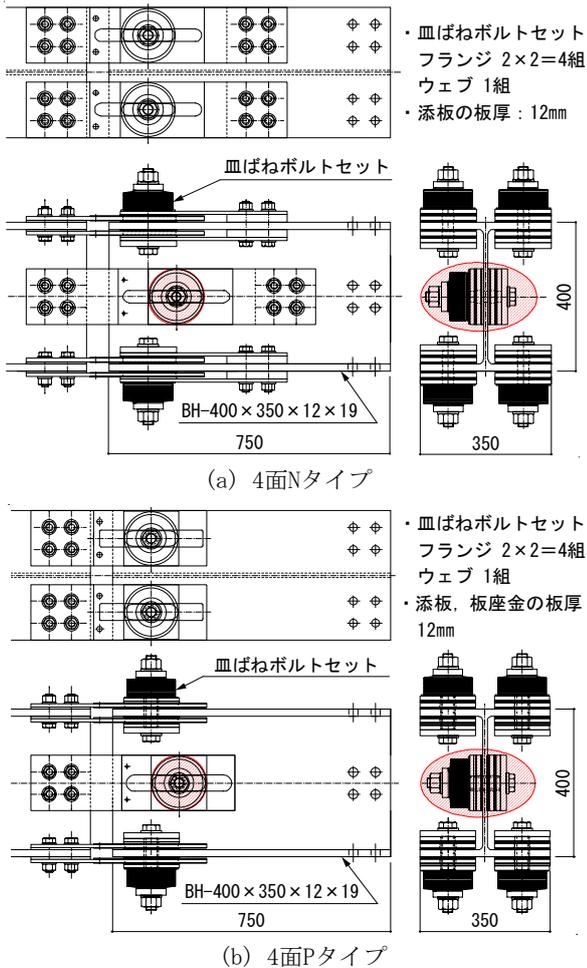


Fig. 2 試験体形状・寸法(ブレースタイプ)
Configuration and Dimensions of Test Specimens
(Brace Type)

試験体の滑り荷重が、動的アクチュエータによる荷重能力の限界(1000kN)を超えないように、ウェブの皿ばねボルトセットを完全に緩めて加振を実施した。試験体の



※ウェブの皿ばねボルトセット（赤丸ハッチ部）を緩めた状態で载荷を実施

Fig. 3 ブレーキダンパー概要(ブレースタイプ)
Outline of Brake Damper (Brace Type)

目標滑り荷重は、摩擦係数を0.32とすると、 $(156.3 \sim 166.6\text{kN}) \times 0.32 \times 4\text{面} \times 4\text{セット} = 800 \sim 853\text{kN}$ である。

3.2.2 载荷・計測方法 载荷メニューをTable 1に示す。Fig. 2に示すように動的アクチュエータを载荷用鉄骨フレームの上部加力梁の一端に接続し、変位制御により水平荷重を作用させた。载荷には定常部が10サイクルの正弦波からなる波形を用い、Table 1の試験No.1～5の順で载荷を実施した。正弦波の周期は、文献1)での载荷条件と同様の2秒とした。さらに4面Nタイプでは、試験No.6として長周期地震動を想定した周期4秒、100サイクルの正弦波による多数回繰返し载荷を実施した。

ブレーキダンパーの軸方向滑り荷重は、アクチュエータ内蔵荷重計の指示値から柱の負担せん断力（ひずみゲージより算出）とブレースのせん断力の水平成分（ひずみゲージより算出）を差引き、その値をブレース材軸方向の値に変換して算出した。

3.3 実験結果

試験体の载荷状況をPhoto 1、実験結果一覧をTable 2に

Table 1 载荷メニュー(ブレースタイプ)
Test Program (Brace Type)

試験No.	波形	周期 T (sec)	アクチュエータ振幅 δ (mm)	ダンパー目標振幅 δ_D (mm)	ダンパー目標速度 V_D (cm/s)	定常サイクル数 N_c (回)
1	正弦波	2	± 10	± 7.84	± 2.46	10
2			± 20	± 15.7	± 4.92	
3			± 30	± 23.5	± 7.39	
4			± 40	± 31.4	± 9.85	
5			± 40	± 31.4	± 9.85	
6		4	± 40	± 31.4	± 4.92	100

※载荷メニューは4面Nタイプ、4面Pタイプで共通。
ただし、試験No.6は、4面Nタイプについてのみ実施

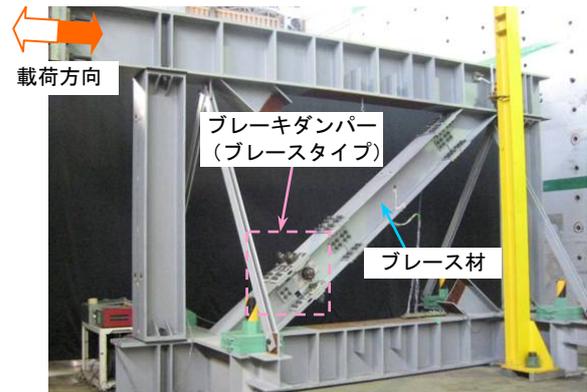


Photo 1 载荷状況(ブレースタイプ)
View of Loading Test (Brace Type)

Table 2 実験結果一覧(ブレースタイプ)
List of Test Results (Brace Type)

試験No.	周期 T (sec)	アクチュエータ振幅 δ (mm)	定常サイクル数 N_c (回)	4面Nタイプ		4面Pタイプ	
				滑り荷重 $P_{d,mean}$ (kN)	摩擦係数 μ_{mean}	滑り荷重 $P_{d,mean}$ (kN)	摩擦係数 μ_{mean}
1	2	± 10	10	615	0.246	618	0.232
2		± 20		814	0.326	801	0.301
3		± 30		864	0.346	852	0.320
4		± 40		834	0.333	816	0.306
5		± 40		818	0.327	811	0.304
6	4	± 40	100	829	0.331	—	—

示す。Table 2の滑り荷重 $P_{d,mean}$ は、ブレーキダンパーの滑り荷重—滑り変位関係から求められる全消費エネルギーを全累積滑り変位で除して算出した。また、摺動面の摩擦係数 μ_{mean} は、上述の滑り荷重 $P_{d,mean}$ とボルト目標導入軸力(4面Nタイプ：156.3kN、4面Pタイプ：166.6kN)を用いて算出した。試験No.1(アクチュエータ変位振幅 $\delta = \pm 10\text{mm}$)での载荷において、滑り荷重は若干小さな値を示した。これは、摩擦板に使用しているブレーキ材が新品で累積滑り変位が小さな範囲では、摩擦係数が低めの値になる傾向を反映している。それ以降の载荷(試験No.2～6)における滑り荷重や摩擦係数は、概ね目標値に近い値であった。

ダンパーの滑り荷重—滑り変位関係の例をFig. 4に示す。図中には滑り変位が0(原点位置)の時の滑り荷重の最大値、最小値をそれぞれ赤破線、青破線で併記している。

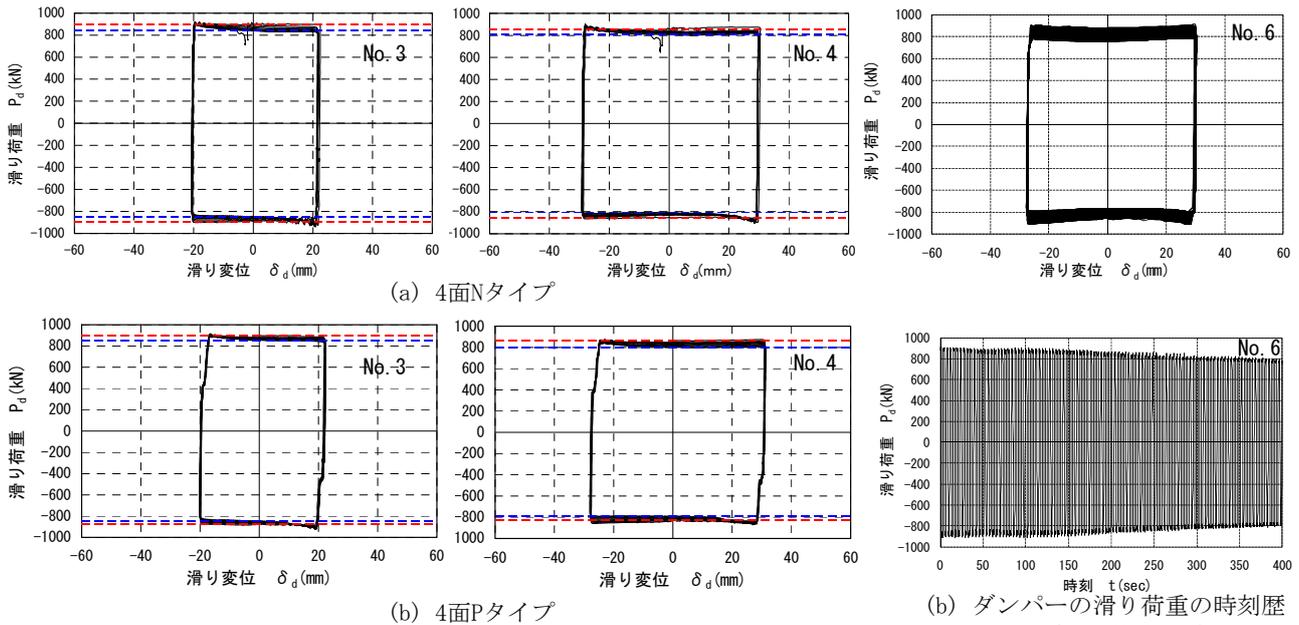


Fig. 4 ダンパーの滑り荷重-滑り変位関係(ブレースタイプ)
Sliding Load - Sliding Displacement Relationship (Brace Type)

(b) ダンパーの滑り荷重の時刻歴
Fig. 5 多数回繰返し載荷
(ブレースタイプ)
Multi-cycle Loading (Brace Type)

各試験体とも滑り荷重の変動は小さく、安定した剛塑性型の履歴特性を示している。4面Pタイプでは、パイプと中板(あるいは板座金)との間に設けた所定のクリアランスにより、滑り荷重の1/2付近(400kN程度)で荷重の棚を確認した。ブレーキダンパーが組み込まれたブレース材には、両端部の固定度の影響により、ブレース面内材軸直交方向に最大で130kN程度(試験No.4, 5)のせん断力が作用したが、終始ダンパーは円滑に作動した。

多数回繰返し載荷(試験No.6)におけるダンパーの滑り荷重-滑り変位関係、及び滑り荷重の時刻歴をFig. 5に示す。多数回繰返し載荷に対して安定した剛塑性型の履歴特性を示している。なお、100サイクル経過時の滑り荷重は、試験No.6の載荷初期の85%であった。

4. 間柱タイプの動的載荷実験

4.1 目的

ブレーキダンパーが実建物に制震用間柱として組み込まれる場合を想定し、実大架構を模擬した鉄骨フレームに間柱タイプの4面摩擦ブレーキダンパーを組み込み、動的載荷実験により構造性能を確認する。

4.2 実験計画

4.2.1 試験体 試験体形状・寸法をFig. 6、ブレーキダンパー部分をFig. 7に示す。間柱は幅1650mm、高さ2150mm、幅、高さ方向の中央位置にブレーキダンパーを配置している(ウェブ、添板の板厚は各々16mm、12mm)。4面Nタイプの試験体を1体用意した。試験体は3.2.1項と同様の皿ばねボルトセット、摩擦板(ブレーキ材)、ステンレス板で構成されており、計5組の皿ばねボルトセットを使用した。ボルト1本あたりの目標導入軸力

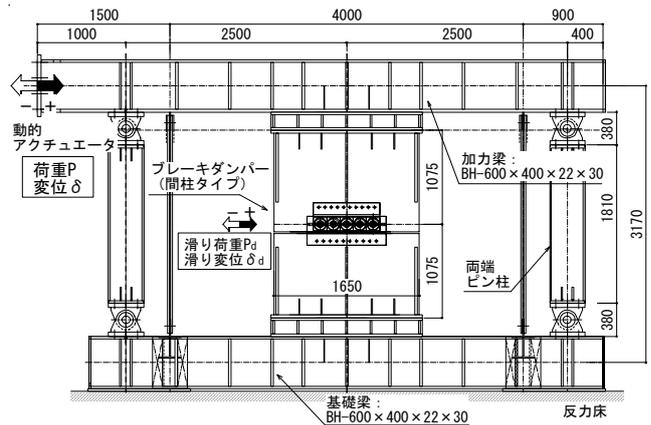


Fig. 6 試験体形状・寸法(間柱タイプ)
Configuration and Dimensions of Test Specimens (Stud Type)

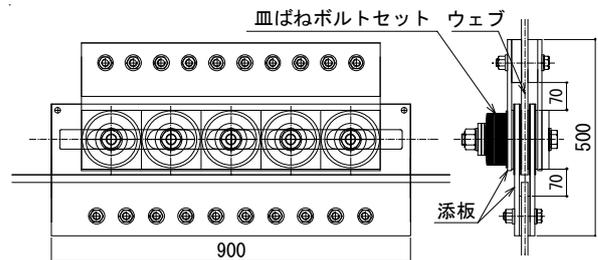


Fig. 7 ブレーキダンパー概要(間柱タイプ)
Outline of Brake Damper (Stud Type)

は136.5kNで、試験体の目標滑り荷重は摩擦係数を0.32とすると、 $136.5\text{kN} \times 0.32 \times 4\text{面} \times 5\text{セット} = 873\text{kN}$ である。

4.2.2 載荷・計測方法 載荷メニューをTable 3に示す。Fig. 6に示す載荷方法は、3.2.2項で述べた方法と同様である。なお、本章の載荷用鉄骨フレームでは、間柱の両側に両端ピン柱を配置しているため、ダンパーの滑り

Table 3 载荷メニューと実験結果(間柱タイプ)
Test Program and Test Results (Stud Type)

試験 No.	波形	周期 T (sec)	ダンパー目標振幅 δ_D (mm)	ダンパー目標速度 V_D (cm/s)	定常サイクル数 N_c (回)	滑り荷重 $P_{d,mean}$ (kN)	摩擦係数 μ_{mean}
0	正弦波	4.3	± 5	± 0.73	10	601	0.220
1			± 10	± 1.46		829	0.304
2			± 20	± 2.92		920	0.337
3			± 30	± 4.38		875	0.321
4			± 40	± 5.84		865	0.317
5	正弦波	1.7	± 10	± 3.70	10	831	0.304
6			± 20	± 7.39		853	0.312
7	地震応答解析による層間変位波 (告示波八戸NS位相)					835	0.306
8	正弦波	4.3	± 40	± 5.84	100	809	0.296

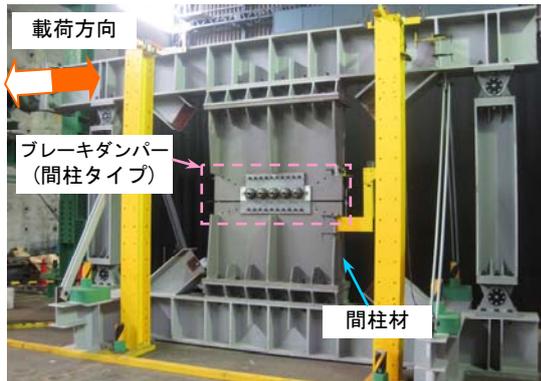


Photo 2 载荷状況(間柱タイプ)
View of Load Test (Stud Type)

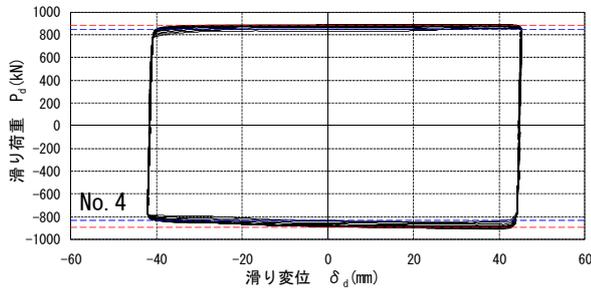
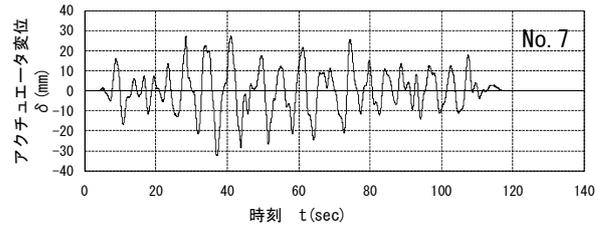


Fig. 8 ダンパーの滑り荷重-滑り変位関係(間柱タイプ)
Sliding Load - Sliding Displacement Relationship (Stud Type)

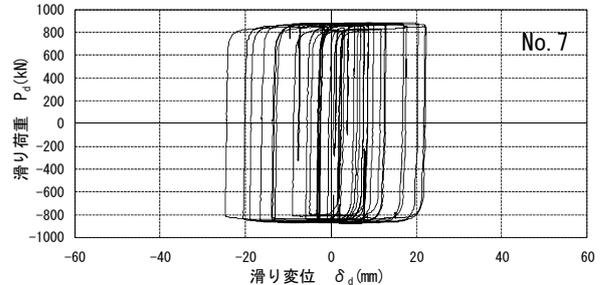
荷重はアクチュエータ内蔵荷重計の指示値と等しい。Table 3に示す試験No.0~8の载荷を順に実施した。载荷波形は、1次固有周期4.3秒、2次固有周期1.7秒の超高層建物を想定し、以下のように設定した。試験No.0~4は想定建物の1次固有周期、試験No.5~6は2次固有周期による正弦波载荷とした。試験No.7は、想定建物の地震応答解析を行い、得られた応答層間変位波形を用いて载荷を行った。試験No.8は、長周期地震動を想定した100サイクルの多数回繰返し载荷とした。

4.3 実験結果

試験体の载荷状況をPhoto 2、実験結果をTable 3に示す。Table 3の滑り荷重 $P_{d,mean}$ 、摩擦係数 μ_{mean} の算出は、3.3節で述べた方法と同様に行った。試験No.0(ダンパー目標変位振幅 $\delta_D = \pm 5\text{mm}$)での载荷において、滑り荷重は若干

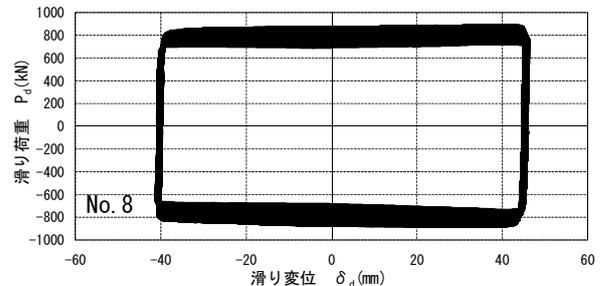


(a) アクチュエータ変位の時刻歴

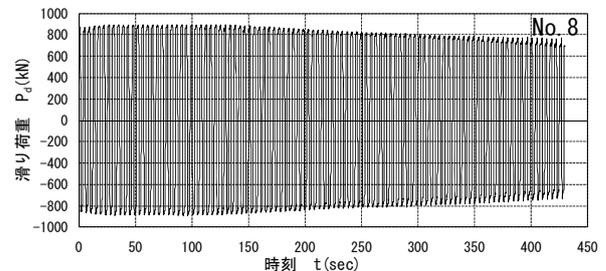


(b) ダンパーの滑り荷重-滑り変位関係

Fig. 9 応答層間変位载荷(間柱タイプ)
Response Interstory Displacement Loading (Stud Type)



(a) ダンパーの滑り荷重-滑り変位関係



(b) ダンパーの滑り荷重の時刻歴

Fig. 10 多数回繰返し载荷(間柱タイプ)
Multi-cycle Loading (Stud Type)

小さな値を示した(原因は3.3節で述べた内容と同様と考えられる)。それ以降の载荷(試験No.1~8)における滑り荷重や摩擦係数は、概ね目標値に近い値であった。

ダンパーの滑り荷重-滑り変位関係の例をFig. 8に示す。滑り荷重の変動は小さく、安定した剛塑性型の履歴特性を示している。なお、ブレーキダンパー部の面内回転角は最大で $1/1000\text{rad}$ 程度(試験No.4)と非常に小さな値であった。

時刻歴地震応答解析に基づく層間変位载荷(試験No.7)におけるアクチュエータ変位の時刻歴、及びダンパーの滑り荷重-滑り変位関係をFig. 9に示す。ランダムな地震応答時でも、ブレーキダンパーは安定して作動することがわかる。

多数回繰返し載荷(試験No.8)におけるダンパーの滑り荷重-滑り変位関係、及び滑り荷重の時刻歴をFig. 10, 実験終了後のダンパー構成部品の状況をPhoto 3に示す。ブレーキダンパーは多数回繰返し載荷に対して安定した剛塑性型の履歴特性を示し、100サイクル経過時の滑り荷重は試験No.8の載荷初期の82%であった(なお、滑り荷重の低下は滑り面の温度上昇が原因であるが、滑り面の温度が常温に戻ると、滑り荷重はほぼ回復する)。実験終了後のダンパーの構成部品(皿ばねボルトセット、摩擦板、ステンレス板)の損傷状況を確認したところ、健全な状態であった。

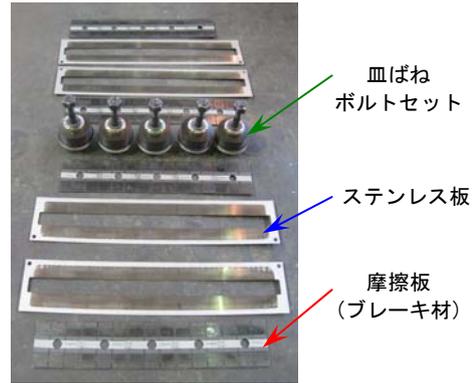


Photo 3 実験終了後の状況(間柱タイプ)
Condition of Specimens after Loading Test (Stud Type)

5. 施工方法と実建物への適用

5.1 施工方法

4面摩擦ブレーキダンパーの施工は、従来の2面摩擦ブレーキダンパーの場合とほぼ同様の方法で行うことが可能である。4面摩擦ブレーキダンパー(ダンパーの種類:4面Nタイプ, 架構への取付け方法:ブレースタイプ)の建設現場での施工状況をPhoto 4に示す。ブレースタイプの建設現場での主な施工手順は以下の通りである。

①ステンレス板、摩擦板の外板、中板への取付け→②外板の取付け→③皿ばねボルトセットの取付け→④ボルトの締付け(一次締め、本締め)→⑤皿ばね高さ測定器による皿ばね高さ(すなわち、ボルト軸力)の確認・調整。



(a) 摩擦板取付け (b) ダンパー部ボルト締付け

Photo 4 現場施工状況(ブレースタイプ)
Onsite Construction (Brace Type)

5.2 実建物への適用

ブレースタイプの4面摩擦ブレーキダンパーの鉄骨造建物への適用状況をPhoto 5に示す(建物とダンパーの概要を併記)。4面摩擦ブレーキダンパーの適用により、皿ばねボルトセット数が従来の2面摩擦ブレーキダンパーの1/2となり、ボルト締付け施工の作業効率が向上した。

＜建物とダンパーの概要＞	
建物規模	20～25階建
構造種別	鉄骨造
ダンパー設置箇所	ほぼ全階に設置
ブレーキダンパーの種類	4面Nタイプ
架構への取付け方法	ブレースタイプ
ダンパーの最大滑り荷重	約5,000kN

Photo 5 実建物への適用状況(ブレースタイプ)
Application to the Building (Brace Type)

6. まとめ

摩擦面を従来の2面から4面に増設した4面摩擦ブレーキダンパーを対象として、実大架構を模擬した鉄骨フレームに組み込んだ状態で動的載荷実験を実施し、構造性能を確認した。4面摩擦ブレーキダンパーには、ダンパーの種類として基本型、パイプ利用型の2種類があり、さらに架構への取付け方法としてブレースタイプ、間柱タイプの2種類が存在する。実験により得られた結論は以下の通りである。

- 1) 4面摩擦ブレーキダンパーでは、同じ皿ばねボルトセット数を有する従来の2面摩擦ブレーキダンパーの2倍の滑り荷重を得ることができる。
- 2) 載荷時の周期や波形に依らず、滑り荷重-滑り変位関係は安定した剛塑性型の履歴特性を示す。
- 3) 長周期地震動を想定した多数回繰返し載荷に対しても、高い繰返し耐久性を示す。

さらに、実建物への適用により、従来の2面摩擦ブレーキダンパーと比較して、ボルト締付け施工の作業効率が

向上することを確認した。

参考文献

- 1) 鈴井康正, 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)
- 2) 高橋泰彦, 他: 高力ボルト摩擦接合滑りダンパー開発 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)
- 3) 野村潤, 他: 高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発 その11～その13, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.1069～1074, (2010.9)
- 4) 例えば, 日本建築学会 構造委員会 長周期建物地震対応ワーキンググループ: 長周期地震動対策に関する公開研究集会, (2011.2)
- 5) 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)