

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

佐野 剛 志

鈴 井 康 正

日 野 泰 成

(本社 キヤノン販売品川J.V.)
高 橋 泰 彦

(本社 設計本部設計第12部)

Development of Friction Slip Damper using High Tension Bolts

Experiment on Brake Damper and Application to Building

Takeshi Sano Yasumasa Suzui

Yasunari Hino Yasuhiko Takahashi

Abstract

Many vibration control systems have been developed to reduce damage to buildings during earthquakes. This paper proposes a friction slip damper using high tension bolts. This damper absorbs the vibration energy of a building using the frictional energy consumed by a brake pad and a stainless plate fastened with the high tension bolts. The pressure of the friction surface can be kept constant and a stable friction damping force can be achieved by fastening the brake pad and the stainless plate through a coned disc spring. Furthermore, maintenance is unnecessary for a mechanism that is not damaged even in a large earthquake, and materials are used that do not age. This paper describes the characteristics of this damper and an application example in a building.

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。本論文では架構内のボルト接合部にブレーキ材とステンレス板を挟み込み、地震時の建物の揺れの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エネルギーに変換することで制震効果を発揮する高力ボルト摩擦接合滑りダンパーを提案する。本ダンパーはブレーキ材とステンレス板を皿バネを介した高力ボルトで締め付けるため、ダンパー作動時に摺動摩擦面の面圧を一定に保持することが可能で、安定した摩擦減衰力が期待できる。また、大地震に遭遇しても損傷が生じない機構を有し、構成部材に経年変化の生じない材料を用いるためメンテナンスが不要である。ここでは提案したダンパーの基本減衰性能、建物への適用について述べる。

1. はじめに

近年、建物の主要架構内に様々な制震デバイスを組込むことにより、地震時における建物の損傷を制御する技術の開発が各方面で進められている。本論文では、高力ボルト摩擦接合部を改良して所定以上の応力が作用した時、意図的に接合部に相対変位（滑り摩擦）を起こし建物の揺れのエネルギーを吸収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またはBDと称す）を提案する。またブレーキダンパーの基本減衰性能や耐久性を確認するため開発段階で行った動的加力実験、大型振動台による加振実験等で得られた実大ブレーキダンパーの構造性能ならびに鉄骨造高層実建物への適用例について述べる。

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。本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架構の接合部にブレーキ材とステンレス板を一對にして鋼材で挟み込んだ耐震・制震システムである。自動車のディスクブレーキを応用したもので、一定の耐力を負担すると同時に、ダンパーに所定以上の力が作用すると建物の振動エネルギーを摺動摩擦熱に変換し吸収する。

安定した滑り荷重（摩擦力）を得るためにはブレーキ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必要がある。本ダンパーの接合部は皿バネを介した高力ボルトで締め付けるため、ブレーキ材の摩耗等に伴う締め付け長さの変化に対して軸力変動が少なく安定した摩擦減衰特性（復元力特性）が期待できる。

3. ブレーキダンパー単体の動的加力実験

3.1 実験目的

ブレーキダンパーの基本的な減衰特性、耐久性、摺動摩擦音の有無などを確認する目的で正弦波波形による動的加力実験²⁾を実施した。

3.2 試験体

3.2.1 試験体パラメータ 試験体のパラメータはFig.1に示すようにステンレス鋼材の配置によるタイプ（中板にステンレス鋼材を用いブレーキ材を接着した外板で挟むAタイプとブレーキ材を接着した中板をステンレス薄板を介して外板で挟むBタイプ）、高力ボルトの本数、皿バネの重ね枚数、加力パターン等とした。ブレーキ材には厚さ3mmの複合摩擦材FT-66Hを用い、Bタイプの試験体のステンレス板には厚さ1.5mmのSUS304を、皿バネは外径120mm、内径60mmで厚さ3.2mmの製品を用いる。試験体の概要をFig.2に、試験体一覧をTable 1に示す。Table 1にはブレーキ材に複合摩擦材FT-66Hを用いた試験体のみを示した。

3.2.2 皿バネの荷重-たわみ関係 実験で使用する皿バネ1枚の荷重-たわみ関係をFig.3に示す。皿バネのたわみの変動に対して荷重変動の小さい領域である皿バネ全密着たわみの75%に相当するポイントを目標とし、±10%を施工上の許容誤差範囲とし高力ボルトの軸力導入を行った。皿バネを6枚並列に（同一方向に重ねて）使用した時の目標導入軸力は $10.7 \times 6 = 64.1 \text{ kN}$ である。

3.3 加力方法と加力波形

加力は動的アクチュエータによる引張・圧縮の繰返し加力とした。加力波形は、ブレーキダンパーの基本的な性能を確認するための地震動を模擬した振動数0.5Hzの基本波（累積変位が振幅40mmの正弦波10波に相当）、振動数（速度）依存性を確認するための振幅±40mmで振動数0.01Hz～0.7Hzの10サイクルの正弦波、および耐久性を確認するため振幅±20mmで振動数0.5Hzの正弦波100サイクルを3シリーズ一定時間間隔（ダンパー中板の側面温度が常温に回復するまでの時間）隔てて断続的に加力する波形の計3種類とした。基本波形をFig.4に示す。

3.4 測定方法

ブレーキダンパーの滑り荷重（P）は動的アクチュエータ

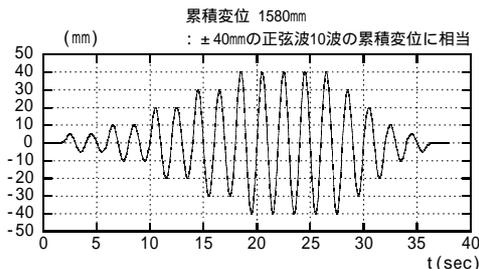
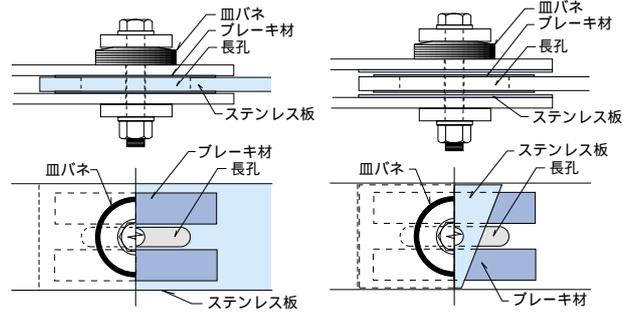


Fig. 4 加力波形（基本波，f=0.5Hz）
Schedule of Excitation



(a) 中板にステンレス鋼を使用 Aタイプ
(b) 添板にステンレス板を挟込む Bタイプ

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

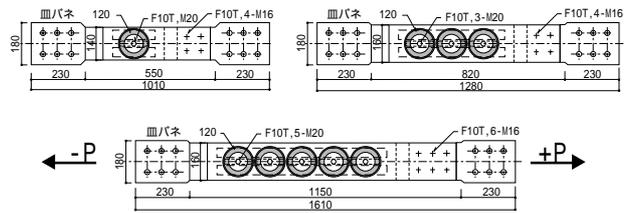


Fig.2 試験体概要
General View of Brake damper for Experiment

Table 1 試験体一覧
Specification of Brake damper for Experiment

パラメータNo.	項目	仕様	試験体No.												
			5	7	11	13	14-1 14-5	15	16	18	20	22	24-1 24-3	25	26-1 26-3
1	試験体のTYPE		A	A	A	A	A	A	B	B	A	B	B	B	A
2	確認項目 ²⁾		*1	*1	*1	*1	*2	*3	*3	*1	*3	*3	*1	*3	*1
3	滑り板の表面仕上	2B #150HL													
4	皿バネ重ね枚数	6 10													
5	ブレーキ材の溝	なし 深さ1.0mm 深さ0.5mm													
6	1列ボルト本数	1 3 5													

< 凡例 >

1) ブレーキ材FT-66H使用。ステンレス薄板の固定側には摩擦接合用塗料を塗布

2) *1: 基本的性能の確認: 地震動を模擬した振動数0.5Hz、最大振幅±40mmの「基本波」を使用

*2: 振動数依存性の確認: 振動数0.01～0.7Hz、振幅±40mm、1091%の正弦波を使用

*3: 耐久性の確認: 振動数0.5Hz、振幅±20mm、10091%の正弦波を使用

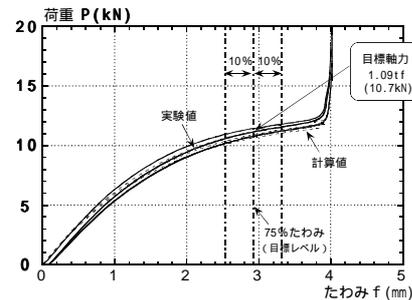


Fig.3 皿バネの荷重-たわみ関係

Relation between Load and Transformation of Coned Disc Spring

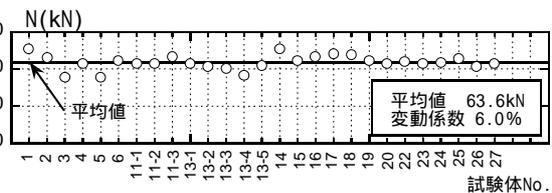


Fig.5 高力ボルト導入軸力のばらつき
Tensility Distribution of High Tension Bolt

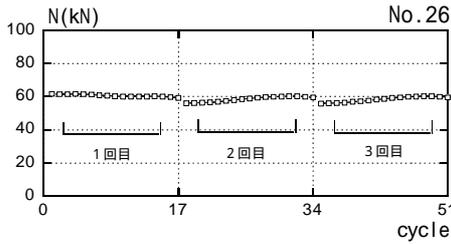


Fig. 6 ボルト導入軸力の推移
Change of Tensility on High Tension Bolt

エータ内蔵ロードセルで、滑り変位()は差動トランス型変位計で計測した。高力ボルトの軸力はボルト軸部に貼付した一对の歪みゲージの平均値より算出した。

3.5 実験結果

3.5.1 導入軸力のばらつき Fig. 5に皿パネを6枚重ねで使用した試験体における高力ボルトの初期導入軸力値とばらつきを示す。トルク一定(235.2N・m)で締め付けを行った場合、導入軸力の変動係数は6%以内となる。

Fig. 6にNo. 26試験体に基本波を断続的に3シリーズ加力した場合の高力ボルトの軸力変化を示す。各シリーズにおけるボルト軸力の変動係数は3%程度と非常に小さく皿パネによる軸力保持効果が確認できた。

3.5.2 摩擦係数のばらつき P - 関係を基にFig. 7に示す手法で摩擦面の平均滑り荷重を算出し、ボルトの軸力で除して算出した摩擦係数(μ)とばらつきをFig. 8に示す。摩擦係数の平均値は0.308で、変動係数は9.1%と小さいことがわかる。

Fig. 9, Fig. 10に基本波で断続的に3シリーズ加力した場合の代表的な2体の試験体(No. 26, No. 24)の摩擦係数の推移を示す。加力間隔は滑り板側面の温度が常温に回復するまでの時間とした。各シリーズにおける摩擦係数の変動係数は4~6%で実用上問題ない程度である。

3.5.3 滑り荷重 - 滑り変位関係 試験体(No. 26, No. 24)のP - 関係をFig. 11, Fig. 12に示す。ブレーキ材とステンレスの接触面が両者の摩擦によって多少馴染むまで初期の滑り開始時に多少摩擦力の上昇が見られるが、以後は安定した完全剛塑性型の履歴特性を示すことがわかる。また、ブレーキダンパー作動中に不快な摺動摩擦音が発生しないことを確認した。本試験結果より復元力特性はFig. 13のようにモデル化できる。

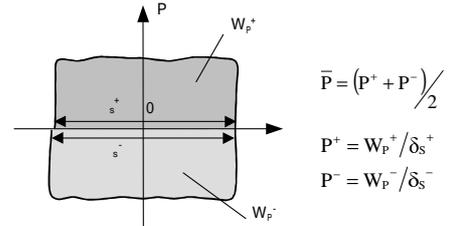


Fig. 7 各サイクルごとの平均滑り荷重の算出
Calculation of Average Friction Force

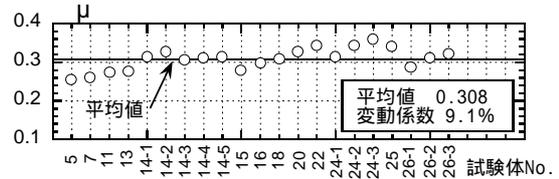


Fig. 8 摩擦係数のばらつき
Distribution about Coefficient of Friction

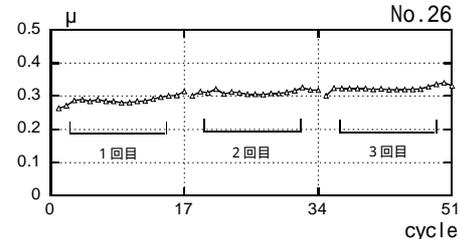


Fig. 9 各サイクルごとの摩擦係数
Coefficient of Friction in Each Cycle

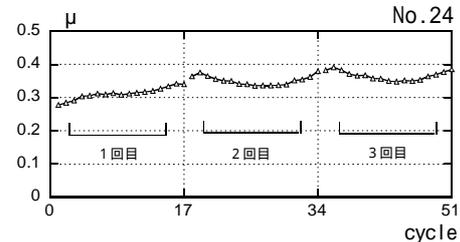


Fig. 10 各サイクルごとの摩擦係数
Coefficient of Friction in Each Cycle

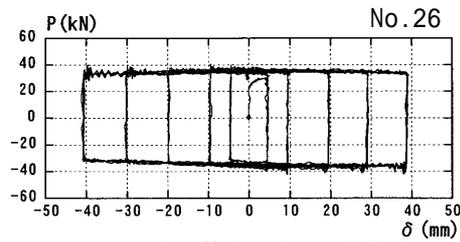


Fig. 11 滑り荷重 - 滑り変位関係
Relation between Load and Displacement of Brake Damper

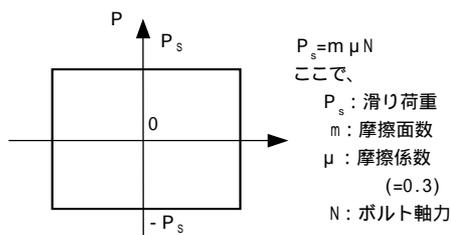


Fig. 13 ブレーキダンパーの復元力特性モデル
Model of Restoring Force Characteristics for Brake Damper

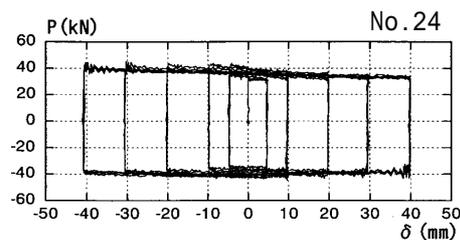


Fig. 12 滑り荷重 - 滑り変位関係
Relation between Load and Displacement of Brake Damper

3.5.4 振動数依存性の確認 Fig.14に摩擦係数と振動数の関係を示す。摩擦係数の平均値は0.314で、変動係数も2.5%と極めて小さく振動数依存性は殆ど無い。なおAタイプとBタイプ間で減衰性能に差は生じなかった。

3.5.5 耐久性の確認 Fig.15にNo.25試験体の耐久性試験3シリーズのうち最初のシリーズの各サイクルごとの摩擦係数とブレーキ材近傍の温度の推移を示す。加振回数が増加しても安定した減衰性能を発揮することがわかる。ブレーキ材近傍温度は約190℃まで上昇した。

4. 実大ダンパーの大型振動台実験

ブレーキダンパーを組込んだ実大部材の構造性能の把握を目的とし、実大ブレース型ブレーキダンパーの大型振動台による加振実験を実施した。主な目的は、滑り荷重 (Pd) - 滑り変位 (d) 関係、摺動摩擦音の有無、摩擦による温度上昇などの基本的な性能把握と、滑り変位が限界変位を超えた場合の挙動確認である。

4.1 実験計画

4.1.1 実験計画 実験装置概要をFig.16に示す。本実験では科学技術庁防災科学技術研究所の電気油圧サーボ式大型振動台に設置した慣性加力装置³⁾を用いて試験体への動的加振を行う。慣性加力装置は約2000kNの重錘(慣性重量)を4基の積層ゴムで支持する免震構造となっている。振動台の加振に伴い、応答速度が増幅された慣性加力装置(重錘)の慣性力を利用して、試験体(左端に斜めに設置したブレース型ブレーキダンパー)に大きな軸方向力(Pd)を作用させることができる。実験状況をPhoto 1に示す。

4.1.2 試験体 H形鋼ブレースのフランジにブレーキダンパーを組込んだ試験体の概要をFig. 17に示す。ダンパー部分はFig. 1に示したAタイプを採用し、H形鋼のフランジ片側に6組、合計12組設置した。試験体の最大滑り荷重は約40kN、最大滑り変位は±40mm(長孔100×22)とした。他の仕様はTable 2に示す通りである。

4.1.3 加振方法 Table 3に加振計画を示す。本加振用の振動台上波形には、El-Centro NS波(1940)をTable 3に示す最大速度(5~60cm/sec)に規準化して用いた。

4.1.4 測定方法 試験体の滑り荷重(Pd)は加力梁のロードセル値、試験体の滑り変位(d)は差動トランス型変位計により測定した。高力ボルトの軸力はボルト軸部に貼付した歪みゲージの測定値より算出する。計測

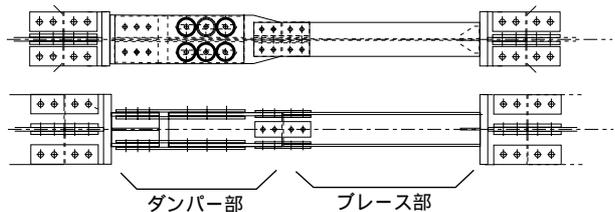


Fig. 17 試験体概要

General Veiw of Brake damper for the Excitaion Experiment

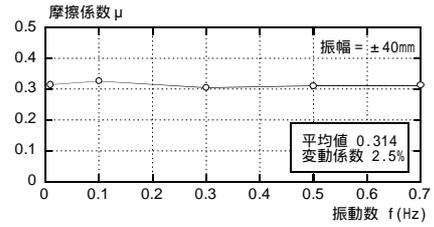


Fig.14 摩擦係数 - 振動数関係

Frequency Dependence about Coefficient of Friction

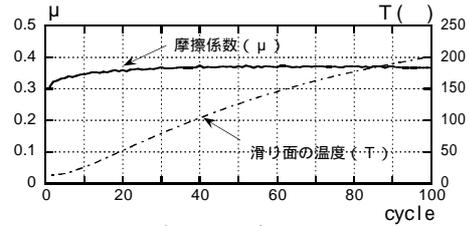


Fig.15 ブレーキダンパーの耐久性

Durability of Brake Damper

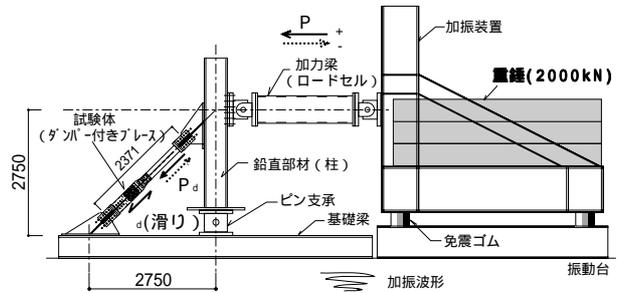


Fig.16 実験装置概要

Outline of Excitation Experiment used Vibration Table



Photo 1 実験状況

General View of Experiment

Table 2 ブレーキダンパーの仕様

Specification of Brake Damper

構成要素	仕様
皿パネ	90 × 50.5 × t2.7 × h6.1、6枚重ね、計12箇所 (1枚あたりの許容支持力: Na=10.9kN)
長孔	最大変形±40mm、施工誤差±15mmを考慮
高力ボルト	JIS形高力ボルトF10T, M20
ブレーキ材	複合摩擦材 FT-66

は1000Hzで行い、計測結果は5ステップごとに平均化する処理を施した。

4.2 実験結果

4.2.1 実験結果概要 Table 4に実験結果の概要を示す。パルス加振により試験体を含めた加力装置の固有周期が0.40sec、減衰定数が4.4%となることを確認した後、本加振を実施し、ダンパーが限界滑り変位を超える加振レベルに達するまで加振を行った。

Fig. 18, Fig. 19に30cm/sec, 60cm/sec入力時のダンパーの滑り荷重(Pd) - 滑り変位(d) 関係を示す。30cm/sec入力時の Pd - d関係は滑り荷重一定の安定した完全弾塑性型の履歴ループを描く。また、加振中の摺動摩擦音も小さい。一方、60cm/sec入力時には、滑り変位が限界滑り変位の d = 45mmを超えるため、高力ボルトがステンレス板の長孔端部に接触し金属音が発生する。このとき接合部が支圧応力状態に変化するため荷重が上昇するが、実験では長孔が僅かに変形した程度でボルトの飛散、破断などは生じていない。しかし、実建物にブレーキダンパーを適用する場合は、限界変位と高力ボルトのせん断耐力に十分余裕を確保する必要がある。

4.2.2 平均滑り荷重・摩擦係数・ボルト軸力 Fig. 20に各加振レベルにおける平均滑り荷重、摩擦係数、ボルト軸力を示す。平均滑り荷重はFig. 7に示す方法で算出した。ここでは各加振レベルにおいて最も滑り変位の大きい Pd - d関係のループを代表ループと呼ぶこととし、この代表ループに関して上記の算出法を適用した。算定結果は累積消費エネルギー(W_{Pi})を横軸にして整理した。加振レベルの上昇に伴い、滑り荷重、摩擦係数は若干上昇する。これはブレーキ材から発生する摩耗粉が完全には外部に排出されず滑り面に残存したためと考えられる。高力ボルトの軸力変動は極めて小さい。

4.2.3 滑り面温度上昇 Fig. 21に各加振終了時のダンパー滑り面近傍の温度(熱電対により測定)を示す。滑り面の温度上昇幅は各加振レベルでの消費エネルギー(W_{Pi}) に比例し、終局加振終了時の温度は約65 となった。加振終了後に摺動面の観察を行ったが温度上昇に伴うブレーキ材の劣化等は確認できなかった。

Table 3 加振計画
Schedule of Excitation

＜本加振＞				
加振手順	加振レベル	最大速度 (cm/sec)	特徴	備考
1. パルス加振				
・固有周期、減衰定数の把握	1	5	弾性加振	
・計器の動作確認	2	20	弾塑性加振	
	3	25	"	
2. 本加振	4	30	"	逆向き
・ダンパーの性能確認	5	40	"	
(弾性 弾塑性 終局)	6	50	"	逆向き
・EI Centro NS(1940)入力	7	60	終局加振	逆向き

Table 4 実験結果概要
Outline of Experiment Result

- 1. パルス加振
系の固有周期 0.40sec、減衰定数 4.4%
- 2. 本加振

加振レベル	最大速度 (cm/sec)	振動台加速度 (cm/sec ²)	ダンパー		
			状態	滑り荷重 (kN)	滑り変位 (mm)
1	5	-138	弾性	-365	-0.8
2	20	-209	滑り開始	447	-16.1
3	25	-244	↑	-410	-28.8
4	30	308	安定滑り	-422	30.5
5	40	-354		-448	-31.3
6	50	325	↓	-459	47.0
7	60	425	ボルト接触	855	52.1

(注)振動台加速度、滑り荷重、滑り変位は最大値を示す。

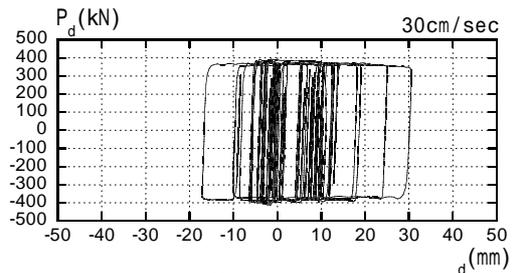


Fig. 18 滑り荷重 - 滑り変位関係
Relation between Load and Displacement of Brake Damper

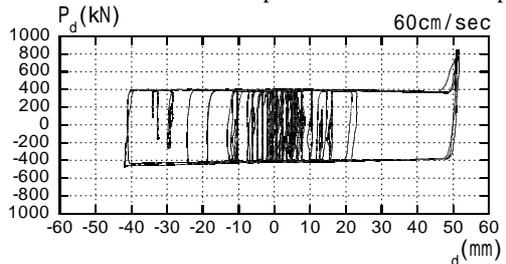


Fig. 19 滑り荷重 - 滑り変位関係
Relation between Load and Displacement of Brake Damper

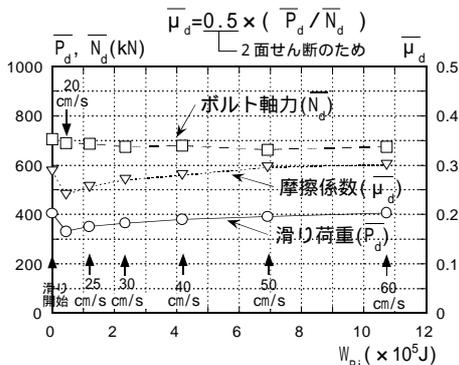


Fig. 20 加振レベル別のブレーキダンパー特性
Damping Characteristic according to Excitation Level

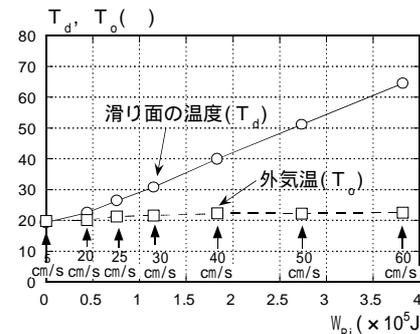


Fig. 21 加振レベル別の滑り面温度
Friction Surface Temperature according to Excitation Level

5. 高層建物への適用例

5.1 建物概要

ブレーキダンパーを採用した実建物の全景および概要をFig.22, Table 5に示す。基準階伏図および軸組図をFig.23, Fig.24に示す。基準階は、おおむね40m×40mの正方形の形状をしており、Y形ブレース・ダンパー、ブレース型ブレーキダンパーおよび間柱型ブレーキダンパーの3種類の履歴型ダンパーを建物コア部分に配置する構造計画となっている。

5.1.1 ブレース型ブレーキダンパー 本建物のY方向に採用したブレース型ブレーキダンパー（Fig.25参照）の断面形状はH-400×450×300であり、フランジとウェブの高力ボルト継手部に摩擦接合面を設けた。ブレーキダンパーの滑り荷重は、1380kN～2240kNで、全架構剛性に対するダンパーの剛性負担率は、27～56%である。

5.1.2 間柱型ブレーキダンパー X方向の4階から8階に設けた間柱型ブレーキダンパー（Fig.25）は、H-1000×350の間柱の上下束材間のウェブに摩擦接合面を設け、水平方向と鉛直方向両方の変位に対して滑り摩擦力が発生するディテールとした。ブレーキダンパーの滑り荷重は623kN～757kNである。全架構剛性に対するY形ブレース・ダンパーと間柱型ブレーキダンパーの剛性負担率は、合計で14～61%である。いずれのブレーキダンパーも、直径100と120の皿パネを組合せた構成となっており、ブレーキダンパー取付け部周辺の架構は、ダンパーの滑り耐力の1.3倍以上の応力に対して短期許容応力度以内となるよう設計されている。



Fig.22 建物全景
Whole View of the Building

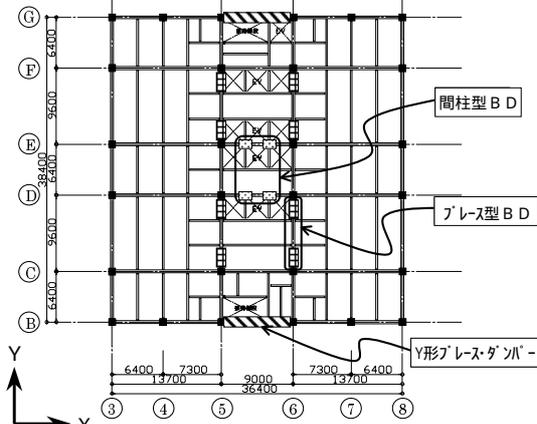


Fig. 23 基準階キープラン
Plan in Standard Floor

Table 5 建物の概要
Outline at the Building

用途	事務所・店舗・駐車場
面積	建築面積 3062.00 m ² , 延床面積 57273.81 m ²
階数	地上30階、地下3階、塔屋2階
高さ	建物最高部高さ GL+147.80m 基準階階高 4.10m
構造種別	地上階 鉄骨造ブレース付ラーメン構造 地下階 鉄骨鉄筋コンクリート造 耐震壁付ラーメン構造
基礎形式	直接基礎（べた基礎）

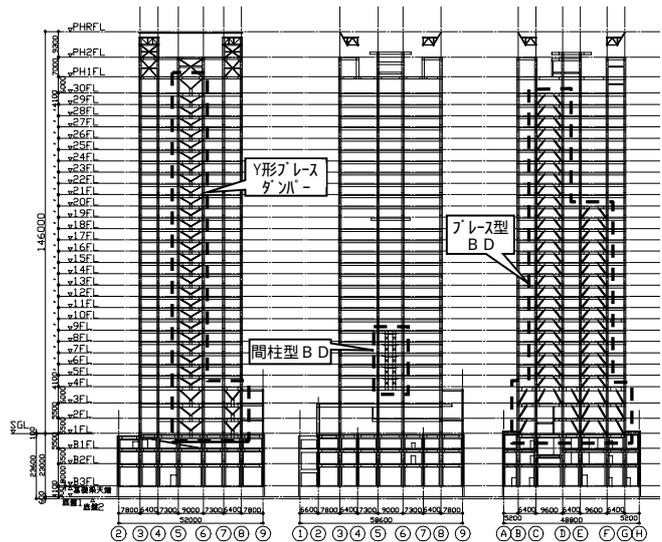


Fig. 24 軸組図
Framing Elevation

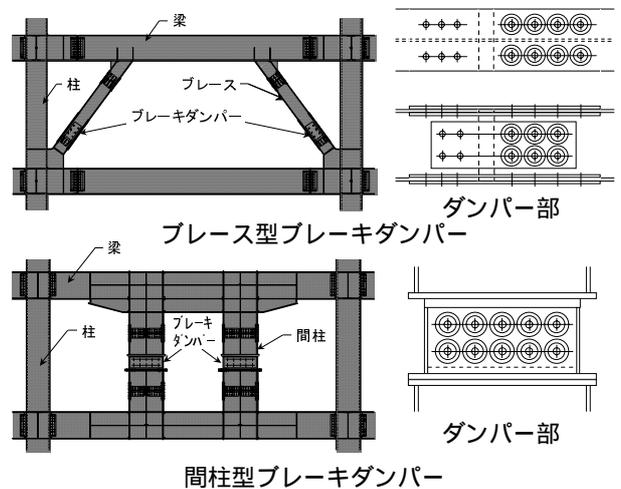


Fig. 25 ブレーキダンパーの適用形態
Application Form of Brake Damper

5.2 建物の耐震設計

ここでは特に間柱型ブレーキダンパーに関する設計および検討結果に的を絞って報告する。

5.2.1 間柱型ブレーキダンパーのモデル化 解析用の立体骨組みモデルにおいて、間柱型ブレーキダンパーの摩擦接合部（以下リンク部と称す）は軸力とせん断力の影響を考慮するため、MSS (Multi-Shear-Spring) モデル⁴⁾によりモデル化した (Fig.26)。

5.2.2 MSSモデルの概要 MSSモデルとは、同一平面内に多数の弾塑性ばねを等角度に配して、多方向耐力相関（ここでは水平方向と鉛直方向）の影響を考慮できる解析モデルである。本設計では剛塑性の復元力特性を持つ8方向のばねで構成されるMSSモデルをX-Z平面内に配置することにより、間柱型ブレーキダンパーの力学特性をモデル化した (Fig.27)。

5.2.3 MSSモデルの妥当性の検討 間柱型ブレーキダンパーのモデル化に用いたMSSモデルの妥当性を確認するため、実設計に先立ち、滑り荷重 - 滑り変位関係について実挙動を忠実に再現したシミュレーション（ばねが無数に有るMSSモデルに相当）とMSSモデル（8方向ばね）によるシミュレーションの消費エネルギー等を比較した。両モデルとも剛塑性ばねモデルと

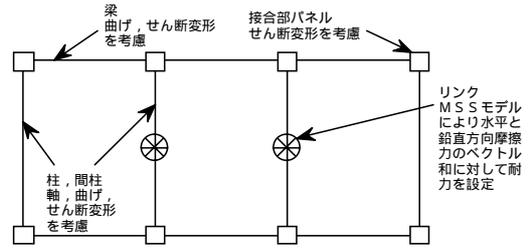


Fig.26 間柱型ブレーキダンパーの解析モデル Analytical Model of Column-Type Brake Damper

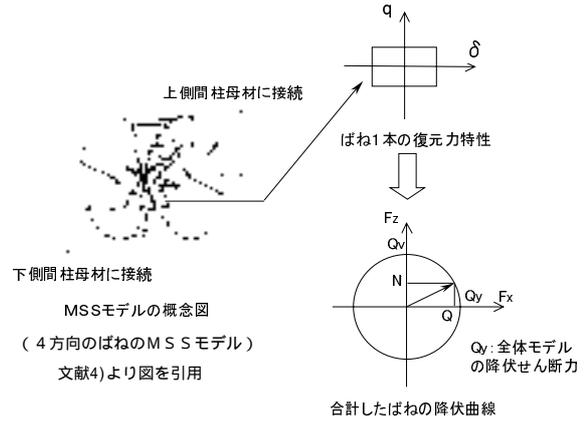


Fig.27 MSSモデルの概念図 Conceptual Diagram of MSS Model

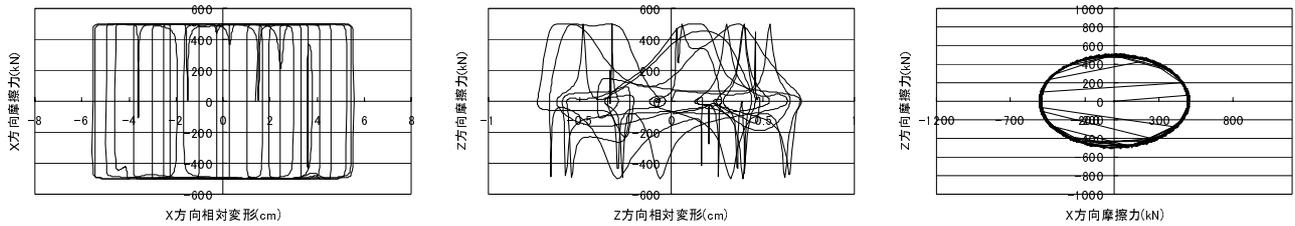


Fig. 28 実挙動下の滑り荷重 - 滑り変位関係, 水平摩擦力 - 鉛直摩擦力関係 Relation Between Load and Displacement under the Actual Phenomenon

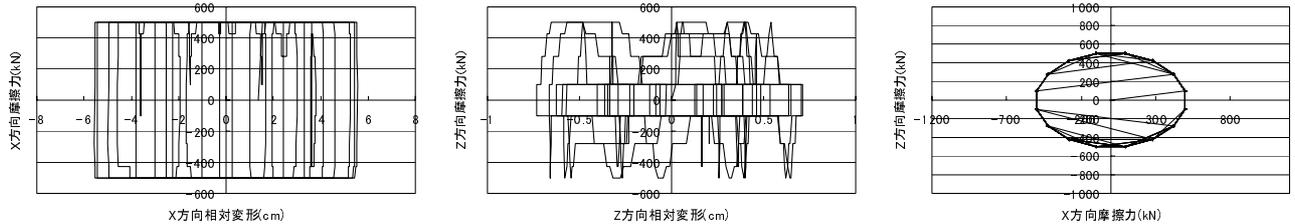


Fig. 29 MSSモデルを用いたシミュレーションによる滑り荷重 - 滑り変位関係, 水平摩擦力 - 鉛直摩擦力関係 Relation Between Load and Displacement by the Simulation used MSS Model

し、建物固有周期の1次から3次までに相当する正弦波を組合せた水平(X)方向最大振幅約55mm,鉛直(Z)方向最大振幅約8mmの2方向入力合成正弦波に対するシミュレーションを行った。合成正弦波の継続時間は20秒である。Fig.28およびFig.29に両モデルによる方向別滑り荷重（摩擦力）と相対変位の関係,滑り耐力を490kNとした場合の水平方向摩擦力と鉛直方向摩擦力の関係を示す。両図よりMSSモデルが実挙動のシミュレーション結果をほぼ忠実に再現することがわかる。また、履歴消費エネルギー量による比較でも両者の差は約1.2%であり、MSSモデルが設計上十分な精度であることを確認した。

5.3 地震応答解析

5.3.1 振動解析モデル 地震応答解析は、3次元立体骨組モデルの静的荷重増分解析結果より求めたNormal Tri-Linear型の層剛性を有する33質点等価せん断型串団子モデルを用いて行った。減衰定数は瞬間剛性比例型とし1次に対して2%に設定した。X方向の固有周期は、1次:3.59秒,2次:1.39秒,3次:0.85秒である。

5.3.2 振動解析結果 Fig.30に、レベル2相当入力時の検討用に作成したサイトの地盤特性を反映した模擬地震動に対するX方向入力時のエネルギー応答解析結果を示す。ブレーキダンパーによる履歴付加減衰量は、内部粘

性減衰による応答解析終了時のエネルギー消費量を減衰定数で2%相当として比較すると1.7%程度であると判断できる。

5.4 部材応答解析による検証

5.4.1 串団子モデルと部材モデルとの比較 Fig.31にレベル2模擬地震動に対するX方向入力時の串団子モデルと部材モデルの層間変形角と層せん断力の最大応答値の比較結果を示す。本建物では串団子モデルが部材モデルの性状をほぼ正確に反映していることがわかる。

5.4.2 M S Sモデルの時刻歴応答 Fig.32にレベル2模擬地震動に対する間柱型ブレーキダンパーのリンク部のせん断力（X方向摩擦力）と軸力（Z方向摩擦力）の関係を示す。最大応答せん断力は4階で約760kN、8階でも約760kNとおおむね等しいが、最大応答軸力は4階で約650kNであるのに対し8階では約150kNと減少しており下層階ほど軸力が大きいことがわかる。軸力成分による摩擦消費エネルギーが当該層全体の消費エネルギーに占める割合は4階が11.0%、8階が0.42%となった。

5.5 滑り面長孔の設定方法

間柱型ブレーキダンパー滑り面の長孔の形状は、保有水平耐力時（静的荷重増分解析において、ある層の層間変形角が1/80を超えた時点）における鉛直方向および水平方向の滑り量が限界滑り量以下となるように定めた。ここで、限界滑り量は[長孔径(H, V) / 2 - ボルト半径(d) - 施工誤差(δ)]と定義した（Fig.33参照）。なお、レベル2時の最大応答層間変形角は1/126であり、保有水平耐力時の層間変形角1/80に対し1.5倍以上の余裕を見込んだ。

6. まとめ

高力ボルト摩擦接合滑りダンパーを提案し、実験で基本性能を確認した。また、30階建て鉄骨造事務所ビルへの適用例について示した。以下に結果をまとめて示す。

- 1) ブレーキダンパーは広範な加振レベルにおいて制震ダンパーに要求される基本的な性能（安定した完全剛塑性型の滑り荷重 滑り変位関係、摺動時の静粛性、ブレーキ材等の耐久性等）を有することを確認した。
- 2) 実建物への適用を通じて、ブレーキダンパーの有効性を示した。また間柱型ブレーキダンパーはM S Sモデルで検討できることを確認した。

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) 小野, 徳山, 井上: アルミ溶射摩擦ダンパーの静的履歴特性に関する研究(その2)実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集B構造, pp.589~590,

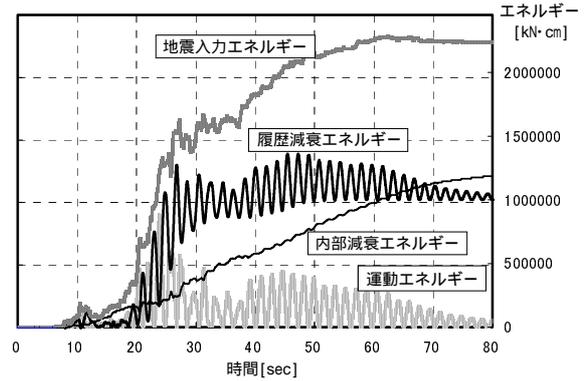


Fig.30 エネルギー応答解析結果
Response Analysis Result expressed in Energy

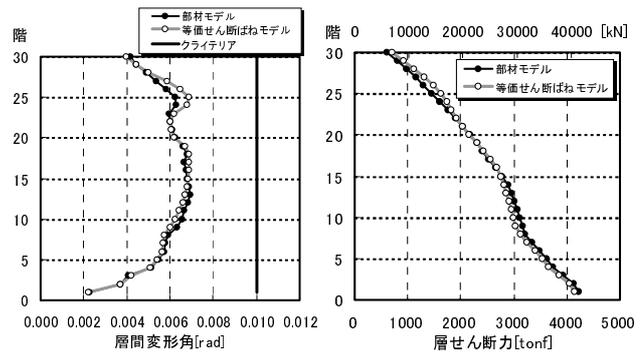


Fig.31 最大応答層間変形角と最大応答層せん断力
Maximum Value of Story Deformation Angle and Shear Force

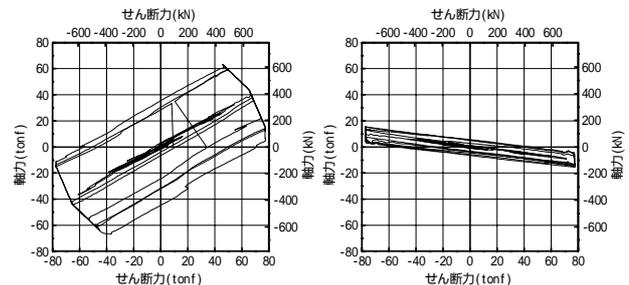
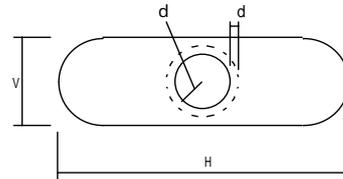


Fig.32 水平方向摩擦力と鉛直方向摩擦力の関係
Relation between Longitudinal Load and Vertical Load



限界滑り量 = 長孔径 (H, V) / 2 - ボルト半径 (d) - 施工誤差 (δ)

Fig.33 限界滑り量の定義
Definition in the Transformation Limit

(1993.9)

- 3) 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)
- 4) 和田, 木下: M S Sモデルを用いたビル建築の弾塑性立体振動応答解析法, 第9回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, pp.317~322, (1985.7)