

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

平田 寛 佐野 剛志 鈴井 康正
野村 潤 内海 良和 中塚 光一
(本社建築本部) (本社建築本部) (本社設計本部)

Development and Application of Multi-step “Brake Damper®”

Hiroshi Hirata Takeshi Sano Yasumasa Suzui
Jun Nomura Yoshikazu Utsumi Koichi Nakatsuka

Abstract

A “brake damper” is a friction-slip damper that uses high-tension bolts, and it has been applied to many buildings. During an earthquake, the brake damper absorbs the building’s vibration energy through the friction between a brake pad and a stainless steel plate fastened with high-tension bolts. They are the dampers with double shear faces, the dampers with four-fold shear faces. Although these brake dampers are designed to absorb vibration of a building by fixed slide load to a big earthquake, multi-step brake damper is developed in this study that can adjust the sliding in with multiple steps, this damper is applied it to the OL2 building of the Obayashi Technical Research Institute. The structural performance of the brake damper is confirmed by dynamic loading tests preformed using practically sized brake dampers and test specimens of the damper units.

概要

大林組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对にして挟み込み、安定した滑り荷重を発揮することで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。従来のブレーキダンパーは、大地震時の大きな揺れに対して一定の滑り荷重で建物の揺れを吸収するように設計されてきたが、近年は、中小地震に対してもエネルギー吸収効果を発揮するダンパーに対するニーズが高まっている。今回新たに開発した多段階ブレーキダンパーを用いると、中小地震から大地震まで幅広い範囲の揺れに対して高い制振効果を期待した設計が可能となる。本論文では、多段階ブレーキダンパーの概要、実大試験体やダンパー要素試験体の動的載荷実験結果、実建物への適用にあたり実施した地震応答解析結果について報告する。

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。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)}。従来のブレーキダンパーは、滑り荷重が1段階であり、主に大地震時の揺れに対して大きな制振効果を発揮するような設計がなされてきた。しかし、近年は、継続時間の長い長周期地震動の後揺れに対してもダンパーのエネルギー吸収性能を期待したいというニーズが高まっている。

今回新たに開発した多段階ブレーキダンパーを用いると、中小地震から大地震まで幅広い範囲の揺れに対して高い制振効果を期待した設計が可能となる。

本論文では、多段階ブレーキダンパーの概要、要素試験体や実大試験体の動的載荷実験結果、実建物への適用例について報告する。

2. 多段階ブレーキダンパーの構成と特徴

ブレーキダンパーは皿ばねを介したボルトセットで摩擦板（ブレーキ材）とステンレス板の摺動面を締結し、摺動面の面圧を一定に保持することで安定した滑り摩擦力を発揮する制振装置であり、Photo 1 に示すように基本ユニットを組み合わせることで構成する。

従来のブレーキダンパーの基本ユニット（2面基本ユニット、4面基本ユニット）の構成と履歴特性モデルを

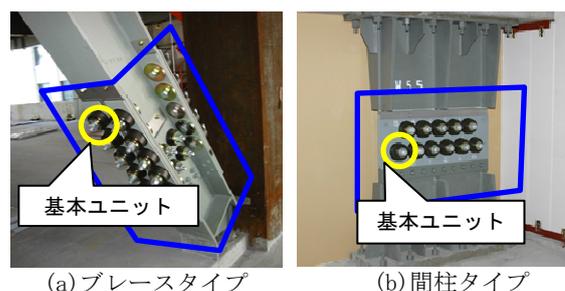


Photo 1 ブレーキダンパーの適用例
Example of Brake Damper Appliance

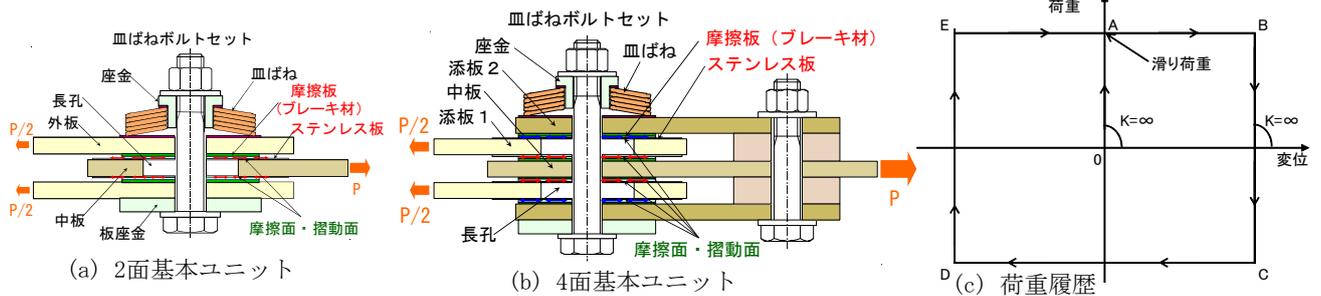


Fig. 1 従来のブレーキダンパーの基本ユニットの構成
Unit of Brake Damper (Normal Type)

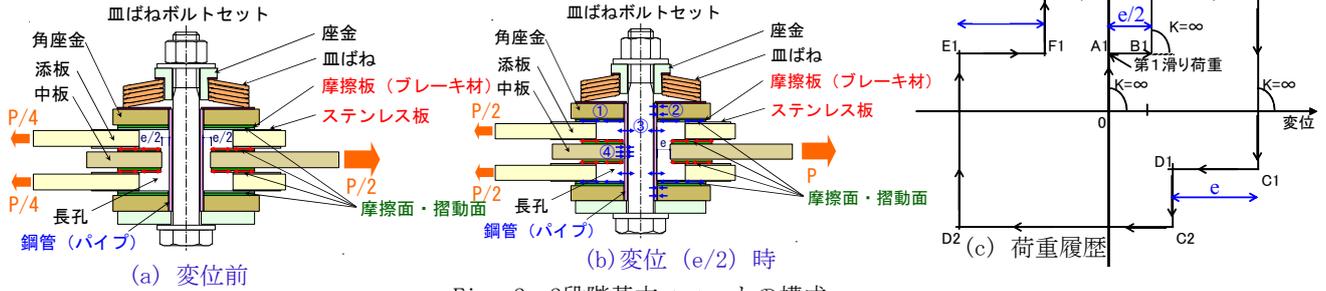


Fig. 2 2段階基本ユニットの構成
Unit of Brake Damper (Step Type)

Fig. 1, 今回考案した2段階基本ユニットの構成と履歴特性モデルをFig. 2に示す。2面基本ユニット, 4面基本ユニットが剛塑性型の復元力特性となるのに対し, 2段階基本ユニットは, 変位に応じて2段階に滑り荷重が変化するため, 2段階の剛塑性型の復元力特性となる。

2段階基本ユニットでは, Fig. 2に示す中板・添板間, 及び添板・角座金間の計4面に, 摩擦板とステンレス板を一对にして挟み込み, 高力ボルトの周囲に高強度の円形鋼管 (以下, パイプ) を配置している。さらに, 中板・添板の双方に長孔を設置し, パイプ外表面と中板の長孔端部との間に一定のクリアランス (Fig. 2 (a) で $e/2$, e : クリアランス全長) を設けている。

Fig. 2 (a) に示す変位量 $< e/2$ の小変位時には, 中板と添板の間の摩擦面でのみ滑りが生じ, このときの摩擦面数は2面である。一方, Fig. 2 (b) に示す変位量 $\geq e/2$ の大变位時には, パイプが中板の長孔端に接触し, パイプを介して中板と角座金が一体となって動くため, 摩擦面数は4面となり, 滑り荷重は小変位時の2倍となる。このように, 2段階基本ユニットは, 滑り荷重を2段階に調整可能なため, 中小地震から大地震までの建物の広範囲な揺れに対して, 制振効果を発揮する。

なお, この時, パイプの中のボルトには直接せん断力は作用しないため, ボルトは導入軸力を一定に保つ役割のみを担う。

さらに, 異なる長径寸法の中板を有するユニットを組み合わせることで, 2段階以上の剛塑性型の復元力特性有する「多段階ブレーキダンパー」を実現できる。多段階ブレーキダンパーの復元力特性の構成例をFig. 3に示す。多段階ブレーキダンパーは, 細かく滑り荷重を設定することができ, 地震力レベルに応じてより詳細な設

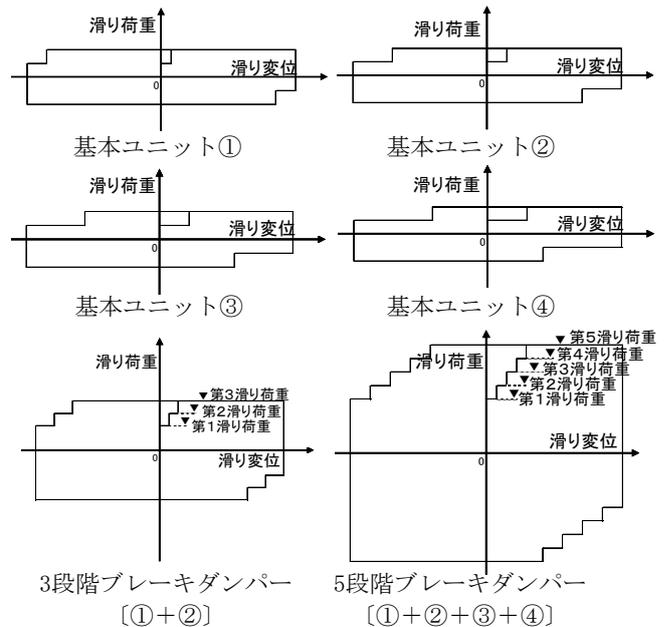


Fig. 3 多段階ブレーキダンパーの復元力特性
Example of Multi-Step Brake Damper

計が可能である。例えば, 3段階では, 現行の設計用地震動に対しては, 第1滑り荷重, 第2滑り荷重を設定し, さらに大きな地震動に対して, 第3滑り荷重を設定するという設計が考えられる。

3. 2段階基本ユニットの要素実験

3.1 実施内容

2段階基本ユニットの基本特性と多数回繰返し特性を確認するために, 要素試験体を用いた水平一方向 (ダンパー作動方向) の動的載荷実験を実施した。

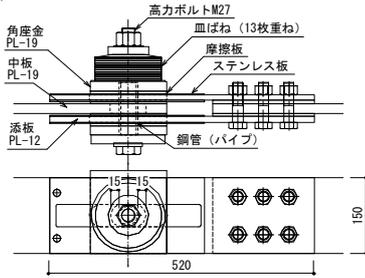


Fig. 4 試験体概要
Brake Damper



Photo 2 載荷状況
Loading of Brake Damper

3.2 実験計画

3.2.1 試験体 試験体概要を Fig. 4 に示す。試験体は、2 段階基本ユニットを 1 セットで、高力ボルト M27 と 13 枚の皿ばね（外径 130mm、板厚 3.6mm）で構成した。ボルトの目標導入軸力を 156.3kN、摺動面の摩擦係数を 0.32 として、2 段階基本ユニットの滑り荷重（目標値）を算出すると、以下となる。

第 1 滑り荷重：156.3kN×0.32×2 面=100kN

第 2 滑り荷重：156.3kN×0.32×4 面=200kN

なお、パイプと中板に設けた長孔端部とのクリアランス全長 e を 30mm とした。

3.2.2 載荷・計測方法 載荷状況を Photo 2 に示す。要素試験体を用いて速度 50mm/sec の三角波による動的載荷を行った。繰返し特性確認載荷として振幅±20mm 及び±40mm で 20 サイクル、多数回繰返し載荷として振幅±40mm で 100 サイクルの載荷を行った。なお、変位振幅として、ダンパーの滑り変位を計測した。

3.3 実験結果と考察

繰返し特性確認載荷時におけるダンパーの滑り荷重－滑り変位関係を Fig. 5 に示す。最初の数サイクルの滑り荷重は小さな値を示すが、それ以降は、2 段階からなる剛塑性型の安定した履歴性状を示している。また、第 1 及び第 2 滑り荷重の目標値に対するばらつきは小さく、概ね目標通り（e=30mm）の滑り変位で滑り荷重が 2 段階に切り替わっていることが分かる。

多数回繰返し載荷時におけるダンパーの滑り荷重－変位関係を Fig. 6 (a)、各サイクル平均滑り荷重－累積滑り変位関係を Fig. 6 (b) に示す。各サイクル平均滑り荷重は、正荷重側、負荷重側及び第 1、第 2 滑り荷重での各サイクルのダンパーの消費エネルギーを累積滑り変位で除して算出した。

100 サイクルでの連続載荷に対しても、履歴性状の変化や第一及び第二滑り荷重の低下は 10%程度に収まっており、高い繰返し耐久性を有することがわかる。

4. 実大架構実験

4.1 実施内容

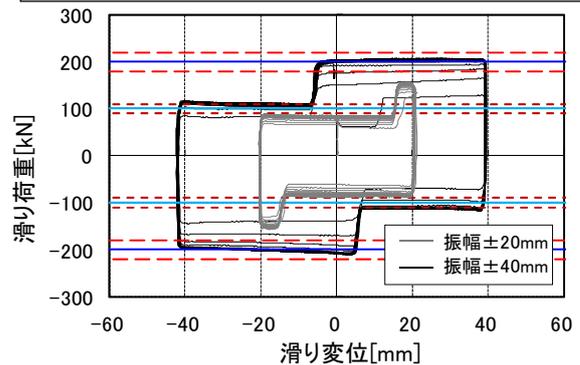
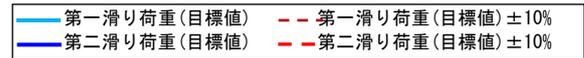
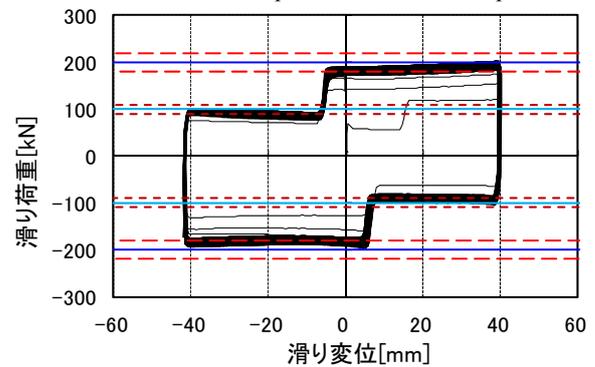
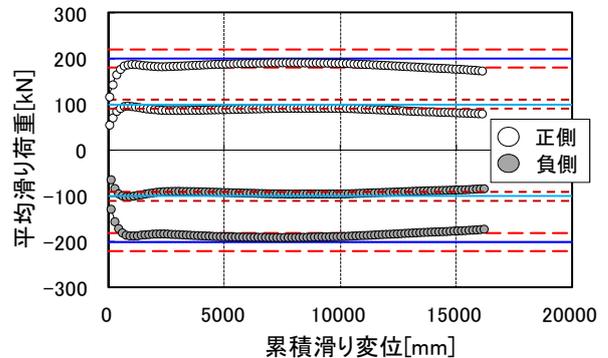


Fig. 5 滑り荷重 - 変位関係
(ブレーキダンパーの繰返し特性)
Load - Displacement Relationship



(a) 滑り荷重 - 変位関係



(b) 平均滑り荷重 - 累積滑り変位関係

Fig. 6 ブレーキダンパーの多数回繰返し特性
Multi-cycle Loading of Brake Damper

ブレースタイプ及び間柱タイプの 2 段階および多段階ブレーキダンパーを、実大架構を模擬した鉄骨フレームに組み込み、動的載荷実験により性能確認を行った。

4.2 実験計画

4.2.1 試験体 試験体を組み込んだ載荷用鉄骨フレームの形状・寸法を Fig. 7 に、ダンパー部概要を Fig. 8 に示す。

試験体一覧と、摺動面の摩擦係数を 0.32 として算出した各試験体の滑り荷重の目標値を Table 1 に示す。

試験体 B-2、C-2 は、ブレースタイプと間柱タイプの 2

段階ブレーキダンパーで、B-2は、フランジを2段階基本ユニット4セット、ウェブを2面基本ユニット2セットで構成した。C-2は、2段階基本ユニット5セットで構成した。

試験体B-3は、ブレースタイプの3段階ブレーキダンパーで、フランジにクリアランス全長eを10mmと20mmとした2種類の2段階基本ユニットを各2セット、ウェブに2面基本ユニットを2セットとしている。

試験体C-3は、間柱タイプの3段階ブレーキダンパーであり、クリアランス全長eを10mmと30mmとした2種類の2段階基本ユニットをそれぞれ3セットと2セットを用いている。

試験体C-7は、間柱タイプの7段階ブレーキダンパーで

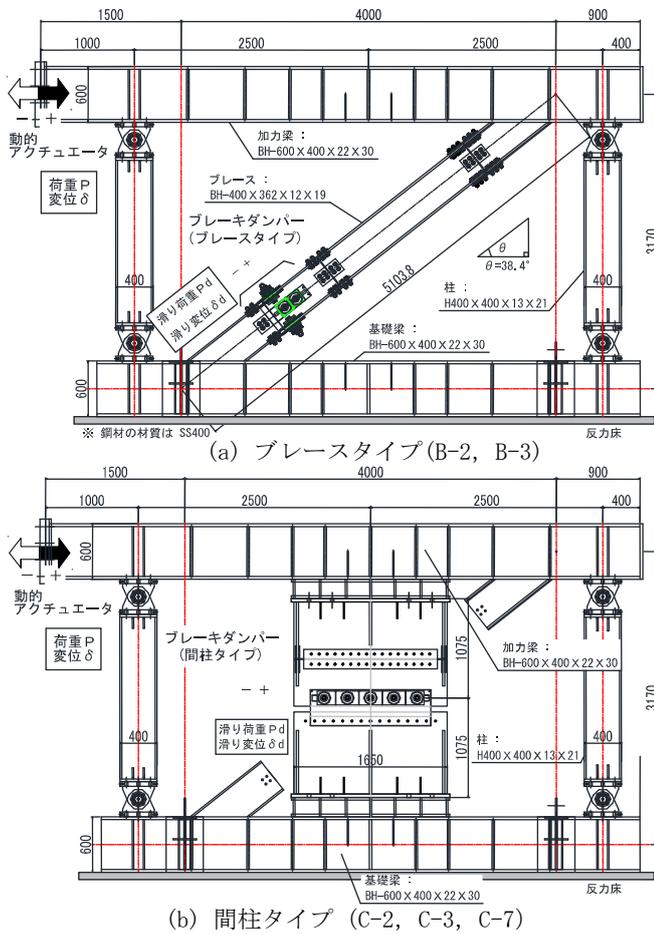


Fig. 7 実大架構の形状・寸法
Configuration and Dimensions of Test Specimens

Table 1 試験体一覧
List of Specimens

試験体名称	形式	履歴	ボルト張力	基本ユニットの構成	滑り荷重	クリアランス全長e
B-2	ブレース	2段階	156.3kN	2段階×4セット(フランジ) 2面×2セット(ウェブ)	600kN(第1), 1000kN(第2)	20mm
C-2	間柱	2段階	156.3kN	2段階×5セット	500kN(第1), 1000kN(第2)	30mm
B-3	ブレース	3段階	156.3kN	2段階×4セット(フランジ) 2面×2セット(ウェブ)	600kN(第1), 800kN(第2), 1000kN(第3)	10mm, 20mm
C-3	間柱	3段階	156.3kN	2段階×5セット	500kN(第1), 800kN(第2), 1000kN(第3)	10mm, 30mm
C-7	間柱	7段階	95.3kN	2段階×6セット	468kN(第1)~936kN(第7) (1段あたり78kNずつ上昇)	5mm~30mm (5mmピッチ)

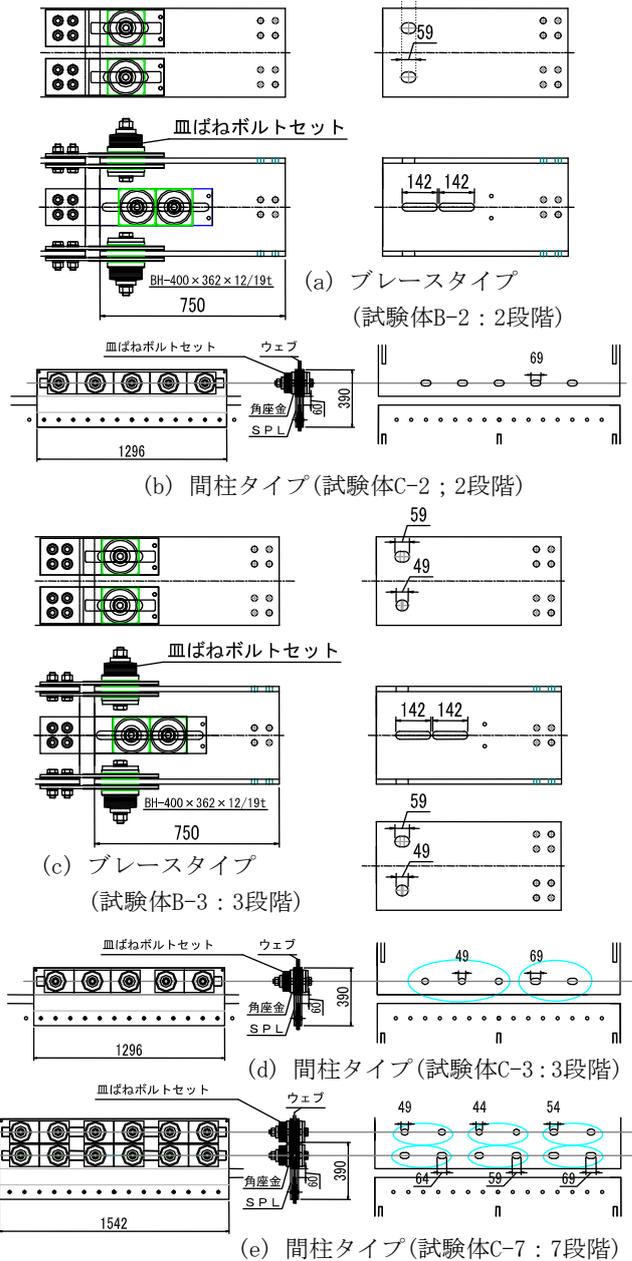


Fig. 8 ダンパー部概要
Outline of Brake Damper

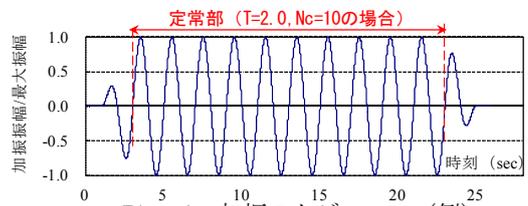


Fig. 9 加振スケジュール (例)
Example of Loading Schedule

Table 2 加振メニュー
Loading Menu

試験No.	周期T (sec)	振幅δ (mm)	サイクル数 Nc (回)
1	2	10	10
2		20	10
3		30	10
4	4	40	10
5		40	100
6		応答変位波 (最大振幅40mm)	

あり、クリアランス全長 e を5mmから30mmまで5mmピッチの6種類とした2段階基本ユニットをそれぞれ2セットずつ用いている。本来、2400kN程度の滑り荷重を想定して設計されているが、動的アクチュエータの载荷能力(1000kN)を超えないように、全てのボルトセットを約39%に緩めて载荷を実施した。

4.2.2 载荷・計測方法 Fig. 7 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力を作用させた。载荷メニューを Table 2 に、载荷スケジュールの例を Fig. 7 に示す。载荷メニューは各試験体で共通とした。まず、基本特性载荷として、周期2秒の正弦波10波からなる波形(波形の前後に数波のエンベロープ波を追加)を用い、試験 No. 1~4 の順で载荷を実施した。試験 No. 5 では、多数回繰返し载荷として周期4秒の正弦波100波からなる波形を用いて载荷した。試験 No. 6 では、超高層建物の地震応答を想定した応答変位波(周期4秒, 最大振幅40mm)を用いて载荷した。

ブレースタイプの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ブレースの負担せん断力の水平成分(ひずみゲージより算出)を取り除き、ブレース材軸方向の値に変換して算出した。

4.3 実験結果と考察

2段階ブレーキダンパー(試験体B-2, C-2)の滑り荷重-滑り変位関係のうち振幅 ± 20 mm, ± 40 mmの10サイクル, 振幅 ± 40 mmの100サイクルの結果を Fig. 10 に示す。各試験体とも概ね設計通りの安定した2段階の剛塑性型の履歴特性を示していることがわかる。

多段階ブレーキダンパー(試験体B-3, C-3, C-7)の滑り荷重-滑り変位関係のうち、振幅 ± 40 mmの100サイクルの結果を Fig. 11 に示す各試験体とも安定した多段階の剛塑性型の履歴特性を示していることがわかる。また、設定した変位において段階的に滑り荷重が大きくなっていることが分かる。第一滑り荷重と第三滑り荷重(間柱試験体C-7は第七滑り荷重)の目標値を示しているが、

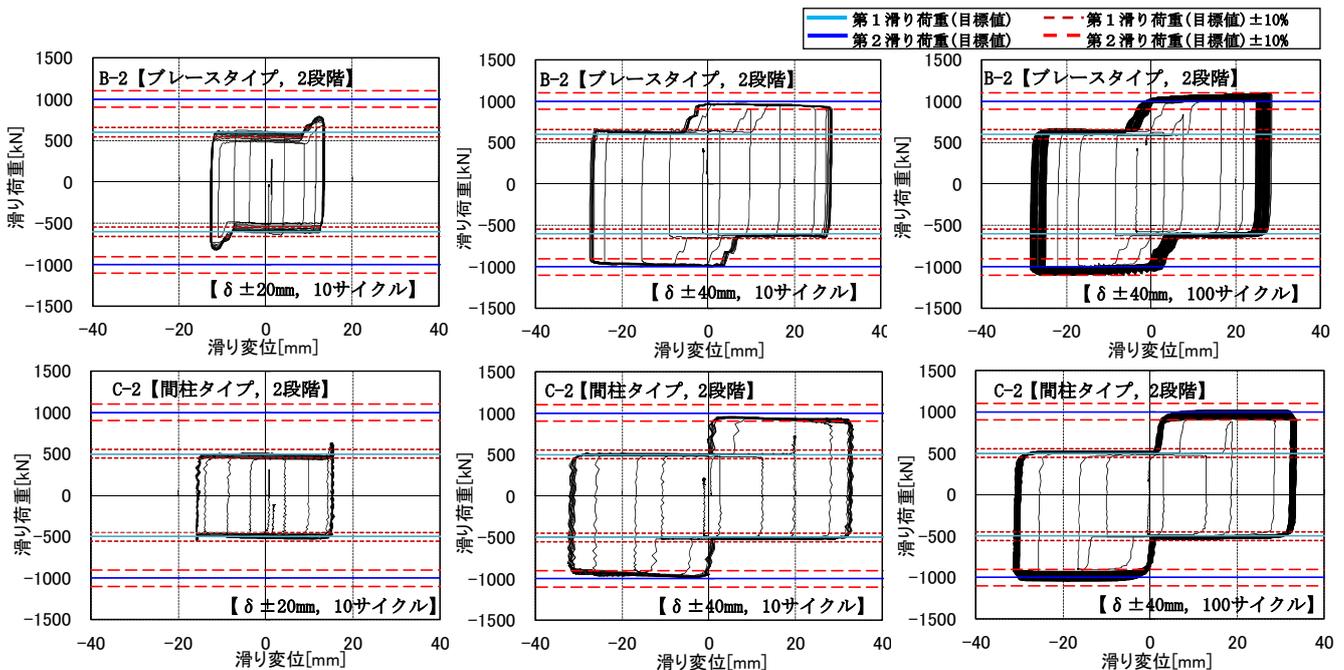


Fig. 10 2段階ブレーキダンパーの滑り荷重-滑り変位関係
Sliding Load - Sliding Displacement Relationship (Multi-cycle Loading)

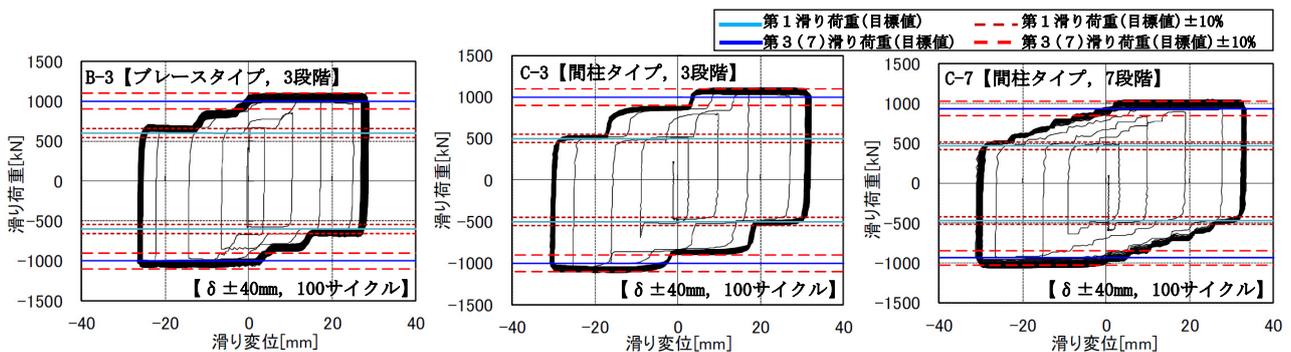


Fig. 11 多段階ブレーキダンパーの滑り荷重-滑り変位関係
Sliding Load - Sliding Displacement Relationship (Multi-cycle Loading)

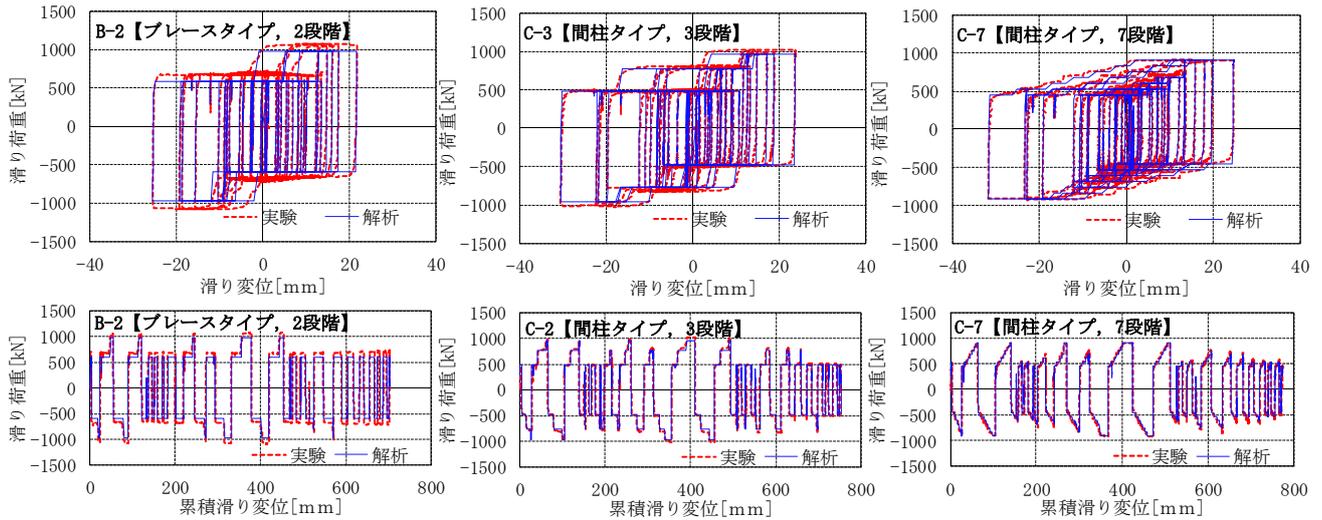


Fig. 12 多段階ブレーキダンパーの滑り荷重－滑り変位関係
Sliding Load – Sliding Displacement Relationship (Multi-cycle Loading)

実験値と良く一致している。

次に、地震応答を想定した応答変位波加振（試験 No. 6）の実験結果を Fig 12 に点線で示す。Fig 12 の実線は、Fig 2 (c) に示す荷重履歴則に基づく復元力特性モデルに実験と同じ変位履歴を与えた解析結果を示している。

滑り荷重－滑り変位関係は、多段階の剛塑性の履歴を示しており、ブレースタイプ、間柱タイプともに、実験結果と解析結果は良く対応している。

5. 実建物への適用

5.1 建物概要

今回開発した2段階ブレーキダンパーを大林組技術研究所OL2（オープンラボ2）に初適用した。本建物は、東京都清瀬市にある（株）大林組技術研究所に建設する研究施設である。地上2階、高さ約15mの規模を有する鉄骨構造の建物であり、東西方向64.8m、南北方向49.5mの整形な平面形状である。1階、2階とも、主に研究室、実験室となっており、東側2スパンは、クレーンの為の吹き抜け空間を有する。Fig. 13 に外観パースを示す。

5.2 構造計画概要

2段階ブレーキダンパーと1000N級鋼を組み合わせることで、構造躯体が、稀に発生する地震動（以下L1地震動と略す）に対して、応答加速度を落とすことで居住性を確保し、極めて稀に発生する地震動（以下L2地震動と略す）においては、無損傷（短期許容応力度以下）となるよう設計を行った。

架構形式は、ブレース付ラーメン構造とし、1階の溶接組立箱形断面柱に1000N級鋼を採用した。ブレースは、SN490のH形鋼とし、2段階ブレーキダンパーを含む各種ブレーキダンパーを用いた。Fig. 14 に構造フレームを、Fig. 15 に構造要素の配置を示す。

制振ブレースに2段階ブレーキダンパーを用いることにより、L1, L2地震動それぞれに対して、より最適な設計を行うことができる。設計方針を以下に示す。

- (1)L1地震動に対して、各層の最大層間変形角を1/200以下に抑える。さらに、ダンパーを積極的に滑らせることで、応答加速度を抑える。
- (2)L2地震動に対して、各層の最大層間変形角を1/100以下に抑える。

5.3 時刻歴応答解析概要

5.3.1 目的 前述の設計クライテリアを満足することの確認と、2段階ブレーキダンパーの有効性の検証のため、時刻歴応答解析を実施した。

5.3.2 解析条件 応答解析モデルは Fig. 16 に示す2質点の等価せん断型モデルである。架構は、フレームとダンパー付ブレースに分離してモデル化している。

フレームとダンパー付ブレースの復元力特性を Fig. 17 に、ダンパー付ブレースの履歴則を Fig. 18 に示す。フレームの復元力特性は、許容応力度設計としているため弾性とする。ダンパー付ブレースの復元力特性は、2段階の滑り荷重 Q_1 , Q_2 , ブレース剛性 K_D , 第一限界滑り量 δ_s により表される。履歴則は、2段階の耐力を持つバイリニアーループ型とする。



Fig. 13 外観パース：大林組技術研究所OL2
Appearance of Obayashi technical research institute OL2

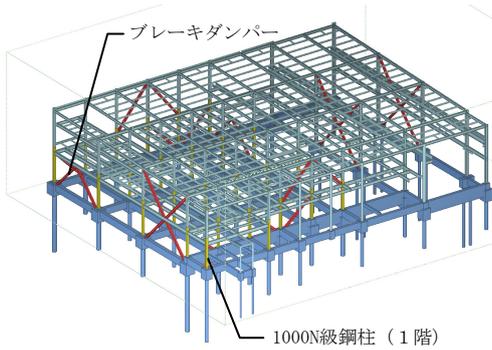


Fig. 14 構造フレーム
Structure Frame

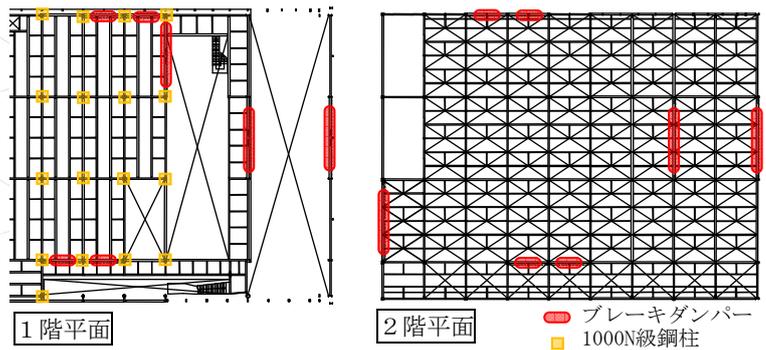


Fig. 15 構造要素配置
Plan view of Structure

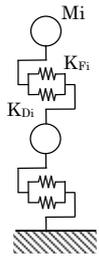


Fig. 16 応答解析モデル
Response Analysis Model

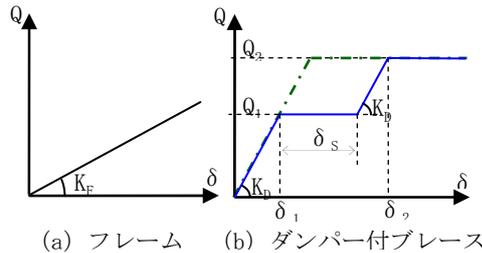


Fig. 17 復元力特性
Restoring Force Characteristics

Table 3 固有値解析結果
Result of Eigenvalue Analysis

固有周期 (s)	次数	初期剛性	L1地震時 等価剛性	L2地震時 等価剛性
		1次	0.396	0.565
2次	0.212	0.287	0.370	

Table 4 入力地震動
Earthquake Ground Motions

告示波	位相	最大加速度 (cm/sec ²)	
		レベル1	レベル2
乱数	乱数	122.2	583.4
	八戸NS	137.5	576.1
	JMA神戸NS	123.9	588.2

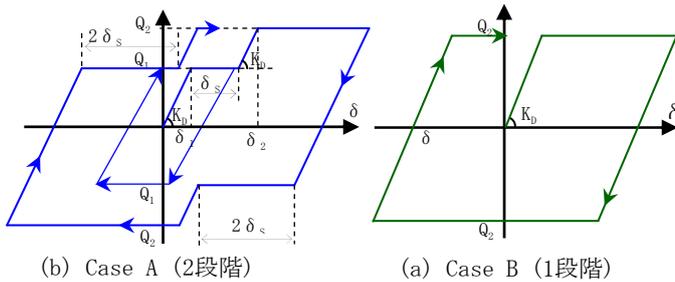


Fig. 18 ダンパー付ブレース履歴則
Hysteretic Rules of Damper Brace

減衰は瞬間剛性比例型とし、1 次の固有振動数に対して2%を与える。弾性時、L1地震動時、L2地震動時の固有値解析結果をTable 2に示す。

入力地震動は、告示波のL1地震動、及びL2地震動とし、それぞれ3波の位相特性(乱数、八戸NS、神戸NS)を採用する(Table 3)。

5.3.2 解析ケース 解析ケースは、Case A、Case B、Case Cの3ケースである。

Case Aは実建物の解析モデルで、2段階ブレーキダンパーを採用した構造システムである。

Case Bは従来型のブレーキダンパー(1段階)を採用した場合のモデルで、滑り荷重は Q_2 (Case Aの第2滑り荷重と同じ)である。

Case Cは制振ブレースのないラーメン架構のみで構成されたモデルである。

5.4 時刻歴応答解析結果

各ケースの時刻歴応答解析結果(応答層間変形角、応

答層せん断力、応答加速度)をFig. 19に示す。

応答層間変形角について、Case A(2段階)とCase B(1段階)は、Case C(フレームのみ)と比べて、L1地震動時、L2地震動時いずれの場合においても応答が大幅に抑えられていることが分かる。

応答層せん断力と応答加速度について、L1地震動時には、Case A(2段階)とCase B(1段階)はダンパー付ブレースによる剛性の増大により、Case C(フレームのみ)と比べて応答が大きくなっているが、L2地震動時には、層せん断力係数、応答加速度ともに、応答が大幅に抑えられていることが分かる。

Case A(2段階)とCase B(1段階)を比較すると、L1地震動時には、Case Aは、応答層せん断力と応答加速度が小さく抑えられている。L2地震動時には、Case AはCase Bよりもダンパーの滑り変位当たりの履歴減衰は小さくなるが、応答層間変形角、応答層せん断力、応答加速度のいずれにおいても違いが見られない。

Case A(2段階)とCase B(1段階)のダンパーの消費エネルギーの割合をFig. 20に示す。Case AはL1地震動時において、Case Bと比べて、格段に優れたエネルギー吸収性能を発揮していることが分かる。L2地震動時において、Case Aの2段階ブレーキダンパーのエネルギー吸収量は、いずれの地震動においても、全入力エネ

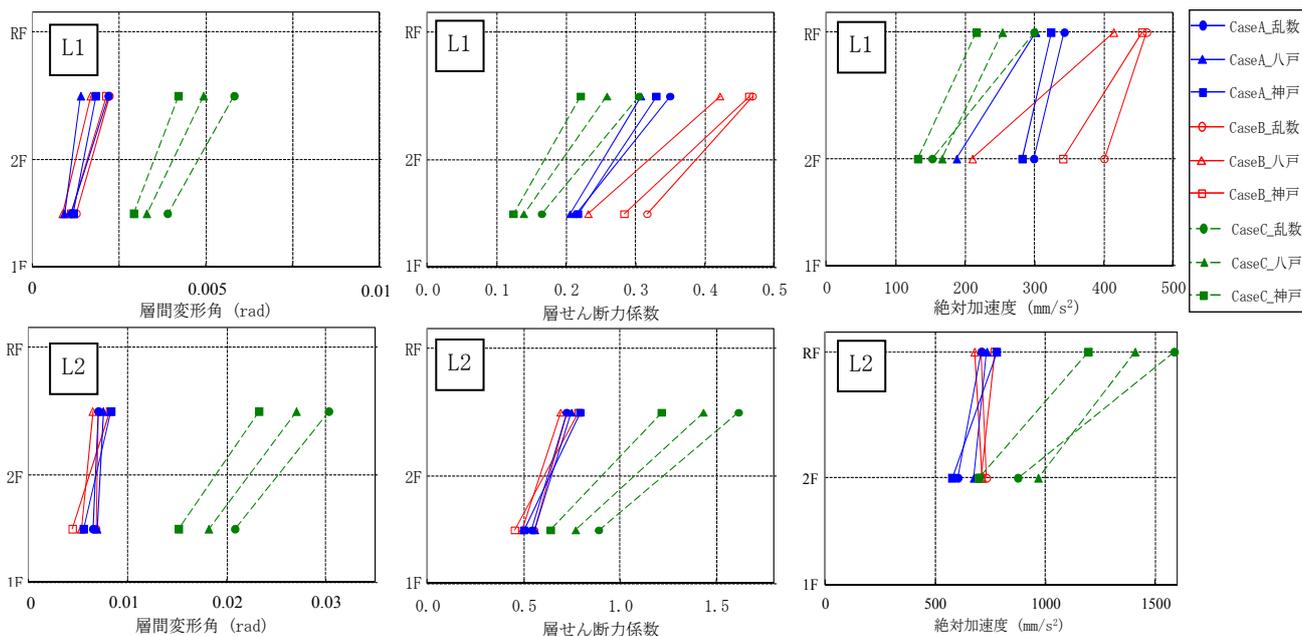


Fig. 19 応答解析結果（層間変形角，層せん断力係数，絶対加速度）の比較
Result of Time Historical Response Analysis

ルギーの9割弱の割合を占めており、Case Bよりも優れたエネルギー吸収性能を発揮していることが分かる。

以上から、2段階ブレーキダンパーは、比較的小さい揺れから大きい揺れまで幅広い範囲で優れた制振効果を発揮することを確認できた。

6. まとめ

中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」を開発し、実建物（大林組技術研究所OL2）に適用した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 多段階ブレーキダンパーの要素試験体（2段階基本ユニット）と、それを組み込んだ実大架構（ブレースタイプ及び間柱タイプ）について、動的载荷実験を実施し、目標とした復元力特性を示すことを確認した。さらに、多数回繰返し载荷（100サイクル）に対して、履歴性状の変化や滑り荷重の低下は小さく、高い繰返し耐久性を示すことを確認した。
- 2) 多段階ブレーキダンパーを組み込んだ実大架構について、地震応答を想定した変動変位振幅による加振実験を実施し、変動振幅の場合の復元力特性モデルの妥当性を確認した。
- 3) 実建物に制振ブレースに2段階ブレーキダンパーを適用し、時刻歴応答解析により性能を確認した。滑り荷重を2段階として実建物へ組み込むことで、中地震から大地震まで幅広く制振効果を発揮する構造システムを実現できることを確認した。

今後は、多段階ブレーキダンパーの「履歴を自在かつ

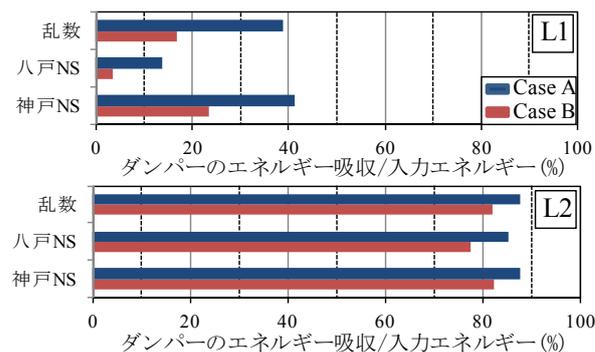


Fig. 20 ダンパーのエネルギー吸収割合の比較
Energy Response of Brake Damper

精度良く設計できる」というメリットを生かし、安全・安心の確保など、多様なニーズに対して対応していく予定である。

参考文献

- 1) 鈴井康正，他：4面摩擦「ブレーキダンパー」の開発と実用化，大林組技術研究所報，No.75，(2011)
- 2) 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)
- 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)