

# ブレーキダンパー® [シアリンク型] の開発

平田 寛 内海 良和 山口 温弘  
(ロボティクス生産本部) (設計本部)

三谷 淳 富居 勝宏 鈴木 康正  
(設計本部) (ロボティクス生産本部)

## Development of Brake Damper (Shear Link Type)

Hiroshi Hirata Yoshikazu Utsumi Atsushi Mitani  
 Atsushi Mitani Katsuhiko Tomii Yasumasa Suzui

### Abstract

A “brake damper” is a friction-slip damper that uses high-tension bolts and has been applied to many buildings. In this study, we developed a new application type of brake damper (shear link type). This technology is expected to provide a more effective energy absorption performance than the stud or brace types, which are the main application forms of brake dampers. In this paper, we report the results of dynamic loading tests and finite element analyses conducted as part of the development of a brake damper (shear link type). The results confirmed that the brake damper (shear link type) exhibited a stable structural performance.

### 概要

「ブレーキダンパー®」は耐震要素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、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制震デバイスであり、既に多くの建物に適用されている。今回、ブレーキダンパーの新たな適用形式として、ブレーキダンパー [シアリンク型] を開発した。本技術は、ブレーキダンパーの主要な適用形態である間柱型やブレース型と比較しても、建物の層間変形を効率的にダンパー摺動距離に置換でき、より効果的なエネルギー吸収性能を期待できる。本報では、ブレーキダンパー [シアリンク型] の開発の一環として、動的載荷実験と、そのシミュレーション解析を実施した。その結果、ブレーキダンパー [シアリンク型] が安定したエネルギー吸収性能を発揮し得ることを確認した。

## 1. はじめに

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、多くの実験によりエネルギー吸収性能を確認し、実建物への適用を重ねてきた<sup>1)~3)</sup>。ブレーキダンパーの適用方法は、主に超高層建物で用いられるブレースに組み込む方法（ブレース型）や、間柱に組み込む方法（間柱型）がある。今回、ブレーキダンパーのさらなる適用範囲拡大を図るため、新たな適用形式としてブレースと梁の間の接合点（シアリンク部）に摺動部を設けたブレーキダンパー（以下、ブレーキダンパー [シアリンク型]）を開発した。

本報では、ブレーキダンパー [シアリンク型] の開発の一環として実施した動的載荷実験と、そのシミュレーション解析の結果をそれぞれ示し、本デバイスの安定したエネルギー吸収性能が確認できたことを報告する。

## 2. 技術概要

### 2.1 ブレーキダンパーの基本的な構成

ブレーキダンパー（2面基本ユニット）の構成をFig. 1に示す。ブレーキダンパーは、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）とステンレス板を一对にして挟み込んだ制震ダンパーである。ブレーキダンパーの摺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）で締め付けるため、締付け力を一定に保持できる。この機構により、安定した滑り荷重とエネルギー吸収性能を発揮し、建物の揺れを効率的に抑えることができる<sup>1)~3)</sup>。

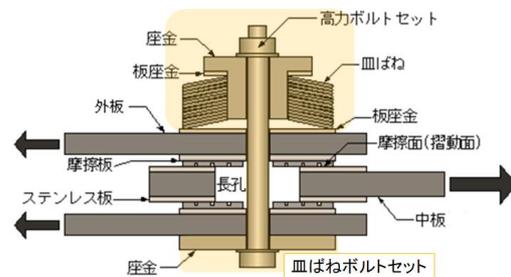
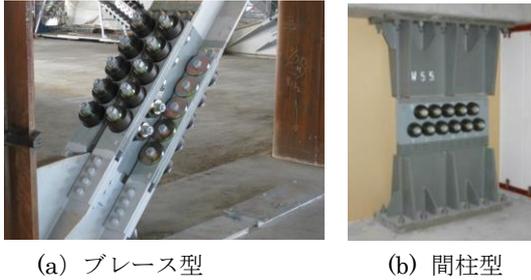


Fig. 1 ブレーキダンパー（2面基本ユニット）の構成  
 Basic Composition of Brake Damper



(a) ブレース型 (b) 間柱型

Photo 1 既往のブレーキダンパーの適用例  
(ブレース型, 間柱型)

Conventional Brake Damper (Brace Type and Stud Type)

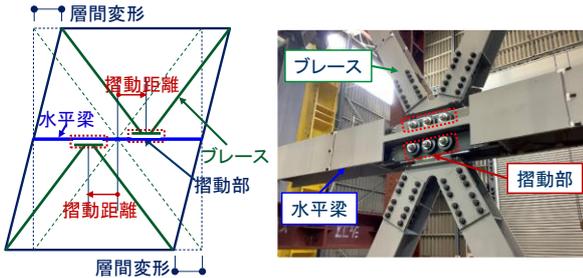


Fig. 2 ブレーキダンパー〔シアリンク型〕の構成  
Brake Damper (Shear Link Type)

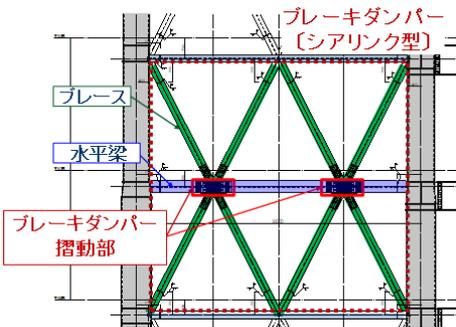


Fig. 3 架構への適用イメージ  
Image of Application to Buildings

## 2.2 ブレーキダンパー〔シアリンク型〕の概要

従来のブレーキダンパーの主要な構成であるブレース型と間柱型の適用例をPhoto 1に示し、ブレーキダンパー〔シアリンク型〕の基本構成をFig. 2、架構への適用イメージをFig.3に示す。ブレーキダンパー〔シアリンク型〕は、ブレースを介して摺動部（エネルギー吸収部）にせん断変形を集中させる機構としており、支持部材の変形によるエネルギー吸収ロスを最小限に抑えることで、高い制震効果を発揮できる。また、ブレーキダンパー〔シアリンク型〕を従来の構成であるブレース型や間柱型と比較すると、間柱型にみられる構成材曲げ変形による影響を受けにくいという、間柱型よりもエネルギー吸収ロスを抑えることができる特長がある。また、斜材の軸方向変位を利用したブレース型と比較しても、建物の層間変形を効率的にダンパー摺動距離に置換できる優位性がある。また、Fig.3に示す通り、ブレーキダンパー摺動部を水平梁に集約し、目立たなくすることができるため、建物デザインに配慮したデバイスとしても期待できる。

## 3. 動的载荷実験

### 3.1 実験の目的

ブレーキダンパー〔シアリンク型〕の実大試験体を载荷フレームに組み込み、動的载荷実験を行う。特に、ブレーキダンパー摺動部が水平梁の上下に取付く場合の基本的な滑り挙動を確認する。さらに、地震時にダンパーに生じる面外変形の影響を確認するために、面外変形を与えた状態での载荷を実施し、エネルギー吸収性能やブレース等の主要構成部材に生じる応力性状を確認する。

### 3.2 実験計画

**3.2.1 試験体** 試験体の諸元をTable 1、ブレーキダンパー摺動部の形状・寸法をFig. 4、試験体・载荷装置概要をFig. 5に示す。試験体高さは、超高層建物の1層分の高さを想定した4.3mとし、試験体はType-X試験体とType-V試験体の2種類とした。

Type-X試験体では、水平梁とその上下に取付くブレーキダンパー摺動部・ブレースを模擬し、建物の上下層に均等に層間変形が生じた場合のブレーキダンパー〔シアリンク型〕の基本的な滑り挙動を動的载荷実験で確認した。なお、载荷装置の都合上、ブレース全長の1/2まで試験体に反映し、加力梁との接合部にはクレビスを設け、ピン接合とした。

Type-V試験体は上部摺動部とブレース全長を模擬し、ブレーキダンパー〔シアリンク型〕の基本的な制震性能や面外変形を与えた時のエネルギー吸収性能を動的载荷実験で確認した。

ブレーキダンパーの目標滑り荷重を300kN（2面基本ユニットの滑り荷重100kN/個×3個）とした。ブレースには、H-250×250×9×14（SN490B）、ブレーキダンパーが取付く水平梁にはH-400×400×13×21（SN490B）を採用した。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 载荷方法及び計測方法

Fig. 5に示す通り、载荷フレームは上下加力梁と両端ピン支柱で構成した。下部加力梁を試験床に緊結した後、試験体を载荷フレームに取り付けた。上部加力梁の端部には1000kN動的アクチュエータを接続し、動的载荷を実施した。Type-V試験体の面外変形を与えるケースでは、動的载荷の前に面外変形を与えた。水平梁と下部加力梁の接合部に面外方向の長孔を設け、水平梁を静的ジャッキにより面外方向に押出した後、PC鋼棒に張力を導入し、固定することにより面外変形（部材変形角1/100rad相当）を与えた。

载荷メニューをTable 3、载荷波形をFig. 6に示す。载荷波形は正弦波と応答波の2種類とした。目標振幅は階高4.3mを基準として決定した。正弦波の周期は超高層建物の1次固有周期を想定し、 $T=3.6\text{sec}$ とした。Type-V試験体の正弦波载荷による目標振幅は $\delta = \pm 4.3\text{mm} \sim \pm$

43mm (層間変形角で $\pm 1/1000\text{rad.} \sim \pm 1/100\text{rad.}$ に相当する変位振幅)とし、それぞれ10サイクルの繰返し载荷を実施した。Type-V試験体の地震応答波による载荷は、最大変位の絶対値を17.2mm, 43mm (それぞれ層間変形角 $1/250\text{rad.}, 1/100\text{rad.}$ に相当する変位)に基準化した2

Table 1 試験体諸元  
Specification of Test Specimen

ブレース-水平梁	
ブレース断面材質	H-250×250×9×14 [SN490B]
水平梁断面材質	H-400×400×13×21 [SN490B]
ブレーキダンパー摺動部	
皿ばねボルトセット数	3
目標滑り荷重(kN)	300
中板の板厚[材質]	28mm [SN490B]
外板の板厚[材質]	19mm [SN490B]

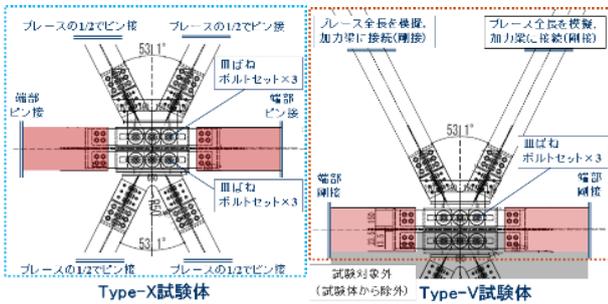
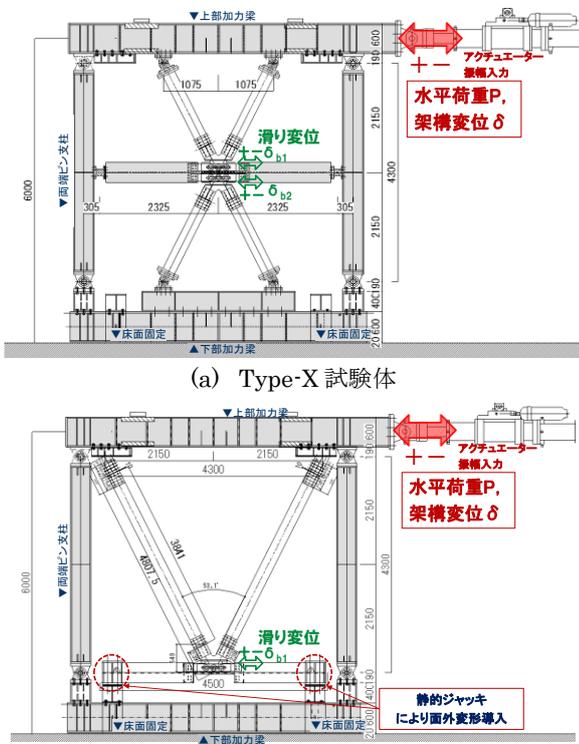


Fig. 4 ブレーキダンパー摺動部の形状  
Configurations of Test Specimens



(a) Type-X 試験体  
(b) Type-V 試験体  
Fig. 5 载荷装置概要

Outline of Loading Apparatus

ケースを実施した。さらに、面外変形 $1/100\text{rad.}$ を与えたケースのみ、 $\delta = \pm 43\text{mm}$ 繰返し数100サイクルの多数回繰返し载荷を実施した。なお地震応答波には、検討対象とした超高層建物の地震応答解析(告示波(L2, ランダム位相)の入力地震波を使用)によって得られた応答架構変位波形を用いた。Type-X試験体は、水平梁の上下にブレーキダンパーが配置されているため、Type-V試験体の2倍の振幅を目標振幅とし、Type-V試験体と同じ载荷波形を採用した。摺動部の滑り変位(上部滑り変位 $\delta_{b1}$ , 下部滑り変位 $\delta_{b2}$ )は、各摺動部の水平梁に対する相対変位をレーザー変位計で測定した。

3.3 実験結果

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 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	引張強さ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	伸び (%)	備考 (主な適用箇所)
SN490B	14	368	547	24.4	ブレース材_フランジ
	9	385	553	22.8	ブレース材_ウェブ
	21	349	539	27.0	水平材_フランジ
	13	392	550	23.7	水平材_ウェブ
	19	355	514	28.4	ブレーキダンパー_外板
	28	332	529	29.8	ブレーキダンパー_中板

※ 試験片形状はJIS 1A号とする。  
※ 降伏点, 引張強さ, 伸びの値は, 試験片3本の平均値を示す。

Table 3 载荷メニュー  
Menu for Loading Test

試験体	波形の種類	周期 T(sec)	目標振幅 $\delta$ (mm)	サイクル数 $N_c$ (回)	面外変形 (rad.)
Type-X	正弦波	3.6	$\pm 8.6 \sim \pm 94.6$	10	0
	応答波	-	$34.4^{*1}, 86^{*1}$	-	
Type-V	正弦波	3.6	$\pm 4.3 \sim \pm 47.3$	10	0, 1/100
	応答波	-	$17.2^{*1}, 43^{*1}$	-	
	正弦波	3.6	$\pm 43$	100 <sup>*2</sup>	

\*1: 最大変位の絶対値, \*2: 面外変形 $1/100\text{rad.}$ のみ実施

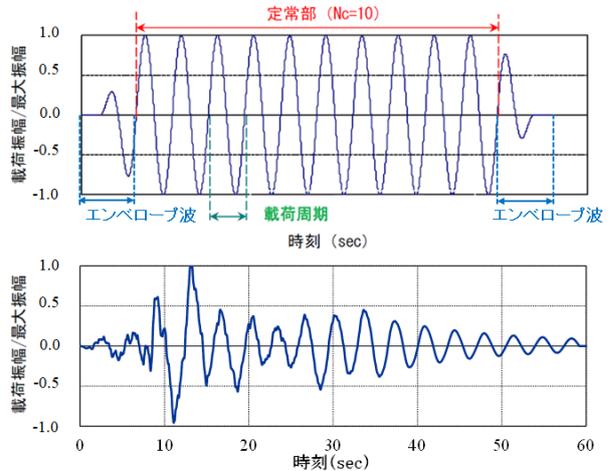
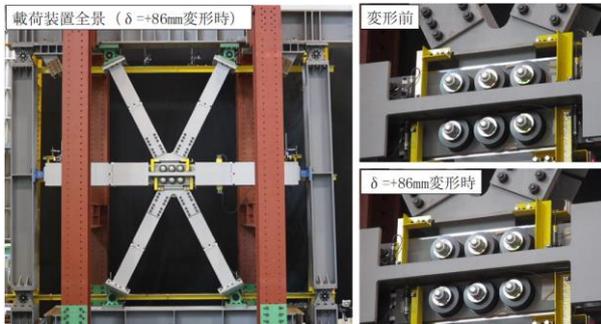


Fig. 6 载荷波形(正弦波, 応答波)  
Waves for Loading Test

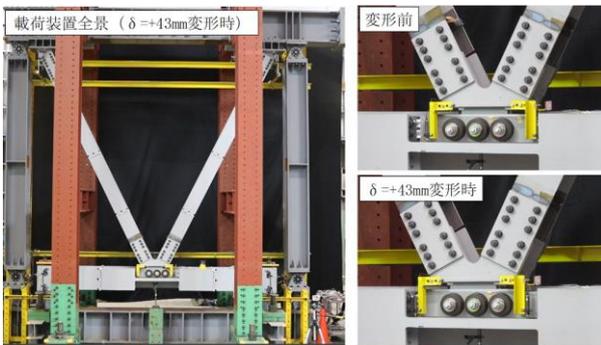
3.3.1 実験状況 Type-X試験体とType-V試験体の  
 載荷状況 (例) をPhoto 2に示す。Photo 2(a)にType-X試  
 験体(正弦波 $\delta=\pm 86\text{mm}$ ,  $T=3.6\text{sec}$ ), Photo 2(b)にType-V試  
 験体(正弦波 $\delta=\pm 43\text{mm}$ ,  $T=3.6\text{sec}$ )の載荷装置全景, 変形  
 前後のブレーキダンパー (摺動部) の状況を示している。  
 いずれの試験体・載荷ケースにおいても, 層間変形の増  
 大に伴いブレーキダンパー摺動部が摺動し, 終始安定し  
 た挙動を示すことを確認した。

3.3.2 荷重-変形関係 Type-X試験体について, 左  
 から水平荷重 $P$ -架構変位 $\delta$ 関係, 水平力 $P$ -上部滑り変  
 位 $\delta_{b1}$ 関係, 水平力 $P$ -下部滑り変位 $\delta_{b2}$ 関係の順に, Fig. 7  
 に示す。いずれの載荷ケースにおいても, 水平荷重 $P$ は  
 ダンパーの目標滑り荷重(300kN)と概ね対応しており,  
 繰返しによる滑り荷重の変動は小さく, 安定した履歴特  
 性を示した。また, 水平材上下の各摺動部での滑り変位  
 量 $\delta_{b1}$ ,  $\delta_{b2}$ はほぼ一致しており, 上下の摺動部には均等  
 に滑り変位が生じていることがわかる。なお, 正弦波を  
 与えた試験ケースでは, 荷重-変形関係がやや降勾配に  
 なっていることが確認されるが, これは加力梁の慣性力  
 の影響である。

Type-V試験体について, 各載荷ケースとも, 繰返し  
 による滑り荷重の変動は小さく, 安定した履歴特性を示  
 した。Type-V試験体の加振結果の例として, Fig. 8に正  
 弦波 ( $\delta=\pm 43\text{mm}$ ,  $T=3.6\text{sec}$ ) と応答波 (目標最大振幅  
 $\delta=43\text{mm}$ ) の水平荷重 $P$ -架構変位 $\delta$ 関係と水平荷重 $P$ -時  
 刻 $t$ 関係を示す。また, Fig. 8には面外変形による影響を  
 比較するために, 面外変形が0の場合と1/100rad相当の



(a) Type-X 試験体(正弦波  $\delta=\pm 86\text{mm}$ ,  $T=3.6\text{sec}$ )



(b) Type-V 試験体(正弦波  $\delta=\pm 43\text{mm}$ ,  $T=3.6\text{sec}$ )

Photo 2 載荷状況 (例)  
 View of Loading Test

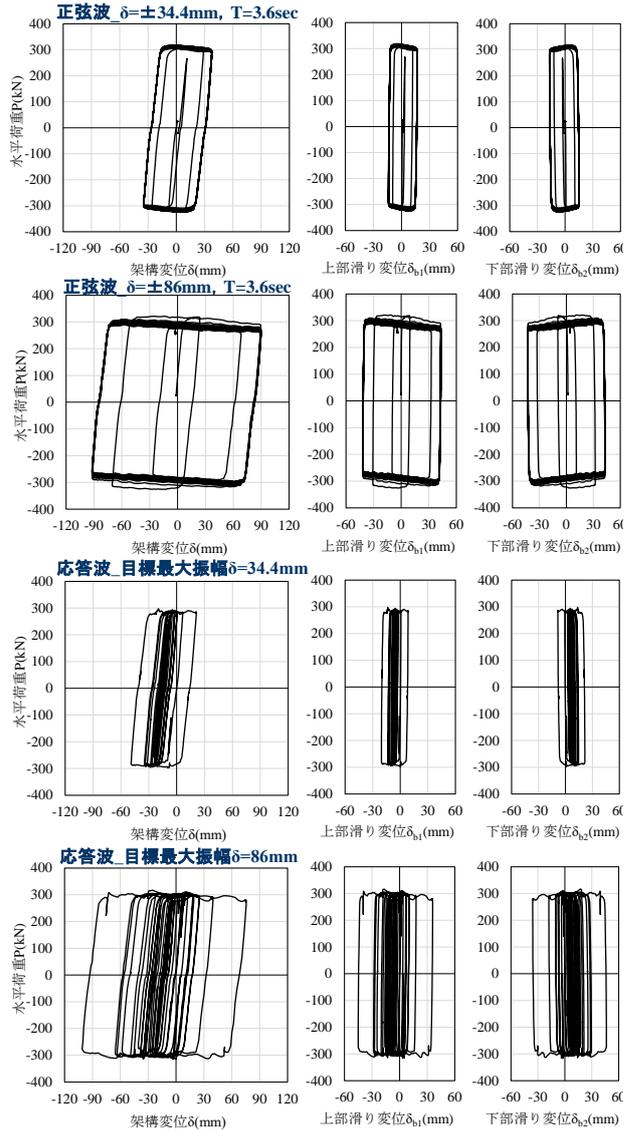


Fig. 7 水平荷重-架構変位関係 (Type-X試験体)  
 Horizontal Load - Story Drift Relationships

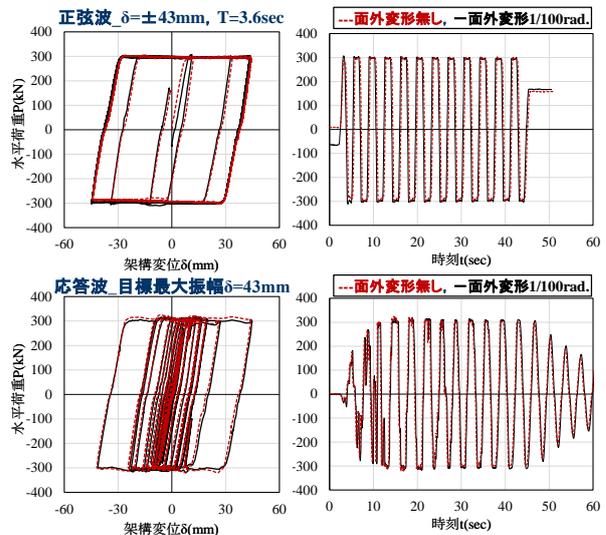


Fig. 8 水平荷重-架構変位関係 (Type-V試験体)  
 Horizontal Load - Story Drift Relationships

面外変形を与えた場合の結果を重ねて示している。Fig. 8より、1/100rad相当の面外変形を与えた場合と面外変形が0の場合では、履歴特性にはほとんど違いがなく、1/100rad相当の面外方向の変形が滑り荷重に与える影響は少ないことを確認できた。

多数回繰返し载荷 (Type-V試験体, 面外変形1/100rad.) におけるダンパー水平荷重Pの時刻歴をFig. 9に示す。多数回繰返し载荷に対して安定した履歴特性を示しており、ダンパーの滑り変位 $\delta_{b1}=0\text{mm}$ の時の荷重と比較すると、100サイクル载荷時の荷重は、载荷初期に対して90%程度を保持しており、既往のブレーキダンパーの多数回繰返し载荷結果<sup>1)</sup>と概ね対応している。これにより既往研究におけるブレーキダンパーと同等の高い耐久性を有することを確認できた。

## 4. 解析的検討

### 4.1 解析目的

3章で示した動的実験に対して汎用ソフトを用いた有限要素解析により実験結果を追跡できることを確認する。

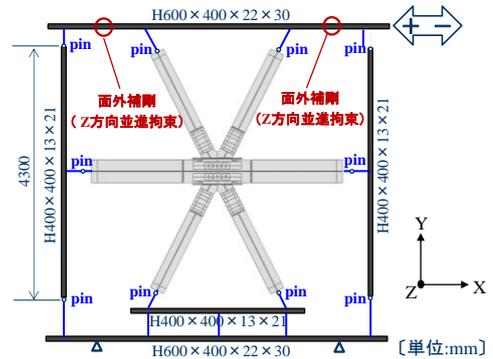
### 4.2 解析条件

Fig. 10に解析モデル概要を示す。Type-X試験体、Type-V試験体を用いた実験を対象とし、解析には非線形有限要素プログラムAbaqus 2020<sup>5)</sup>を使用した。使用する要素モデルは、加力装置部分は線材要素とコネクタ要素<sup>7)</sup>、ダンパー試験体部分はシェル要素とソリッド要素とし、3章で示した実験の試験体及び载荷フレームの断面・寸法諸元をもとにモデル化した。

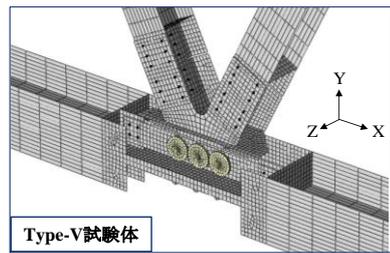
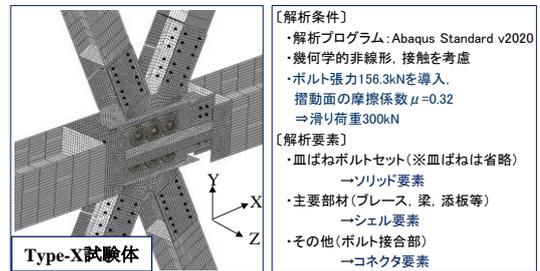
鋼材の材料特性は、弾性パラメータはヤング係数Eを205,000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比 $\nu$ を0.3とした。降伏強度は各材料試験結果を反映し、降伏点を折れ点とし、二次勾配をE/100とするバイリニア型の移動硬化則を採用した。

载荷装置のピン柱、試験体接合部のクレビスは、コネクタ要素を用いて、曲げモーメントを伝達しない部材 (ピン接合) をモデル化した。ブレーキダンパー摺動部は、構成する各要素 (皿ばねボルトセット, 中板, 外板) 間の接触を考慮し、皿ばねボルトに初期張力を導入することで、ブレーキダンパー摺動部の挙動を再現できるようモデル化した。また、摺動面の摩擦係数を0.32, ボルトの初期導入張力を156.3kNとすることで、設計値 (300kN) と同じ滑り荷重が生じるようモデル化した。なお、解析モデルの簡易化のため、ステンレス板や摩擦材, 皿ばね等はモデル化していない。

解析対象とした载荷メニューをTable 4に示す。各試験



(a) 解析モデル (例: Type-X試験体)



(b) ブレーキダンパー摺動部のモデル化

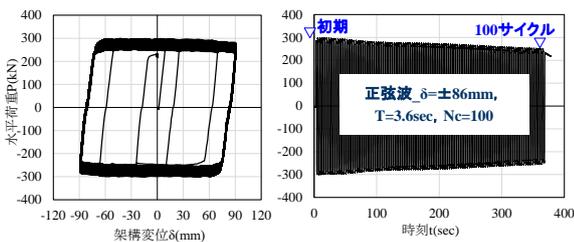
Fig. 10 解析モデル概要

### Analytical Model

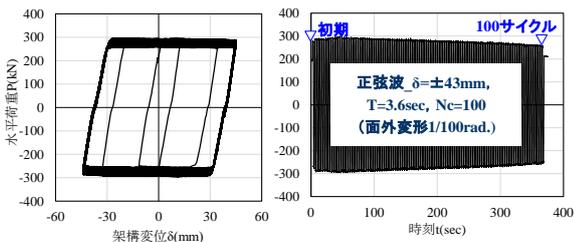
Table 4 解析対象とした载荷メニュー

Loading Menu for Analysis

試験体	波形の種類	周期 T(sec)	目標振幅 $\delta(\text{mm})$	サイクル数 $N_c(\text{回})$	面外変形 (rad.)
Type-X	正弦波	3.6	$\pm 17.2$	10	0
			$\pm 43$		
Type-V	正弦波	3.6	$\pm 43$	10	0
			$\pm 43$		1/100



(a) Type-X試験体



(b) Type-V試験体

Fig. 9 多数回繰返し载荷 Results of Multi-cycle Loading

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。

### 4.3 解析結果

4.3.1 荷重－変形関係 Fig. 11に水平荷重P－架構変位 $\delta$ 関係、水平荷重P－滑り変位 ( $\delta_{b1}$ ,  $\delta_{b2}$ ) 関係の各解析結果に実験結果を重ねて示す。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。実験の水平荷重P－架構変位 $\delta$ 関係、水平荷重P－滑り変位 ( $\delta_{b1}$ ,  $\delta_{b2}$ ) 関係を解析で精度よく再現できていることがわかる。このことから、ブレーキダンパー [シアリンク型] の挙動を有限要素解析で再現できることを確認した。

4.3.2 部材の応力状況 面外変形の有無が部材応力に与える影響を確認した。Fig. 12に、Type-V試験体（正弦波 $\delta=\pm 43\text{mm}$ ）について、ダンパー摺動部（中板）のミーゼス応力分布を示す。面外変形が無い場合と比べ、面外変形を与えた上でダンパーを摺動させることにより、中板の長孔周辺の応力が最大で $319\text{N/mm}^2$ に到達しており、弾性限近傍まで上昇している。よって、構成部材の健全性を確認するにあたり、面外変形の影響を考慮することが重要であると言える。

## 5. まとめ

ブレーキダンパー [シアリンク型] のエネルギー吸収性能を動的載荷実験とそのシミュレーション解析により検証し、以下の知見を得た。

- 1) 載荷履歴によらず、水平荷重－架構変位関係は安定した履歴特性を示した。
- 2) 水平材上下に摺動部を設けたType-X試験体について、各摺動部が均等に滑ることを実験により確認した。
- 3) 上部摺動部とブレース全長をモデル化したType-V試験体について、ダンパーの構面外方向に $1/100\text{rad}$ の変形を与えた状態での動的載荷実験を行い、構面外方向の変形が滑り荷重に与える影響は少ないことを確認した。
- 4) 有限要素解析により、ブレーキダンパー [シアリンク型] の実験結果（水平荷重－架構変位関係）を再現できることを確認した。

今回の一連の検証により、ブレーキダンパー [シアリンク型] が安定したエネルギー吸収性能を発揮し得ることを確認できた。今後は、本技術の特長を保持しつつ、構造形式の多様化やダンパーの大容量化を実現し、多くの建物への適用を目指す。

### 参考文献

- 1) 高橋泰彦, 他: 高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの

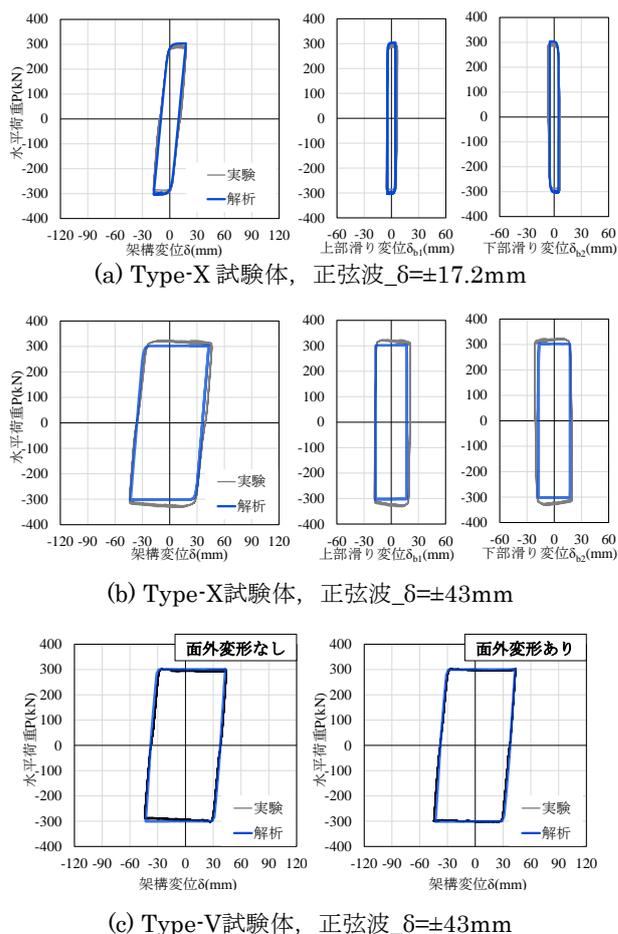


Fig. 11 解析結果（実験値との比較）  
Analysis Results of Brake Damper (Shear Link Type)

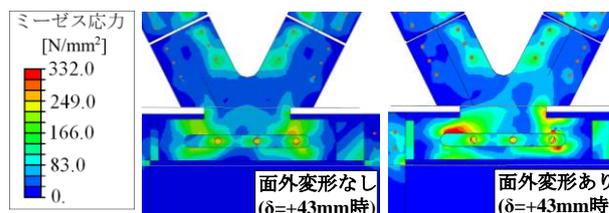


Fig. 12 ダンパー摺動部（中板）のミーゼス応力分布  
（解析対象：Type-V試験体，正弦波 $\delta=\pm 43\text{mm}$ ）  
Mises Stress Distribution in the Brake Damper Sliding Parts

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) 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

- 3) 鈴木康正, 他: 面外変形が「ブレーキダンパー®」の構造性能に及ぼす影響, 大林組技術研究所報, No.81, 2017.12

- 4) ばね技術研究会: ばね 第3版, 丸善株式会社, pp.283-292, 1982

- 5) Abaqus version 2020 Analysis User's Manual, 2020