

## 大荷重に対応したブレーキダンパー®〔引張ブレース型〕の開発

平田 寛 内海良和 渡辺哲巳  
(ロボティクス生産本部) (設計本部)  
 富田和磨 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 (Tension Brace Type) for Large Loads

Hiroshi Hirata Yoshikazu Utsumi Tetsumi Watanabe  
 Kazuma Tomita Katsuhiko Tomii Yasumasa Suzuki

## Abstract

A brake damper (tension brace type) is a slim vibration control device that can be applied to narrow spaces. Because the capacity of the device is several hundreds of kilonewtons, the applicable range is limited to middle- and low-rise buildings. Therefore, a large-load type brake damper (tension brace type), which can handle larger loads of several thousands of kilonewtons and can be applied to skyscrapers, was recently developed. In this study, we have explained the results of dynamic loading tests and dynamic finite element analysis conducted as part of the development of the large load type brake damper (tension brace type).

## 概 要

ブレーキダンパー®〔引張ブレース型〕（以下、ブレーキダンパーTBと称す。）は、主要構成部材を小さな部材としたことで、柱や梁が細く華奢な既存骨組みや既存の配管などが入り組む狭隘なスペースにも適用できるスリムな制震ダンパーである。しかし、従来のブレーキダンパーTBは数百kNの荷重までしか対応しておらず、適用範囲が中低層建物に限定されるという課題があった。今回新たに開発した大荷重タイプのブレーキダンパーTBは、数千kNの大荷重に対応することができ、今まで採用できなかった超高層建物への適用も可能となった。本報では、大荷重タイプのブレーキダンパーTBの制震性能を動的載荷実験と有限要素解析により確認した。今後は、ブレーキダンパーTBの更なる適用範囲の拡大を進める予定である。

## 1. はじめに

大林組は1990年代後半よりブレーキダンパー®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<sup>1),2)</sup>。近年では工場などの低層建物の制震補強工事への適用を想定して、ブレーキダンパーと引張ブレース（鋼棒等の引張のみに耐力を期待するブレース）を組み合わせた制震ダンパーであるブレーキダンパー〔引張ブレース型〕（以下、ブレーキダンパーTBと称す。）を開発した<sup>3),4)</sup>。ブレーキダンパーTBは、ブレース等の主要構成部材を断面積の小さな引張部材としたことで、柱や梁が細く華奢な既存骨組みや既存の配管などが入り組む狭隘なスペースにも適用できるスリムな制震ダンパーである。しかし、ブレーキダンパーTBは数百kNの荷重までしか対応しておらず、適用範囲が中低層建物に限定されるという課題があった。

今回新たに開発した大荷重タイプのブレーキダンパーTBは、ブレーキダンパー部に4面基本ユニットを採用し、ブレースには高荷重を伝達可能な平鋼を採用することで、スリムな形状であるが、超高層建物にも適用可能な大荷重化を実現した。

本報では、大荷重タイプのブレーキダンパーTBの性能検証を目的に、動的載荷実験を実施する。併せて、実験時の荷重－変形関係などを有限要素解析で再現できるこ

とを確認する。

## 2. 技術概要

## 2.1 ブレーキダンパーの基本的な構成

ブレーキダンパーの基本構成を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）とステンレス板と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<sup>5)</sup>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、締付け力を一定に保持でき、安定した滑り荷重を発揮し建物の揺れを抑えることができる<sup>1),2)</sup>。Fig. 1(a)に示す2面基本ユニットは、皿ばねボルトセット1セット当たり100kNの摩擦力を発揮するのに対し、Fig. 1(b)に示す4面基本ユニットは、1セット当たり200kNの摩擦力を発揮する。

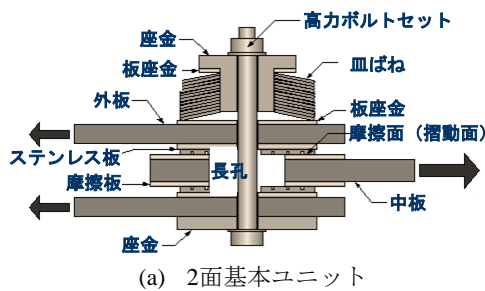
## 2.2 ブレーキダンパーTBの概要

ブレーキダンパーTBの概要をTable 1、従来タイプのブレーキダンパーTBの構成をFig. 2(a)に示す。Fig. 2(a)に示す通り、従来タイプのブレーキダンパーTBは、ターンバックル付ブレース等を用いた4本の引張ブレースの中央に四隅がピンの中枠（四方枠）を設け、その中にブレーキダンパー（2面基本ユニット）を組み込んだ構成である。

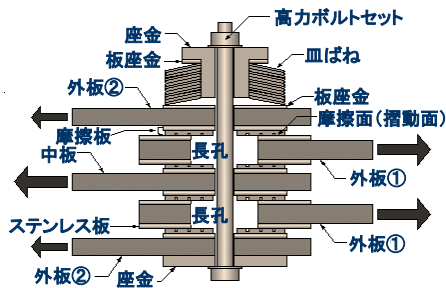
ダンパー部は、ブレーキダンパーの中板と外板を縦板で連結することで、四方枠を構成している。地震による水平力を一方のブレス部材の引張軸力のみで負担し、ブレーキダンパーに伝達するため、座屈耐力による制限を受けず、部材断面を小さく抑えることができ、スリムなブレーキダンパーを実現できる。

### 2.3 大荷重ブレーキダンパーTB概要

大荷重タイプのブレーキダンパーTBの構成をFig. 2(b)に示す。大荷重タイプのブレーキダンパーTBは、ブレーキダンパーに複数の4面基本ユニットを採用し、ブレスには高荷重を伝達可能でスリムな平鋼を採用した。それにより、数千kNの大荷重に対応することができ、今まで採用できなかった超高層建物への適用が可能となった。また、従来タイプのブレーキダンパーTBと同様に、地震による水平力を一方のブレス部材の引張軸力のみで負担し、ブレーキダンパーに伝達するため、ブレス母材は座屈による制限を受けず、部材断面を小さく抑えることができた。Fig. 3に実建物への適用イメージの例を示す。複数層に跨る長大スパンのダンパーを数多く設置するために一層ずつずらして配置し、各ダンパーのブレス部を平面的に干渉しないように設置することで、高い制震効果を実現できる。



(a) 2面基本ユニット



(b) 4面基本ユニット

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

Table 1 ブレーキダンパーTBの概要

Composition of Brake Damper (Tension Brace Type)

	従来タイプ	大荷重タイプ
ブレーキダンパー	2面基本ユニット	4面基本ユニット
引張ブレス	ターンバックル付ブレス	平鋼
ダンパー容量	300kNまで	3000kNまで

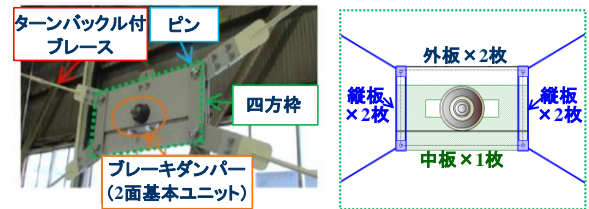
### 3. 動的載荷実験

#### 3.1 実験の目的

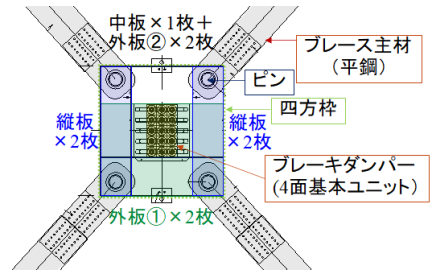
大荷重タイプのブレーキダンパーTBの試験体を載荷フレームに組み込み、動的載荷実験を行うことにより、ダンパーのエネルギー吸収性能（荷重-変形特性）やブレス等の主要構成部材に生じる応力性状を確認する。

#### 3.2 実験計画

3.2.1 試験体 試験体の諸元をTable 2、試験体のブレーキダンパー部の形状・寸法をFig. 4、載荷装置概要をFig. 5に示す。架構および四方枠のアスペクト比は1.11とし、試験体高さを4.4mとした。また、ダンパーの目標滑り荷重を400kN(4面基本ユニットの滑り荷重200kN×2個)



(a) 従来タイプ (例: 滑り荷重100kN)



(b) 大荷重タイプ (例: 滑り荷重3000kN)

Fig. 2 ブレーキダンパーTBの構成  
Composition of Brake Damper (Tension Brace Type)

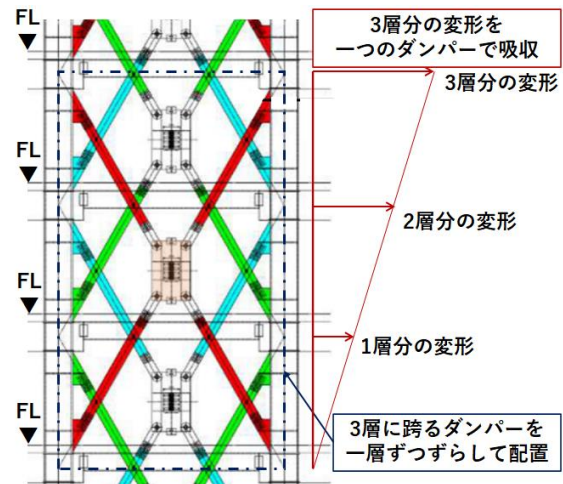


Fig. 3 実建築物への適用イメージ  
Image of Application to Buildings

とした。これらは、超高層建物の階高4.4m×3層に跨って設置したすべり荷重3000kNのダンパーを想定し、試験体の縮尺率が約1/3であることを考慮して設定した。

ブレースには160mm×19mmの平鋼 (SN490B材) を採用した。なお、ブレースのピン部のクリアランスが小さ

Table 2 試験体諸元  
Specification of Test Specimen

ブレース断面 [材質]	ピン径 (直径:mm) [孔径:短径,長径]	皿ばね ボルト セット数	ダンパー部 目標滑り荷重 (kN)
PL-160×19 [SN490B]	φ70 [71mm, 81mm]	2	400

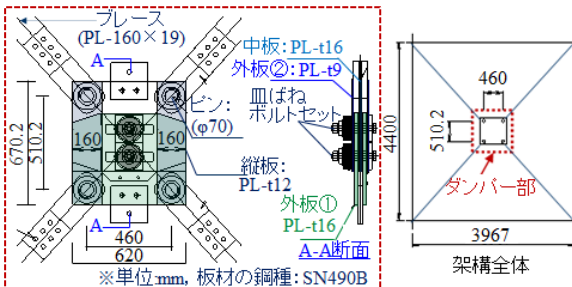


Fig. 4 ブレーキダンパー部分の形状・寸法  
Configuration and Dimensions of Test Specimens

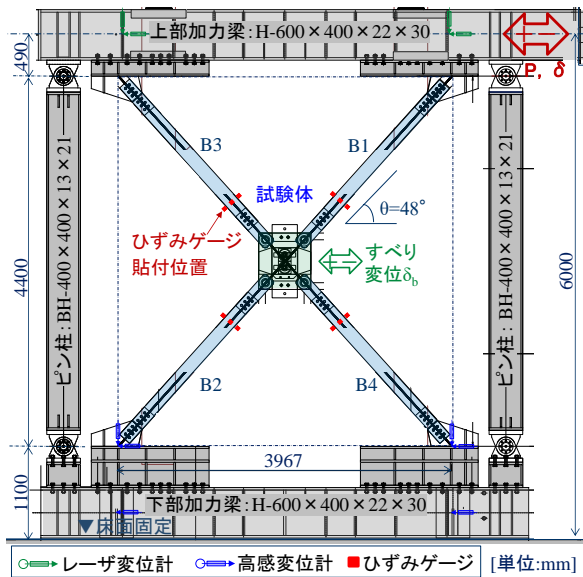


Fig. 5 載荷装置概要  
Outline of Loading Apparatus

Table 3 載荷メニュー  
Menu for Loading Test

波形の種類	周期 T(sec)	目標振幅 δ(mm)	サイクル数 N <sub>c</sub> (回)
正弦波	5.5	±4.5~±49.5	10
応答波	-	18*, 45*	-
正弦波	100	±45	1
	10		10
	4		10
	2		10
	1		200

\*は最大変位の絶対値

い場合、滑り開始までは対角側のブレースに圧縮力が生じ、それに伴う座屈が生じてしまう可能性がある。そこで、ピン部には、ブレースに圧縮力を伝達させない目的で長孔を設けている。長孔は、ピン径φ70に対して長辺方向11mm、短辺方向1mmのクリアランスを見込んだ。

3.2.2 載荷方法 Fig. 5に示す通り、試験体を上下の加力梁と両端ピン支柱で構成する載荷フレームに組み込み、下部加力梁を試験床に緊結するとともに、上部加力梁の端部に1000kN動的アクチュエータを接続し、動的載荷を実施した。

載荷メニューをTable 3、載荷波形をFig. 6に示す。載荷

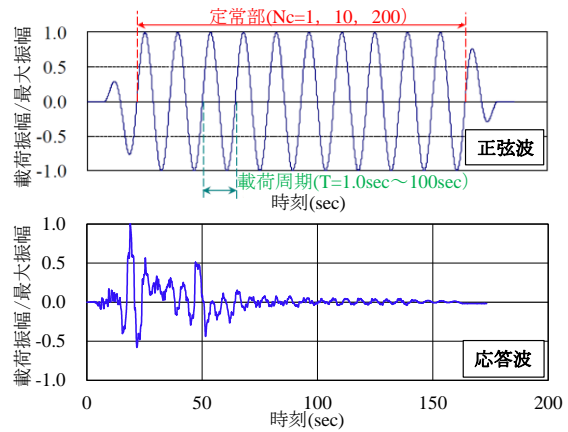


Fig. 6 載荷波形 (正弦波, 応答波)

Wave for Loading Test



Photo 1 載荷状況  
View of Loading Test

Table 4 実験結果一覧  
List of Test Results

波形の種類	周期 T(sec)	目標振幅 δ(mm)	サイクル数 N <sub>c</sub> (回)	滑り荷重 P <sub>d,mean</sub> (kN)
正弦波	5.5	±4.5	10	-
		±9		-
		±18		361.5
		±27		410.8
		±36		418.6
		±45		416.8
応答波	-	18*	-	356.8
		45*	-	401.2
正弦波	100	±45	1	409.2
	10		10	417.9
	4		10	407.8
	2		10	390.9
	1		10	350.1
	5.5		200	335.8

\*は最大変位の絶対値

メニューは以下とした。まず、周期を超高層建物の1次固有周期を想定した $T=5.5\text{sec}$ 、架構変位の目標値(目標振幅)を $\delta=\pm 4.5\text{mm}\sim\pm 49.5\text{mm}$ とし、10サイクルの正弦波による繰返し载荷を実施した。次に最大変位(絶対値)を18mm, 45mmに基準化した地震応答波による载荷を2ケース実施した。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1.5倍の入力地震波)によって得られた応答架構変位波形を用いた。さらに、 $\delta=\pm 45\text{mm}$ とし、 $T=100\text{sec}\sim 1.0\text{sec}$ の正弦波による繰返し载荷( $T=100\text{sec}$ のみ1サイクル, 他は10サイクル)を実施した。最後に、多数回繰返しに対するダンパーのエネルギー吸収性能を確認する目的で、 $T=5.5\text{sec}$ 、 $\delta=\pm 45\text{mm}$ 、200サイクルの正弦波による多数回繰返し载荷を実施した。

**3.2.3 計測方法** 変位をレーザー変位計と高感度変位計により、ひずみをひずみゲージにより測定した。変位の計測には基本的にレーザー変位計を採用し、一部、下部加力梁の支持点等の微小な変位や速度のみ生じる部位には、高感度変位計を採用した。ダンパーの滑り変位

$\delta_b$ は、外板①と外板②の相対変位をレーザー変位計で測定した。なお、3.3節で使用する荷重を以下の要領で算出した。架構全体の水平荷重 $P$ はアクチュエータの内蔵荷重計の指示値とした。ブレースの軸力 $N$ は、ブレースに貼付したひずみゲージの軸ひずみ測定値(ひずみゲージ貼付位置における4点の平均軸ひずみ)をもとに、ヤング係数 $E$ を $205,000\text{N/mm}^2$ と仮定し、ひずみの測定値にブレースの断面積とヤング係数を乗じて算出した。

**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 4に示す。Table 4の滑り荷重 $P_{d,mean}$ は、架構全体の水平荷重 $P$ と架構変位  $\delta$  の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。各载荷ケースにおける滑り荷重 $P_{d,mean}$ のばらつきは少なく、概ね目標値に近い値であった。なお、 $\delta=\pm 4.5\text{mm}$ 、 $\pm 9\text{mm}$ の载荷では、ダンパーが滑らなかったため $P_{d,mean}$ は算出していない。

ダンパーの水平荷重-架構変位関係をFig. 7に示す。各载荷ケースとも、繰返しによる滑り荷重の変動は小さく、

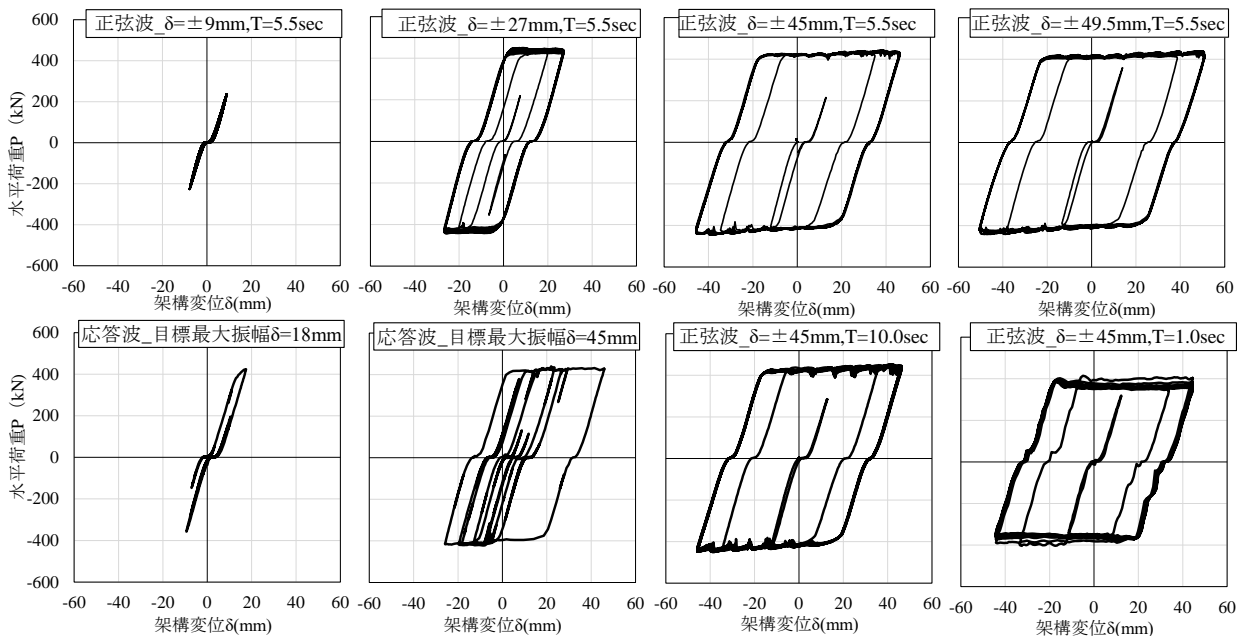


Fig. 7 ダンパーの水平荷重-架構変位関係  
Horizontal Load - Story Drift Relationship

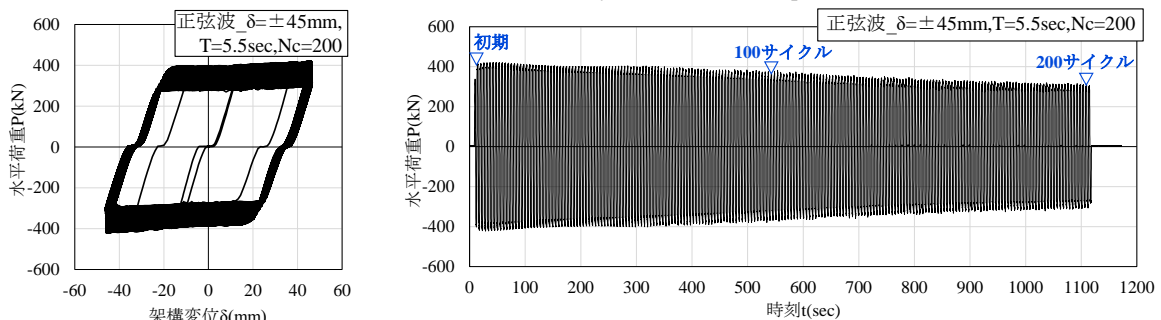


Fig. 8 多数回繰返し载荷 (正弦波,  $\delta=\pm 45\text{mm}$ ,  $T=5.5\text{sec}$ ,  $N_c=200$ )  
Results of Multi-cycle Loading



安定した履歴特性を示した。また、小さい振幅の除荷時に、わずかなスリップが確認されたが、これは、ダンパーの組立て施工時においてブレースピン部に生じる僅かな隙間の影響である。これに関しては、後述の解析検討において詳しく説明する。

多数回繰返し载荷 ( $\delta = \pm 45\text{mm}$ ,  $T = 5.5\text{sec}$ ,  $N_c = 200$ 回) におけるダンパーの水平荷重P-架構変位関係  $\delta$ 、及び水平荷重Pの時刻歴をFig. 8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いる。なお、ダンパーの滑り変位 $\delta_b = 0\text{mm}$ の時の荷重と比較すると、100サイクル経過時の荷重は、载荷初期の92%、200サイクル経過時の荷重は、载荷初期の75%であった。また、100サイクル経過時までは目標滑り荷重 $\pm 10\%$ の範囲に収まっており、ブレーキダンパーに期待される基本性能<sup>①</sup>を満たしている。なお、4面基本ユニットをH形鋼ブレースに組み込んだ実験<sup>②</sup>では、100サイクル経過時の滑り荷重は、载荷初期に対して91%であり、本実験と同様の特性を示している。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。

Fig. 9にブレースの軸力(引張が正)と架構変位 $\delta$ の関係を示す。なお、各ブレース(B1~B4)に生じる軸力-架構変位関係は、B1とB2、B3とB4はほぼ同じ形であったため、B1、B4のみの結果を示している。ダンパーのすべり荷重(目標値400kN)を引張側のブレースのみで負担すると仮定し、ブレース軸力を計算すると、軸力の計算値は597kNである。いずれの载荷ケースにおいても、ブレース軸力の最大値は計算値と概ね一致している。また、引張のみの耐力を発揮しており圧縮力は負担していないことがわかる。以上より、大荷重タイプは、安定して高いエネルギー吸収性能を有するとともに、主要構成部材も

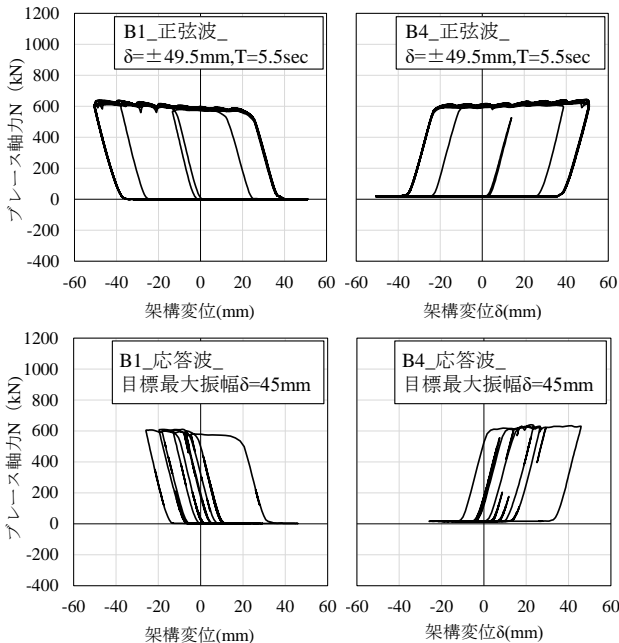


Fig. 9 B1, B4の軸力(引張が正) - 架構変位関係  
Brace Axial Force - Story Drift Relationship

意図通りの性能を発揮することが確認できた。

#### 4. 解析的検討

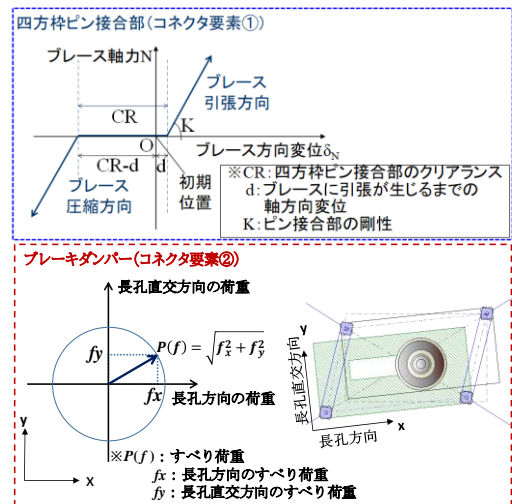
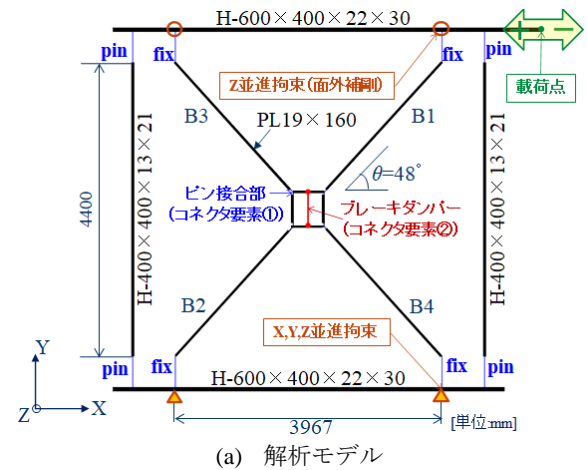
##### 4.1 解析目的

3章で示した動的实验に対して汎用ソフトによる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。解析には非線形有限要素プログラムAbaqus 2020<sup>⑥</sup>を使用した。使用する要素モデルは、線材要素とコネクタ要素<sup>⑦</sup>(節点間にバネや摩擦面等の相互作用を設定可能)とし、3章で示した試験体及び载荷フレームの断面・寸法諸元をもとに線材要素でモデル化した。鋼材は弾性を仮定し、ヤング係数を205,000N/mm<sup>2</sup>、比重を7.9t/m<sup>3</sup>とした。

コネクタ要素の特性として、四方枠のピン接合部(コネクタ要素①)は、ピン接合部の孔クリアランスCRを考慮してモデル化し、CRの値は試験体の設計値(CR=11mm)とした。ピンの初期配置について、ブレースに引張力が



(b) コネクタ要素の説明

Fig. 10 解析モデル概要  
Analytical Model

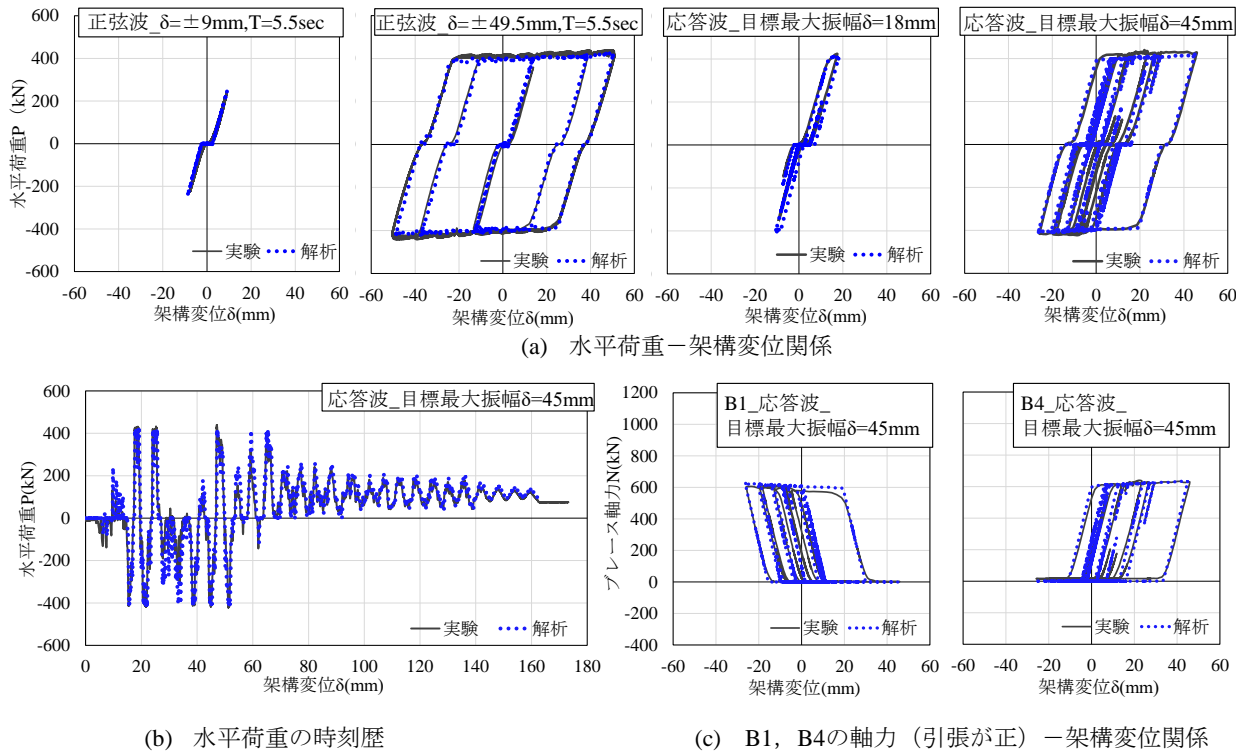


Fig. 11 解析結果：実験値との比較

Analysis Results of Brake Damper (Tension Brace Type)

生じるまでの軸方向変位量 $d$ は、実験結果と対応するように試行錯誤的に、 $d=0.75\text{mm}$ として解析モデルに反映した。ブレースに引張力が生じるまでの水平変位 $\delta_d$ は、 $\delta_d=2d/\cos\theta$ で算定することができ、 $\delta_d=2.2\text{mm}$ となる。ここで、 $\theta$ はブレース角度である。ブレーキダンパー部（コネクタ要素②）は、摩擦面の挙動を模擬した剛塑性モデルとし、滑り荷重 $P(f)$ には、滑り荷重の設計値（400kN）を採用した。荷重条件は、実験時と同様の荷重波形を載荷点に強制変位として与えた。

4.3 解析結果

Fig. 11に各解析結果（水平荷重—架構変位関係、水平荷重の時刻歴、ブレース（B1, B4）の軸力—架構変位関係）に実験結果を重ねた図を示す。同図より、試験体の水平荷重—架構変位関係や水平荷重の時刻歴、ブレースに生じる軸力を解析で精度よく再現できていることがわかる。他の荷重ケースにおいても解析結果は実験結果とほぼ一致しており、本解析手法を用いることで、ブレーキダンパーTBの動的挙動を再現できることを確認した。

5. まとめ

大荷重タイプのブレーキダンパーTBの構造性能を動的荷重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) 荷重周期や荷重履歴によらず、水平荷重—架構変位関係は安定した履歴特性を示した。

- 2) 目標振幅 $\delta\pm 45\text{mm}$ 、周期 $T=5.5\text{sec}$ の正弦波での200サイクルの多数回繰返し荷重を実施した。その結果、100サイクル経過時までは目標滑り荷重 $\pm 10\%$ の範囲に収まっており、ブレーキダンパーに期待される基本性能を満たすことを確認した。

- 3) 有限要素解析により、動的荷重実験時の水平荷重—架構変位関係を再現できた。

ブレーキダンパーTBの大容量化を実現し、従来の中低層建物だけでなく、超高層建物にも適用を可能とした。今後は、ブレーキダンパーTBの更なる適用範囲の拡大を進める予定である。

参考文献

- 1) 鈴井康正, 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
- 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, 2000.9
- 3) 平田寛, 他: 引張ブレースとブレーキダンパー®を組み合わせた制振機構の開発, 大林組技術研究所報, No.80, 2016
- 4) 平田寛, 他: 引張ブレースを用いた高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発 その1~その3 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.945~946, 2019.9
- 5) ばね技術研究会: 第3版 ばね, 丸善株式会社, pp.283-292, 1982
- 6) Abaqus version 2020 Analysis User's Manual, 2020