

# 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

平田 寛 後閑 章吉 内海 良和  
(本社設計本部) (本社建築本部)

野村 潤 佐野 剛志  
(本社建築本部)

## Seismic Control System of Tensile Brace and Brake Damper® Combination

Hiroshi Hirata Shokichi Gokan Utsumi Yoshikazu  
Jun Nomura Takeshi Sano

### Abstract

When reinforcing low-rise buildings, the installation space is often narrow and limited. Therefore, there are demands for slim dampers. Usually, dampers are installed into the brace, which act on tension and compression. Hence, reducing the brace cross section would directly save more space. However, in this case, the load at which the brace can be borne is determined by its buckling strength. Therefore, the brace section becomes larger than that of the required damper strength, and it may lead to ineffective design. In this study, new dampers that combine the tensile brace and the brake damper are proposed. Static loading tests were conducted for the proposed damper, and stable damping performance was confirmed. Furthermore, the numerical analysis considering geometric nonlinearity was conducted, and it was confirmed that the numerical analysis could accurately simulate the experimental results.

### 概 要

工場等の低層の鉄骨造建物を制振補強する場合、既存の柱や梁部材の断面が小さいため、柱梁構面内の補強可能スペースの厚みが制限されることが多い。そのため、スリムな制振ダンパーに対するニーズが高まっている。代表的な制振補強形態として、圧縮引張力が作用するブレースに制振ダンパーを組み込む方式があるが、座屈耐力を確保するためブレースの断面は大きくなる傾向があり、スリムな制振ダンパーの妨げとなる。このような課題を解決するために、本報では、引張ブレースとブレーキダンパーを組み合わせた新しい制振ダンパーを提案し、本ダンパーが安定した制振性能を発揮することを載荷実験により確認した。また、数値解析を実施することにより、実験結果を精度よくシミュレートできることを確認した。

## 1. はじめに

ブレーキダンパーは、安定した摩擦力によりエネルギーを吸収することで、地震時の建物の揺れを抑える大林組独自の制振システムであり、多くの実験により構造性能を確認し、超高層建物を中心に実建物への適用を重ねてきた<sup>1)~4)</sup>。ブレーキダンパーの構成をFig. 1 に、活用例をPhoto 1 に示す。ブレーキダンパーはブレース (Photo 2 (a)) や間柱 (Photo 1 (b)) などの耐震要素内や耐震要素と主架構との接合部の中板と外板の間にブレーキ材とステンレス板を一对にして挟み込んだ制振システムで、一定の耐力を発揮するとともに、耐力を一定に保ちながら撓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可能となる。

一方、工場等の低層鉄骨建物の制振補強工事のニーズが増加している。このような建物は、従来からアングルやH形鋼を用いた耐震ブレースが採用されるのが一般的であるが、この場合、大地震時にはブレースに「座屈」や「破断」といった破壊が生じ (Photo 2) , 耐震性能が

大きく低下してしまう場合がある。そのため、「度重なる大地震に備えて建物の構造性能を確保しておく」という観点からも、低層鉄骨建物の補強にブレーキダンパー等の制振ダンパーを採用するメリットは大きい。しかし、柱や梁が細く、ダンパーの設置スペース (幅) に制限のある低層鉄骨建物の制振補強において、ブレース型のブレーキダンパー (Photo 1 (a)) をそのまま適用しようとした場合、圧縮力に対する座屈性能を確保するため、部材断面を抑えることができず、ブレーキダンパーの適用が困難であった。

このような課題を解決するために、引張ブレース (鋼棒などの引張のみに耐力を期待するブレース) とブレーキダンパーを組み合わせ、「部材のスリム化」と「高いエネルギー吸収性能」を両立した新しい制振ダンパーを開発した。

本報では引張ブレースを用いたブレーキダンパー (以下、本ダンパーと称す) の構造システムの概要を示し、本ダンパーのエネルギー吸収性能を確認するために実施した数値解析と静的載荷実験の内容について報告する。

## 2. 技術概要

### 2.1 ブレーキダンパー（引張ブレース型）概要

本ダンパーは、鋼棒などを用いた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を組み込んだものである。本ダンパーについて、設置状況をPhoto 3 に、構成をFig. 2 に、変形時の説明図をFig. 3 に示す。ダンパー部は、ブレーキダンパーの中板と外板を縦板（フラットバー）で連結することで、4方枠を構成している。ダンパーの制振力を一对のブレース部材の引張軸力のみで負担し、建物に伝達するため、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る。主要部材を断面積の小さな引張部材で構成したことで、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振ダンパーである。本ダンパーは「架構の厚さ方向で200mm程度の設置スペース」、「最低限鋼棒を通すことのできる隙間（60mm程度）」があれば適用可能であり、今まで不可能だった制振補強を可能とする。

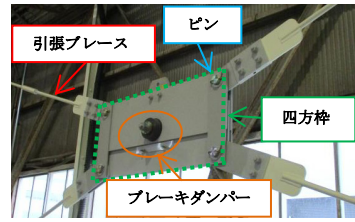


Photo 3 ブレーキダンパー（引張ブレース型）  
Brake Damper (Tension Brace Type)

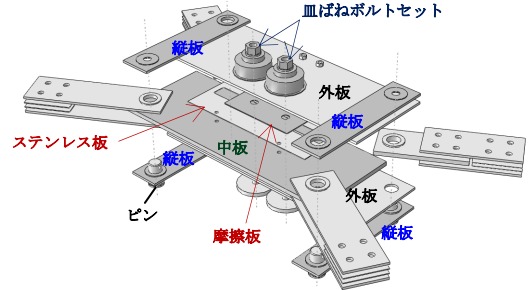


Fig. 2 ブレーキダンパー（引張ブレース型）の構成  
Brake Damper (Tension Brace Type) Appliance

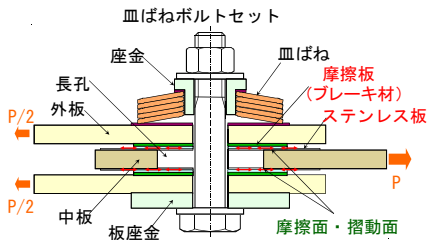


Fig. 1 ブレーキダンパー構成（例：2面）  
Example of Brake Damper Appliance

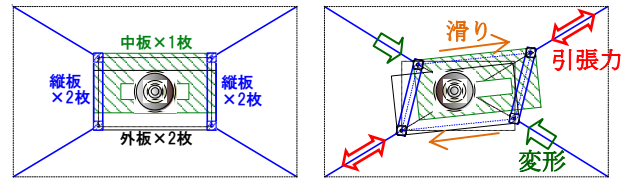


Fig. 3 ダンパー変形時の説明図  
Mechanism of Resistance Using the Device



(a) ブレース型 (b) 間柱型

Photo 1 従来のブレーキダンパー活用例  
Example of Brake Damper Appliance

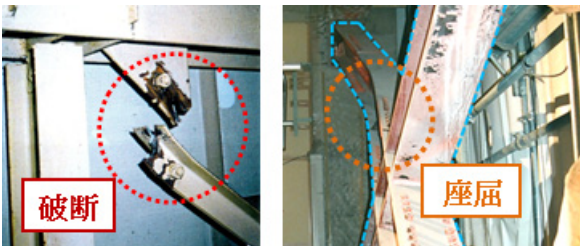
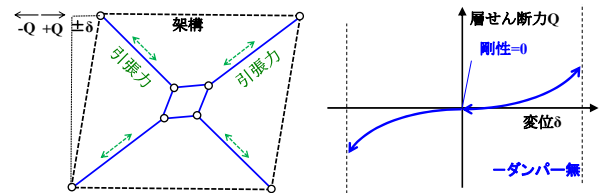
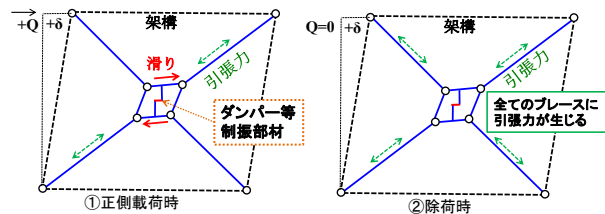


Photo 2 従来の耐震ブレースの地震被害  
Example of Earthquake Damage of Seismic Brace



(a) ダンパー無の場合



(b) ダンパー有の場合

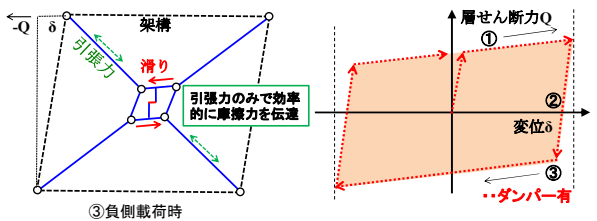


Fig. 4 （引張ブレース型）の構造メカニズム  
Structure Mechanism of Brake Damper (Tension Brace)

## 2.2 構造メカニズム

本ダンパーの機構は、幾何学的非線形を考慮（外力を受けた時の変形を随時考慮して力のつり合いを詳細に計算）することではじめて成立する構造である。Fig. 3 に本ダンパーの構造メカニズムの説明図を示す。本ダンパーの機構は、Fig. 4 (a) に示すように、ダンパー無（ダンパー耐力が限りなく小さい場合）を考えると、層間変位  $\delta$  が生じることではじめて耐力上昇（剛性）が生じるような挙動を示す。また、架構の層間変位  $\delta$  が生じることで4本すべてのブレースに引張力が生じる。一方、Fig. 4 (b) に示すダンパー有の場合を考えると、「①正側載荷時」、「③負側載荷時」は、各異なる対角ブレース（2本）に引張力が生じ、「①正側載荷」から「③負側載荷」に切り替わる「②除荷時」には、4つすべてのブレースに引張力が生じる。つまり、本ダンパーには常に、いずれかのブレースに引張力が生じるため、ダンパーの摩擦力を引張力のみで効率的に架構に伝達し、安定したエネルギー吸収性能を発揮することができる。

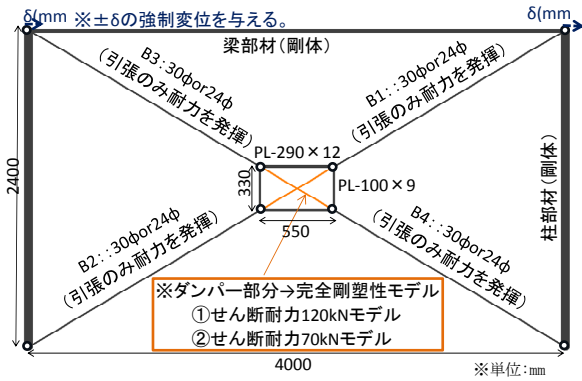


Fig. 5 解析モデル (例: 試験体No.3)  
Example of Analysis Model

Table 1 解析ケース (対象試験体) 一覧  
Analysis Case

試験体	引張ブレース	ダンパー	層間変位振幅
	断面	すべり荷重 (kN)	
No.1	30φ	120	±20mm~±90mm
No.2	30φ	70	
No.3	24φ	70	

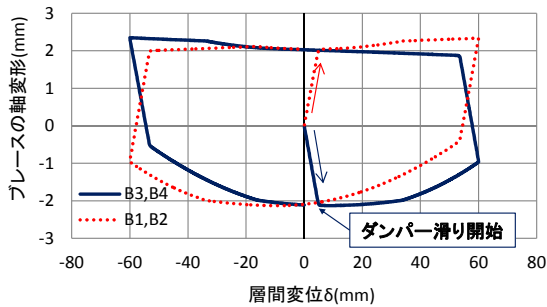
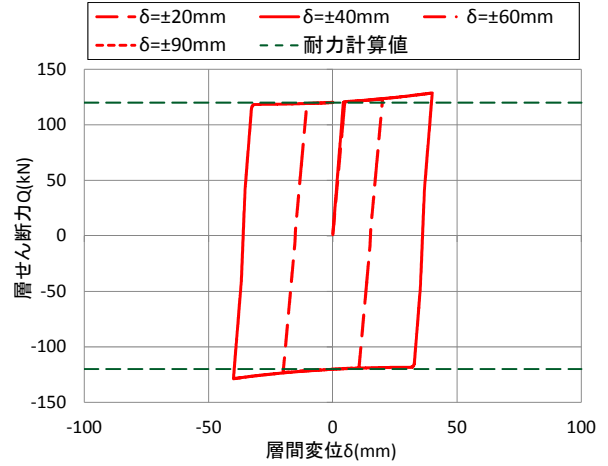


Fig. 6 ブレースの履歴 (No.3: 解析,  $\delta=\pm 60\text{mm}$ )  
History Properties of Tensile Brace

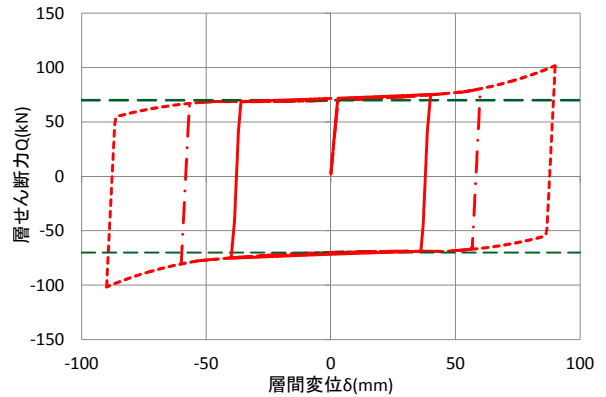
## 3. 数値解析

### 3.1 解析方法

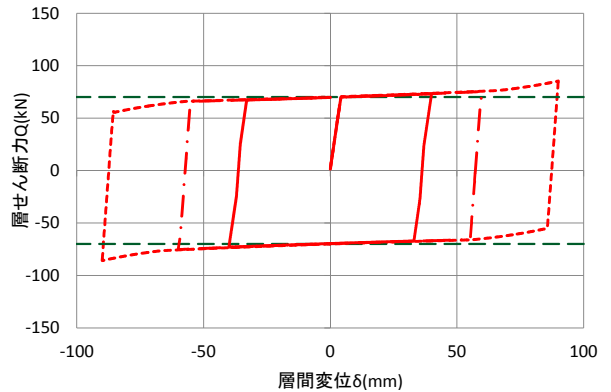
本ダンパーの機構が制振架構として成立することを確認するために、汎用解析プログラムを用いて幾何学的非線形を考慮した数値解析を実施した。



(a) No.1: 解析,  $\delta=\pm 20\text{mm}, \pm 40\text{mm}$



(b) No.2: 解析,  $\delta=\pm 40\text{mm}, \pm 60\text{mm}, \pm 90\text{mm}$



(c) No.3: 解析,  $\delta=\pm 40\text{mm}, \pm 60\text{mm}, \pm 90\text{mm}$

Fig. 7 層せん断力-層間変位関係 (解析結果)  
Sliding Load – Sliding Displacement Relationship

Fig. 5 に解析モデル例, Table 1 に解析ケース一覧を示す。解析要素は梁要素とし, 各梁要素の接合点はピン接合となるようにモデル化した。各部材の断面寸法, ダンパー荷重 (滑り荷重70kN) 等は後述する検証実験に対応するように決定した。摩擦ダンパーは完全剛塑性ブレースでモデル化した。ブレースは, 30φ, 24φのものを想定し, 引張のみ耐力を発揮するようにモデル化しているが, 解析の安定性を確保するために圧縮力にもわずかに抵抗するものとした。

### 3.2 解析結果

Fig. 6 にブレースの軸変形-層間変位関係を示す。同図より, 圧縮変形が最大値に到達するのは, ダンパーが初めて滑り荷重に到達した時点であり, 層間変位に関わらず圧縮変形が増大しないことが確認できる。

Fig. 7 に層せん断力-層間変位関係 (No.1~No.3 : 解析結果) を示す。同図 (数値解析) により, 履歴ループにスリップ等による欠けが生じることが無く安定したエネルギー吸収性能を発揮するダンパーを実現できることがわかる。また, ダンパー摺動後も, 非線形の二次勾配を有し, その性状はブレース断面やダンパー耐力により変化することを確認した。これは, 本ダンパーが変形する際の幾何学的非線形性によるものである。

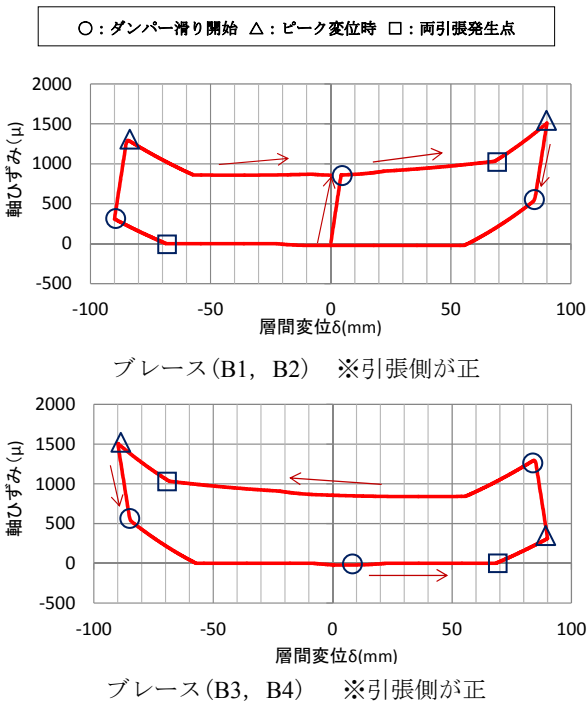


Fig.8 各ブレースの軸ひずみ-層間変位関係 (解析結果(例): 試験体No.3,  $\delta = \pm 90\text{mm}$ )  
Axial Strain - Displacement Relationship

## 4. 検証実験

### 4.1 実験方法

Fig. 9 に載荷装置を示す。載荷方法について, 水平方向ジャッキにより層間変位 $\delta$  ( $\delta = \pm 20\text{mm} \sim \pm 90\text{mm}$ ) を一定振幅で3サイクル繰り返すように静的に載荷した。試験体一覧をTable 2, 試験体形状・寸法をFig. 9 に示す。試験体数は 3体であり, 実験変数はブレース断面 (30φ [No.1, No.2], 24φ [No.3]), ダンパーの滑り耐力 $q$  ( $q = 120\text{kN}$  [No.1],  $q = 70\text{kN}$  [No.2, No.3]) である。

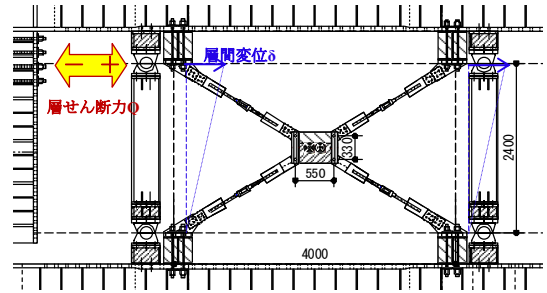


Fig. 9 載荷装置の形状・寸法  
Configuration and Dimensions of Test Specimens

Table 2 試験体一覧  
Test Program

試験体	ブレース		ダンパーのすべり耐力(kN)	振幅	初期張力の有無
	断面	材質			
No.1	30φ	SNR490	120	±20mm ~ ±90mm	無し, 有り(200μ)
No.2					
No.3	24φ		70		

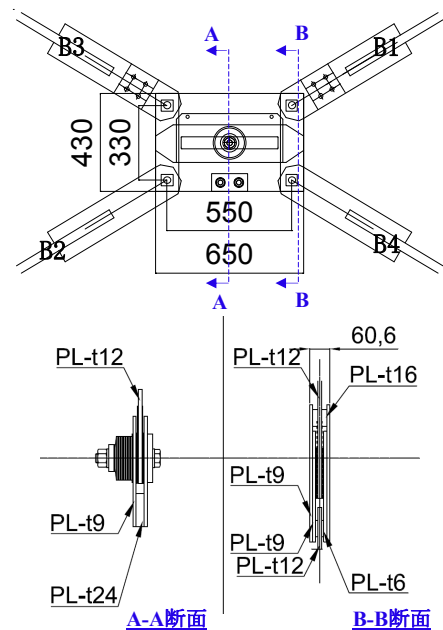
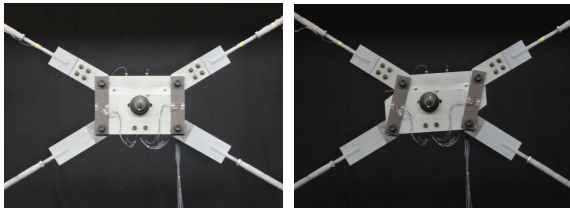
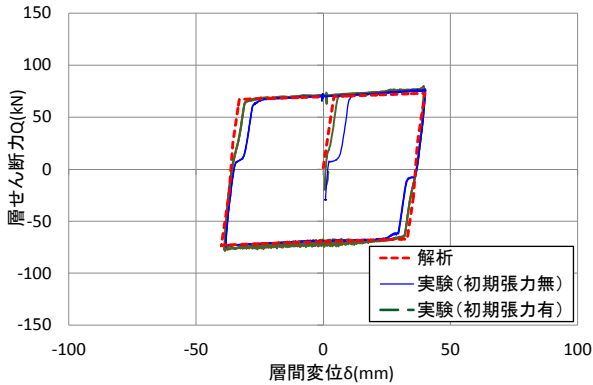


Fig. 10 試験体形状・寸法 (例:No.3)  
Outline of Brake Damper (Tension Brace Type)

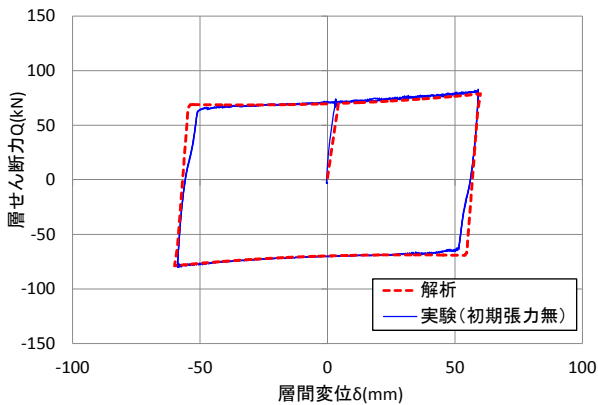


(a) No.3 (変形前) (b) No.3 ( $\delta=+90\text{mm}$ 変形時)

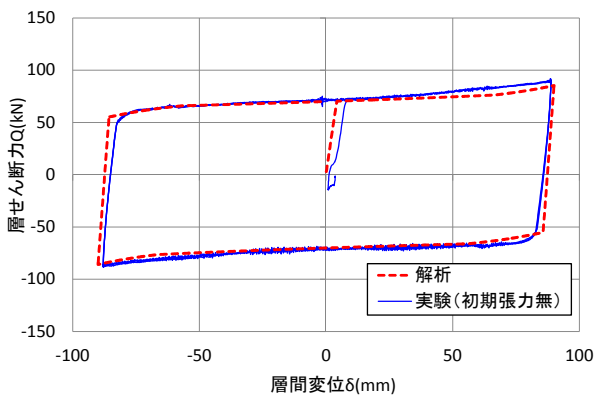
Photo 4 試験体No.1の変形前と変形後のTD部  
View of Loading Test



(a) 試験体No.3,  $\delta=\pm 40\text{mm}$



(b) 試験体No.3,  $\delta=\pm 60\text{mm}$



(c) 試験体No.3,  $\delta=\pm 90\text{mm}$

Fig.11 層せん断力-層間変位関係  
Sliding Load – Sliding Displacement Relationship

Table 2 ダンパーのエネルギー吸収量  
The Amount of Energy Absorption of the Damper

試験体	初期張力	1サイクルあたりのエネルギー吸収量		
		実験 (kN・m)	解析 (kN・m)	実験/解析
No.3 $\delta=\pm 40\text{mm}$	無し	9.36	10.63	0.88
	有り	10.38		
No.3 $\delta=\pm 60\text{mm}$	無し	16.32	16.62	0.98
No.3 $\delta=\pm 90\text{mm}$	無し	25.11	24.92	1.01

## 4.2 実験結果

Photo 4 に実験時のダンパーの変形状況の例として、No.3試験体の変形前と $\delta=+90\text{mm}$ 時(本実験における最大変形時)を示す。層間変形 $\delta$ の増大に伴いダンパーが摺動し、ダンパーが変形していることがわかる。

Fig. 11 に、試験体No.3を、 $\delta=\pm 40\text{mm}$ 、 $\pm 60\text{mm}$ 、 $\pm 90\text{mm}$ でそれぞれ3サイクル繰り返した時の実験結果(層せん断力-層間変位関係)を数値解析結果と重ねて示し、Table 2に同試験体(No.3試験体、 $\delta=\pm 40\text{mm}$ 、 $\pm 60\text{mm}$ 、 $\pm 90\text{mm}$ )のダンパーの1サイクルあたりのエネルギー吸収量について、実験値と解析値の比較を示す。

試験体No.3、 $\delta=\pm 40\text{mm}$ について、初期張力を導入しない場合の実験結果は5mm程度欠けた履歴ループとなっており、エネルギー吸収量も解析結果と比べて12%ほど小さな値となっている。これは、ピンに生じているガタやブレースのゆるみによる影響である。しかし、初期張力(軸ひずみ200 $\mu$ )を導入することで改善されていることがわかる。なお、 $\delta=\pm 60\text{mm}$ 、 $\pm 90\text{mm}$ の、大きな変形の場合には、初期張力を導入しない場合でも履歴ループの欠けはほとんど生じなかった。これは、層間変位の増大により、ブレースに引張力が生じるためである。ここには示していないが、他の試験体についても同様に、実験結果を数値解析でシミュレートできることを確認した。

## 5. 適用事例

本ダンパーは、大林組東京機械工場の再整備や、その他、既存工場の耐震改修(4件)で既に適用されており、ダンパーの設計には本報で示した数値解析を活用した。Photo 5 に、大林組東京機械工場への適用状況を示す。本建物には、外周へブレーキダンパー(引張ブレース型)を計4か所設置しており、作業スペースや導線を妨げず、視界も遮らない開放的な制振補強を実現している。

## 6. まとめ

引張ブレースを用いたブレーキダンパーを開発し、構造性能を静的な繰り返し载荷実験と数値解析により検証した。得られた知見を以下に示す。



- 1) ブレースが引張軸力のみ負担することで、本ダンパーは安定した制振性能を発揮することを確認した。
- 2) 幾何学的非線形を考慮した数値解析を実施することにより、実験を精度よくシミュレートできることを確認した。

本ダンパーは、実物件（5件）に適用した。今後も、設置スペースに制約がある中低層建物向けの制振部材として展開する予定である。

#### 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) 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）
- 3) 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）
- 4) 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）



Photo 5 大林組東京機械工場への適用状況  
Status of Application