

# 省スペースで耐震性能と制震効果を発揮する 「クロスダンパー®」の開発

鈴木康正 佐野剛志 平田寛  
大出大輔 内海良和 堂地利弘  
(本社建築本部) (本社設計本部)

## Development of “Cross Damper®” for Seismic Performance and Damping Effect with Space Saving

Yasumasa Suzui Takeshi Sano Hiroshi Hirata  
Daisuke Ode Yoshikazu Utsumi Toshihiro Dochi

### 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 a building’s vibration energy by the friction between the brake pads and stainless-steel plates fastened with high-tension bolts. We have newly developed a “cross damper” that combines and locates a brake damper and an oil damper within one frame of the building. The cross damper is particularly effective for seismic retrofitting the existing structures, and it was adopted to the seismic retrofitting work of the castle tower of Kumamoto Castle. This paper presents the outline of the cross damper, the results of the dynamic loading test, and the dynamic FEM analysis of a real-size damper to confirm its structural performance, and an application example to a real building.

### 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、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「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。今回、ブレーキダンパーとオイルダンパーを建物の一構面内に交差させ組み合わせた耐震・制震システム「クロスダンパー®」を新たに開発した。クロスダンパーは、省スペースで様々な大きさの地震に対して耐震性能と制震効果を期待できることから、既存建物の耐震改修に特に有効であり、熊本城天守閣の耐震改修工事に採用された。本稿では、開発したクロスダンパーの概要、構造性能を確認するために実施した実大ダンパーの動的載荷実験と動的FEM解析の結果、実建物への適用例について報告する。

## 1. はじめに

建物の主架構内に組み込んだ制震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<sup>1)2)</sup>。

一方、既存建物の耐震改修工事では、耐震要素の設置場所の確保が難しいことがあり、省スペースで耐震性能の向上(強度・靱性の向上)と制震効果(揺れの低減)を同時に実現できる技術が求められている。そこで、筆者らは、ブレーキダンパーとオイルダンパーを各々組み込んだブレースを各々の軸心が一致するように交差させたクロスダンパーを新たに考案した<sup>3)</sup>。そして、考案したダンパーの構造性能を確認するために、実大の載荷フレームに組み込み、動的載荷実験を実施した。本稿では、開発したクロスダンパーの概要、構造性能を確認するために実施

した実大ダンパーの動的載荷実験と動的FEM解析の結果、実建物への適用例について報告する。

## 2. クロスダンパーの構成と特徴

クロスダンパーの概要をFig. 1に示す。オイルダンパーが取り付くブレースをブレーキダンパーが取り付くブレース内に貫通させ、一構面内で両者をX形に配置している。ブレーキダンパーの基本構成をFig. 2に示す。ブレー

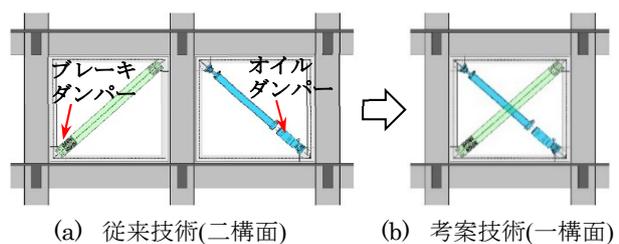


Fig. 1 クロスダンパーの概要  
Outline of Cross Damper

キダンパーは皿ばね<sup>4)</sup>を介した高力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、摺動面に一定の面圧を発生させることで安定した滑り摩擦力を発揮する機構である。ブレーキダンパーは「ブレーキダンパーを用いた耐震補強工法」として、一般財団法人日本建築センターの建設技術審査証明(BCJ-審査証明-238)を取得している。従って、従来の耐震ブレースと同様に、ブレーキダンパーを耐震補強に用いて既存建物の強度・靱性の向上を図ることができる。

中小地震時(小変形時)には、ブレーキダンパーは高い剛性により地震時変形を抑制し、主にオイルダンパーで地震エネルギーを吸収する。また、大地震時(大変形時)には、ブレーキダンパーが一定の摩擦力で滑ることにより、ブレーキダンパーとオイルダンパーの両方で地震エネルギーを吸収する。

一構面で建物の耐震性能の向上と制震効果の付与を実現できるため、耐震要素の設置場所の確保が難しい既存建物の耐震改修で特に有効である。また、新築建物にも適用可能な技術である。変位依存型(履歴型)のブレーキダンパーと速度依存型のオイルダンパーとでは、地震時に最大の効果を発揮するタイミングが異なるため、両者を組み合わせた本ダンパーでは、ダンパー周辺の柱や杭の作用軸力を軽減することができる<sup>5)</sup>。

### 3. 実大ダンパーの動的载荷実験と解析検討

#### 3.1 目的

実大サイズの試験体を载荷フレームに組み込み、動的载荷実験を行うことにより、クロスダンパーの構造性能を確認する。また、動的FEM解析により実験時の挙動を追跡できることを併せて確認する。

#### 3.2 実験計画

**3.2.1 試験体** 試験体概要をFig. 3に示す。既存RC系建物の耐震改修では、通常、枠付き間接接合を介して既存フレームにダンパーを設置することが多いが、ここでは鉄骨枠と加力梁を高力ボルトで接合する試験体を製作した。X形ブレースの片側のブレースは、H-550×350×19×22(SM490A)を弱軸方向に配置し、下部にブレーキダンパーを組み込んだ。反対側のブレースは、角形鋼管□-175×175×12(BCR295)とオイルダンパーを直列につないだ。そして、H形鋼のウェブに角形鋼管を貫通させた。なお、貫通部の面内方向のクリアランスは、文献6)で靱性指標F=2.0に相当する層間変形角(R=1/82)時のブレーキダンパーの滑り量に安全率(1.2)を乗じ、さらに施工誤差(10mm)を考慮して100mmとした。また、面外方向のクリアランスは、主に施工性を考慮して50mmとした。

ブレーキダンパーには、2面摩擦タイプのダンパー基本ユニットをH形鋼のフランジに4セット、ウェブに2セット、計6セット使用し、ブレース材軸方向の目標滑り荷重を600kNとした。ダンパー基本ユニットには、高力ボルト

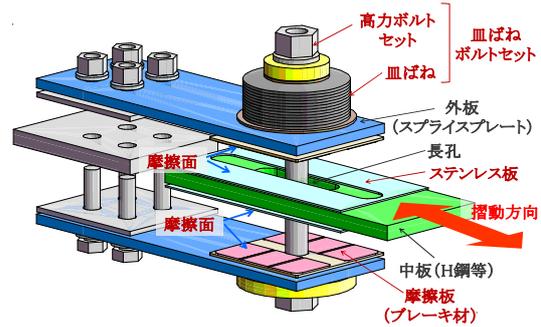


Fig. 2 ブレーキダンパーの基本ユニット  
Basic Unit of Brake Damper

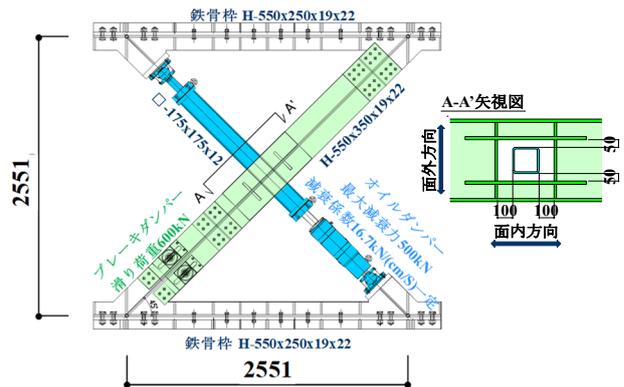


Fig. 3 試験体概要  
Configuration and Dimensions of Test Specimens

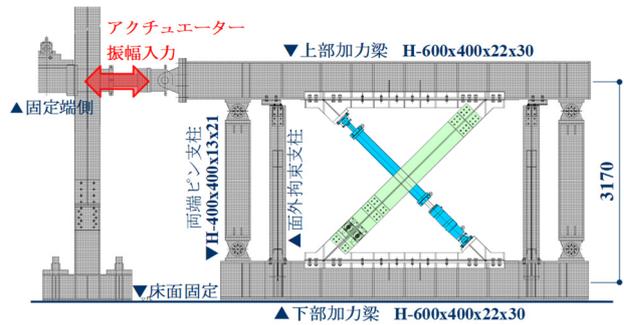


Fig. 4 载荷装置概要  
Outline of Loading Apparatus

Table 1 载荷メニュー  
Menu for Loading Test

波形の種類	周期 T [sec]	倍率 [倍]	目標 アクチュエーター 振幅 $\delta$ [mm]	定常部 サイクル 数 N <sub>c</sub> [回]
正弦波	2.0	—	±3, ±5, ±10, ±20, ±30, ±40, ±50, ±60	5
	0.4	—	±10	
	0.7	—	±10, ±20	
地震波 (熊本地震応答波)	(0.64)	1.0	[-18.9]	—
		1.5	[-28.35]	—

<備考>  
 ・周期Tの( )内の値は、地震応答波形(変位)のフーリエスペクトル上の卓越周期を示す。  
 ・[ ]内の値は、波形中の最大変位を示す。

F8T M27と12枚並列重ねの皿ばね(外径130mm, 内径65mm, 板厚3.6mm)を組み合わせた皿ばねボルトセット

を使用した。ダンパー部の高力ボルト本締め時の導入軸力は皿ばね高さで管理し、ボルト張力146.3kNを目標に軸力を導入した。

オイルダンパーは、1次減衰係数 $C_1=16.7\text{kN}/(\text{cm}/\text{sec})$ 、装置剛性 $K_0=1600\text{kN}/\text{cm}$ 、最大減衰力500kNで、リリースしないタイプのものを使用した。

また、各々のブレースの設置角度は $\theta=45^\circ$ とした。

**3.2.2 荷重方法** 荷重装置概要をFig. 4に示す。試験体を上下の加力梁と両端ピン支柱で構成する荷重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ーを接続し、動的荷重を実施した。

荷重メニューをTable 1、荷重波形をFig. 5に示す。荷重メニューは以下の1), 2)とした。

1) 正弦波：周期 $T=0.4, 0.7, 2.0\text{sec}$ 、振幅 $\delta=\pm 3, \pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40, \pm 50, \pm 60\text{mm}$ を組合せた計11ケース

2) 地震波：2016年熊本地震の熊本気象台観測波(NS方向)による検討建物1階層間変形(Y方向)の応答波の1.0倍(最大変位-18.9mm)、1.5倍(最大変位-28.35mm)の2ケース

**3.2.3 計測方法** 試験体の主な変位、ひずみの測定位置をFig. 6に示す。変位をレーザー変位計や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。なお、3.4節で使用する荷重、変形を以下の要領で算出した。

架構全体の水平荷重 $P$ はアクチュエーターの内蔵荷重計の指示値とした。

オイルダンパーの軸方向荷重 $N_o$ は、ブレース材に貼付したひずみゲージの軸ひずみ測定値をもとに、(1)式で算出した。

$$N_o = -E \cdot A_{ob} \cdot \epsilon_{on} \quad (1)$$

ここで、 $E$ ：ヤング係数、 $A_{ob}$ ：ブレース材の断面積、 $\epsilon_{on}$ ：ブレース材中央位置における4点の平均軸ひずみ  
ブレイキダンパーの軸方向荷重 $N_b$ は、(2)~(4)式で算出した。

$$M_{bu} = E \cdot Z_b \cdot \epsilon_{um}, \quad M_{bl} = E \cdot Z_b \cdot \epsilon_{lm} \quad (2)$$

$$Q_b = (M_{bu} - M_{bl}) / l_b \quad (3)$$

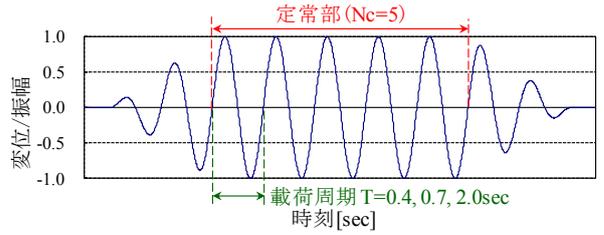
$$N_b = (P - Q_b \cdot \sin \theta - N_o \cdot \cos \theta) / \cos \theta \quad (4)$$

ここで、 $M_{bu}, M_{bl}$ ：ブレース材上・下位置での曲げモーメント、 $Z_b$ ：ブレース材断面係数、 $\epsilon_{um}, \epsilon_{lm}$ ：ブレース材上・下位置でのひずみゲージによる曲げひずみ、 $Q_b$ ：ブレース材せん断力、 $l_b$ ：軸ひずみ測定区間距離、 $\theta$ ：ブレースの設置角度

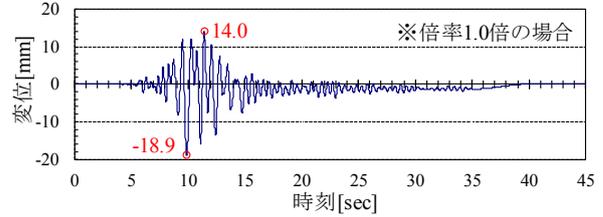
また、架構全体の水平変形 $\delta$ 、ブレイキダンパーの軸変形 $\delta_b$ 、オイルダンパーの軸変形 $\delta_o$ は、各々Fig. 6に示す変形とした。

### 3.3 解析計画

実験結果を解析で追跡できることを確認するために、汎用解析コード「Abaqus6.12」<sup>7)</sup>を使用して、動的FEM解析を実施した。使用する要素モデルは、線材要素とコネクタ要素(節点間にバネやダッシュポットを設定可能)と



(a) 正弦波



(b) 地震波：熊本地震(熊本気象台)応答波

Fig. 5 荷重波形  
Wave for Loading Test

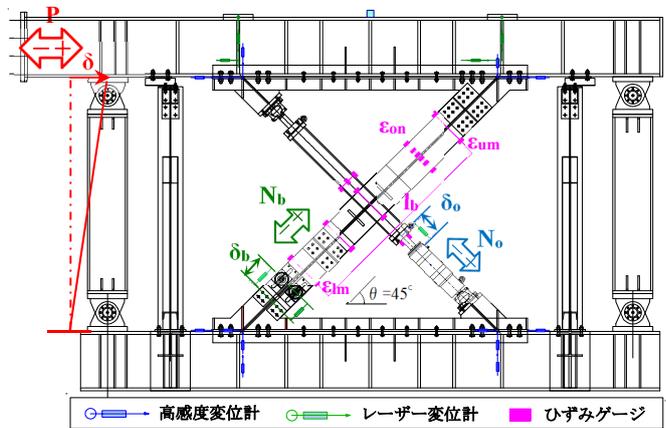


Fig. 6 変位・ひずみの計測位置  
Position of Measuring Displacement and Strain

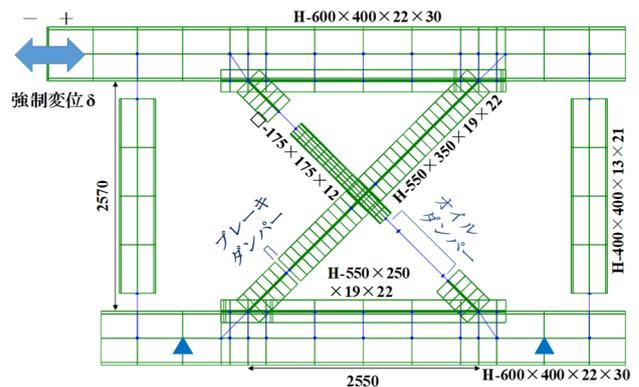


Fig. 7 解析モデル  
Analytical Model

した。解析モデルをFig. 7に示す。3.2節で示した試験体及び荷重フレームの断面・寸法諸元、ブレイキダンパーの特性(剛塑性型の復元力特性、滑り荷重)、オイルダンパーの特性(1次減衰係数、装置剛性)を忠実にモデル化した。そして、実験時と同様の荷重波形を荷重点に強制変位として動的に与えた。

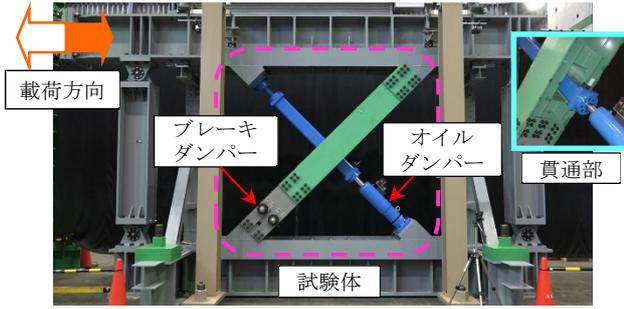
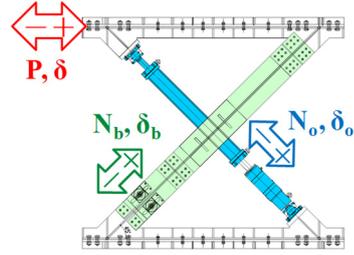
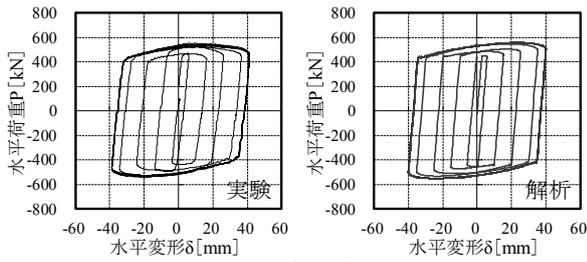


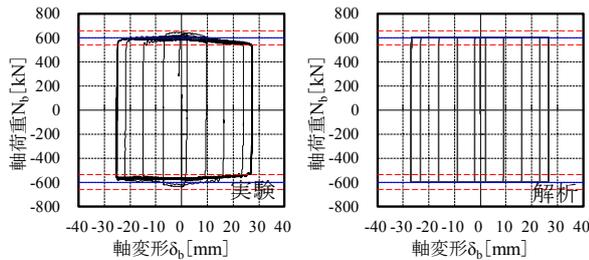
Photo 1 荷重状況  
View of Loading Test



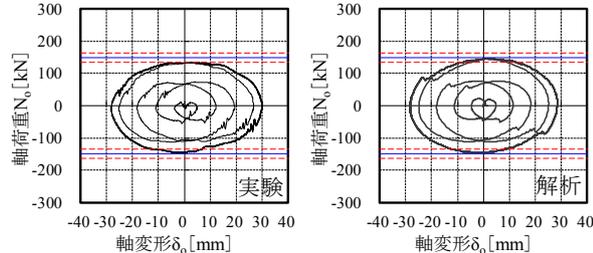
※Fig. 8, Fig. 9の記号の説明  
P,  $\delta$ : 架構全体の水平荷重, 水平変形  
 $N_b, \delta_b$ : ブレーキダンパーの軸荷重, 軸変形  
 $N_o, \delta_o$ : オイルダンパーの軸荷重, 軸変形



(a) 架構全体



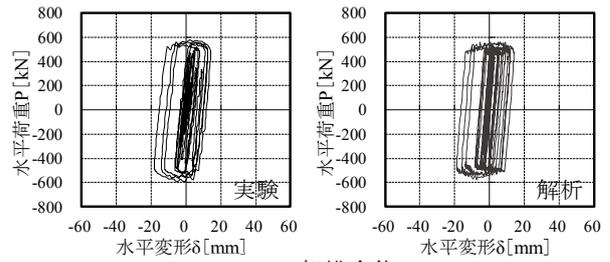
(b) ブレーキダンパー



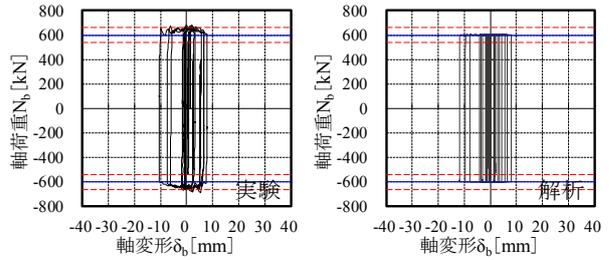
(c) オイルダンパー

Fig. 8 実験と解析による荷重-変形関係の比較  
(正弦波,  $T=2.0\text{sec}$ ,  $\delta=\pm 40\text{mm}$ )

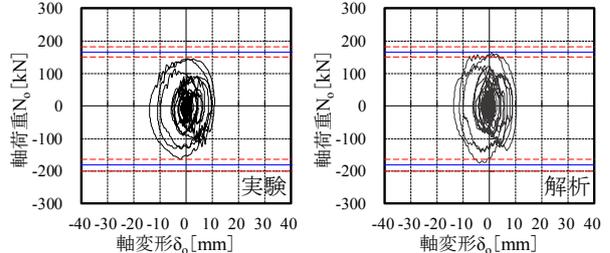
Comparison of Load-Deformation Relationship  
between Test and Analysis



(a) 架構全体



(b) ブレーキダンパー



(c) オイルダンパー

Fig. 9 実験と解析による荷重-変形関係の比較  
(熊本地震応答波 $\times 1.0$ 倍)

Comparison of Load-Deformation Relationship  
between Test and Analysis

### 3.4 実験結果と解析結果

3.4.1 実験経過 試験体の荷重状況をPhoto 1に示す。全ての荷重を通じて、荷重フレームに組み込まれたブレーキダンパーとオイルダンパーはスムーズに作動した。ブレース材に貼付したひずみゲージのひずみは、全ての荷重を通じて概ね降伏ひずみ以下であった。

3.4.2 荷重-変形関係 試験体の荷重-変形関係を実験と解析で比較した例をFig. 8, Fig. 9に示す。Fig. 8は正弦波( $T=2.0\text{sec}$ ,  $\delta=\pm 40\text{mm}$ ), Fig. 9は地震波(熊本地震応答波 $\times 1.0$ 倍)の例である。各図の上段(a)は架構全体の水平方向荷重-変形関係, 中段(b)はブレーキダンパーの

軸方向荷重-変形関係, 下段(c)はオイルダンパーの軸方向荷重-変形関係を示す。(b)の図には、ブレーキダンパーの軸方向の滑り荷重の計算値(600kN, 青実線)とその $\pm 10\%$ の荷重(赤破線), (c)の図には、オイルダンパーの軸方向の最大減衰力の計算値(青実線)とその $\pm 10\%$ の荷重(赤破線)を併記している。なお、オイルダンパーの軸方向の最大減衰力の計算値 $N_{\text{omax}}$ は、オイルダンパーをMaxwellモデルで表現し、(5), (6)式で算出した。

$$K_{ot} = \frac{1}{1/K_{ob} + 1/K_o} \quad (5)$$

$$N_{omax} = \frac{C_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi C_1}{T \cdot K_{ot}}\right)^2}} \cdot V_{max} \cdot \cos \theta \quad (6)$$

ここで、 $K_{ot}$ ：オイルダンパーとそれに取り付くブレース材を含む全体剛性、 $K_{ob}$ ：ブレース材の軸剛性、 $K_o$ ：オイルダンパーの装置剛性、 $C_1$ ：オイルダンパーの1次減衰係数、 $T$ ：载荷周期(地震波ではTable 1に示す $T=0.64\text{sec}$ を使用)、 $V_{max}$ ：架構全体の水平方向の最大速度(正弦波では载荷振幅 $\delta_{max}$ を用いて $V_{max}=\delta_{max} \cdot 2\pi/T$ で計算、地震波では入力変位 $\delta$ の時刻歴を時間微分して $V_{max}$ を算出)、 $\theta$ ：ブレースの設置角度

実験結果に着目すると、架構全体の水平荷重の最大は最大変形時よりも少し手前のタイミングで生じていることがわかる。また、架構全体の荷重-変形関係は、若干角部が丸みを帯びたバイリニア型に近い形状の履歴ループを描いている。ブレイキダンパーの軸方向荷重-変形関係は、剛塑性型の履歴ループを描いており、滑り荷重は概ね計算値(目標滑り荷重) $\pm 10\%$ の範囲に収まっている。オイルダンパーの軸方向荷重-変形関係は、楕円型の履歴ループを描いており、最大減衰力は概ね計算値 $\pm 10\%$ の範囲に収まっている。

また、実験結果と解析結果を比較すると、いずれの载荷ケースにおいても両者は良い対応を示している。

**3.4.3 各ダンパーの消費エネルギー** 周期 $T=2.0\text{sec}$ の正弦波载荷(実験では、振幅 $\delta_{max}=\pm 3\text{mm} \sim \pm 60\text{mm}$ )に関して、各载荷ケースでのブレイキダンパー、オイルダンパーの消費エネルギーの推移をFig. 10、消費エネルギー比率の推移をFig. 11に示す。検討対象はFig. 5(a)に示した载荷波形のうちの定常部5波分とした。

ここでは、各ダンパーの消費エネルギー比率を(7),(8)式で算出した。

$$\alpha_b = W_b / (W_b + W_o) \quad (7)$$

$$\alpha_o = W_o / (W_b + W_o) \quad (8)$$

ここで、

- $\alpha_b$ ：ブレイキダンパーの消費エネルギー比率
- $\alpha_o$ ：オイルダンパーの消費エネルギー比率
- $W_b$ ：ブレイキダンパーの消費エネルギー
- $W_o$ ：オイルダンパーの消費エネルギー

Fig. 10, Fig. 11における各ダンパーの消費エネルギー $W_b, W_o$ の実験値と解析値は、Fig. 8に示したような各ダンパーの軸方向荷重-変形関係の履歴ループの面積を足し合わせるにより算出した。 $W_b, W_o$ の計算値については、クロスダンパーの力学モデルをFig. 12のように軸方向バネやダッシュポットを用いて単純化し、1サイクル当たりの消費エネルギー $\Delta W_b, \Delta W_o$ をFig. 13に示した履歴ループの面積として(9)~(11)式で求め、これにサイクル数(=5)を乗じるにより算出した。

$$C_{eq} = \frac{C_1}{1 + \left(\frac{2\pi C_1}{T \cdot K_{ot}}\right)^2} \quad (9)$$

$$\Delta W_o = 2(\pi \delta_{max})^2 \cdot \frac{1}{T} \cdot C_{eq} \cdot \cos^2 \theta \quad (10)$$

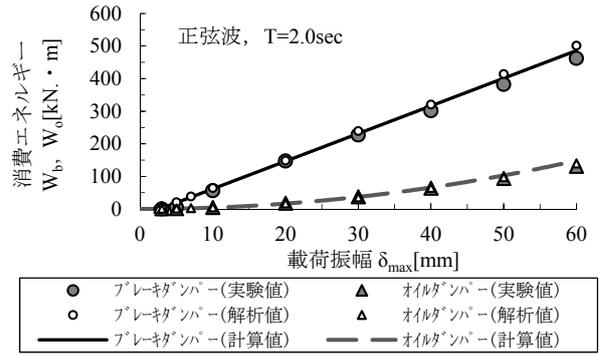


Fig. 10 各ダンパーの消費エネルギーの推移  
Transition of Energy Consumption for Each Damper

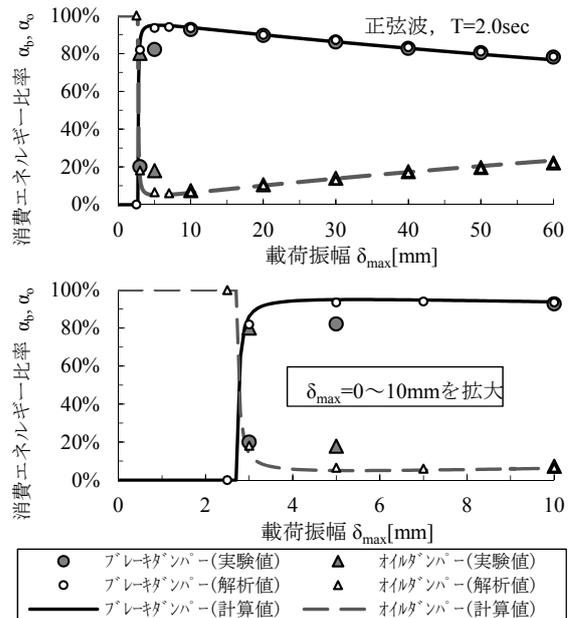


Fig. 11 各ダンパーの消費エネルギー比率の推移  
Transition of Energy Consumption Ratio for Each Damper

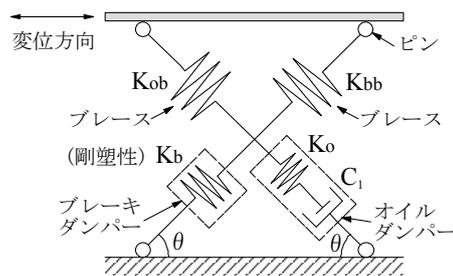


Fig. 12 クロスダンパーの力学モデル  
Mechanical Model of Cross Damper

$$\Delta W_b = 4F_b \cdot (\delta_{max} - \delta_{max1}) \cdot \cos \theta \quad (11)$$

(ただし、 $\delta_{max} \leq \delta_{max1}$ のとき、 $\Delta W_b = 0$ )

ここで、 $C_{eq}$ ：オイルダンパーの等価減衰係数、 $\delta_{max}$ ：架構全体の载荷振幅、 $F_b$ ：ブレイキダンパーの滑り荷重、 $\delta_{max1}$ ：ブレイキダンパー滑り開始時の水平変形(ここでは、解析値を使用)

Fig. 10, Fig. 11によると、振幅5mm以下の領域で若干の差異はあるものの、全般的に計算値は実験値や解析値の

傾向をよく捉えている。計算値によると、振幅のごく小さい範囲ではオイルダンパーのみでエネルギーを消費するが、ブレーキダンパーが滑り始める変形に達するとブレーキダンパーの消費エネルギー比率が増加する。そして、約5mm以上の振幅の载荷では、振幅の増加とともにオイルダンパーの消費エネルギー比率が徐々に増加する。これは、振幅の増加と共に速度も増加するが、ブレーキダンパーの滑り荷重は一定であるのに対し、オイルダンパーの減衰力は速度に比例して増加するためである。

#### 4. 実建物への適用例

クロスダンパーは従来の技術と比較して、非常に省スペースで設置できることから、Fig. 14に示すように、内部に展示施設があり設置スペースに制約のある熊本城天守閣復旧整備事業における耐震改修工事に採用された。2016年の熊本地震で損傷を受けた天守閣の耐震改修工事では、地震時の揺れを効果的に低減することが求められ、限られたスペースで優れた耐震性能と制震効果が得られるクロスダンパーが高く評価された。クロスダンパーの設置イメージ(構造パース)をFig. 15に示す。

#### 5. まとめ

様々な大きさの地震に対応できる省スペース型の耐震・制震工法として、ブレーキダンパーとオイルダンパーを交差して組み合わせた「クロスダンパー®」を新たに開発した。

実大サイズの試験体を用いて実際の大地震時の変形を想定した動的载荷実験及び動的FEM解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) クロスダンパーは架構全体として安定した構造性能(荷重-変形関係, エネルギー吸収性能)を発揮すると共に、各々のダンパーは事前に想定した摩擦性能や減衰性能を発揮した。
- 2) 試験体を詳細にモデル化した動的FEM解析により、実験時の荷重-変形関係を概ね再現できた。
- 3) 基本的な入力波形(正弦波)に対するクロスダンパーの消費エネルギーは、簡易な力学モデルに基づく計算式で評価できる。

また、クロスダンパーを熊本城天守閣の耐震改修工事に適用した事例について紹介した。

今後は、耐震要素の設置箇所の制限から耐震補強が進められないような既存建物の耐震改修だけでなく新築建物に対しても、クロスダンパーを積極的に提案する予定である。

#### 参考文献

- 1) 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

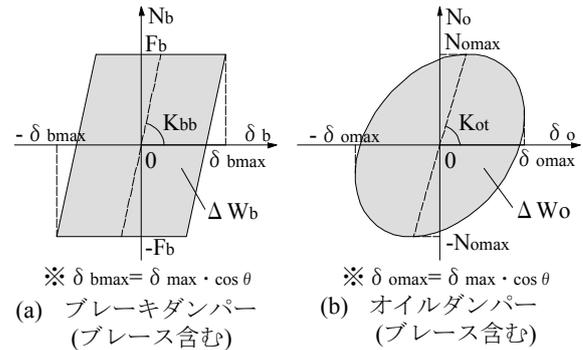


Fig. 13 各ダンパーの履歴モデル  
Hysteretic Model of Each Damper

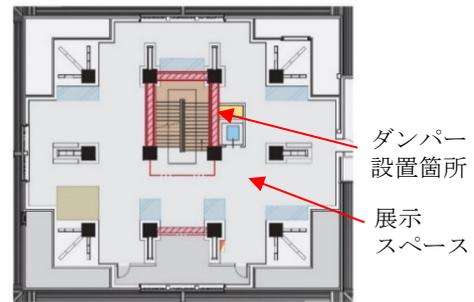


Fig. 14 適用建物の平面図(2階)  
Plan of the Building Installing Cross Damper  
(2<sup>nd</sup> Floor)

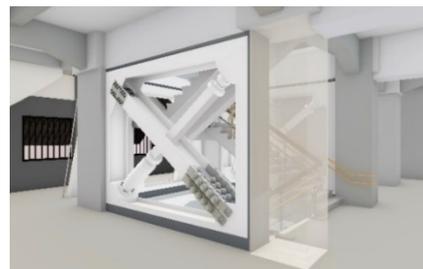


Fig. 15 クロスダンパーの設置イメージ  
(構造パース)  
Image of Installation of Cross Damper  
(Structural Perspective)

- 2) 例えば, 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) 堂地利弘, 他: 高力ボルト摩擦接合滑りダンパーとオイルダンパーを交差させたブレース型ダンパーの構造性能 その1~その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造II, pp.255-258, 2018.9
- 4) 例えば, ばね技術研究会: 第3版 ばね, 丸善株式会社, pp.283-292, 1982
- 5) 例えば, 小川薫, 他: 履歴減衰型と粘性減衰型制振部材を併用する制振構造に関する研究 一位相差に着目した制振効果の検証一, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2, pp.491-492, 2009.8
- 6) 日本建築防災協会: 2001年改定版 既存鉄筋コンクリート建築物の耐震診断基準・同解説, pp.120-121, 2001
- 7) Abaqus/Standard User's Manual Version 6.12, 2012