

特集 「自然災害にそなえる」

ブレーキダンパー[®]を用いた鉄筋コンクリート建物の耐震補強工法の開発

佐野 剛志 勝俣 英雄
野村 潤
(本社建築本部)

Development of Seismic Retrofitting Method with Brake Damper for RC Building

Takeshi Sano Hideo Katsumata
Jun Nomura

Abstract

Seismic retrofit is necessary for buildings that don't provide the seismic performance required by the Building Standards Law. Various technologies have been proposed to improve the seismic performance of such buildings. For example, building strength has been improved by adding braces and walls, building deformation performance has been improved by wrapping carbon fiber around columns, and seismic forces have been reduced by installing new base-isolation systems. However, progress in seismic retrofit has been hampered by problems of loss of building amenity, high cost, and construction difficulty. To solve these problems, a method has been developed of installing stud-type brake dampers outside an existing building. This paper describes a dynamic loading experiment result on an RC frame building equipped with these dampers.

概要

現在の建築基準法で定められた耐震性能を満足しない既存不適格建物に対する耐震改修の必要性が指摘されている。既存不適格建物の耐震改修技術として、ブレースや壁など耐震部材の増設による強度補強、繊維や鉄板などを柱や梁に巻き付ける靱性補強、免震化による地震力低減など様々な工法が開発されている。しかし増設部材による建物使用性の低下や、建物を使用しながら耐震改修することが困難であること、高コストであることなどの理由で改修が捗っていない。このような課題を解決する一つの方法として、当社が開発した間柱型ブレーキダンパーを建物の外部側面で一体化する耐震補強工法が考えられる。本論文では、同工法により補強した鉄筋コンクリートフレームの動的載荷実験の概要と、補強ディテールの違いによるダンパーのエネルギー吸収効果や被補強鉄筋コンクリートフレームの破壊性状などを検証したので結果について報告する。

1. はじめに

現在の建築基準法で定められた耐震性能を満足しないいわゆる既存不適格建物に対する耐震改修の必要性が指摘されている。既存不適格建物の耐震改修技術として、ブレースや壁など耐震強度を高める部材の増設による強度補強、繊維や鉄板などを柱や梁に巻き付け建物の変形性能を高める靱性補強、基礎下や中間階に免震層を新たに設け地震力を低減する工法などが開発されている。しかし増設部材による建物使用性の低下や、建物を使用しながら耐震改修することが困難であること、高コストであることなどの理由で特に鉄筋コンクリート（以下RCと略す）造集合住宅の耐震改修が捗っていない。

このような課題を解決する一つの方法として当社が開発した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¹⁾ ²⁾と略す）を間柱型で組み込んだ鉄骨梁をRC建物の外部側面に増設して一体化する耐震補強工法が考えられる。

本論文では、同工法の実用化に資する技術資料の整備を

目的とし、同工法で補強したRCフレームの動的載荷実験の概要ならびに増設鉄骨梁長さや増設鉄骨梁とRCフレームを間接接合法で一体化する部分のスタッドやあと施工アンカーの密度などがRCフレームの破壊性状や補強後の耐震性能に及ぼす影響について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の形状・寸法をFig. 1に示す。試験体はRCフレーム、間柱型ブレーキダンパーを組み込んだ鉄骨梁で構成されている。

RCフレームの断面寸法と配筋をFig. 2に示す。RCフレームは、実在する数棟の既存のRC造集合住宅の寸法・配筋を原型とし、約1/3に縮小したもので、梁の曲げ降伏先行型として設計した。Table 1に鉄筋、コンクリート、グラウトの材料特性を示す。

間柱型ブレーキダンパーは、安定した摩擦係数を有するブレーキ材とステンレス板を中板とスプライスプレート

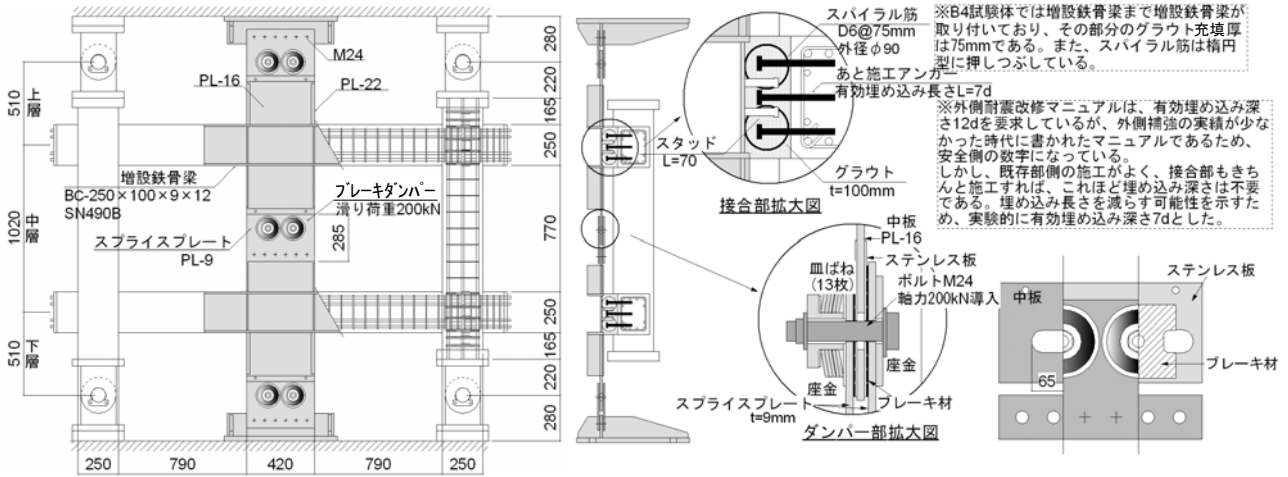


Fig. 1 試験体の概要
Outline of Specimen

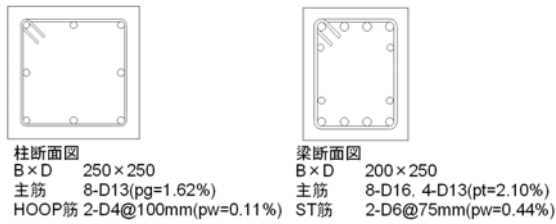


Fig. 2 柱・梁の形状と配筋
Dimensions and Bar Arrangement of Column and Girder

Table 1 材料特性
Material Characteristic

種別	鉄筋		コンクリート 圧縮強度	グラウト 圧縮強度
	使用部位	降伏強度		
D4(SD295A)	柱帯筋	353	520	19.2
D6(SD345)	梁あばら筋	379	530	
D13(SD345)	柱・梁主筋	367	544	
D16(SD345)	梁主筋	378	556	

単位: N/mm²

Table 2 補強諸元一覧
Retrofitting Parameter

	増設鉄骨梁 長さ mm	あと施工アンカー	増設鉄骨梁スタッド
試験体N		なし	
試験体B1	260 (0.33)	D13(L=70mm) 3段@75mm 有効埋込み深さ7d(91mm)	φ16mm(L=70mm) 2段@75mm
試験体B2	520 (0.66)		
試験体B3	780 (0.99)		
試験体B4 (鉄骨梁を柱 梁接合部手 で延長)	1,040 (1.32)	D13(L=70mm) 3段@150mm 有効埋込み深さ7d(91mm) 柱梁接合部は5本	梁部: φ16mm(L=70mm) 2段@150mm 柱梁接合部: φ13mm(L=70mm)5本

→ ()内の数字: 増設鉄骨梁長さ / (RC梁内長さ+増設鉄骨間柱幅)

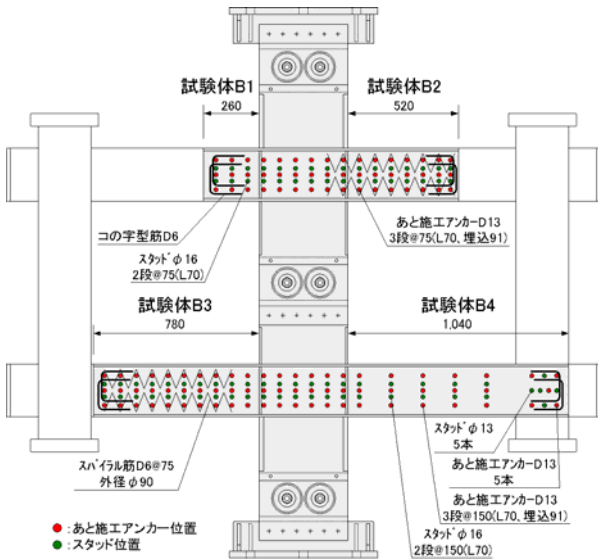


Fig. 3 間接接合部の詳細
Details of in Indirect Connection Part

の間に挟み込み、皿ばねを介した高力ボルトで締め付け軸力を一定に保つことで安定した滑り荷重を発生する。プレーキダンパー 1 基の滑り荷重は200kNとした。

間柱型プレーキダンパーを組み込んだ鉄骨梁と RC フレームはFig. 1に示すように鉄骨梁側面スタッドと RC フレームに打設したあと施工アンカーの間にプレミックスタイルのグラウトを充填する間接接合法で一体化した。

スタッドおよびあと施工アンカーの量は既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル³⁾を参考に

決定した。

実験には、無補強試験体 1 体 (試験体N) および補強試験体 4 体 (試験体B1~B4) の計 5 体を用いた。

Fig. 3は補強試験体の増設鉄骨梁の長さ、スタッド、あと施工アンカーの位置を纏めて示したものである。Table 2に補強部分の諸元一覧を示す。

増設鉄骨梁の長さは試験体B1が最も短く、試験体B3は梁全長、試験体B4で梁全長+柱梁接合部とした。

あと施工アンカーはD13とし、試験体B1~B3は3段@75mm、試験体B4は梁部で3段@150mm、柱梁接合部は5本とした。外側耐震改修マニュアルではあと施工アンカーの有効埋込み長さは12dとしているが、本試験では埋込み長さ低減の可能性を確認するため有効埋込み長さを7dとした。

スタッドは試験体B1~B3がφ16mm (L=70mm) 2段@75mm、試験体B4は梁部をφ16mm (L=70mm) 2段@150mm、柱梁接合部をφ13mm (L=70mm) 5本とした。

また、グラウト充填位置に面する RC フレーム側面は面

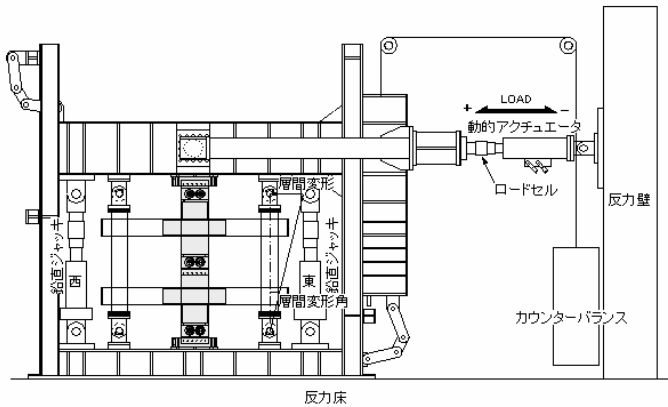


Fig. 4 載荷装置

Outline of Dynamic Loading System

積比で20%程度目粗しを施すとともに、グラウトの脱落を防止するためグラウト充填部全長にスパイラル筋を、グラウト充填部両端部にコの字型筋を施した。

2.2 載荷方法

載荷装置の概略図をFig. 4に示す。

載荷は鉛直マニュアルジャッキ2台により0.2bDFcに相当する軸力を両側の柱にそれぞれ負荷した後、動的アクチュエータを用いて水平変位制御により同一振幅で5サイクルの正弦波を入力した。その際に用いた振幅は、Fig. 4に示す層間変形角（以下Rfと略記）1/2040, 1/680, 1/340, 1/204, 1/170, 1/136, 1/102, 1/82, 1/68, 1/58, 1/51, 1/41rad. を目標として入力した。ただし、振幅をアクチュエータの内蔵変位計により制御しているため、載荷フレーム自体の変形の影響等により試験体の層間変形角は目標値よりも若干小さな値となった。載荷振動数は1Hzとしたが、Rf=0.012rad. 以上ではアクチュエータの性能限界により0.5Hzに低減した。

3. 実験結果

3.1 破壊経過

Fig. 5に各試験体の最終破壊性状を示す。

試験体Nでは、Rf=1/204rad. までの載荷において梁に曲げひび割れが生じたが、柱および梁柱接合部は無損傷であった。続いて、Rf=1/170rad. において梁および梁柱接合部に初期せん断ひび割れが生じた。その後、Rf=1/102rad. において梁主筋が降伏に至り、Rf=1/41rad. の1サイクル目に梁のせん断補強筋の一部が降伏した。2サイクル目以降の耐力低下が著しく、1サイクル目の荷重を最大耐力と判断した。なお、柱は最終サイクル（Rf=1/41rad.）までほぼ無損傷であった。本試験体は梁端部が曲げ降伏した後、降伏域が柱梁接合部に広がり最終的に接合部破壊に至った。このため全試験体の中で柱梁接合部が最も大きく損傷した。

試験体B1では、載荷初期から増設鉄骨梁が取り付けられていない範囲においてせん断ひび割れが多数生じた。

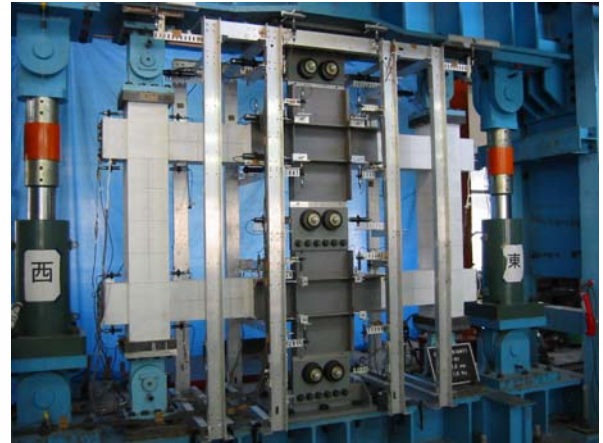


Photo 1 試験体設置状況
Installation of Specimen

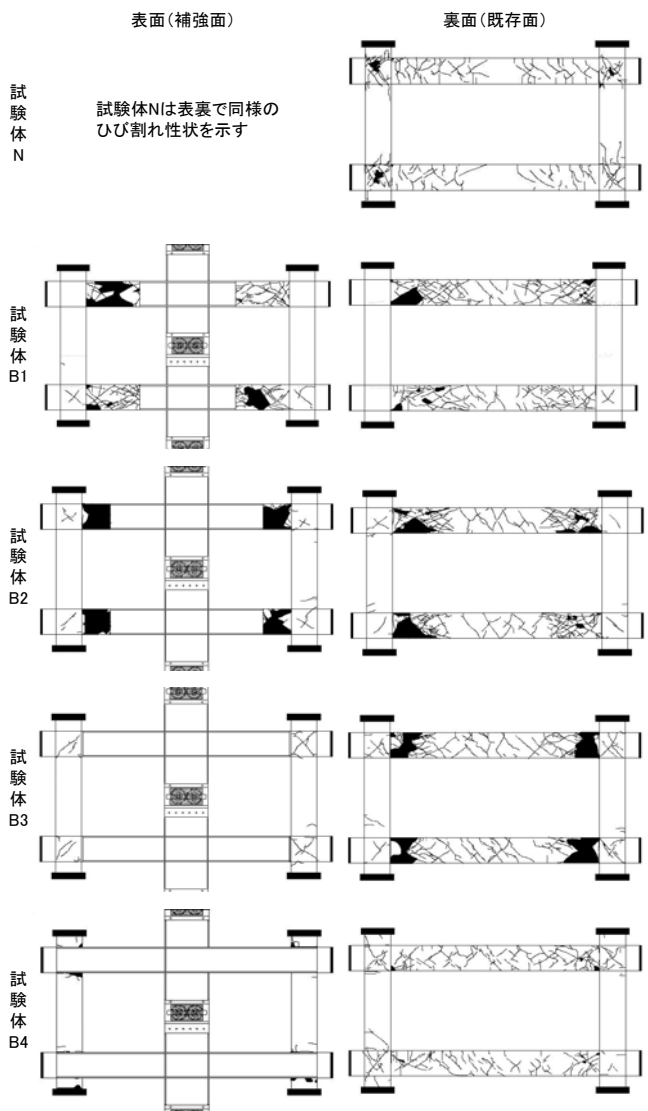


Fig. 5 最終破壊状況
Failure Pattern

Rf=1/136rad. において梁のせん断補強筋が降伏に至り、Rf=1/82rad. で梁主筋が降伏し、最大耐力に達した。また、同変形角で梁端部の損傷が顕著となり、かぶりコンクリー

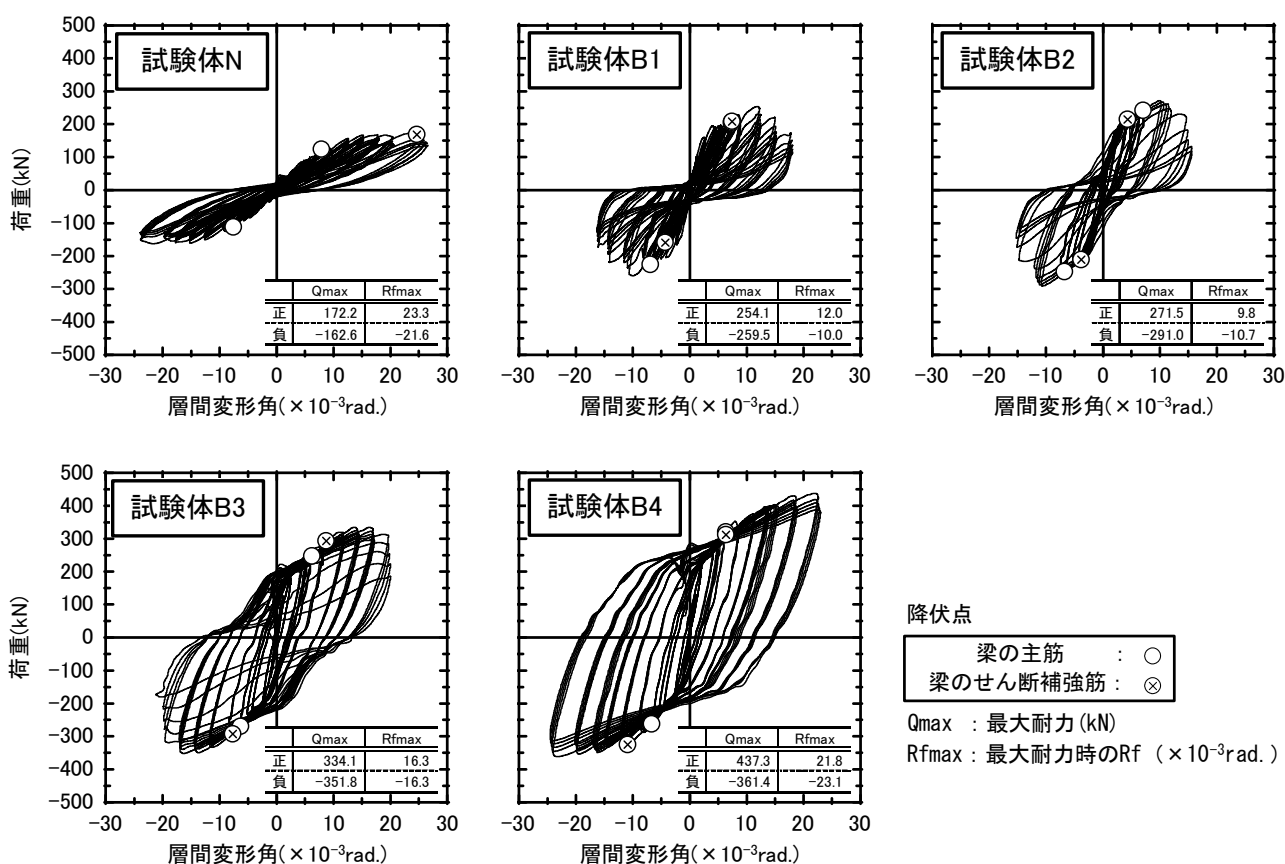


Fig. 6 荷重－層間変形角関係
Relation between Loading Force and Story Deformation Angle

トの剥落が生じた。最終的には $R_f=1/58$ rad. でかぶりコンクリートの剥離と耐力低下が顕著となったため載荷を終了した。

試験体B2は、試験体B1と類似した破壊経過を示し、 $R_f=1/170$ rad. で梁のせん断補強筋が、また $R_f=1/102$ rad. で梁主筋がそれぞれ降伏した後、 $R_f=1/82$ rad. で最大耐力に達した。 $R_f=1/68$ rad. で耐力低下が顕著となったため載荷を終了した。

試験体B3は、 $R_f=1/340$ rad. で梁の柱側端部に曲げひび割れが生じ、RC梁中央部にアンカー筋に沿うひび割れが生じた。その後、梁全域にひび割れが伸展し、梁端部のコンクリートが剥離して載荷を終了した。また、柱に曲げひび割れが生じた。さらに、試験体B1および試験体B2とは異なり、 $R_f=1/136$ rad. のサイクルで梁主筋が降伏に至った後、せん断補強筋が $R_f=1/82$ rad. のサイクルで降伏した。 $R_f=1/58$ rad. で最大耐力に達し、 $R_f=1/51$ rad. で梁端のかぶりコンクリートが剥離し、耐力低下を生じた。

試験体B4は、試験体B3と類似した破壊経過を示したが、コンクリートの剥落は生じなかった。また、最後まで耐力低下は見られず、アクチュエータの性能限界により載荷を $1/41$ rad. で終了した。

以上のように、既存RCフレームの梁に短い増設鉄骨梁を取り付けると、鉄骨梁が取り付けしていない部分に、損傷

が集中しやすくなることを確認した。

3.2 荷重－層間変形角関係

Fig. 6に各試験体の荷重－層間変形角関係を示す。

補強した試験体は、無補強の試験体Nに比べて最大耐力および剛性は大きく、補強効果が発揮されたといえる。また、増設鉄骨梁の長さの違いにより履歴性状に顕著な差異が認められた。

試験体B1およびB2は、試験体B3およびB4に比べて履歴の膨らみが小さい。これは前節で述べたように、載荷初期段階から増設鉄骨梁の取り付けられていない梁端部の損傷の進行が著しく、それに伴い梁中央部の回転によるダンパー部の相対水平変形が小さくなり、結果としてダンパーの摩擦抵抗能力が低下したためと考えられる。

一方、試験体B3は試験体B1およびB2に比べて良好な履歴性状を呈しており、ダンパーの摩擦抵抗能力が十分に発揮されているといえる。しかし、梁主筋が曲げ降伏した直後から若干であるが履歴にスリップ性状が認められた。

試験体B4は、全試験体の中で最も良好な補強効果が発揮された。載荷終了まで耐力低下は認められず、履歴面積も大きく、かつ、履歴性状にスリップ性状はまったく認められない。RCフレームの復元力が最も小さくなる層間変形角ゼロ付近でせん断力は200kNを上回っておりダンパーが

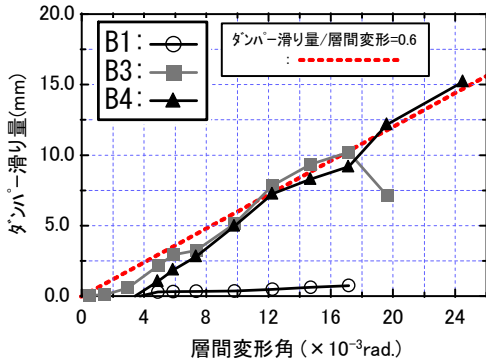


Fig. 7 ダンパー滑り量と層間変形角の関係
Relation between Slipping Displacement of Damper and Story Deformation Angle

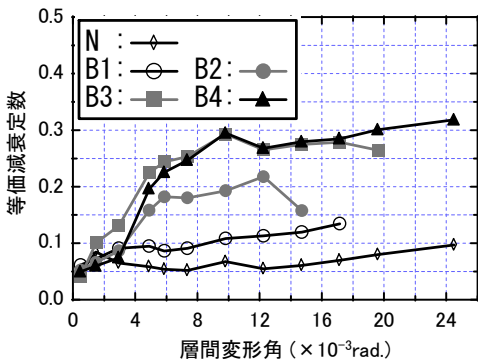


Fig. 8 等価減衰定数
Equivalent Damping Factor

概ね設計滑り荷重で作動していると推測できる。

最大耐力を比較すると、試験体B1, B2は増設鉄骨梁が付いていないRC梁部分のせん断破壊の進行により、この部位に大きな変形が生じたことで間柱型ブレーキダンパーが効果的に水平抵抗要素として働かず、耐力上昇が小幅に止まったと考えられる。一方、試験体B3, B4は増設鉄骨梁の補強効果により梁部分の損傷が比較的小さく、梁の損傷に伴う変形も比較的小さかったため間柱型ブレーキダンパーが水平抵抗要素として効果的に働き架構全体の上昇に寄与したと考えられる。

3.3 ダンパーの滑り量

Fig. 7に正方向載荷時における間柱型ブレーキダンパーの水平方向滑り量と層間変形角の関係を示す。図中に併記した赤い点線は、層間変形に対してダンパー滑り量の割合が60%となるラインを示したものである。このラインと比較することで層間変形に対するダンパーの変形割合を概ね確認することができる。なお試験体B2は、 $R_f=1/204rad$ でダンパーが滑り始めたことを目視確認したが、RC梁端部の著しい破壊が原因で良好な計測データが得られなかったため同図から除外した。

試験体B1のダンパーは試験体崩壊時まで滑りがほとんど生じなかった。これは前節で述べたように増設鉄骨梁が取り付けしていないRC梁部分のせん断破壊の進行が著し

く、梁中央部における間柱の曲げ戻し力よりもダンパーの摩擦力が上回ったためと考えられる。試験体B1の補強効果は増設鉄骨梁と弾性鉄骨間柱によるものと考えられる。

試験体B3およびB4は、 $R_f=1/204rad$ の載荷サイクル時から滑り出し、試験体が崩壊に至る直前まではほぼ同様な挙動を示し、層間変形に対するブレーキダンパーの変形割合は概ね60%であった。増設鉄骨梁の長さの違いにより、試験体B3は $R_f=1/51rad$ で梁端部に損傷が集中し、以降ダンパー滑り量が減少したが、試験体B4は梁全体に損傷が分散したことで最後までダンパーが水平変形し良好な補強効果が得られたと考えられる。

3.4 減衰特性

Fig. 8に全試験体の各層間変形角毎の等価減衰定数の推移状況を比較したものを示す。同一層間変形角時の1サイクル目から5サイクル目までの荷重-層間変形角形状は、若干荷重低下はあるが概ね同じ形状で、2サイクル目の等価減衰定数と3サイクル目以降の等価減衰定数に大差がないと考え、層間変形角の増加に伴う荷重更新の影響を受けない2サイクル目の試験で得られた履歴曲線より等価減衰定数を算定した。

無補強の試験体Nは、等価減衰定数が6%前後で、鉄筋降伏後に若干等価減衰定数が小さくなる傾向が見られた。

試験体B1は、摩擦材の滑りがほとんど生じなかったものの、増設鉄骨梁等の効果により試験体Nに比べて若干であるが大きな減衰を生じている。

試験体B2およびB3, B4は、摩擦材の滑りが確認された $R_f=1/204rad$ の載荷サイクル以降で等価減衰定数が急激に増加している。しかし、梁端部の損傷が初期から大きかった試験体B2は、他の2試験体に比べて等価減衰定数の増加度合い小さく、最大で20%程度となっている。また、摩擦材の滑り量の推移状況がほぼ同じであった試験体B3およびB4は、同様な等価減衰定数の推移状況を示し、 $R_f=1/136rad$ の載荷サイクル以降では30%弱の等価減衰定数となった。

3.5 梁主筋の応力分布

Fig. 9に $R_f=1/204$ および $1/102rad$ における上梁の上端主筋の応力分布を示す。図中の太い縦破線は増設鉄骨梁の取り付け範囲を示す。

試験体Nの応力分布はほぼ直線的であり、梁全体に一樣なせん断力が作用していたものと推測できる。

一方、試験体B2, B3およびB4では梁端部の応力分布の勾配が大きく、既存RC梁に大きなせん断力が作用していたものと考えられる。また、梁中央付近では応力がほとんど生じておらず、増設鉄骨梁が概ね有効に作用していたものと判断できる。ただし、既存RC梁に生じたひび割れが増設鉄骨梁を接合しているグラウトに伸展したため既存RC梁と増設鉄骨梁の一体性が低下し増設鉄骨梁の端部付近では大きな応力が生じている。

また、試験体B1は増設鉄骨梁の取り付けしている範囲の応力分布の勾配が試験体Nとは逆となっている。これは既存

R C梁部分のせん断破壊の進行により梁の剛性が低下し、間柱による梁の曲げ戻しの効果が顕著となったためと考えられる。

4. まとめ

間柱型プレーキダンパーを組み込んだ外付け増設鉄骨梁で補強したR Cフレームの動的載荷実験を行い、補強R Cフレームの破壊性状と耐震性能およびダンパーによる補強効果に及ぼす増設鉄骨梁長さの影響を検討した。

本研究で得られた知見は以下のように要約できる。

- (1) 増設鉄骨梁を既存R C梁に取り付けた場合、増設鉄骨梁が取り付けしていない既存R C梁部分に過大なせん断力が作用する。
- (2) 増設鉄骨梁を長くすることで、既存R C梁の損傷が分散・軽減する傾向がある。
- (3) 間柱に取り付けたプレーキダンパーを効果的に作用させるためには、既存R C梁の損傷を抑制するような取り付け詳細にすることが肝要である。特に、増設鉄骨梁を既存R C梁の全長に配することは効果的である。
- (4) 既存R C梁の状態が良く、接合部の施工を適切に行なえば、あと施工アンカーの有効埋込み長さを7d程度とすることが可能であることを示した。

謝辞

本実験は、国立大学法人豊橋技術科学大学と株式会社大林組が共同で交付を受けた国土交通省平成18年度住宅・建築関連先端技術開発助成金事業費補助金を活用して実施したものです。国立大学法人豊橋技術科学大学工学部建設工学系の倉本洋助教授に多大なご指導を賜りました。また倉本研究室の皆様には実験の計画・実施・結果の取り纏めに多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐野,他：高力ボルト摩擦接合滑りダンパー（プレーキダンパー）の開発ープレーキダンパーの性能確認実験と実建物への適用ー,大林組技術研究所報, pp.13～20, No.62, (2001)
- 2) 佐野,他：高力ボルト摩擦接合滑りダンパー（プレーキダンパー）の開発（その2）ー実物大ブレース型・間柱型プレーキダンパーの性能確認試験ー,大林組技術研究所報, No.70, (2006)
- 3) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル, (2002.7)
- 4) 佐野：高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発その8, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.639～640, (2001.9)
- 5) 佐野：高力ボルト摩擦接合滑りダンパーの開発その9, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2, pp.981～982, (2005.9)
- 6) 田中久一郎：摩擦のおはなし, 日本規格協会, pp.83～94. (1985.3)

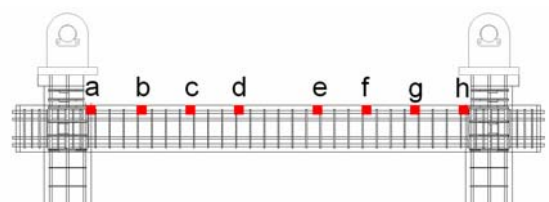
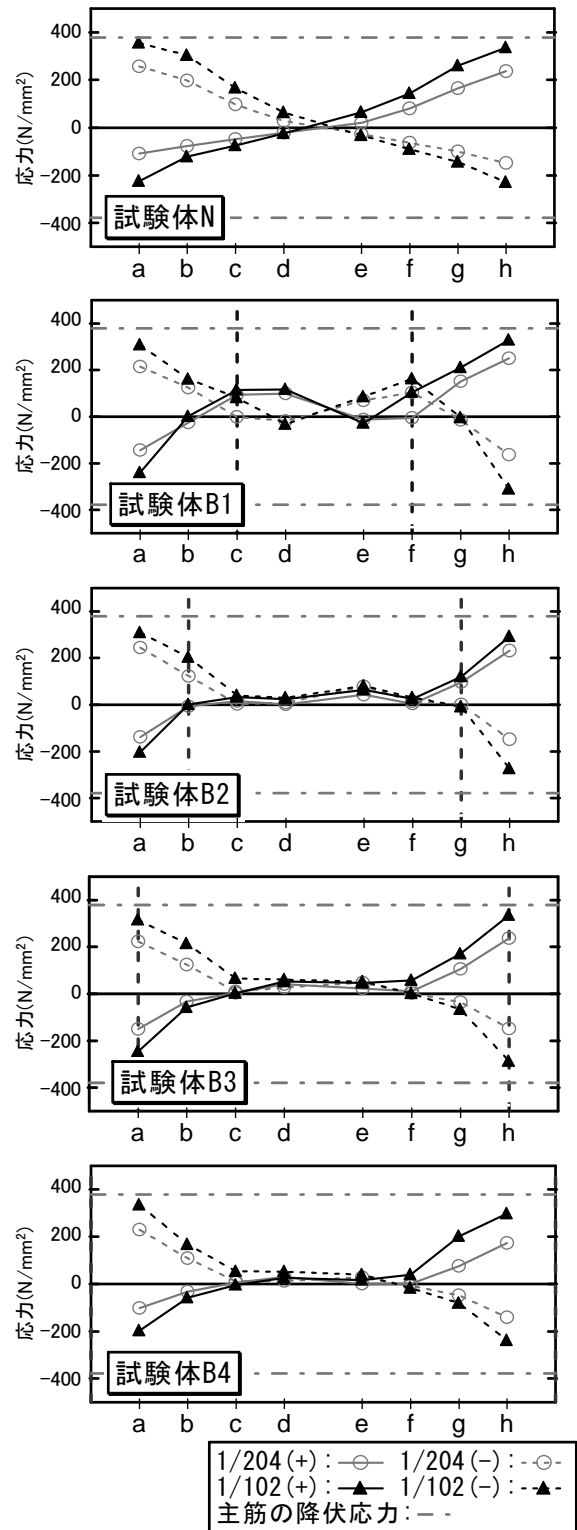


Fig. 9 梁主筋の応力状態
Longitudinal Reinforcement Stress in Girder