

論文 ダンパー補強された鉄筋コンクリート造骨組の仮動的実験

北嶋圭二*¹・上田英明*²・中西三和*³・安達洋*⁴

要旨：本研究は、新しい耐震補強法の一つであるダンパー補強法の有効性について、実験的に明らかにすることを目的としたものである。柱のせん断強度が不足する2層2スパンの鉄筋コンクリート造骨組を、摩擦ダンパーと鋼製ブレースが一体となった部材(ダンパーブレース)を取付けることで補強し、その補強効果を仮動的実験によって確認した。また、主体構造とダンパーブレースをモデル化した1質点並列系の弾塑性応答解析により実験結果が再現できることを示した。

キーワード：耐震補強、応答制御、摩擦ダンパー、エネルギー応答、仮動的実験

1. はじめに

近年、既存建物の耐震補強法の一つとして、付加的なエネルギー吸収装置(以下、ダンパー)を建物に組み込むことにより耐震性能の改善を図る補強法が提案されている[1]。この制震技術を応用した補強法(以下、ダンパー補強法)は、建物を継続使用しながら補強工事が行えるなどのメリットがあり、その実用化が望まれるところである。しかし、補強の必要性が高いと考えられる鉄筋コンクリート造(以下、RC造)建物を対象としたダンパー補強法に関する研究は少なく、また、そのほとんどが解析的に検討しているのが現状で、実験的にその補強効果を確認したケースはほとんど見られない。

筆者らは、これまでRC造建物にエネルギー吸収性能が明確なダンパーを組み込むことにより耐震性能が向上することを地震応答解析手法を用いて検討し、その有効性を解析的に明らかにしてきた[2][3]。本論文は、ダンパー補強法の有効性を実験的に明らかにすることを目的としたものである。柱せん断破壊型の2層2スパンのRC造骨組に摩擦ダンパーと鋼製ブレースが一体となった部材(以下、ダンパーブレース)を取付けることで補強し、レベル2相当の入力地震波に対する補強効果を仮動的実験により確認した。また、実験で得られた層せん断力を、柱せん断破壊型の主体構造とダンパーブレースの負担せん断力に分離し、補強効果を詳細に検討するとともに各々の抵抗機構をモデル化した1質点並列系の弾塑性応答解析により実験結果が再現できることを示した。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体は新耐震設計法以前の旧基準で設計された4階建て程度の低層RC造建物を想定し、柱および柱・梁接合部のせん断強度が不足する縮尺1/3の2層2スパンRC造骨組を製作した。同形状同配筋の試験体2体のうち、1体を無補強試験体、もう1体をダンパー補強試験体として使

* 1 (株)青木建設	研究所建築研究室、	工博(正会員)
* 2 (株)青木建設	研究所建築研究室、	工修(正会員)
* 3 日本大学専任講師	理工学部海洋建築工学科、	工博(正会員)
* 4 日本大学教授	理工学部海洋建築工学科、	工博(正会員)

用した。試験体形状を図-1に、部材断面リストおよび材料特性を表-1、2にそれぞれ示す。

ダンパー補強試験体は、完全剛塑性形の履歴形状を示す摩擦ダンパーと鋼製ブレースが一体となったダンパーブレースをV字形に取付けることで補強した。使用した摩擦ダンパーの構造を図-2に、単体性能試験結果を図-3に、ダンパーブレース取付部の詳細を図-4に示す。ダンパーブレースの設計（ダンパーの摩擦荷重（ダンパー強度）および鋼製ブレース断面）は、ダンパー強度とブレース軸剛性をパラメータとした試験体の予備応答解析を行い、柱がせん断破壊しない変位レベルに応答変位が低減されるようにそれぞれ設定した。取付方法は、試験体の梁端部と梁中央部にP C鋼棒を通すための貫通孔を横断方向に設け、ダンパーブレース両端の定着プレートと梁との間にグラウトを注入し、グラウト強度発現後にP C鋼棒で締付ける方式で行った。締付力および定着プレートの大きさは取付部の実験結果[4]より、グラウトと梁との摩擦係数が1.0、グラウトに働く支圧応力度が2.0MPaとなるように定めた。

表-1 部材断面リスト

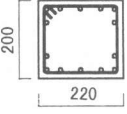
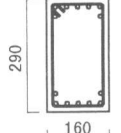
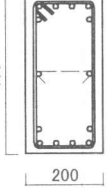
柱	2階梁	1階梁、3階梁
		
$B \times D = 200 \times 220\text{mm}$ 14-D10 $P_g = 2.27\%$ $\phi 4 - @150$ $P_w = 0.08\%$	$B \times D = 160 \times 290\text{mm}$ 7-D10 $P_t = 1.20\%$ $\phi 4 - @80$ $P_w = 0.20\%$	$B \times D = 200 \times 400\text{mm}$ 6-D13 $P_t = 1.05\%$ D6-@100 $P_w = 0.32\%$

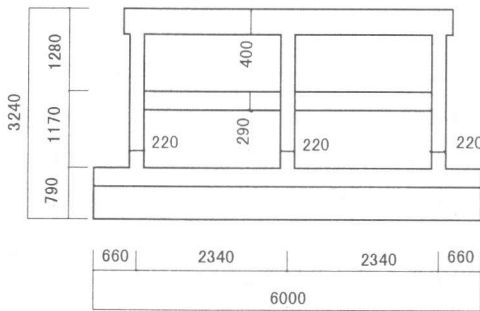
表-2 材料特性

(a) コンクリート

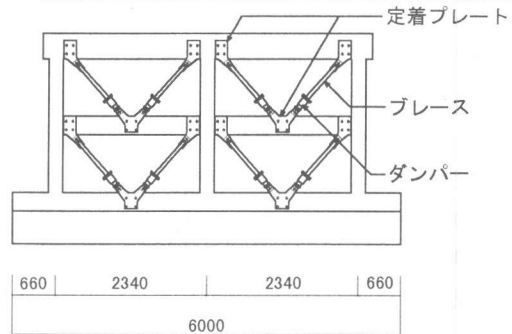
部位	材令 [日]	圧縮強度 [MPa]	割裂強度 [MPa]
3階梁	59	23.9	2.6
2階梁、柱	69	18.2	1.8
1階梁	87	26.7	2.5

(b) 鉄筋

部位	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]
1・3階梁主筋(D13)	316	461	187
1・3階梁筋筋(D6)	394	603	224
2階梁・柱主筋(D10)	342	503	184
2階梁筋筋、柱帯筋($\phi 4$)	557	617	213



(a) 無補強試験体



(b) ダンパー補強試験体

図-1 試験体形状

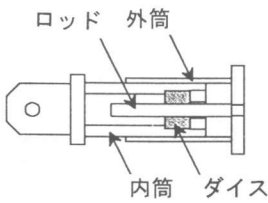


図-2 ダンパーの構造

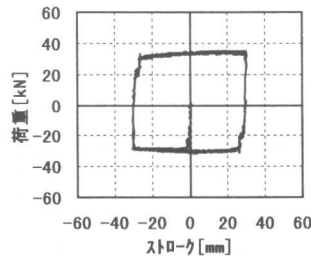


図-3 ダンパー単体試験結果

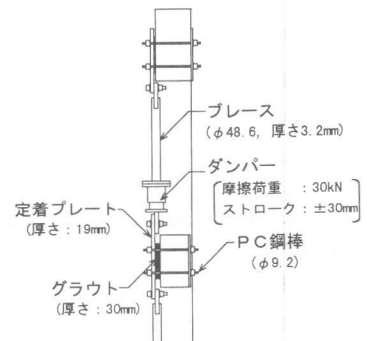


図-4 ダンパー取付部の詳細

2. 2 実験方法

(1) 仮動的実験手法

ダンパー補強効果を実験的に確認するためには、強度と変形性能を評価する正負交番載荷実験より、地震時の応答値が直接得られる仮動的実験の方が直接的であり、その評価も明確である。ここでは、試験体を1質点系に置き換え、陽な Newmark- β 法により振動方程式を解きながら試験体に応答変位を与えていく仮動的実験を実施した。仮動的実験手法には、実験システムに含まれる様々な要因によって発生する誤差の補正法を組込んだ手法[5]を採用し、鉄骨造の模擬試験体に対する弾性応答実験により実験システムの妥当性を確認した後、本実験を行った。入力地震波はEl Centro<NS>波形の最大加速度をレベル2相当の 5.11m/sec^2 に基準化して用いた。なお、時間軸は相似則に従って縮小し、主要地震動の継続時間を4.0秒、時間刻みを0.012sec秒とした。減衰は3%の粘性減衰定数を与え、建物重量は441kNとした。

(2) 加力方法

試験体への加力は図-5に示す加力装置を使用し、鉛直加力用と水平加力用のアクチュエータをそれぞれ1台ずつ用いて行った。軸力は試験体上部の軸力載荷用ビームを介して各柱の軸力(147kN)が等しくなるように載荷した。試験体の面外変形は軸力載荷用ビームにパンタグラフを取付けて拘束した。なお、鉛直加力用アクチュエータ上部はローラー支持とし、試験体の水平変形に追従できるようにした。

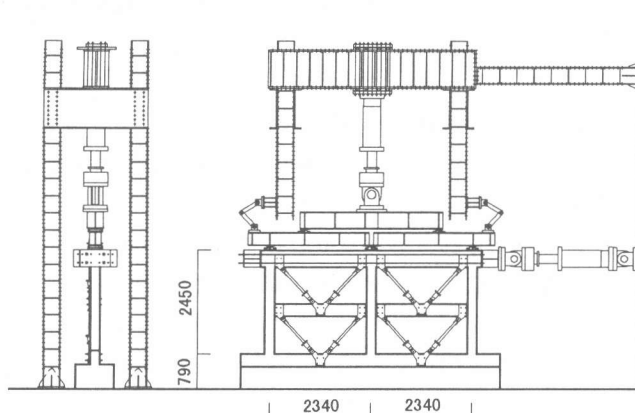


図-5 加力装置

(3) 計測方法

応答計算に取り込まれる試験体復元力と、応答変位として制御される試験体水平変位は、アクチュエータ先端のロードセルと、試験体中央柱頂部に取付けたデジタル型変位計によりそれぞれ計測した。その他の測定項目は、各節点の水平・鉛直変位、試験体の面外変形と、柱・梁の各材端の主筋、定着プレートの取付く梁の中央部の主筋、柱および柱・梁接合部内の帯筋のひずみである。また、鋼製ブレースにもひずみゲージを貼付し、あらかじめ検定しておいた校正係数を用いてダンパーブレースの作用軸力を測定した。定着プレートのずれおよび浮き上がりは2軸型亀裂変位計により測定した。

3. 実験結果

3. 1 無補強試験体の正負交番載荷実験

ダンパー補強試験体の仮動的実験に先駆け、無補強試験体の正負交番載荷実験を行い、無補強試験体の基本性能を調べた。試験体は、全体変形角 $R=\pm 0.25\%$ 、 $\pm 0.33\%$ を各1サイクル、 $\pm 0.50\%$ 、 $\pm 0.67\%$ 、 $\pm 1.00\%$ を各2サイクルず

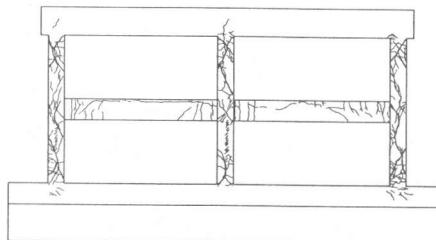


図-6 無補強試験体の最終破壊状況

つ経験した後、 $R=1.14\%$ で2階柱頭がせん断破壊し耐力低下を示した。最大耐力は179kNで $R=1.00\%$ で記録した。無補強試験体の最終破壊状況と水平荷重-水平変位関係を図-6、7にそれぞれ示す。

3.2 ダンパー補強試験体の仮動的実験

ダンパー補強試験体の仮動的実験で得られた応答変形角の時刻歴を図-8に、応答履歴曲線を図-9に、最終破壊状況を図-10に示す。試験体は、レベル2相当の入力地震動に対し加振後0.84secで最大応答変形角 $R=-0.63\%$ の振幅を記録し、加振後2.0~3.0secの間で0.3~0.4%の変形角を経験した。最大応答値を経験した時点で、柱および柱梁接合部にはせん断ひび割れが発生し、引張側の2階柱頭の主筋も降伏ひずみに達していたが、水平抵抗力および軸力保持能力の低下は見られなかった。図-9の応答履歴曲線からはバイリニア形の膨らみが見られ、ダンパーの履歴特性が試験体の応答履歴に大きく反映されていることがわかる。また、ダンパーブレースの取付部にずれや浮上りの変形は見られず、ダンパー単体の性能が十分に発揮されていたことが推測された。

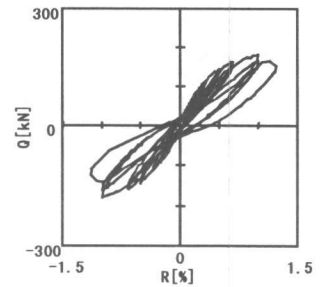


図-7 無補強試験体の水平荷重-水平変形関係

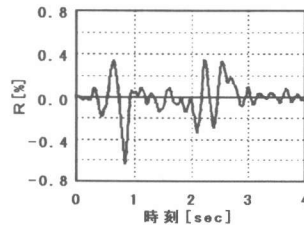


図-8 応答変形角の時刻歴

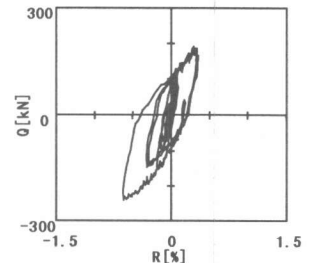


図-9 応答履歴曲線

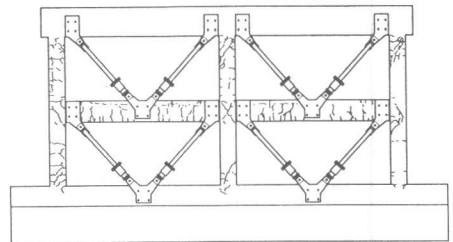


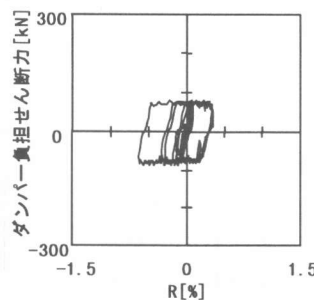
図-10 最終破壊状況

4. 実験結果の検討および考察

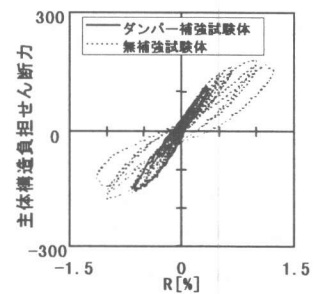
4.1 ダンパー負担せん断力の分離およびエネルギー消費状況

実験で得られたダンパー補強効果をより詳細に検討するため、ダンパー補強試験体の層せん断力をダンパーと主体構造の負担せん断力に分離し、それぞれの履歴曲線および履歴エネルギー消費状況を比較・検討する。なお、ここでいう主体構造とはRC造の柱および梁からなるフレーム部分を指す。図-11に、ダンパーと主体構造負担せん断力の履歴曲線を示す。ダンパー負担せん断力は2層のダンパーブレース軸力の水平成分を総和したものであり、主体構造負担せん断力は層せん断力とダンパー負担せん断力の差を示したものである。

図-11(a)のダンパー負担せん断力の履歴曲線はダンパー単体性能試験結果と同様なバイリニア形の履歴形状を示し、最大値も単体試験結果の水平成分の総和とほ



(a) ダンパーの履歴



(b) 主体構造の履歴

図-11 ダンパーおよび主体構造の履歴曲線

ば一致していることから、ダンパー単体性能が補強システム全体として十分に機能していたことが確認された。また、主体構造負担せん断力の履歴曲線は無補強試験体の履歴曲線(図-11(b)破線)とよい対応を示しており、ダンパー補強試験体の履歴曲線が主体構造とダンパーの履歴曲線の和で表現できることを示唆している。

ダンパーおよび主体構造の履歴消費エネルギーを各々の履歴曲線を積分して求め、時刻歴として示したのが図-12である。全履歴消費エネルギーに占めるダンパー消費エネルギーの割合は大きく、エネルギー吸収効率が低い主体構造をダンパーが補っていることがわかる。実験終了時の全履歴消費エネルギー(8.37kN・mm)に対するダンパーの消費エネルギー(7.31kN・mm)の割合は約87%であった。

4.2 実験結果と解析結果の比較

ダンパー補強試験体の実験結果と解析結果を比較・検討し、実験結果が解析により再現可能であることを示す。ここでは、補強試験体の抵抗機構が、ダンパーと主体構造の各々の抵抗機構をモデル化したせん断バネを並列結合することで表せるものと仮定する。主体構造のせん断バネは、無補強試験体の実験で得られたスケルトンカーブをトリリニアにモデル化し、武田モデル(除荷剛性係数0.4)の履歴特性を採用した。ダンパーのせん断バネはバイリニアモデルで表し、初期剛性と耐力は図-11(a)のダンパーの履歴曲線を参考にして定めた。解析モデルの諸元を表-3に示す。なお、応答解析諸元は実験での応答計算諸元に合わせ、陽なNewmark- β 法を用い、時間刻みは0.012secとした。

解析で得られた応答変位の時刻歴を実験結果と比較して図-13に、応答履歴曲線とダンパーおよび主体構造の履歴曲線を図-14に示す。図より、ダンパー補強試験体の応答特性は解析によりの確に再現されていることがわかる。なお、図-13には主体構造のみの応答解析結果もあわせて示した。

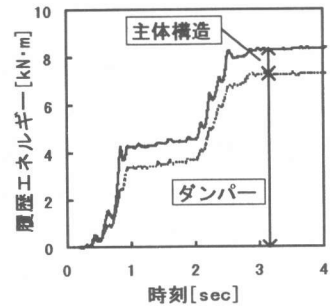


図-12 履歴消費エネルギー

表-3 解析モデルの諸元

	主体構造	ダンパー
使用モデル	武田モデル	バイリニアモデル
第1折点荷重[kN]	115.6	84.3
第2折点荷重[kN]	178.4	-----
初期剛性[kN/mm]	15.0	31.7
第2剛性[kN/mm]	6.3	0.001
第3剛性[kN/mm]	0.002	-----
除荷剛性係数	0.4	-----

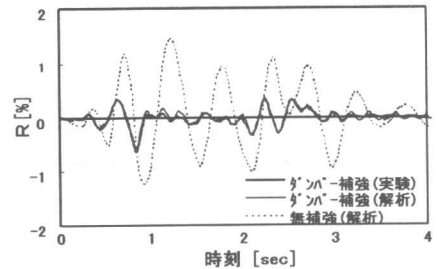


図-13 応答変形角時刻歴の比較

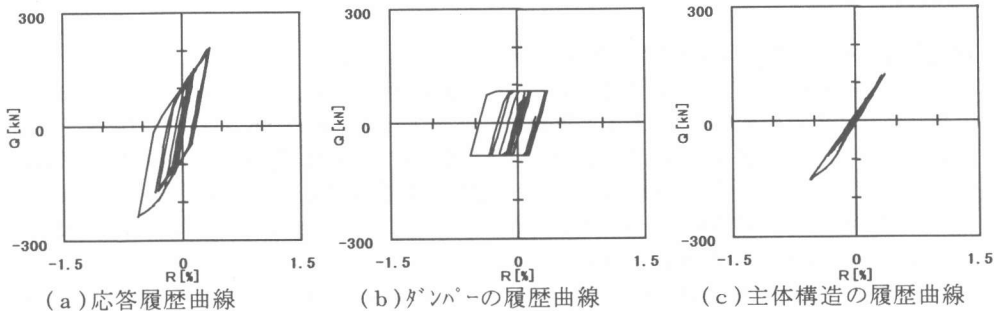


図-14 応答履歴曲線とダンパーおよび主体構造の履歴曲線

また、本解析モデルに対し、無補強試験体の実験と同様に正負交番の定常変位振幅を与え、等価粘性減衰定数を調べた結果が図-15である。主体構造のみの1質点系の解析結果と無補強試験体の実験結果が対応し、1質点並列系の解析結果とダンパー補強試験体の実験結果が対応している。なお、補強試験体の実験結果は、荷重が正(負)側から負(正)側へ移った点から、次に負(正)側から正(負)側へ移るまでの半サイクルの履歴面積により算定したものである。図より、無補強試験体の等価粘性減衰定数が5~14%であるのに対し、補強試験体は15~27%の値を示しており、ダンパーのエネルギー消費が耐震性能を向上させていることがわかる。また、このことは解析結果によっても示されている。

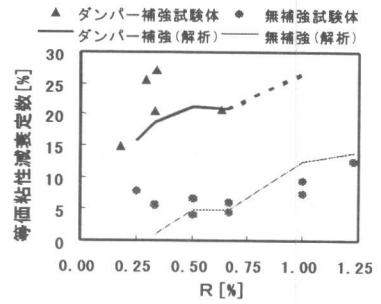


図-15 等価粘性減衰定数

5. まとめ

以上、ダンパー補強試験体の仮動的実験により以下の知見を得た。

- ・柱せん断破壊型の耐震性能の劣るRC造骨組をダンパー補強することにより、レベル2相当の入力地震波に対して柱がせん断破壊しない変位レベルに応答変位を低減させることができる。
- ・このとき、ダンパーの消費エネルギーは全履歴消費エネルギーの約87%を占め、エネルギー吸収効率が低い主体構造をダンパーが補っていることを実験結果より確認した。
- ・ダンパー補強試験体の抵抗機構は、ダンパーと主体構造の並列系の抵抗機構でモデル化することができ、1質点並列系の応答解析により実験結果を的確に再現することができる。
- ・ダンパー補強することにより耐震性能が向上することを、無補強試験体とダンパー補強試験体の等価粘性減衰定数の比較より示した。

謝辞

本研究は、日本大学と青木建設の共同研究「損傷低減のための耐震補強技術に関する研究」の成果の一部であり、関係各位に感謝致します。本実験は、建築研究振興協会「耐震性向上にかかわる補強工法の開発に関する実験委員会」(委員長:広沢雅也教授(工学院大学))の一環として行った実験であり、広沢雅也委員長、松井雅明氏(ショボンド建設)はじめ委員会関係各位のご助言ご協力に感謝致します。また、仮動的実験は、平成8年度文部省科学研究費補助金(基盤研究B2)「鉄筋コンクリート部材の強度と変形性能の把握に関する研究」(研究代表者:安達洋)の一環として行ったものである。

参考文献

- [1] 建築保全センター: Re 建築保全(特集 免震・制震トロフィット)、1996. 7、11
- [2] 日野泰道・北嶋圭二・中西三和・安達洋: エネルギーの釣り合いに基づく鉄筋コンクリート造建物の弾塑性応答性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 2、pp. 317-322、1996
- [3] 北嶋圭二・野口隆・上田英明・鈴木信治: ダンパーを用いた既存RC造建物の耐震補強法に関する研究(その1~その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2、pp. 271-280、1996. 9
- [4] 野口隆・北嶋圭二・上田英明・安達洋: 耐震補強のためのダンパー・ブレースの躯体定着方法に関する実験、コンクリート工学年次論文報告集、1997
- [5] 佐藤稔雄・石丸辰治・安達洋・白井伸明・中西三和・神田亮: オンラインシステムによる擬似動的実験の誤差評価法に関する研究(その1、2)、日本建築学会大会学術講演梗概集C、pp. 189-192、1985. 10