アウトフレーム連結制振構法による耐震補強

Seismic Retrofit of Building Structures by Out-framed Viscous Damping System

高橋 宏治*1	黒木 安男*2	太田 寛*1
Koji Takahashi	Yasuo Kuroki	Hiroshi Ohta

要旨

新しい耐震補強構法として、既存躯体の外部にフレームを新設し、ダンパーで両者を連結する構法の開発を行った。特徴としては①建物外部の工事であるので、"ながら施工"が可能であること ②ダンパー設置に伴う高減 衰化により、信頼性の高い耐震性能向上効果が得られること 等がある。本報では地震応答解析を中心に本構法 の効果を検証し、実建物を対象にした検討事例を紹介する。

キーワード:連結制振 ダンパー アウトフレーム 耐震補強 地震応答解析

1. はじめに

阪神大震災から十余年を経て、東海・東南海・南海地震 などの巨大地震の発生が懸念される昨今、学校・病院を中 心に、建物の耐震補強を実施する動きが目立ってきている。 また、2006年1月に施行された改正耐震改修促進法がその 動きに拍車をかけている。

補強方法として最も一般的である「鉄筋コンクリート壁」 や「鉄骨造ブレース」による開口閉鎖は、建物の使用性や 居住性に影響を及ぼすことから、建築主に受け入れられな いことも多い。今回開発したアウトフレーム連結制振構法 は、新しい耐震補強方法として、既存建物にアウトフレー ム方式で架構を新設し、接合部にダンパーを設置して地震 時のエネルギー吸収を図るものである。

アウトフレーム連結制振構法の特徴は次のとおりである。

"ながら施工"により移転が不要

当構法による補強工事は、既存建物の外部でほとんど の作業が行われるため、生活しながら・・・、授業し ながら・・・使いながら・・・の「ながら施工」が可 能な構法である。したがって、工事に伴う一時移転や 屋内での工事スペースの確保などが不要になる。

② 信頼性の高い耐震補強構法 ダンパー設置に伴う高減衰化により、信頼性の高い耐 震性能向上効果が得られる。

③ 工事費の低減 従来工法(鉄骨ブレース等による補強)では建物内部 での作業が多く、工事に伴う一時移転や設備等の盛り 替え、内装等の復旧工事に伴う費用が必要となる。当 構法ではアウトフレームの施工やダンパーの取り付 け等多くの作業が外部から行われるため、これらの費 用の多くが不要となり、補強工事全体の費用を低減す ることが可能になる。

④ デザイン性に配慮した外観
 アウトフレーム方式で設ける新設架構は、既存建物の
 柱・梁位置に合わせ配置することで、デザイン性に配
 慮したフレーム形状で設けることができる。これまでの
 の補強工事に用いられてきたブレース増設等に比べ、
 機能性だけでなく美観性にも配慮した構法である。

2. 連結制振の理論的背景

隣接する建物をダンパーで接合し、それぞれの建物の揺 れ方の違いを利用して、既存建物の揺れを押さえ、衝突を 防ぐシステムが連結制振構法である。建物同士を繋ぐ装置 は、それぞれの建物が揺れて生じる相対変位によりエネル ギーを吸収するものであり、「ジョイントダンパー」と呼ば れる。しかし、ダンパーが硬すぎると各建物を緊結したの と変わらない一体化に近い揺れとなる。逆に柔らかすぎる とダンパーの存在に関係なく各々独立に近い揺れとなり、 いずれの場合も揺れの低減効果は期待できない。各建物の 振動特性の相違を把握し、適度な硬さ(剛性)と十分なエ ネルギー吸収能力をもつダンパーを採用することが重要で ある。

次に、連結制振の理論的背景について述べる。

異なる周期をもつ各々1 自由度で表される建物を考える。 連結されていない場合、剛結した場合、ダンパーにより連 結した場合の各々について、共振曲線を用いて応答倍率の 変化を比較する。 解析モデルは、建物 1、2 の質量、剛性をそれぞれ m1、 k1、m2、k2 とし、質量比 m1:m2=2:1、剛性比 k1:k2=1:2 と した。ここで、図中の振動数は建物 1 の 1 次振動数で無次 元化している。

(1) 連結されていない場合

図1に非連結時の建物1、2の共振曲線を示す。



- (2) 剛結した場合
- 図2に剛結時の共振曲線を示す。

2つは同じ動きとなり1つの共振曲線となる。



(3) ダンパーで連結した場合

ダンパーで連結した場合の共振曲線を示す。



ダンパーで連結した場合においても、ダンパーの量によ り異なる共振曲線となる。ダンパーが少ない場合は、図 3 に示すように建物が独立な場合の共振曲線に近い。

次にダンパーの量を変化させると、ダンパーが多い場合 は、図4に示すように剛結した場合の共振曲線に近くなる。 また、図5に示すような最大応答倍率が最も小さくなるよ うな最適なダンパー量が存在する。

次に、建物 1,2 の固有振動数の違いによる応答倍率の変 化を比較する。図 6 に固有振動数の近い場合と離れている 場合の共振曲線を示す。



図6 固有振動数の近い場合(左)と離れている場合(右)

2 つの建物の固有振動数はある程度以上離れているほう が応答低減効率がよい。

以上のことより、以下のことが考察される。

- 2つの建物をダンパーで連結すると、応答は小さくする ことができる。
- ・ 連結するダンパー量には最適値が存在する。
- 2 つの建物の固有振動数がある程度以上離れているほうが連結による応答低減効率がよい。

3. 動的応答解析による検証

3.1 解析概要

既存建物とアウトフレームをジョイントダンパーによ り連結することによって、応答性状がどう変化するかを 明らかにするため既存建物を1自由度、アウトフレーム を1自由度とした2自由度連結モデルについて動的応答 解析を行った。解析パラメーターは、アウトフレームの 既存建物に対する剛性比、質量比、及びジョイントダン パーの設置本数とした。

解析パラメーターを以下のように定義する。

- ・周期比(Ta/To):アウトフレームの周期 / 既存建物の周期
- ・質量比 (m/M):アウトフレームの質量 / 既存建物の質量
- ・剛性比 (k/K):アウトフレームの剛性 / 既存建物の剛性
- ・最大応答比(δ j/δ o):
 (連結時既存建物の最大応答変位 非連結時既存建物の最大応答変位

・減衰力重量比:ダンパーに生じる最大減衰力/既存建物の重量



図7 2自由度連結モデル

3.2 解析モデルと解析結果

既存建物を弾塑性構造物、アウトフレームを弾性構造物 として、ジョイントダンパーで連結したモデルに対する解 析結果を示す。既存建物の復元力特性は、Degrading Tri-linear型(武田モデル)とし、構造減衰は、瞬間剛性 比例型(h₁=0.03)とした。またジョイントダンパーは粘性 ダンパーとし、リリーフ機構によるバイリニア型の減衰係 数を有するダッシュポット要素にモデル化した。解析に用 いる入力地震波は、建築センター波を50 cm/s に規準化し たものを採用した。

既存建物は RC 造 4 階建てを想定し、1 質点モデルに置換 したものである。質量 1000 (ton)、1 次固有周期 0.444 (s) である。図 8 に解析モデルの概要、図 9 にジョイントダン パーの減衰特性、表 1 にジョイントダンパーの解析定数を 示す。

解析ケースは、剛性比:k/K=0.25、0.5、1.0、1.5、 2.0、質量比:m/M=0.05、0.10、0.20、0.5、0.75、ま たジョイントダンパー(500kN用)の設置本数を1本、2 本、4本、8本、12本、及び剛結合した場合とした。表2 に解析ケースの一覧を示す。



図8 解析モデル

表1 ダンパー	解析定数
---------	------

図 10 に周期比と最大応答比、図 11 に剛性比と最大応答 比、図 12 に質量比と最大応答比、図 13 に減衰力重量比と 既存建物の最大応答加速度、図 14 に減衰力重量比と最大応 答比との関係を示す。

図 10~14 より以下のことが考察される。

- 周期比、質量比の変化は既存建物の応答低減効果に大きな影響を与えない。しかし周期比が1.0に近い場合には既存建物の応答低減効果は小さくなる。(図10)
- 剛性比が大きくなると応答低減効果は大きくなるが、
 剛性比が 1.0 を越えると応答低減効果の変化の度合いは小さくなる。(図 11)
- ・ 上記の2項目の傾向は、ジョイントダンパーの本数が 変化しても同様の結果である。しかし、ジョイントダンパーの本数が少ない場合に限っては、剛性比の変化 が最大応答比に与える影響は少ない。
- ジョイントダンパーによる既存建物の応答低減効果は、 質量比とはほぼ無関係である。(図 12)
- 応答加速度は、ジョイントダンパーの本数やアウトフレームの剛性を調整するで非連結時より低減できるか、もしくはほぼ同程度となる。しかし、剛結合とした場合は、非連結時の2倍以上となる。(図13)
- ・各剛性比に対して、ジョイントダンパーによる既存建物の応答低減効果がピークとなる減衰力重量比が存在する。(図 14)
- 既存建物の応答低減効果のピークを越えてジョイント ダンパーの本数を増やすと、応答は増加し、剛結した 場合の応答に近づいていく。(図 14)



図9 ジョイントダンパー減衰特性

表2 解析ケース

	C1	C2	Qy	Qmax	Vy	剛性比	0.25,	0.5,	1.0,	1.5,	2.0
	(kNs/cm)	(kNs/cm)	(kN)	(kN)	(cm/s)	哲島と	0.05	0 10	0.20	0.50	0.75
500kN田						貝里比	0.00,	0.10,	0.20,	0.00,	0.10
ダンパー	50.0	4.0	325.0	500.0	6.5	ダンパー本数 (n)	1,	2,	4,	8,	12





n = 8

0.20

0.4

0.2

0.0

0.00

図 12 質量比と最大応答比 (n はダンパーの本数)

n = 12

剛結





図13 減衰力重量比と最大応答加速度



図14 減衰力重量比と最大応答比

3.3 まとめ

既存建物、アウトフレームをそれぞれ1自由度とした2 自由度連結モデルによる動的応答解析を行った。連結制振 構法は以下のような性質を有していると考えられる。

- 既存建物の応答低減効果は、剛性比とジョイントダン パー量によりほぼ決定され、質量比、周期比にはほぼ 無関係である。
- ジョイントダンパー量については、既存建物の応答低 減効果がピークとなる最適ジョイントダンパー量が存 在する。最適量を越えて量を増加させると、剛結した 場合の応答に近づく。
- 応答加速度は、剛結合した場合は、かなり増大するが、 ダンパーで連結した場合は、ダンパー量やアウトフレ ームの剛性の調整で低減することができる。

4. アウトフレーム連結制振構法の概要

当構法は、図15に示すように既存設建物の外周に、既存 建物とは独立して、十分な強度と剛性を有する骨組架構(ア ウトフレーム)を新設し、これと既存建物をジョイントダ ンパーで連結することにより、地震時のエネルギー吸収を 図る耐震補強構法である。図16にダンパー設置例を示す。



図 15 耐震補強イメージ



当構法に用いるダンパーに求められる性能としては、① ストロークが大きい、②安定したエネルギー吸収性能が得 られる、③安価である、④施工性が良い、等がある。これ らの事項を満足するために、本試設計ではジョイントダン パーにオイルダンパーを採用する。オイルダンパーの特徴 として、数十 cm といったストロークを比較的容易に確保で き、また速度依存性があるため、速度を持った急な動きに は減衰抵抗力を生じるが、長期的な(ゆっくりとした)変 動には抵抗力は生じない。



図 17 オイルダンパー

5. 試設計

5.1 試設計建物概要

試設計の対象として、RC造4階建ての学校校舎を想定した。平面形状としては、桁行方向は6mの7スパン、張間方向は7.2mの1スパン、立面形状としては階高3.6mの4層、建物高さは14.4mである。張間方向は耐震壁があり耐力が十分あるものとし、検討は全て桁行方向について行う。 柱断面は全て700×700mm、基礎梁を除く梁断面は全て400×750mmである。

アウトフレームは建物の両側に第1層が3スパン、第2、 3層が1スパンとする。柱断面は740×1200mm、梁断面は 700×1200mm(3階)ないし1400mm(1、2階)である。 図18に対象建物の伏図、軸組図を示す。また表3に建物及 びアウトフレームの諸元を示す。

既存建物の復元力特性は、Degrading Tri-linear型(武 田モデル)、アウトフレームの復元力特性は弾性とする。構 造減衰は、瞬間剛性比例型(h₁=0.03)とした。またジョイ ントダンパーはオイルダンパーとし、リリーフ機構による バイリニア型の減衰機構を有するダッシュポット要素にモ デル化した。解析に用いる入力地震波は、建築センター波 を 50 cm/s に規準化したものを採用した。図 19 に解析モデ ル、図 20 にジョイントダンパーの減衰特性、表 4 にジョイ ントダンパーの解析定数を示す。

解析モデルの周期比は 0.20、質量比は 0.09、1 次固有周 期に対する剛性比は 2.0 である。



図 18 伏図・軸組図

表3 建物およびアウトフレーム諸元

	質量 (ton)			弹性剛性 (kN/cm)				1次固有周期	
	4階	3階	2階	1階	4階	3階	2階	1階	(s)
既存建物	561	612	612	612	7963	8228	8524	11646	0.45
アウトフレーム	_	35	54	114		4629	7923	21202	0.09



連結制振モデル

図19 解析モデル

減衰力 Q(kN)



解析は、ジョイントダンパーの設置本数、配置をパラメ ーターとして行った。ジョイントダンパー(500kN用)の 設置本数、配置は、表5に示す4ケースを設定した。

表4 ジョイントダンパー解析定数

	C1	C2	Qy	Qmax	Vy
	(kNs/cm)	(kNs/cm)	(kN)	(kN)	(cm/s)
500kN用 ダンパー	50.0	4.0	325.0	500.0	6.5

表5 ジョイントダンパーの検討ケース(数字は本数)

	1層	2層	3層	総量
Case1	4	4	4	12
Case2	6	4	2	12
Case3	2	4	6	12
Case4	2	2	2	6



5.2 解析結果と考察

図 21 に最大応答層間変形角、図 22 に非連結時と連結時 のエネルギー吸収分担率を示す。

図 21、22 より以下のことが考察される。

- ジョイントダンパーで連結した層で応答が小さくなっている。Caselでは、非連結時には、1、2層で1/100を越えていた変形が、各層で1/200程度に小さくなっている。ジョイントダンパーで連結することにより、大きな応答低減効果が得られている。(図21)
- ジョイントダンパーの各層分布が同じでその総量が異なる Case1、Case4 を比較すると、ジョイントダンパーの総量が多い Case1 の方が最大応答層間変形角が小さくなっている。(図 21)
- ジョイントダンパーの総量が同じでその分布が異なる Case1、Case2、Case3を比較すると、ジョイントダンパ ーの設置本数が多い層ほど大きな応答低減効果が得ら れている。
- ジョイントダンパーで連結されていない最上層では、
 非連結時に比べると応答が増加する傾向にある。この
 傾向は、上層に多くのジョイントダンパーを配置した
 場合に顕著となっている。(図 21)
- ジョイントダンパーで連結しない場合と連結した場合の地震によるエネルギーの吸収分担率を比較すると、
 両者での総入力エネルギーには大差はないが、非連結

時には地震エネルギーの大部分を柱・梁の損傷を伴う 履歴減衰により消費しているのに対し、連結時にはジ ョイントダンパーによって地震エネルギーの大部分が 消費されている。(図 22)

6. まとめ

今回、RC造4層の学校校舎を想定した動的応答解析より、 既存建物と新設アウトフレームをジョイントダンパーで連 結することにより大きな応答低減効果が得られ、またジョ イントダンパーによるエネルギー吸収により建物の損傷を 大幅に改善できることが明らかとなった。

今後の課題としては、今回の試設計のようなケーススタ ディを増やし、ジョイントダンパーの最適量や最適配置に ついての検討、またジョイントダンパー、およびジョイン トダンパー接合部の詳細設計の検討を進めていく予定であ る。

謝辞

アウトフレーム連結制振構法の開発は、当社と京都大学 大学院工学研究科の竹脇・辻研究室との共同で進められて おり、今回の解析を行うに当たり、竹脇教授・辻助教授に 多大なご指導を賜りました。ここに御礼申し上げます。