広島工業大学紀要研究編
第41巻（2007）pp. 133-141
論　　文

外付け鉄骨のはり上下空間を利用したRC建物制震補強システムの機構について

玉井　宏章*　・高松　隆夫*　・檜谷本浩二**
尾木　靖夫***・原田　秀秋****・森下　邦宏*****

（平成18年10月30日受理）

Mechanism on Rehabilitated RC Frame Using Hysteretic Damper Installed in Beam Upper and Lower Space of Outer Steel Frame

Hiroyuki TAMAI , Takao TAKAMATSU , Koji HIYAMATO
Yasuo OGI , Hideaki HARADA and Kunihiro MORISHITA

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

We have proposed the rehabilitation system of RC frame using hysteretic damper installed in beam lower space. To make damper effective, it is desirerable to make the damper strong. The system has limitation of damper's strength because shear strength of RC frame joint is very low in ordinary old building. To solve the difficulty, we propose the outer steel frame with the damper installed in beam lower and upper space. We performed the cyclic loading tests on scaled RC frame with the outer steel frame with dampers to show the availability of the present system. From these results, conclusions and remarks are drawn as follows.

1) Four hysteretic dampers yield within small story drift, so that the system absorbs the seismic energy effectively.
2) The system improves the shear strength of RC frame, so that we can install the stronger damper.

Key Words: RC frame, Outer steel frame, Hysteretic damper, Cyclic loading test

1．は　じ　め　に

開口部を閉塞しないRC建物の補強工法として，比較的階高が高く開口部を塞ぐことのできない商業RC建物（例えば多層１スパン架構）に，履歴ダンパーをはり下の天井空間内にコンパクトに設置し，建物空間を有効にしうる，はり下空間を利用したエネルギー吸収型の制震補強システムを提案した。前報１），２）では，その縮小構造模型により実験的に制震効果を検討した。

しかしながら，階高が低いRC建物には適用が困難であること，また，RCフレームのせん断耐力の制約により，ダンパー耐力を大きく設定できないという難点があった。そこで，外付け鉄骨補強工法の柱・はりを利用し，鉄骨はり上下空間に履歴ダンパーを組み込む制震補強システムを提案する。この構法では，１）ダンパーからの抵抗力は外付け鉄骨フレームに作用しRCフレームとは並列型の抵抗

* 広島工業大学工学部建築工学科
** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** 三菱重工業株式会社　広島製作所
**** MHIソリューションテクノロジーズ株式会社
***** 三菱重工業株式会社　広島研究所

要素となるため，ダンパーの耐力はRCフレームの耐力の制約をうけない，２）はり上部にも配置可能なので配置スペースが２倍確保できる，という利点が得られる。本論文では，この制震補強システムを有するフレームの１／２縮小構造模型の載荷実験を行って，構造特性等を検討する。その際に，２種類の外付け鉄骨とRCフレームとの接合形式に着目して試験を行う。

２．制震補強システムの概要

2.1　制震補強システムの機構

提案する制震補強システムをFig.1に示す。制震補強システムは，RC架構外面に鉄骨柱・はりを無収縮モルタルとスタッドを介して接合し，その鉄骨はり中央部の上下に高剛性の鋼製束材を取り付け，その先端部と左右の鉄骨柱間に計４本の履歴ダンパーを組み込んだものである。制震補強システムの作動概念図をFig.2に示す。RC架構の柱・はり接合部，架構と鉄骨フレームとの接合が剛結合された架構が水平地震力を受けると，節点での部材のなす角は変化しないため，はりは曲げ変形する。この曲げ変形による高剛性の鋼製束材の回転を利用して，鉄骨はり上下に設置した履歴ダンパーに軸変形させて，塑性化させることにより地震入力エネルギーを吸収する。

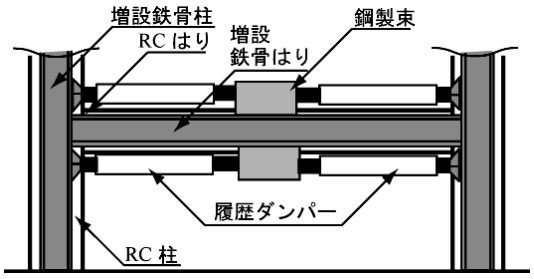


Fig.1　制震補強システムの概念図

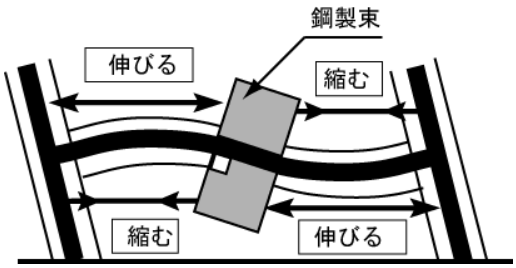


Fig.2　履歴ダンパーの作動概念

３．実　験　概　要

3.1　試験体

試験体をFig.3に示す。柱の反曲点位置で取り出した１スパンのRCフレームに，履歴ダンパー付外付け鉄骨（柱：H-244 × 175 × 7 × 11，はり：H-244 × 175 × 7 ×

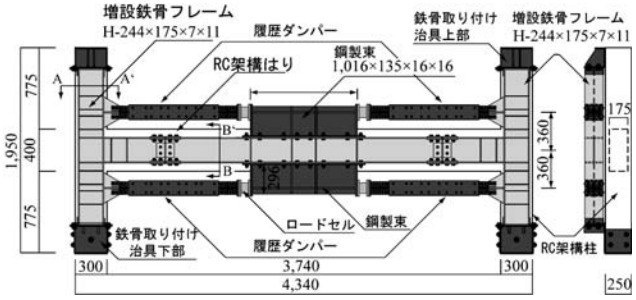
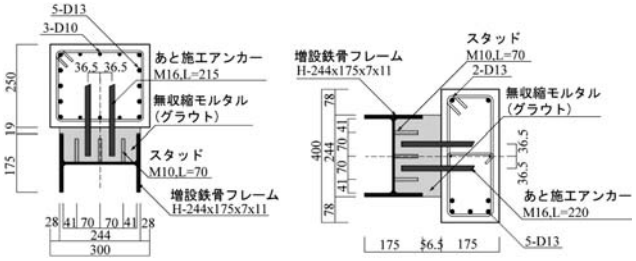
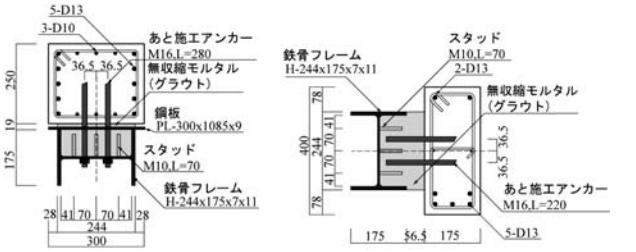


Fig.3　試験体の外観図

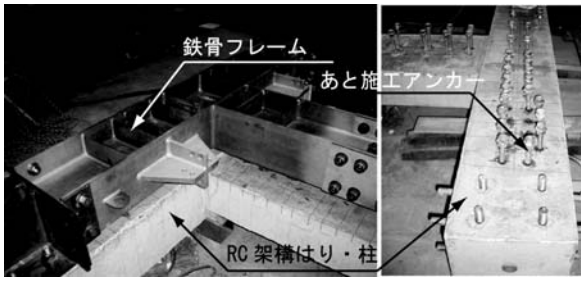


(a) TypeSB 試験体

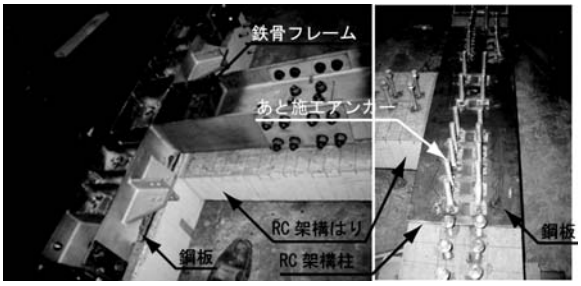


(b) TypePSB 試験体

Fig.4　RCフレームと外付け鉄骨フレームの接合詳細図

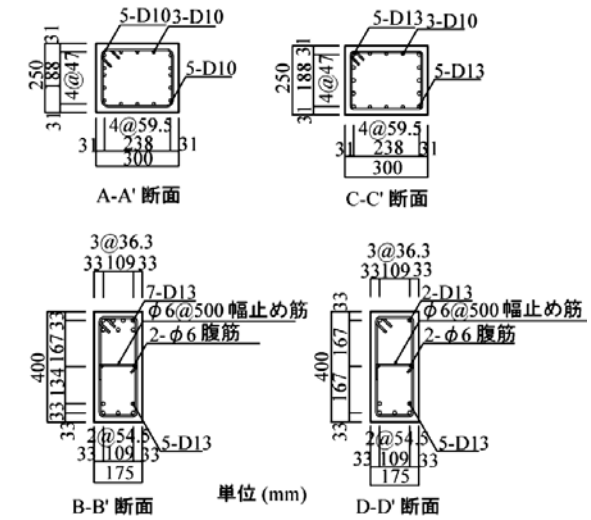


(a) TypeSB 試験体

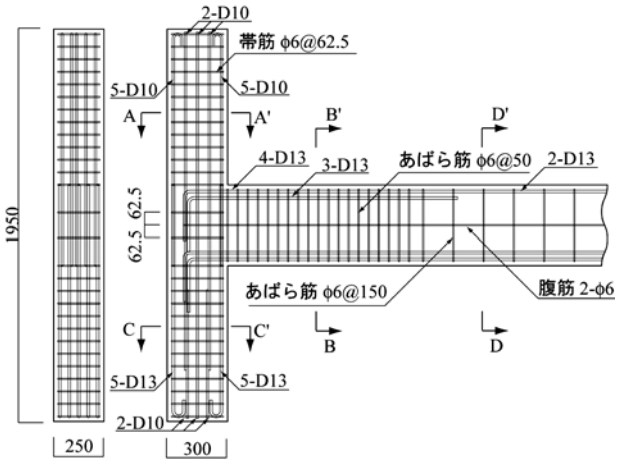


(b) TypePSB 試験体

Photo.1　RCフレームと外付け鉄骨フレームの接合詳細図

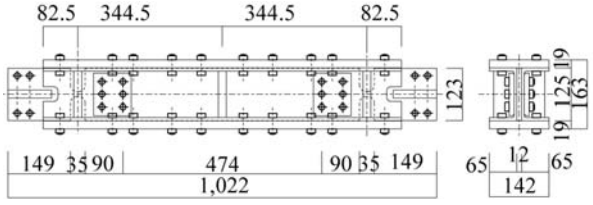


(a) 配筋断面図

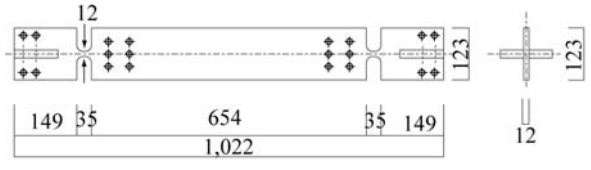


(b) 配筋側面図

Fig.5 RC フレーム配筋詳細図



(a) 拘束材



(b) 芯材

Fig.6 履歴ダンパー

Table1 各素材試験結果

(a) コンクリート

材齢日	3	7	14	21	28
F_c (N/mm^2)	7.1	14.0	19.7	22.5	24.5

	E (kN/mm^2)	F_c (N/mm^2)
TypeSB	25.1	25.8
TypePSB	24.5	24.3
TypeN	25.4	23.3
グラウト	−	−

(b) 鋼材

		ダンパー鋼板	鉄筋		
			D10	D13	φ6
材質		SN400B	SD295	SD295	SR235
De or *Te*	(mm)	12.0	9.53	12.7	5.60
Ae	(mm^2)	−	71.3	127	24.6
σ_y	(N/mm^2)	273	327	331	287
σ_u	(N/mm^2)	430	456	468	338
σ_y/σ_u		0.63	0.72	0.71	0.85
ε_u	(%)	43.0	15.5	16.4	18.8

E：ヤング係数，Fc：圧縮強度，De,Te：直径，厚さ，
Ae：断面積，σ_y：降伏応力，σ_u：引張強度，ε_u：伸び

11）を付与した補強試験体（TypeSB，TypePSB）及び無補強試験体（TypeN），計3体を用意した。本システムの補強試験体は室外の外周構面への設置を前提に，RC フレームと履歴ダンパーとを並列型に配置した形式となっている。補強試験体のパラメータは，RC フレームと外付け鉄骨フレームの接合形式である。RC フレームと鉄骨フレームとの接合詳細図を Fig.4 に，RC フレームの配筋図を Fig.5 に，履歴ダンパーの詳細図を Fig.6 に，それぞれ，示す。Table1 に，コンクリート各材齢・実験日の圧縮強度・割線剛性及び履歴ダンパーの塑性化部位と鉄筋類の素材試験結果を示す。

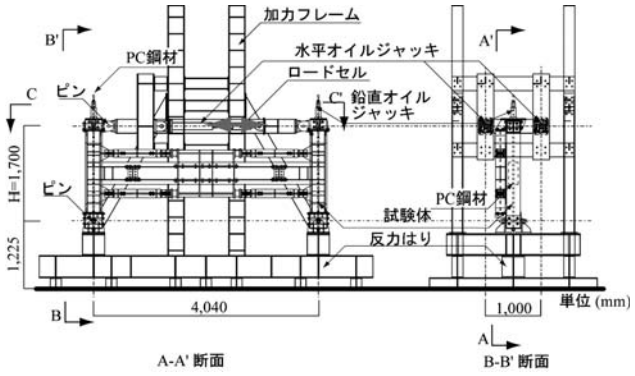
履歴ダンパーは，平鋼の芯材を座屈拘束用の溝形鋼で挟み込む，いわゆる座屈拘束型ブレースを採用する。特に，芯材の両端近傍には小さな軸変形でも降伏しうるように断面縮小部を設けている。

3.2 RC フレームと外付け鉄骨フレームの接合形式

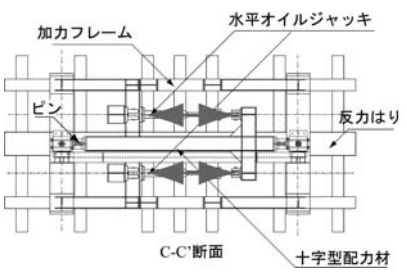
本制震システムを既存 RC 建物の補強に適用する際には，履歴ダンパーは小さな軸変形で塑性化することから，RC フレームと外付け鉄骨フレームとのずれ変位により履歴ダンパーの軸力伝達が良好に図れない可能性があるため，ずれ変位を小さくする工夫が必要となる。従来型

（TypeSB）とあと施工アンカーのせん断抵抗部位の長さを短くした補強設置型（TypePSB）の２種類に着目する。

TypeSB 試験体における RC フレームと外付け鉄骨フレームとの接合方法は，RC フレームの柱はりにあと施工アンカー（ケミカルアンカー：柱 M16−L＝215，はり M16−L＝220）を取り付け，鉄骨フレームにはスタッド（M10，L＝70）を溶植し，無収縮モルタル（グラウト）を RC フレームと外付け鉄骨フレームの間に注入して一体化している（Fig.4 (a)，Photo 1（a）参照)。TypePSB 試験体における RC フレームと外付け鉄骨フレームとの接合方法は，RC フレームの柱はりにあと施工アンカー（ケミカルアンカー：柱 M16−L＝280，はり M16−L＝220）を取り付け，外付け鉄骨フレームにはスタッド（M10，L＝70）を溶植し，RC フレームと外付け鉄骨フレームとの間に鋼板（PL−1085 × 300 × 9）を取り付け，外付け鉄骨フレーム H 形鋼フランジと側面隅肉溶接を行った。また，あと施工アンカーは，鋼板と外付け鉄骨フレーム H 形鋼ウェブを貫き，あと施工アンカー頂部を外付け鉄骨フレーム H 形鋼柱ウェブと溶接接合を行い固定し，無収縮モルタル（グラウト）を RC フレームと外付け鉄骨フレームの間に注入して一体化している（Fig.4（b），Photo 1（b）参照)。



(a) 立面図



(b) 平面図

Fig.7　加力装置

3.3　加力装置

加力装置の概要を Fig.7 に示す。試験体の柱頂部に取り付けたピンを介して，剛性の高い十字型の配力材が取り付けられており，そこに試験体の表裏から２本の水平オイルジャッキにより正負交番の水平力を載荷する。柱の下部にはピンが取り付けられており，柱上部とこの下部ピンとを，RC 柱の断面中心を貫通する中央１本のアンボンド型 PC 鋼棒（ϕ26）でつなぎ，上部に取り付けた鉛直センターホールジャッキで初期軸力150kNを導入する。２本の水平オイルジャッキと２本の鉛直センターホールジャッキは，それぞれ，分岐管を介して油圧ポンプをつないでおり，２本の水平オイルジャッキ相互及び２本の鉛直センターホールジャッキ相互には，同じ力が作用する仕組みとなっている。

3.4　計測方法

各計測諸量の模式図を Fig.8 に示す。

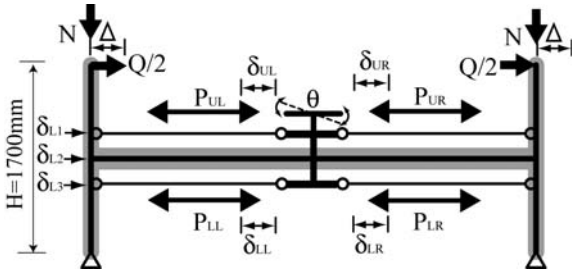
荷重計測は，水平ジャッキ先端に取り付けたロードセルから層せん断力，Q を，鉛直センターホールジャッキ上端に取り付けたロードセルから柱の軸力，N を，外付け鉄骨はりの鋼製束と履歴ダンパーとの間に設けたロードセルから試験体中心から左上，右上，左下，右下位置にある履歴ダンパーの軸力，P_{UL},P_{UR},P_{LL},P_{LR}を，それぞれ，計測した。

変位計測は，試験体左下柱脚のピン軸を不動点とする支持治具に変位計を取り付け，柱上部の層間変位，Δを，鋼製束先端の回転角，θを，また，履歴ダンパー両端に取り付けピン軸間の相対変位を計測する治具により，各履歴ダンパーの軸方向変位，δ_{UL},δ_{UR},δ_{LL},δ_{LR}を，RC フレームと鉄骨フレームとの相対関係の変位δ_{L1},δ_{L2},δ_{L3}（Fig.8 (a) 参照）を，それぞれ，計測した。

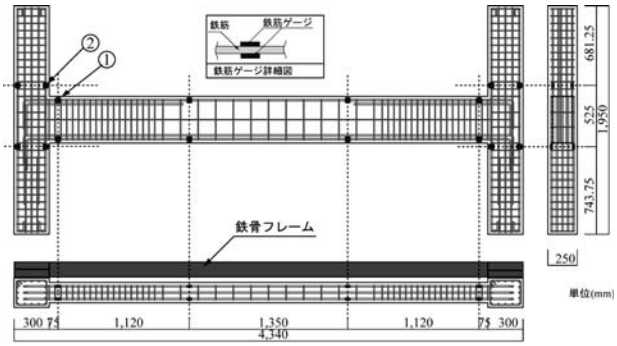
ひずみ計測は，RC フレームの鉄筋と鉄骨フレームはり端部近傍の各部で行った。RC フレームの鉄筋ゲージ位置を Fig.8 (b) に，鉄骨フレームはり端のひずみゲージ位置を Fig.8 (c) に，それぞれ，示す。検長５mm の箔ひずみゲージを使用した。また，RC フレームの損傷の程度を観察するために，各サイクル載荷時における最大変位時にひび割れ状況をチェックした。

3.5　載荷プログラム

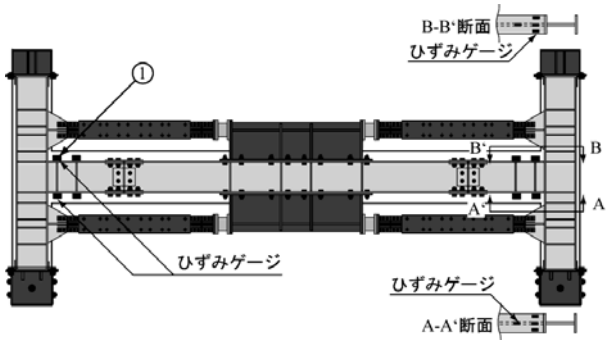
載荷は，層間変位角を制御する変位制御とし，1/1500rad，1/750rad，1/500rad，1/250rad，1/150rad，1/75rad 振幅を漸増させ，各振幅レベルで２サイクル繰り返す，正負交番漸増振幅繰り返し載荷を採用した。尚，柱１本当りの初期軸力（鉛直オイルジャッキによる導入軸力），N は，150kN で載荷中一定に制御した。



(a) 荷重・変位計測諸量



(b) RC フレーム鉄筋ひずみ計測諸量



(c) 鉄骨フレームはり端ひずみ計測諸量

Fig.8 各計測諸量

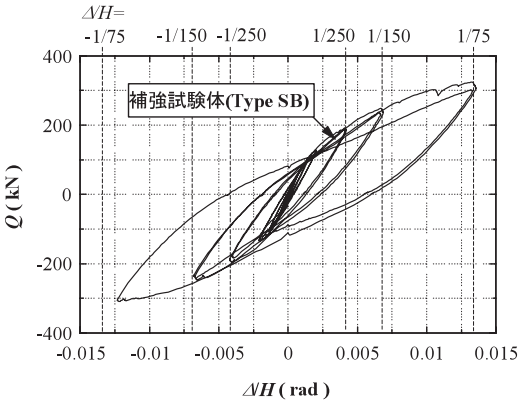
4．実験結果と考察

以下に得られた各実験結果と項目毎の考察を示す。

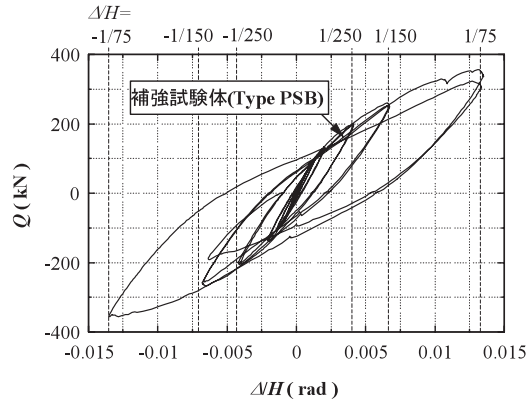
4.1 層せん断力と層間変位角の関係

Fig.9 に層せん断力，Q と層間変位角，Δ/H との関係を，(a) TypeSB 試験体，(b) TypePSB 試験体，(c) TypeN 試験体に分けて示す。また，Fig.10 (a) に各試験体における骨格曲線，(b) には弾性範囲における TypeSB 試験体と TypeSB 試験体での履歴ダンパーを取り外した試験体の Q と Δ/H との関係を，Δ/H は頂部変位を柱下部ピンから柱上部ピン間での距離（Fig.7 (a) に参照，H＝1700mm）で割って求めている。

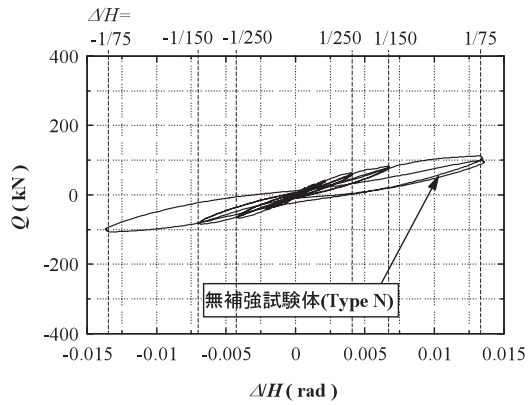
Fig.9，10 から以下のことが分かる。１）各試験体は，振幅が大きくなるにつれ逆 S 字形の紡錘型の履歴ループとなる。２）層間変位角 Δ/H＝1 /75 振幅時における補強試験体 TypeSB と TypePSB の層せん断耐力は，無補強試験体 TypeN と較べ，2.7 倍程度上昇する。３）TypeSB，TypePSB 試験体は TypeN 試験体と較べ，試験体全体の層せん断耐力が増加しているのみでなく除荷時剛性が高いことから，エネルギー吸収効率が向上している。４）RC フレームに外付け鉄骨フレームを付与することにより，TypeN 試験体と較べ 2.0 倍，更に履歴ダンパー取り付けることにより 3.2 倍近く弾性層せん断剛性が上昇する。５）TypeSB 試験体と TypePSB 試験体を較べ，両試験体ともあと施工アンカーの影響による層せん断耐力の低下の履歴は示さないが，層間変位角 Δ/H＝1 /150 振幅時から層せん断耐力差が生じた。



(a) TypeSB 試験体

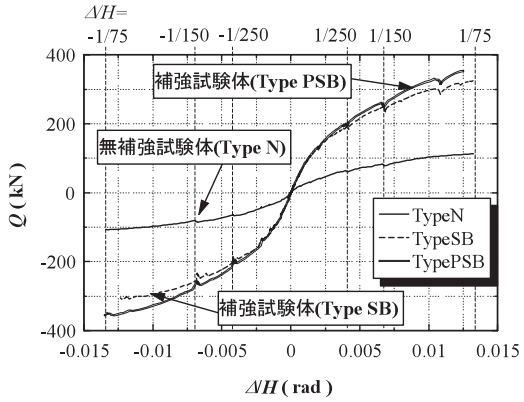


(b) TypePSB 試験体

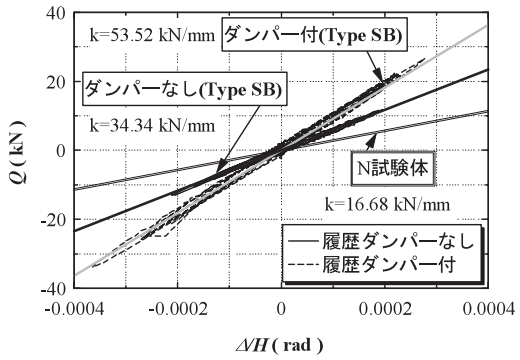


(c) TypeN 試験体

Fig.9 層せん断力と層間変位角の関係



(a) 骨格曲線



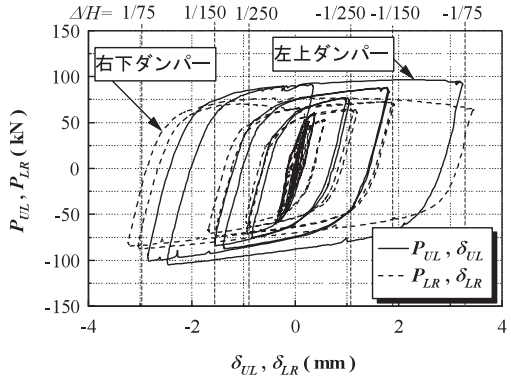
(b) 初期せん断弾性剛性

Fig.10 各試験体の骨格曲線と TypeSB 試験体における初期せん断弾性剛性

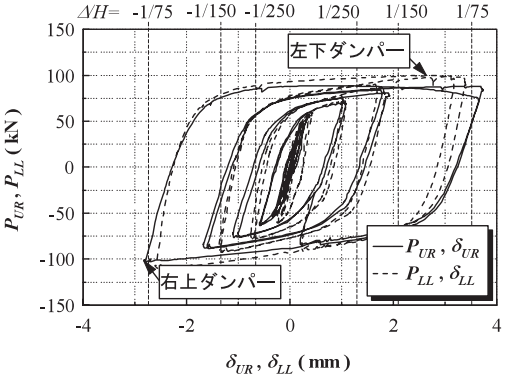
4.2 履歴ダンパー軸力と軸方向変位の関係

Fig.11 に TypeSB 試験体，Fig.12 に TypePSB 試験体における試験体中心から左上，右上，左下，右下位置にある履歴ダンパーの軸力，（P_{UL},P_{UR},P_{LL},P_{LR}）とそれらの軸方向変位，（δ_{UL},δ_{UR},δ_{LL},δ_{LR}）との関係を，(a) 左上ダンパーと右下ダンパー，(b) 右上ダンパーと左下ダンパーに分けて示す。Table2 には，層間変位角が 1 /250，1 /150 の第 1，第 2 サイクル時におけるフレーム全体の履歴吸収エネルギー，ΔW，最大変位時におけるポテンシャルエネルギー，W，各履歴ダンパーの履歴吸収エネルギー，ΔW_{UL}，ΔW_{UR}，ΔW_{LL}，ΔW_{LR}，及びフレーム全体の履歴吸収エネルギーから履歴ダンパーの履歴吸収エネルギーを差し引いた RC フレームの履歴吸収エネルギー，W_F，フレーム全体の等価粘性減衰定数，h_{ef}，履歴ダンパーの等価粘性減衰定数，h_{ed} を示す。また，W_F には鉄骨フレームの吸収エネルギー量も含まれている。

Fig.11，12，Table2 から以下のことが分かる。1）本システムの 4 つの履歴ダンパーは，軸方向変形の引張側振幅が大きくなる傾向があるものの，エネルギー吸収効率の良い安定した紡錘型の履歴特性となる。2）小さな層間変位時から良好に作動し，小さな軸変位で塑性変形してエネルギーを吸収する。3）各 4 つの履歴ダンパーは，正方向

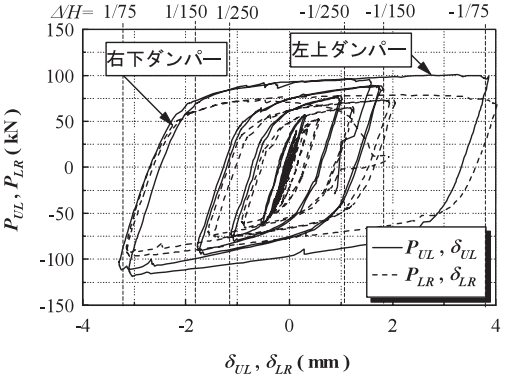


(a) 右下・左上ダンパー

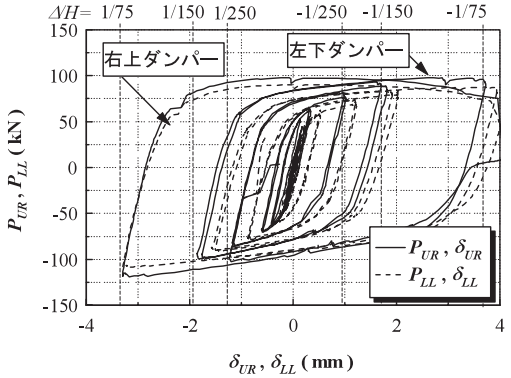


(b) 右上・左下ダンパー

Fig.11 TypeSB 試験体の履歴ダンパー軸力と軸方向変位の関係



(a) 右下・左上ダンパー



(b) 右上・左下ダンパー

Fig.12 TypePSB 試験体の履歴ダンパー軸力と軸方向変位の関係

Table2　各サイクル下でのエネルギー吸収量

試験体名称	Type SB				Type PSB				Type N			
Δ/H	1/250		1/150		1/250		1/150		1/250		1/150	
Cycle	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
ΔW (kN・mm)	1123.9	874.7	2454.6	2055.1	1026.2	949.9	2511.5	2122.9	227.0	122.6	477.9	275.5
W (kN・mm)	655.6	645.13	1378.9	1318.1	671.6	678.9	1439.7	1405.1	208.4	200.1	450.7	431.4
h_{ef}	0.136	0.108	0.142	0.124	0.122	0.111	0.139	0.120	0.087	0.049	0.084	0.051
ΔW_{UL} (kN・mm)	144.0	146.1	362.5	354.3	187.1	206.2	439.9	435.4	-	-	-	-
ΔW_{UR} (kN・mm)	164.8	157.1	365.3	361.9	141.2	163.1	367.0	377.5	-	-	-	-
ΔW_{DL} (kN・mm)	150.4	154.0	372.8	367.2	137.3	154.6	332.1	327.0	-	-	-	-
ΔW_{DR} (kN・mm)	157.1	154.2	347.9	343.8	158.4	180.9	390.5	397.9	-	-	-	-
h_{ed}	0.075	0.075	0.084	0.086	0.074	0.083	0.085	0.087	-	-	-	-
ΔW_F (kN・mm)	507.6	263.3	1006.0	627.7	402	245.1	982	585.1	227.0	122.6	477.9	275.5

ΔW：全体の履歴吸収エネルギー　W：最大変位時のポテンシャルエネルギー
$\Delta W_{UL}, \Delta W_{UR}, \Delta W_{DL}, \Delta W_{DR}$：上下左右履歴ダンパーの履歴吸収エネルギー
h_{ef}：RC架構の等価粘性減衰定数　h_{ed}：履歴ダンパーの等価粘性減衰定数
ΔW_F: RC架構(鉄骨フレームも含む)の履歴吸収エネルギー

の層間変位下では左上と右下の履歴ダンパーは圧縮力，右上と左下の履歴ダンパーは引張力がそれぞれ作用し，負方向の層間変位下では，左上と右下の履歴ダンパーは引張力，右上と左下の履歴ダンパーは圧縮力が作用する。5）TypeSB試験体とTypePSB試験体エネルギー吸収量はほぼ等しいが，層間変位角 Δ/H = 1/75振幅時では履歴ダンパー変位に微小であるが差が生じている。

4.3　鋼製束の回転角と層間変位角の関係

Fig.13には，鋼製束の回転角θ，と層間変位角 Δ/H との関係を示す。Fig.13から，TypeSB，TypePSB試験体の補強システムは最終サイクルの層間変位角までほぼ安定して鋼製束は回転し，鋼製束ははりの微小変形に良好に追随してい回転することが分かる。

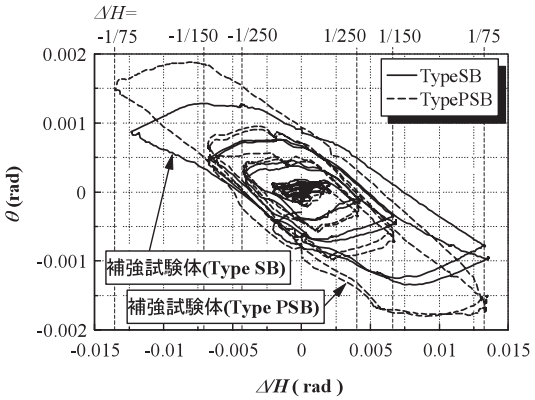
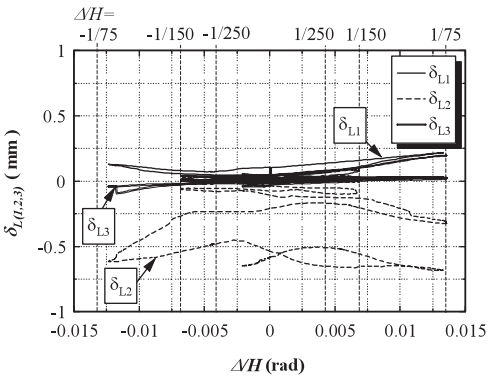


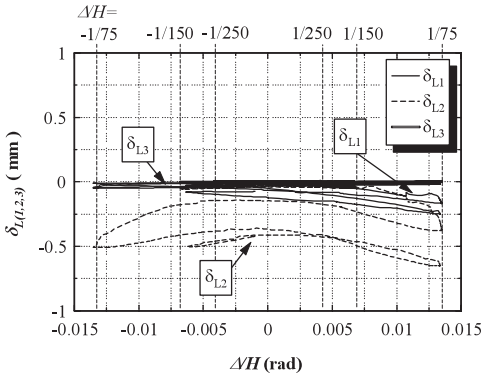
Fig.13　鋼製束の回転角と層間変位角の関係

4.4　RCフレームと鉄骨フレームとの相対変位関係

Fig.14 (a) TypeSB試験体，(b) TypePSB試験体におけるRCフレームと鉄骨フレームの相対変位関係$\delta_{L1}, \delta_{L2}, \delta_{L3}$と層間変位角，$\Delta/H$との間の関係から以下のことが分かる。1）RCフレームと鉄骨フレームとの接合形式によるあと施工アンカーのせん断変形の変位は小さい。2）弾性範囲時では，TypeSB試験体とTypePSB試験体を較べて差は生じないが，振幅が大きくなるにつれ顕著ではないがずれ変位に差が生じていることが分かる。このことから，従来型の接合方法（TypeSB試験体）でもRCフレームにおける層せん断力は，あと施工アンカーを介して外付け鉄骨フレームに良好に伝達されたと考えられる。



(a) TypeSB試験体

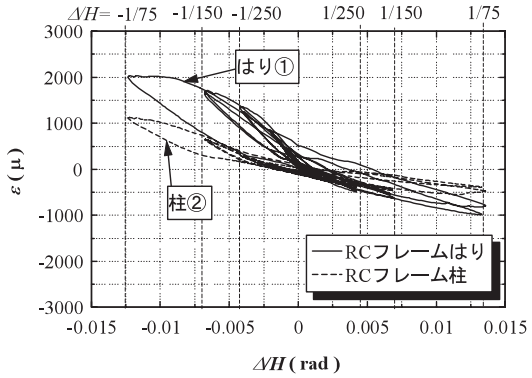


(b) TypePSB試験体

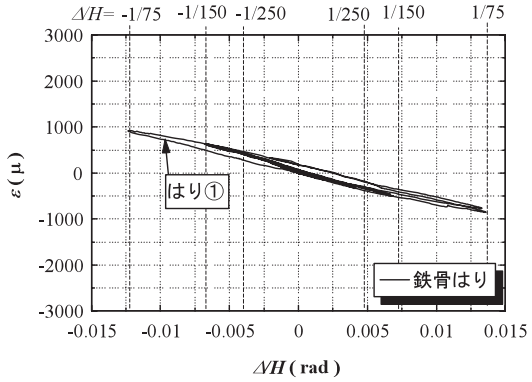
Fig.14　RCフレームと鉄骨フレームとの相対変位関係

4.5 RC フレームの柱・はり鉄筋及び鉄骨フレームのはりひずみ状況

Fig.15 には，TypeSB 試験体において各箇所で計測したひずみ値（ひずみゲージ位置は，Fig.8 (b)，(c) 参照），ε，と層間変位角 Δ/H との間の関係を示す。(a) には TypeSB 試験体の RC フレーム柱・はり鉄筋ひずみ値，(b) には TypeSB 鉄骨フレームはりに貼り付けたひずみ値をそれぞれ示す。RC フレームの鉄筋ひずみを柱とはりとで較べるとはり降伏先行型であること，鉄骨フレームはり端ひずみ値が線形であることからはり端部が降伏する性状は顕著には見られないこと，等のことが分かる。



(a) RC フレーム柱・はり鉄筋ひずみ

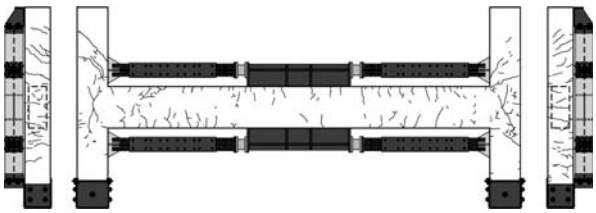


(b) 外付け鉄骨フレームはり端ひずみ

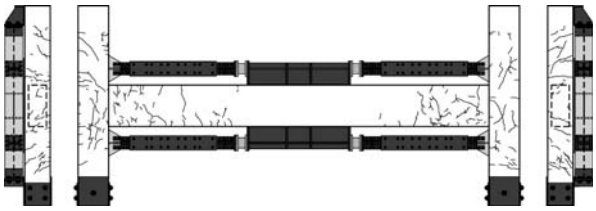
Fig.15 RC フレームの柱・はり鉄筋及び外付け鉄骨フレームはり端ひずみ状況

4.6 コンクリートひび割れ状況

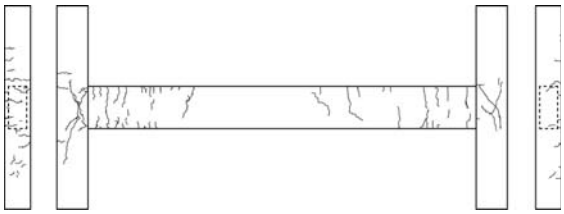
Fig.16 には，各試験体の層間変位角 Δ/H = 150 の第 2 サイクル後のひび割れ状況を（a）TypeSB 試験体，(b) TypePSB 試験体，(c) TypeN 試験体に，それぞれ，分けて示す。TypeSB，TypePSB 試験体は，はり端の接合部付近の曲げひび割れが先行し，Δ/H = 150 までに柱接合部のせん断ひび割れが生じた。また，RC フレームに鉄骨フレームの付加による偏心によって，RC フレーム柱にねじれひび割れが生じていることが分かる。TypeN 試験体は，はり端の接合部付近の曲げひび割れが先行して発生し，Δ/H = 150 までに接合部のせん断ひび割れが生じた。しかし，TypeN 試験体と較べひび割れが多いものの崩壊機構の変化がないことが分かる。



(a) TypeSB 試験体



(b) TypePSB 試験体



(c) TypeN 試験体

Fig.16 コンクリートひび割れ状況

5．ま　と　め

1）外付け鉄骨に組み込んだ 4 体の履歴ダンパーは，非常に小さな軸方向変形で塑性化し，エネルギー吸収する。

2）本システムを RC フレームに付加することにより，フレームにおける層せん断耐力が上昇する。

3）本システムによる RC フレームの崩壊機構は，変化しない。

4）RC フレームと外付け鉄骨フレームとの接合方法は，従来型の接合形式を用いても履歴ダンパーに及ぼす影響は顕著には生じない。

以上のことから，本システムは小さな層間変位下においても良好に動作することが確認でき，RC フレームにおける層せん断耐力とエネルギー吸収性能が向上する構造特性を有していること，RC フレームと外付け鉄骨フレームとの接合部を十分な剛性と耐力を設定すれば，従来型の外付け鉄骨補強方法でも本システムを設置することは可能であ

ることを示した。

謝　　辞

本研究は，広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」（代表者　高松隆夫教授）のプロジェクト研究の一環として実施されました。また，実験実施にあたり，2005年度広島工業大学工学部建築工学科高松研究室・玉井研究室の学生には，多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

1）尾木靖夫，他：はり下空間を利用したRC建物制震補強システムの開発（その１）～（その４）日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），構造Ⅲ，pp.499-506，2005．９。

2）尾木靖夫，他：はり下空間を利用したRC建物制震補強システムの載荷実験，鋼構造年次論文報告集，pp.385-392，2005．11。