

# 論文 RC 架構を対象とした外付け制振工法の補強効果に関する研究

住岡 良紀<sup>\*1</sup>・向井 智久<sup>\*2</sup>・北村 春幸<sup>\*3</sup>・佐藤 大樹<sup>\*4</sup>

要旨：本研究は，座屈拘束型の履歴減衰型制振ブレース(以下，制振ブレース)が，定着板及びグラウトを介して PC 鋼棒で RC 架構の外周に圧着される制振補強工法を対象とし，その設計法の確立を目的としている。本研究では，崩壊形の異なる 3 体の RC 架構試験体による静的繰返し載荷実験を行い，崩壊形の違いによる制振補強効果の違い，また制振ブレースのエネルギー吸収性能の低下の原因となる接合部のロス変形について明らかにし，その影響度と補強効果について考察する。

キーワード：外付け制振補強，ねじれ破壊，エネルギー吸収性能，ロス変形

## 1. はじめに

1995 年の阪神大震災を受けて耐震改修促進法が制定され、2006 年に同法の改正により今後 10 年間で耐震化率を向上すること目標・計画された。そこで耐震化率の向上を目標とした普及型耐震改修技術の開発の一つとして、既存 RC 造建物に対して効果的にエネルギー吸収を可能とする制振部材を用いて既存建物を高性能化させることは有効であると考えている。具体的には、内側補強工法に比べ簡易に取付けられる図-1 に示すような、既存 RC 建物の外周部に制振ブレースを定着板及びグラウトを介して PC 鋼棒圧着により外付けする工法(外付け制振補強工法)は有効であり、これまでに、外付け制振補強した RC 架構の静的繰返し載荷実験や制振ブレースと RC 架構の接合部(以下接合部)を取り出した要素実験を行い、制振補強効果や、RC 架構部の破壊性状を明らかにしてきた<sup>1),2)</sup>。RC 架構の応答変形制御型の補強工法は小変形からブレースが有効に働くことが重要であるが、ブレース端部のピン接合によるガタや、梁端部のねじれ変形などによるブレースのエネルギー吸収性能が低下する要因については明確に検討されていない。

そこで、本研究は外付け制振補強された崩壊形の異なる RC 架構の静的繰返し載荷実験を行い、崩壊形による RC 架構の破壊性状の違いを確認し、ブレースのエネルギー吸収性能を低下させるロス変形を示し、それらが補強効果に与える影響について検討する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体計画

表-1 に試験体一覧、及び各耐力、表-2 に各材料特性、図-2 に試験体配筋例と寸法を示す。試験体は 1 層 1 スパンラーメンを実大の 1/2 に縮小したモデルで、崩壊形の

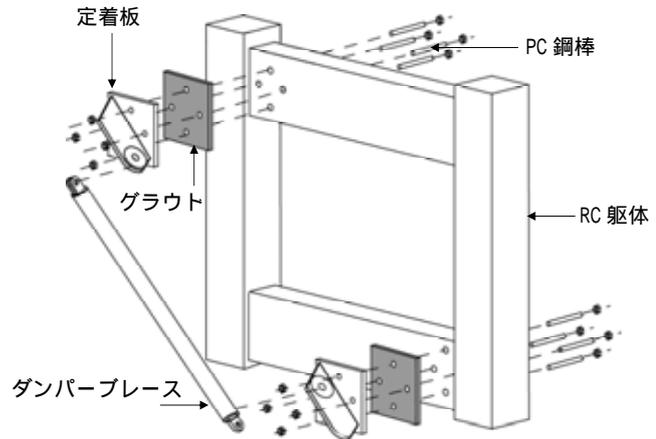


図-1 外付け制振補強工法

表 1 試験体概要

初期導入入力 (kN/本)	梁曲げ降伏型(Gb)	柱曲げ降伏型(Cb)	柱せん断破壊型(Cs)	垂れ壁
	216.0	231.3	231.3	
Mu (kNm)	81.5	150.5	264.0	
Qu (kN)	161.8	195.1	358.5	
b x D	200 x 425	200 x 425	200 x 425	60 x 387.5
上下端筋	6-D16(SD345)	6-D22(SD345)	6-D22(SD345)	2-D6(SD295)
あばら筋	2-D6(SD295)@50	3-D6(SD295)@50	3-D6(SD295)@50	1-D6(SD295)@200
Pw (%)	0.64	0.96	0.96	0.27
備考			垂れ壁付	Csの梁のみ
Mu (kNm)	106.7	108.7	108.7	
Qu (kN)	135.8	152.3	128.0	
b x D	300 x 300	300 x 300	300 x 300	
主筋	6-D19(SD345)	6-D19(SD345)	6-D19(SD345)	
帯筋	2-D6(SD295)@75	3-D6(SD295)@75	2-D6(SD295)@300	
Pw (%)	0.28	0.43	0.07	
備考				
oMu (kNm)	27.9	60.6	108.7	
Tuo (kNm)	30.9	44.3	44.3	

表-2 各材料特性

コンクリート			鉄筋		ブレース	
試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (x 10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	試験体名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験体名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
Gb	24.0	2.19	D6(SD295)	352.7	LYP225	221.3
Cb	25.7	2.26	D16(SD345)	398.3		
Cs	25.7	2.25	D19(SD345)	375.3		
			D22(SD345)	380.7		

\*1 東京理科大学 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)  
 \*2 独立行政法人 建築研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)  
 \*3 東京理科大学理工学部建築学科 教授 博士(工学) (非会員)  
 \*4 東京理科大学理工学部建築学科 助教 博士(工学) (非会員)

異なる3体(梁曲げ降伏型 Gb, 柱曲げ降伏型 Cb, 柱せん断破壊型 Cs)を製作した。各試験体とも 250kN 程度の層せん断耐力を目標に設計している。いずれも梁部材は、ブレース応力によりねじれ破壊しないよう設計している。また、せん断破壊する試験体は、たれ壁を設けて靱性指標 F 値が 1.0 のせん断柱となるよう設計している。柱・梁の曲げ終局強度  $M_u$ , せん断終局強度  $Q_u$ , 梁端部の面外曲げ終局モーメント  ${}_oM_u$ , ねじれモーメント  $T_{uo}$  は表-2 の材料特性を用いて文献3) A) より求めた。また、ブレース取付角度は全試験体共通して  $45^\circ$ , PC 鋼棒初期導入軸力は定着板が浮き上がり、かつ滑らないよう算出し(摩擦係数=0.63)<sup>2)</sup>, 150kN とした。

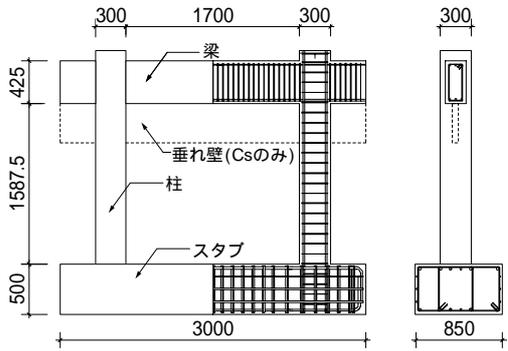


図-2 試験体寸法, 配筋例

## 2.2 加力計画

図-3 に RC 試験体を含めた荷重装置, 図-4 に荷重プログラムを示す。水平方向の荷重は両端のアクチュエータを同時に同方向に稼働させることで, RC 架構のみの加力を想定した場合に梁に軸力が作用しないよう考慮した。各柱にはオイルジャッキを用いて軸力比が 0.1(既存 RC 造 4 層建物の 2 階中柱の長期軸力相当)となる初期軸力を作用させた。荷重は RC 梁中央に設置した変位計(D39)により算出した層間変形角( $R=D39/\text{内法スパン}$ )で制御し,  $R=1/800, 1/600$  を 1 回ずつ荷重しブレースが降伏荷重に達した後, ブレースの履歴エネルギー吸収レベルとして  $R=1/400, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100$  を同一変形で 5 回繰返し荷重を行う。その後 RC フレームにもエネルギー吸収を期待するレベルとして  $R=1/75, 1/50$  の変形で 2 回繰返し荷重を行う。また, ブレース引張荷重時を正荷重とした。

## 2.3 計測計画

図-5 に変位計の設置位置, ひずみゲージの貼付位置を示す。本実験においては, ブレースのロス変形を計測するために, D45 でロードセルのガタ, D49, D50 でピンのガタをそれぞれ直接計測している。また, 変位計より算出するねじれ回転角  $\theta_t$ , 定着板浮き上がり回転角  $\theta_{ul}$ , 定着板滑り変位(RC-グラウト間, グラウト-定着板間の変位, グラウトのせん断変形とする)  $\delta_{s/}$  は式(1)~(3)による。

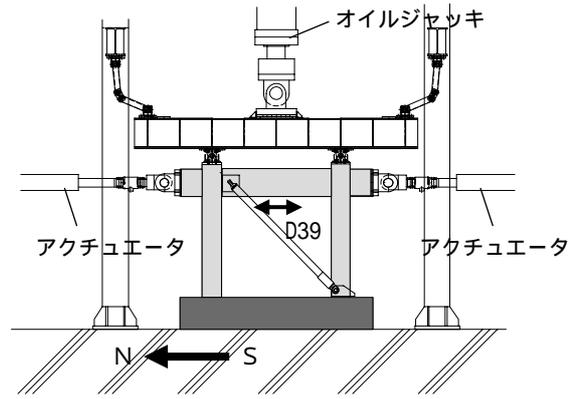


図-3 加力装置

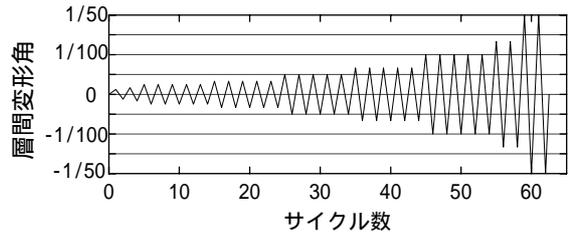
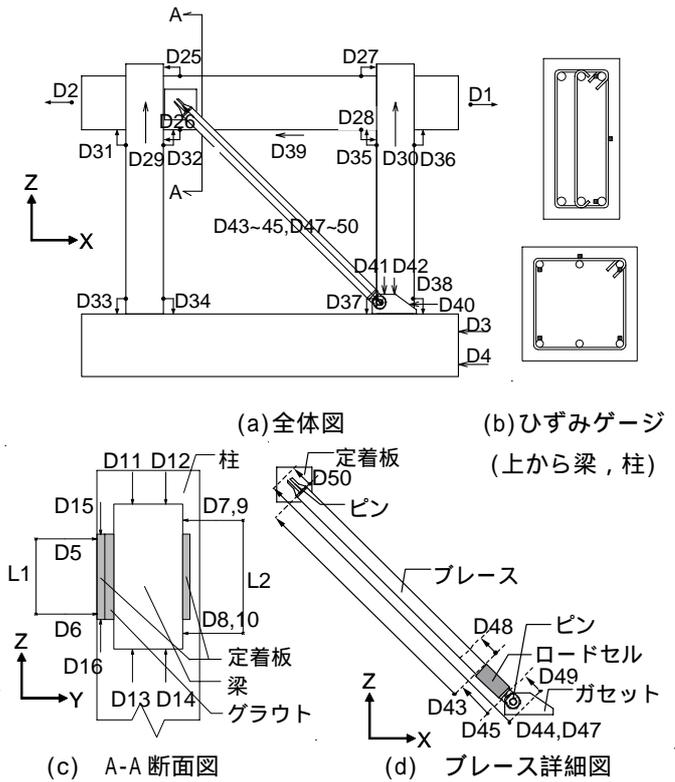


図-4 荷重プログラム

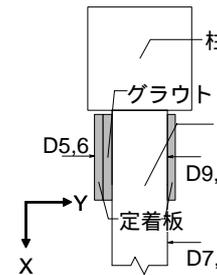


(a) 全体図

(b) ひずみゲージ (上から梁, 柱)

(c) A-A 断面図

(d) ブレース詳細図



(e) 接合部上面図

記号	変位計測内容	記号	変位計測内容
D1,2	アクチュエータ	D31~38	柱端部回転
D3,4	スタブ	D39	試験体水平
D5,6	定着板浮き上がり	D40	ガセット滑り
D7~10	梁端部ねじれ	D41,42	ガセット浮き上がり
D11~14	梁端部鉛直	D43,48	ブレース軸方向
D15,16	定着板浮き上がり	D44,47	両端ピン間
D25~28	梁端部回転	D45	ロードセル
D29,30	柱鉛直	D49,50	ピン

(f) 変位計測内容

図-5 計測計画

$$\theta_t = (D9 - D10)/L_2 \quad (1)$$

$$\theta_{ul} = (D5 - D6)/L_1 - \theta_t \quad (2)$$

$$\delta_{sl} = (D15 - D16)/2 - (D11 + D12 - D13 - D14)/4 \quad (3)$$

### 3 実験結果及び考察

#### 3.1 試験体の破壊性状及び各荷重 - 層間変形角関係

図-6 に各試験体のひび割れ状況(制振ブレース取付状

態での最終ひび割れ), 図-7 に全体(プロットは各降伏点), ブレース, フレームの各荷重 - 変位関係を示す。フレーム荷重は層せん断力からブレース荷重水平成分を除いたものと定義した。また, 図-7 の破線は各試験体の設計時のメカニズム時耐力を表す。

Gb の実験結果について述べる。R = 1/400rad 第 1 サイクル負荷荷時でブレースが降伏し( ), 次いで梁端部付

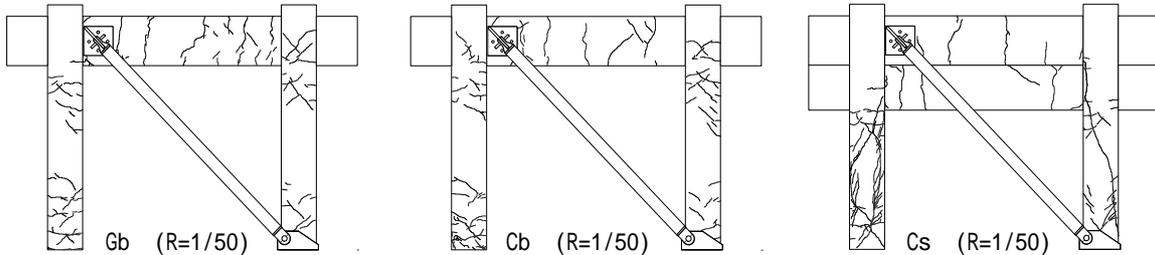


図 6-(a) 西側ひび割れ図

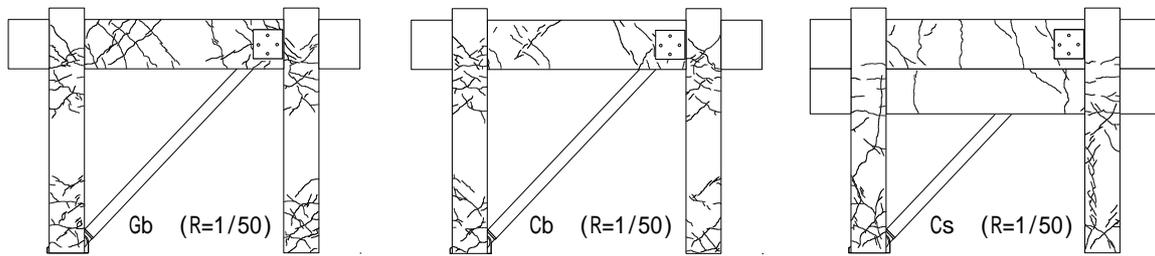


図 6-(b) 東側ひび割れ図

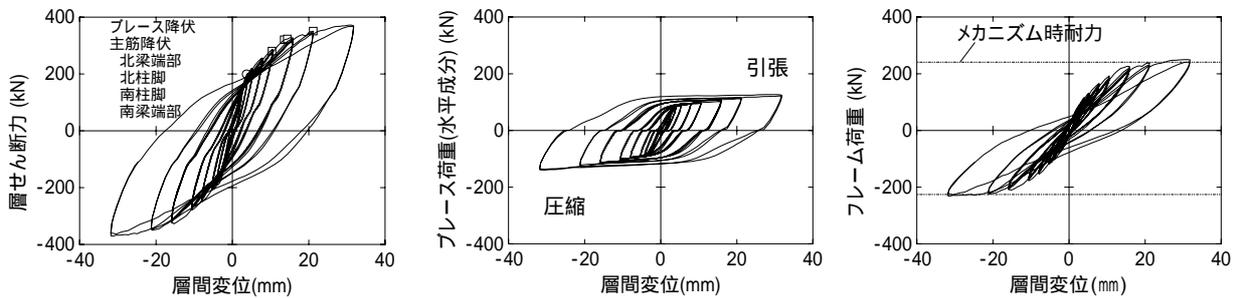


図 7-(a) 各荷重 - 層間変位関係 (Gb)

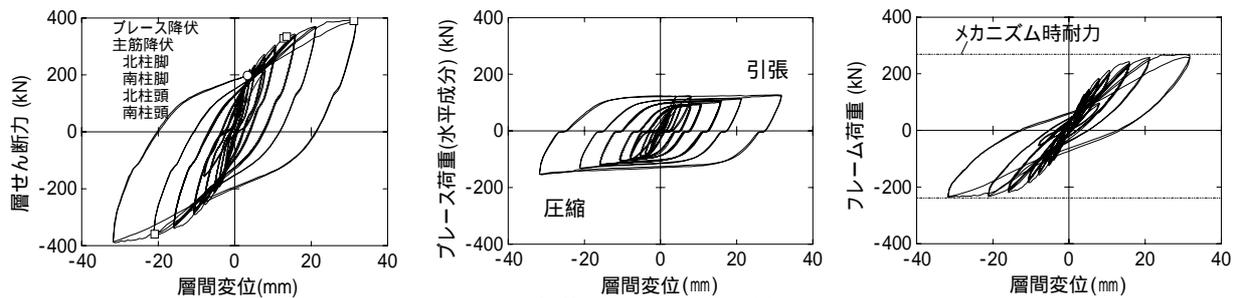


図 7-(b) 各荷重 - 層間変位関係 (Cb)

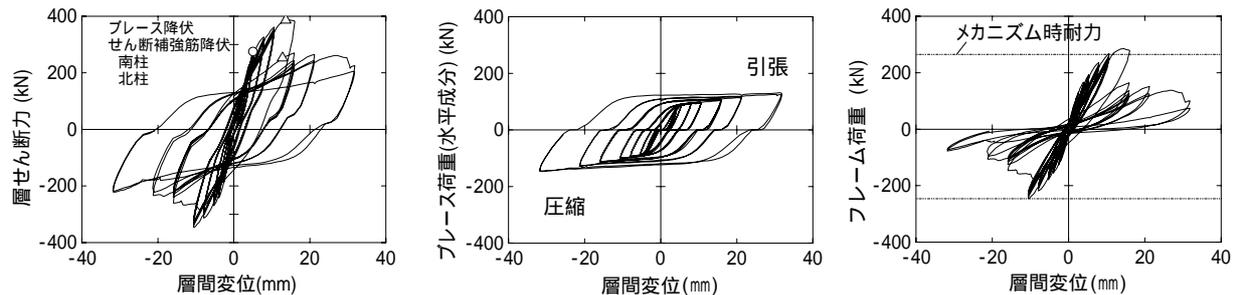


図 7-(c) 各荷重 - 層間変位関係 (Cs)

近にて曲げひび割れが見られた。 $R = 1/200\text{rad}$ では、第1サイクル正載荷時に北側梁端部の主筋が降伏した( )。  $R = 1/150\text{rad}$ では、第1サイクルの負載荷時に両柱脚部の主筋が降伏した( )。  $R = 1/75\text{rad}$ では、梁端部のねじれ変形が進行し梁中央にねじれによるひび割れが顕著に現れた(図6-(b) Gb)。  $R = 1/50\text{rad}$ では、南側梁端部の主筋が降伏し( )、設計時保有耐力に達し想定した梁曲げ降伏形の崩壊機構に至った。その際、梁端部のねじれ破壊には至らなかった。また、北側と南側の梁端部の比較より、ブレースを外付けすることにより、梁の損傷度合いが変わることも確認した。

Cbの実験結果について述べる。 $R = 1/400\text{rad}$ の第1サイクル正載荷時にブレースが降伏し( )、北側梁端部付近にてひび割れが見られたが(図6-(a,b) Cb)、その後はひび割れが進行するが、幅の大きなひび割れは見られなかった。 $R = 1/100\text{rad}$ の正載荷時に両柱脚部の主筋が降伏し( )、また北側の梁端部にねじれ変形によるひび割れが見られたが、Gbと比較すると損傷度は少なかった(図6-(b) Cb)。 $R = 1/75\text{rad}$ の第1サイクル負載荷時に北柱頭の主筋が降伏( )、 $R = 1/50\text{rad}$ の第1サイクル正載荷時に北柱頭の主筋が降伏し( )、設計時保有耐力に達し想定した柱曲げ降伏形の崩壊機構に至った。その際、Gbと比較すると梁端部の損傷は少なかった。

Csの実験結果を述べる。Csは他の試験体に比べクリアランスの大きいピン(= ± 0.6mm)を用いたため、 $R = 1/400\text{rad}$ ではブレースが降伏しなかった。 $R = 1/300\text{rad}$ でブレースが降伏し( )、柱頭、柱脚部でひび割れが見られ始めた。 $R = 1/200\text{rad}$ ではせん断ひび割れが見られ、 $R = 1/150\text{rad}$ では付着割裂を伴うせん断ひび割れが発生した。 $R = 1/100\text{rad}$ では南柱のせん断補強筋が降伏し( )、その後破裂音と共にせん断補強筋が破断し、せん断破壊を起こして急激な耐力低下が見られ、その際、北柱では付着割裂を伴うせん断ひび割れが顕著に見られるようになった(図6-(a) Cs)。 $R = 1/75\text{rad}$ で北柱のせん断補強筋も降伏し( )、また南柱ではせん断補強筋の破断が1回、 $R = 1/50\text{rad}$ でも1回発生し、さらに耐力の低下が進み、 $R = 1/50\text{rad}$ の2サイクル目途中で柱の軸方向に縮む変形が増大し、軸力保持限界状態に至ったため載荷を終了し

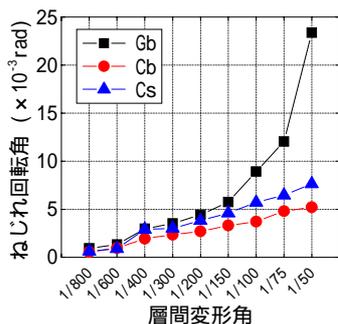


図-8 ねじれ回転角

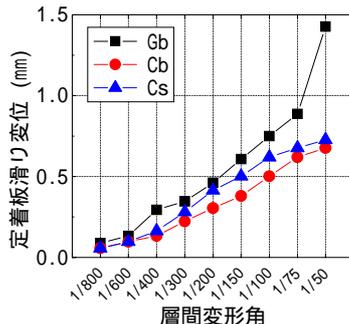


図-9 定着板滑り変位

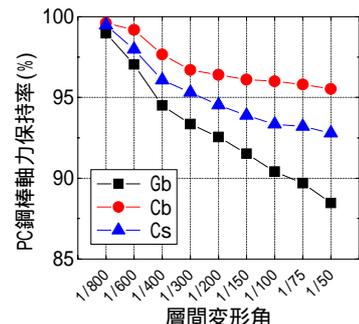


図-10 PC鋼棒軸力保持率

た。しかし、柱のせん断破壊後から  $R = 1/50\text{rad}$  の1サイクル目までは、ブレースはエネルギー吸収を行った。また、梁の損傷はCb試験体と同程度と小さかった。

また、全試験体に共通して、ブレース取付裏側の梁せい面でねじれひび割れが見られた。

### 3.2 PC鋼棒軸力保持率と梁端部損傷の関係

図-8にねじれ回転角 $\theta_t$ 、図-9にRC-定着板間滑り変位(以下定着板滑り変位) $\delta_{s/l}$ 、図-10にPC鋼棒軸力保持率(=PC鋼棒軸力/PC鋼棒初期導入軸力)を、それぞれRとの関係を示す。

図-8より、Cb、Csに比べ、Gbが $R = 1/100\text{rad}$ を超えてから $\theta_t$ が急激に増えていることがわかる。これは、他の試験体に比べGbは梁端部のねじれ耐力の余裕度が小さく、かつ梁端が曲げ降伏する試験体であるために、ねじれ変形が大きく進んだといえる。

図-9より、Cb、Csに比べ、Gbが $R = 1/100\text{rad}$ を超えてから $\delta_{s/l}$ が急激に増えていることがわかる。また、図-3より、PC鋼棒軸力保持率が、Cb、Csは90%以上を保持しているのに対し、Gbは $R = 1/100\text{rad}$ を超えたあたりから80%台まで低下している。さらに図-8と図-10より、 $\theta_t$ の増加とPC鋼棒軸力保持率の減少が対応している。

つまり、梁のねじれ変形および梁端部のひび割れ損傷の増大に伴い、PC鋼棒の軸力が減少し、定着板の圧着度が減少することで、滑り変位が増大することがわかった。

### 3.3 各ロス変形

ブレースの変形性能低下の原因と考えられるロス変形は、梁端部のねじれ変形、面外曲げ変形、定着板の滑り変位、定着板の浮き上がり変位、ピンのガタ、本実験においてはブレースに設置したロードセルのガタの変形成分で構成されると考えている。

図-11に、各ロス変形の和にブレース変位を加えた値と、幾何学的変位(=全体水平変位(図5 D39)から幾何学的に求まるブレース軸方向成分)値を、層間変形角ごとに示す。各ロス変形は全てブレース軸方向で示しており、ピン、ロードセルについては計測結果を直接使い、定着板の滑り変位は式(3)をブレース軸方向に変換したものの、ねじれ変形 $\delta_{td}$ については式(4)に算出方法を示す。

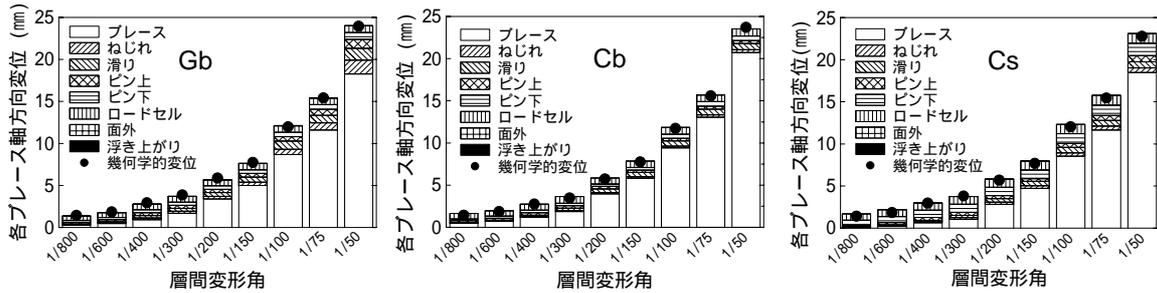


図-11 各ブレース軸方向変位 - 層間変形角

$$\delta_{ul} = \frac{b}{\theta_i} \left( 1 - \sqrt{1 - \theta_i^2} \right) \cos \phi \quad (\theta_i = 0 \text{ の時, } \delta_{ul} = 0) \quad (4)$$

ここに、 $b$  : 梁の幅(mm),  $\phi$  : ブレース取付角度(°)

図-11 より、全試験体ともブレース変位と各ロス変形の和が概ね幾何学的変位とほぼ一致した結果が得られた。また、ロス変形の主たる成分は、梁端部のねじれ変形、定着板の滑り変位、ピンのガタ(本実験においてはロードセルのガタ)であることが確認できた。

### 3.4 エネルギー吸収

図-12 にブレースの制振補強効果を表す指標として、ブレース軸方向変位の水平成分と RC 架構の層間変位との比率(実効変形比)を層間変形角ごとに示す。図-13 にフレームとブレースのエネルギー吸収量( $W_f, W_d$ )を 1 サイクル当たりでの算出結果を棒グラフ(右軸)で、全体に対するフレームとブレースのエネルギー吸収割合( $W_f/W, W_d/W$ )を線グラフ(左軸)で層間変形角ごとに示す。各エネルギー吸収量は図-7 において用いた荷重と各変位(ブレース変位は水平成分) 関係から算出した。

図-12, 13 の結果から、全試験体共通して、小変形時にはピンおよびロードセルのガタの影響から実効変形比が小さく、ブレースは機能していないことがわかる。また、図-12 よりブレースが降伏した  $R=1/400\text{rad}$  並びに  $R=1/300\text{rad}$  を境に実効変形比が上がり、補強効果が始めていることがわかる。

Cb は、図-11 から、最もロス変形が少なかった試験体であり、図-12 から、実効変形比が最も高い割合を示し、図-13 から、ブレースのエネルギー吸収量が最も多い結果となり、補強効果も高かったといえる。

Gb は、図-12 から、他の試験体に比べ  $R=1/150\text{rad}$  を超

えるとダンパーの実効変形比の上昇する割合が小さいことがわかる。これは、図-11 より、梁端部のねじれ変形、また、それに伴う定着板の滑り変形の影響が大きいと考えられる。図-13 のエネルギー吸収量を見ても Cb に比べブレースのエネルギー吸収量は  $R=1/150\text{rad}$  から少なくなっており、ある変形以上から補強効果が低下している。

Cs は、ピンのクリアランスが他の試験体に比べ大きいものを用いたため、図-12 より、小変形時の実効変形比が最も低い結果となったが、 $R=1/75\text{rad}$  までで見ると、最終的に 8 割まで上昇していることと、図-13 のエネルギー吸収量としては、Gb 相当の結果が得られていることがわかる。また、南柱がせん断破壊した  $R=1/100\text{rad}$  後もブレースの性能は低下していないことがわかる。このことから、柱が軸力保持能力を有していれば、ある程度の補強効果が得られることになる。

全試験体共通して、 $R=1/50\text{rad}$  までブレースは、図-12 から実効変形比で 80%以上、図-13 からエネルギー吸収割合で全体の 50%以上であり、十分な制振補強効果が得られているといえる。

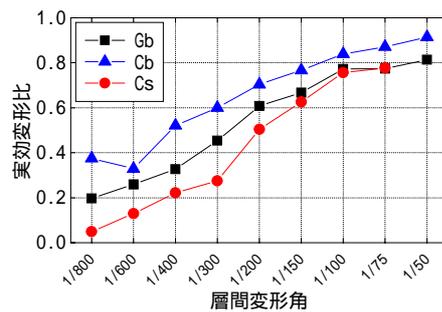


図-12 実効変形比

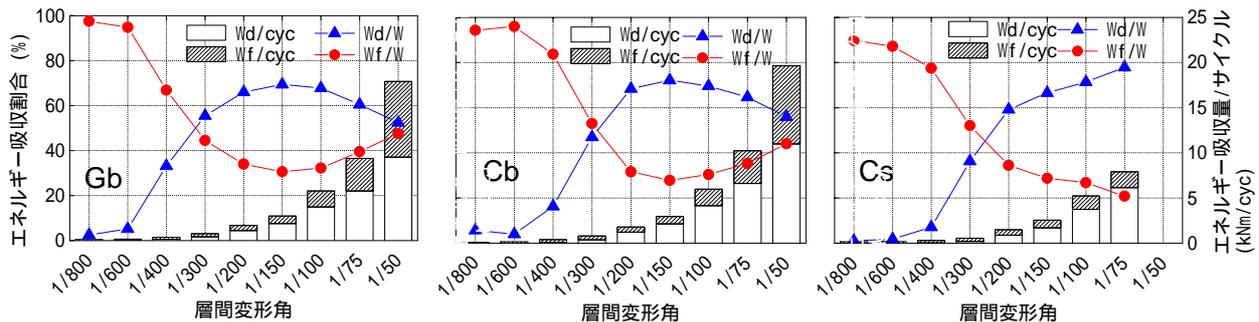


図-13 ブレースとフレームのエネルギー吸収量と吸収割合

#### 4. 面外曲げ，ねじれ耐力の余裕度に関する検討

接合部の設計を行う上で接合部に発生する応力を把握することは重要であり，過去には RC 梁端部とブレース端部接合部を再現した試験体 1～8 の要素実験を行っている<sup>1)</sup>。表-3 に要素試験体の概要を示す。

図-14 に，面外曲げ余裕度  $R_o$ ，ねじれ余裕度  $R_t$  の結果を，RC 架構試験体と要素試験体を併せて示す。ここで， $R_o, R_t$  は実験最大面外曲げ応力  $\sigma_{Mu}$ ，ねじれ応力  $M_{tu}$  (式(5)，(6))に対する計算面外曲げ耐力  $\sigma_{Mu}$ ，ねじれ耐力  $T_{uo}$  の比を算定したものであり，破壊モードに至らないことを保証するための必要な余裕度である<sup>1)</sup>。

$${}_oM_u' = e \cdot P_{dmax} \cdot \sin \phi \quad (5)$$

$$M_{tu} = e \cdot P_{dmax} \cdot \cos \phi \quad (6)$$

ここに， $e$ ：梁材芯からブレース端部までの偏心距離 (m)

$P_{dmax}$ ：実験時ブレース最大荷重 (kN)

過去の要素試験体の結果では，ねじれ破壊が起らなかった試験体 3 の  $R_t=1.72$ ，試験体 4 の  $R_o=1.41$  を下限値として各余裕度と定めていた(試験体 2 は，面外曲げ降伏の影響でねじれ余裕度が大きくてもねじれ破壊が起こる結果となった)。しかし，今年度の Gb は，いずれの余裕度も下限値を下回っているにも関わらず，最終的に梁端部がねじれ破壊に至っていない試験体である。これは，架構試験体，要素試験体の梁端部の境界条件の違いにより，作用する応力が変化し，結果として梁端部の余裕度が大きくなったことによるものと思われる。また，スラブ付きの試験体 8 の結果から，実際にはスラブの効果によって各耐力が大きく評価できるとも併せて勘案すれば，少なくとも Gb において，ねじれ余裕度 1.12 かつ面外曲げ余裕度 1.00 程度を確保すれば梁端部の破壊には至らないと考えられる。しかしながら，前述したとおり接合部の損傷が大きくなることでロス変形が増大し，エネルギー吸収性能が低下するため，設計の際にはその点に十分留意する必要がある。

#### 5. まとめ

本研究より以下の知見を得られた。

- (1) 各崩壊形架構に関して以下のことがいえる。
  - ・梁曲げ降伏型試験体は，梁端部のねじれ耐力の余裕度が他の試験体に比べ低いために，梁曲げ降伏時点以降の変形レベルで，梁端のねじれ変形および梁端のひび割れ損傷が大きくなり，PC 鋼棒の軸力が低下することに伴う定着板の滑り変位が卓越し，ブレースによるエネルギー吸収性能が低下する。
  - ・柱曲げ降伏型試験体は，梁が十分なねじれ耐力を有していたため，安定した制振ブレースのエネルギー吸収が確認できた。
  - ・柱せん断破壊型試験体は，柱のせん断破壊後も柱が

表-3 要素試験体概要

試験体	スラブの有無	破壊性状
1,2,5～7	無し	ねじれ破壊
8	有り	
3,4	無し	ねじれ破壊に至らず

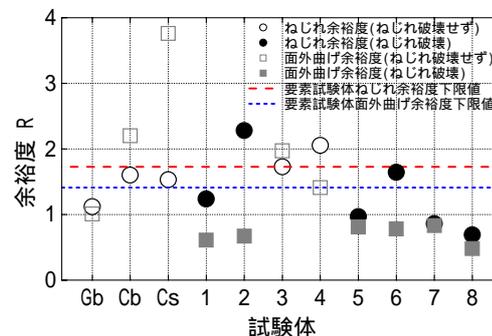


図-14 面外曲げ，ねじれ余裕度

軸力保持能力を有していれば，ブレースのエネルギー吸収性能は確保される。

- (2) 制振ブレースのエネルギー吸収性能に影響を及ぼすロス変形は，ピンのガタ，梁のねじれ変形，定着板の滑り変位による成分である。
- (3) 面外曲げ，ねじれ耐力の余裕度について，今年度の梁曲げ降伏型試験体の面外曲げ余裕度 1.00，ねじれ余裕度 1.12 を用いれば，ブレースによる応答制御の効果があるが，ブレースに期待するエネルギー吸収性能は，梁のねじれ耐力の余裕度および RC 躯体の応答層間変形を勘案して適切に考慮する必要がある。

#### 謝辞

本検討は，(独)建築研究所の研究課題「耐震化率向上を目指した普及型耐震改修技術の開発 (H18-20)」の鋼構造分科会(主査：北村春幸)にて行われた。分科会委員に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 箕輪田翔ほか：外付け制振補強された既存 RC 建造物の耐震補強設計手法に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集(中国)，pp.651-654，2008.9
- 2) 向井智久ほか：梁端部のねじれ挙動を考慮した外付け制振補強 RC 架構に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.584，pp.139-146，2004.10
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料，1991.9
- 4) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2007年度版 建築物の構造関係技術基準解説書，全国官報販売協同組合，2007.8