# 論文 繰り返し斜め載荷下における制振ブレースを外付けしたRC造の 梁端部および取付部の破壊性状と評価手法

石田陽一\*1·向井智久\*2·石井匠\*3·北村春幸\*4

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,制振ブレースとする)を, 定着板を介して PC 鋼棒で架構の外周に圧着する既存 RC 構造物の制振補強構法について, その設計法を確立する事を目的とする。本論ではフレーム実験に先立って行った,制振ブ レース取付部の繰り返し斜め載荷要素実験より,定着板が取り付く梁端部に制振ブレース 軸力が局所的に作用する場合の梁端および取付部の破壊性状の把握と,制振効果を発揮で きる変形性能を確保するための既存設計式の検証について報告する。

**キーワード**:制振補強,外付け, PC 鋼棒, ねじれ破壊, コッター形状

#### 1. はじめに

近年,従来の強度型の補強では制約が生じる耐 震補強の可能性を広げる目的で,免震・制振改修 が既存 RC 構造物にも適用され始めた。制振改修 では,制振部材が早期に降伏して多くのエネルギ ーを吸収するため既存構造物も損傷が軽減できる 事,外周架構のみに限定して補強すれば執務を続 けながら工事ができる事などの利点がある。今日, 外付けフレームの増設による補強に関する研究・ 実施例は数多く報告されており,2001 年度に改訂 された「既存 RC 造建築物の耐震改修設計指針・ 同解説」においても,外付けフレームの増設によ る補強の項が新たに加わった。しかしながら,制 振改修の利点を生かした外付け制振補強構法では, 建物外部に制振部材を偏心取付けする事になり,



図-1 RC フレーム実験試験体図

取付部の強度・剛性に加えて, 偏心による RC 架 構への影響を考慮する必要がある。

本研究では、外付けフレームより簡易に取り付けられる制振補強構法として、図-1に示すような 既存 RC 躯体の外周部に座屈拘束型の履歴減衰型 制振ブレースを PC 鋼棒圧着により外付けする構 法を対象としている。北嶋らは、履歴減衰型制振 ブレースを、定着台を介して建物外部に取付けた 際の取付部に関する検討を行っている<sup>1)</sup>が、制振 ブレースからの荷重が斜め入力する際に梁端部に 生じる引張力に対する破壊性状は明らかにされて おらず、取付部の破壊に関して検討の余地がある と言える。また、制振ブレース端取付部の破壊性 状に着目すると、既往の研究では定着板裏面のコ ッターとして異形鉄筋D10 溶接が提案されてい る <sup>2)</sup>が、摩擦面における破壊性状が不明瞭であり 評価が難しい。

そこで、本論は制振ブレース取付部の繰り返し 斜め載荷要素実験に基づいて、梁端部に制振ブレ ース軸力が局所的に作用するときの RC 梁端部お

衣-1 14() (1) () () () () () () () () () () () () ()									
	0.2%耐力又 は下降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)	降伏比(%)	試験片				
LY100	$100\pm20$	200以上 300以下	50以上	60以下	JIS Z 2201 5号				

表−1 低降伏点鋼の機械的性質

\*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻(正会員)

\*2 東京理科大学理工学部建築学科 助手・工博(正会員)

\*3 JFE 技研 土木・建築研究部 工博

\*4 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

よび取付部の破壊性状の把握,および制振ブレース取付部や RC 梁端部に適用する既存設計式の検証を目的とした。対象とする履歴減衰型制振ブレースは,低降伏点鋼を用いた座屈拘束型ブレースで,**表-1**に機械的性質を示す。

## 2. 既存設計式に基づく取付部の設計

#### 2.1 設計概念

制振ブレース取付部の設計に当たって、制振ブ レースの降伏荷重  $_{\rm D}P_{\rm Y}$  と終局荷重  $_{\rm D}P_{\rm U}$ , 面外に斜 めにブレース材が取り付く事から既存 RC 梁部材 の局所的な引張ねじれ・圧縮ねじれ荷重に対する 終局耐力  $_{\rm G}Q_{\rm U}$ , 定着板の浮上がり荷重  $_{\rm B}P_{\rm A}$  とグラ ウト部のせん断破壊荷重  $_{\rm B}P_{\rm U}$ を求める必要がある。 制振効率を高めるためには、制振ブレースが降伏 した後,定着板と梁部材が無損傷で十分な剛性を 保ち,定着板の浮き上がりやずれがほとんど生じ ない事,過大な外乱に対する安全性を確保するた めには、終局耐力が変形能力の高い部材で決まる 事が必要となる。従って、それぞれの値が下記の 条件式を満たす事が求められる。

$${}_{\mathrm{D}} P_{\mathrm{Y}} \leq_{\mathrm{B}} P_{\mathrm{A}} \tag{1}$$

$${}_{\mathrm{D}}P_{\mathrm{U}} \leq_{\mathrm{B}}P_{\mathrm{U}} \leq_{\mathrm{G}}Q_{\mathrm{U}} \tag{2}$$

<sub>D</sub>P<sub>Y</sub>, <sub>D</sub>P<sub>U</sub>は**表**-1 により, それ以外の各部強度の既 存設計式を以下に示す。

#### 2.2 RC 躯体部の設計式

RC 梁のねじれ終局耐力 <sub>G</sub>Q<sub>U</sub>は, 文献 3)を参考 にし,式(3)で算出する。

GQu=GTU/h (3) h:梁面からブレースピンまでの高さ(図-2 参照,本実 験では全ての試験体で h=117mm), GTU:梁の終局ねじ れモーメントで以下の式で与えられる。(式中記号は文 献 3)を参照)

$$_{\rm G}T_{\rm U} = 1.01 \frac{{\rm B}^2 \cdot {\rm D}}{\sqrt{{\rm B}}} \sqrt{{\rm F}_{\rm c}} + \left(0.66{\rm m} + 0.33 \frac{{\rm d}_0}{{\rm b}_0}\right) \frac{{\rm A}_0 \cdot {\rm a}_{\rm v} \cdot {\rm \sigma}_{\rm vy}}{{\rm s}}$$
 (4)

# 2.3 定着板取付部の設計式

定着板の浮き上がり荷重<sub>B</sub>P<sub>A</sub>は, PC 鋼棒の初期 導入軸力 Pa に条件を与えて式(5)で求める。

$${}_{B}P_{A} = \frac{Z \times \sum Pa}{h \times A}$$
(5)

ただし、 $Pa > Pa_1$ かつ $Pa > Pa_2$ 

$$Pa_1 = \frac{M_e/Z \times A}{鋼棒の本数}$$
  $Pa_2 = \frac{ブレ-ス強度 \times 安全率}{鋼棒本数 \times 摩擦係数}$   
ここで、 $M_e$ : 偏心曲げモーメント(=制振ブレース強度  
×安全率×h)、Z: 断面係数、A: 定着板面積

グラウト材のせん断破壊荷重<sub>B</sub>P<sub>U</sub>は,プレキャ スト RC 部材接合部の設計式<sup>4)</sup>を基に,圧縮軸力 下の摩擦抵抗とシアキーの支圧耐力の累加式とし て式(6)で与える。

$${}_{B}P_{U} = n_{sky} \cdot Q_{sky} + \mu \cdot N \tag{6}$$

ここで、n<sub>sky</sub>:シアキー個数、μ:摩擦係数(文献 4)より 0.55 とする)、N:接合面に生じる圧縮軸力(=PC 鋼棒 数×PC 鋼棒の初期導入軸力)、Q<sub>sky</sub>:シアキーの支圧耐 力で以下の式で与える。

$$Q_{sky} = A_{p} \cdot \sigma_{B} \cdot (1 + \gamma)$$
(7)

ここで、 $A_p$ :シアキーの支圧面積、 $\sigma_B$ :グラウトの圧縮 強度、  $\gamma$ : 圧縮軸力による耐力増加割合  $[\gamma = 3.55 \sqrt{\sigma_N / \sigma_B}]$ 、 $\sigma_N$ : 接合面に生じる圧縮軸力 応力度

#### 3. 実験概要

## 3.1 試験体計画

本論では、梁端部に制振ブレース軸力が局所的 に作用するときの RC 梁端部および取付部の破壊 性状の把握および既存設計式に基づく取付部の設 計の検証をより詳細に行うために、フレーム実験 に先立って制振ブレース取付部の繰り返し斜め載 荷要素実験を行った。試験体は図-1の□部分をモ デル化した図-2に示す 1/2縮小モデルである。表 -2 に試験体一覧を,表-3,4 に使用した材料特性 を示す。試験体の実験変数は、既存躯体の断面形 状, コンクリート強度, 定着板裏に取付けたコッ ターの形状を主変数とし、その他に PC 鋼棒の初 期導入軸力を副変数として,試験体を計5体製作 した。定着板のRC躯体への定着方式はすべてPC 鋼棒式とした。定着板裏面のコッター形状は図-3 に示す。なお、定着板に取り付くブレースは定着 板の破壊性状を十分把握できるまで降伏させない ようにしている。試験体は以下の破壊性状を把握 するため、シリーズ1とシリーズ2に大きく分け

られる。

シリーズ1 (PC18-45,PC18-D10)は, RC 躯体のね じれ破壊が先行する場合を想定し, 偏心斜め荷重 に対する梁部材の終局耐力の検証と RC 梁端部の ねじれ破壊性状の把握を目的とする。PC 鋼棒の初 期導入軸力は定着板の浮き上がりが生じないよう に 100kN とした。

シリーズ 2(PC30-0,PC30-45,PC30-90)は, RC 梁 端部がねじれ破壊せず,まず定着板の浮き上がり を生じさせ,最終破壊性状がグラウトのせん断破 壊となることを想定し,定着板裏面のコッター形 状がグラウトの破壊に与える影響やその評価およ び制振ブレース端取付部の破壊性状の把握を目的 とする。そのため, RC 躯体のねじれ破壊が起こ る前に定着板が浮き上がるように PC 鋼棒の初期 導入軸力は 50kN とした。

## 3.2 実験方法

図-4 に載荷装置を示す。載荷プログラムは、ア クチュエータにより 10~20kN ピッチで各 2 サイ クルずつ最大耐力まで漸増繰返し載荷する。最大 耐力以降もしくは試験体の破壊性状に変化があっ

		• • •				
	シリ-	-ズ1	シリーズ2			
	PC18-45	PC18-D10	PC30-0 PC30-45 PC30-9			
定着方式			PC鋼棒式			
RC躯体	6-D13(	SD295)	6-D22(SD390)			
配筋	Hoop:D6@1	00(SD295)	Hoop:D6@100(SD295)			
断面	200mm>	× 300mm	200mm × 400mm			
設計強度	Fc=18	3N/mm <sup>2</sup>	$Fc=30N/mm^2$			
PC鋼棒径	17	Φ	15Φ			
導入軸力	100	0kN	50kN			
コッター形状	45° コッター	D10溶接	コッターなし	45° コッター	90゜コッター	
グラウト代	28mm	18mm	18mm	28mm	28mm	

表-2 試験体一覧

表-3 コンクリート・グラウトの材料特性

		グラウト		
試験体名	引張強度	圧縮強度	ヤング係	圧縮強度
	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	数(N/mm <sup>2</sup> )	$(N/mm^2)$
PC18-45	1.51	18.1	$1.95 \times 10^{4}$	40.7
PC18-D10	1.65	16.8	$2.00 \times 10^{4}$	40.1
PC30-0	2.72	31.9	$2.65 \times 10^4$	6.0
PC30-45	2.12	34.0	$2.81 \times 10^{4}$	21.6
PC30-90	2.1	32.1	$2.67 \times 10^{4}$	16.2

# 表-4 鉄筋の材料特性

試験体名	呼び名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)	降伏比(%)
PC18-*	D13	352.01	478.30	16.94	73.60
	D6	323.12	480.48	18.01	67.25
PC30-*	D22	428.83	613.11	16.39	69.94
	D6	337.28	471.53	16.68	71.57

た後は耐力が頭打ちになった側を変位制御に切り 替え,耐力に余裕がある側はそのまま荷重制御で 載荷を続けた。変位制御は,シリーズ1では RC 躯体変位  $\delta_c$ ,シリーズ2では定着板変位  $\delta_s$ によっ て制御した。 $\delta_c$ , $\delta_s$ はそれぞれ式(8),(9)により求 めた。

$$\delta_{\rm c} = \frac{\delta 1 + \delta 2 + \delta 3 + \delta 4}{4} - \frac{\delta 11 + \delta 12 + \delta 13 + \delta 14}{4} \quad (8)$$

$$\delta_{s} = \frac{\delta 9 + \delta 10}{2} - \frac{\delta 1 + \delta 2 + \delta 3 + \delta 4}{4} \tag{9}$$

また、測定項目は載荷荷重、試験体各部の変位





	計算値				実験値					
		0	<sub>в</sub> Рц	<sub>в</sub> Рц	定着板浮き上がり荷重		最大荷重		主筋降伏	フープ筋
百八 局央 144	вРа	GQU	$(\mu = 0.55)$	$(\mu = 0.63)$	引張側	圧縮側	引張側	圧縮側	荷重	降伏荷重
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
PC18-45	100.0	102.0	413.7	445.8	ドレート		88.7	-332.6	66.5	降伏せず
PC18-D10	100.0	102.6	413.7	445.8	́не⊥	かりなし	97.0	-178.8	65.2	降伏せず
PC30-0		233.4	110.0	126.0	82.4	-88.7	173.9	-126.0	降伏せず	118.5
PC30-45	83.4	234.4	211.1	227.1	85.9	-83.9	250.2	-230.8	124.1	154.5
PC30-90		233.5	_	_	79.7	-80.4	228.7	-190.6	205.1	178.8

表-5 計算結果および実験結果一覧

および歪みについて行った。図-5 に変位計取付け 位置,図-6 に主筋と補強筋それぞれのゲージ貼付 位置を示す。変位は、δ1~δ6 で RC 躯体の変位を、 δ7・δ8 で定着板の浮き上がり変位を、δ9・δ10 で定 着板のずれ変位を、δ11~δ18 でベース部の変位を 計測している。

# 4. 要素実験結果

表-5 に実験結果および計算結果を、図-7~10 に各試験体の制振ブレース荷重と躯体変形角 $\phi_{c}$ 、 躯体回転角 $\theta_{c}$ 、定着板変形角 $\phi_{s}$ 、定着板回転角  $\theta_{s}$ の関係をそれぞれ示す。各値は以下の式(10)~ (13)で算出した。ただし、変位計高さをH(125mm)、 梁せいをD(300mm)とする。

$$\phi_{\rm c} = \delta_{\rm c} \,/\,{\rm H} \tag{10}$$

$$\theta_{\rm c} = \left(\delta 5 - \frac{\delta 15 + \delta 17}{2} + \delta 6 - \frac{\delta 16 + \delta 18}{2}\right) \times 1/D \quad (11)$$

$$\phi_{\rm s} = \delta_{\rm s} \,/\,{\rm H} \tag{12}$$

$$\theta_{s} = (\delta 7 - \delta 5 + \delta 8 - \delta 6) \times 1/D$$
(13)



なお,本論では制振ブレース軸力が引張側になる 時を正載荷,圧縮側になる時を負載荷とした。

#### 4.1 試験体の破壊状況

シリーズ 1 の試験体の破壊性状は,正載荷時, 初めに RC 梁端部にひび割れが生じ,ほぼ同時に 最も引張を受ける主筋が降伏した。その後荷重が 増加しても,RC 躯体のひび割れが進行するのみ で,定着板とグラウト部,グラウト部と躯体の境 界には何の変化も見られなかった。最終的には正 載荷時に RC 躯体がねじれ破壊し,最大荷重に達 した。なお,定着板の浮き上がりやずれはほとん ど見られなかった。最大荷重に達した後は正側の ねじれ変形に対する負側の挙動の違いを見るため, PC18-45 では小さい変形(10/1000rad)まで, PC18-D10 では大きい変形(50/1000rad)まで載荷 した。その結果,図7-(a)(b)より正側のねじれ変 形が負側の終局耐力に大きな影響を及ぼしている 事が分かった。

シリーズ2の試験体は、概ね同じ破壊性状を示

した。まず初めに定着板の浮き 上がりが生じ,さらに荷重を増 加するに従い,正載荷時はねじ れによる RC 躯体のひび割れが 進行した。負載荷時はグラウト と定着板の境界部でのすべりに よるグラウトのひび割れが生じ た,最終的には負載荷時に,グ ラウトと定着板との間のせん断 破壊またはグラウトの圧壊によ って最大荷重に達した。

## 4.2 既存設計式の検証

図−7, 図−8 に, RC 梁のねじ れ終局耐力<sub>G</sub>Q<sub>U</sub>の計算値を破線 で示す。図より計算値と実験値を比較してみると, 圧縮側は計算値より実験値が大きい。これは,負 載荷(制振ブレース軸圧縮)の場合,ブレース荷 重の鉛直成分である軸方向力が RC 躯体のねじれ 挙動に影響しているためと考えられる。また,引 張側では計算値と実験値が概ね近い値となったが, 式(4)は,軸力の効果によるねじれ耐力の変動を適 切に評価していない。従って,式(4)を引張力が作 用する場合のねじれ耐力を適切に算出できるよう に修正する必要がある。

また図-9,10 に定着板の浮き上がり荷重 <sub>B</sub>P<sub>A</sub>を 一点鎖線で示し,**表-5** に実験で得られた浮き上が り荷重の実験値を示す。**表-5** より計算値と実験値 は概ね一致しており,式(5)の妥当性が確認できた。

グラウト材のせん断破壊荷重式に関しては,表 -5よりコッターがない場合(PC30-0),つまり定着 板取付部が圧縮軸力下の摩擦抵抗だけで持つ場合 において, $_{B}P_{U}$ の計算値と負載荷時にグラウトが せん断破壊または圧壊した時の最大荷重(表-5中 の圧縮側の最大荷重)に大差はなかった。なお, 4.1で示したように負載荷時にグラウトがせん断 破壊または圧壊し最大荷重に達したため,PC30-0 の圧縮側の最大荷重を式(6)に代入( $n_{sky}=0$ とす る)して摩擦係数 $\mu$ を算出すると,0.63であった。 また,支圧型コッター(PC30-45)の場合は,計 算値(211.1kN)と圧縮側の最大荷重(230.8kN)が近 い値を示したが, $\mu$ を0.63として $_{B}P_{U}$ を求めると, 227.1kN となり実験値との相関性がより高くなっ た。以上の結果から、 $\mu$  に関してはさらなる検討 が必要だが、定着板裏面のコッター形状が支圧型 シアキーであれば、式(6)を用いて $_{B}P_{U}$ を算出でき る事が確認できた。なお、PC30-90 のようにグラ ウトがせん断破壊する場合、それを精度よく算出 する式が提案されていないため、本論では検証を 行わなかった。

# 5. 考察

#### 5.1 RC 梁端部応力に関する考察

図-1 に示す補強を行った場合, RC 梁端部の応 力状態は複雑である。そこで,5.1 では梁端部に 生じた応力について検討する。制振ブレースから RC 躯体に作用する力を RC 部材芯に作用する力 に置換すると,図-11 に示すようにブレース荷重 の水平成分である水平力,鉛直成分である軸方向 力,偏心取付けしたことによって生じる純ねじれ モーメントと面外方向の曲げモーメントに置き換 える事ができる。水平力,純ねじれモーメントに 関しては既往の研究<sup>1)</sup>においても考慮されている が,軸方向力,面外方向の曲げモーメントに関し ては考慮されていない。そこで本論では,主筋に



貼付したひずみゲージの実験データから面外方向 の曲げモーメントを算出する事を試みた。算出方 法は、梁端部に貼付したひずみゲージの値から軸 方向力による軸ひずみを差し引く事で軸方向力に よって作用する曲げモーメントに寄与する鉄筋の ひずみを求め、次にそのひずみから平面保持の仮 定を用いて面外方向の曲げモーメントを求めた。 その値を変位計高さで除する事によって、部材芯 に働く面外方向の曲げモーメントを評価した面外 力に置き換えた結果を表-6に示す。このように引 張側では、ブレース荷重の 50~100%程度、 圧縮 側ではブレース荷重の 15~80%の面外力が作用 している事から、ブレースの鉛直成分(図-11 中 Pv) が梁端部の挙動に大きな影響を与えることが 分かり,図-1に示すフレーム内においても、ブ レースが軸圧縮・軸引張時に梁端部の応力状態へ 与える影響を今後検討する必要がある。

#### 5.2 コッター形状の違いによる比較

写真-1 に定着板を取り外した後のグラウト部の破壊状況を示す。この写真から PC30-45 と PC30-90 を比較してみると, PC30-90 のグラウト部には PC30-45 のグラウト部にはあまり見られないせん断ひび割れが多く見られる。この事から,

PC30-45 は支圧部破壊であったのに対し, PC30-90 はせん断破壊であったと推測される。

また、グラウトの破壊によって最大荷重に達した 後の履歴挙動を比較してみると、図−9中に〇印で 示したように PC30-45 は PC30-90 に比べて定着板 のずれが生じてからも荷重の低下がなく比較的安 定した挙動を示した。この事から 45°コッターの 方が 90°コッターより定着板がずれた後の変形性 能に優れているという結果が得られた。

## 6. まとめ

本論では、以下の知見を得た。

1) 既存RC躯体の外周部に座屈拘束型の履歴減衰 型制振ブレースを PC 鋼棒圧着による外付け制振 補強構法を行った場合に想定される破壊性状を明 らかにした。

2) 既存設計式に基づく取付部の設計の検証を行



図-11 ブレース荷重の置換

表-6 面外力の算出

		引張側		圧縮側			
	ブレース 荷重 (kN)	面外力 (kN)	軸方向力 (kN)	ブレース 荷重 (kN)	面外力 (kN)	軸方向力 (kN)	
	32.6	24.7	23.0	-22.2	-3.5	-15.7	
PC18-45	46.4	30.9	32.8	-34.6	-6.3	-24.5	
	59.6	53.7	42.1	-57.5	-43.7	-40.7	
	27.0	14.5	19.1	-20.8	-15.6	-14.7	
PC18-D10	35.9	37.7	27.9	-49.9	-25.3	-35.3	
	51.3	32.0	36.3	-63.1	-23.9	-44.6	
Solution and the second	•	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			•		
(a)	PC30-4	5	100	(b) P(	230-90		

写真-1 定着板取り外し後のグラウト形状

い,定着板取付部の設計では式の妥当性がある程 度確認できたが,RC 梁端部の設計では軸力の効 果によるねじれ耐力の変動を適切に評価した式の 提案が必要である。

3) 梁端部が軸圧縮される場合と軸引張される場合では試験体の破壊性状が異なり、特に軸引張の場合は軸方向力や面外力の影響を十分に考慮して設計する必要がある。

4) 45°コッターは、定着板のずれが生じた後も荷 重の目立った低下がなく比較的安定した挙動を示 し、定着板がずれた後の変形性能に優れていると いう結果を得た。

## 参考文献

- 野口隆,北嶋圭二ほか: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、Vol.19, No.1, 1997
- 2) 川股重也:東北工大5号館の震災修復,建築技術, No.346, pp.83~95, 1980. 6
- 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,pp161~164
- 4) 中野克彦, 松崎育弘: プレキャスト RC 部材接合面に おけるせん断抵抗要素の耐力累加方法, 日本建築学会 構造系論文集, 第 550 号, pp151~158, 2001.12