

# 論文 柱をアラミド繊維ロッドで曲げ補強した RC 柱梁接合部に関する実験的研究

花井 伸明<sup>\*1</sup>・中井 敏<sup>\*2</sup>・遠山 孝行<sup>\*2</sup>・董 添文<sup>\*3</sup>

**要旨**：既存の鉄筋コンクリート造純ピロティ建物の柱を曲げ補強することを想定して、柱の周囲にアラミド繊維ロッド（以下、ロッド）を建て込んでグラウトを増し打ちし、その周りにアラミド繊維シート（以下、シート）を巻く補強方法を提案した。また、その際の十字形柱梁接合部におけるロッドの定着について実験的に検討した。その結果、ロッドが柱主筋の応力を肩代わりし柱の曲げ補強効果が得られるが、ロッドの定着が問題となる可能性があること、グラウト厚さを十分に確保しシートを貼り付けることで接合部を通して配したロッドの定着が確保できると考えられること、が明らかとなった。

**キーワード**：アラミド繊維、柱梁接合部、曲げ補強、付着力、保有水平耐力、かぶり厚さ

## 1. はじめに

既存鉄筋コンクリートの純ピロティ建物（1階に全く耐力壁がない建物）の崩壊形として1階柱の曲げ降伏による層崩壊になる場合、柱頭柱脚の曲げ強度により建物全体の保有水平耐力が決まることとなる。このような建物のうち、1階柱の曲げ強度不足により保有水平耐力が低いRC建物に対する耐震補強の方法として、柱を曲げ補強して保有水平耐力を上昇させることが考えられる。

本研究では、柱の曲げ補強として柱の周囲にアラミド繊維ロッド（以下、ロッド）を建て込んで、グラウトを増し打ちし、その周りにアラミド繊維シート（以下、シート）を巻く補強方法を提案し、その効果について検討する。また、この際に十字形柱梁接合部ではロッドを通して配することとなるので、図-1のようにロッドに生じる応力がパネルゾーンの狭い範囲において引張から圧縮に急激に変化するため大きな付着力が生じることとなるが、この付着力が適切に処理できるか実験的に検討する。

## 2. 十字形柱梁接合部実験<sup>1)</sup>（第1シリーズ）

本研究では、2シリーズの実験を行った。第1シリーズ<sup>1)</sup>ではRC十字形柱梁接合部を抜き出した試験体を対象とした。

### 2.1 実験概要

#### (1) 試験体

試験体は4体計画し、補強の有無の違いをパラメータとした。縮尺は1/2.5程度とした。試験体形状を図-2に示す。基本となるC0-B0試験体は、柱を建築基準法施行令上の最小配筋に近い配筋とし、梁の曲げ耐力が柱をやや上回るよう配筋して補強なしとした。C5-B0試験体は柱の周りに呼び径5mmのロッド4本およびシートで補強することで梁降伏先行となることを意図した。

C5-B0R試験体は梁主筋を増やしたものとし、C5-B0試験体と同様の補強を施した。C7-B5試験体は柱の周りに呼び径7mmのロッド4本およびシートで補強し、さらに梁を呼び径5mmのロッド2本およびシートで補強したものとした。補強方法を図-3に示す。ロッドのかぶり厚さは $1.0d$ （ $d$ ：ロッドの呼び径）とした。

ロッドの配置方法は、柱については上階と下階の柱を通して配置し、梁については柱を穿孔してロッドを75mm差し込み、樹脂を充填して定着した。また、接合部はシートを柱形に沿って貼り付け、さらにコの字形に加工したロッドを入隅部に斜めに差し込んで固定した。使用材料の特性を表-1に、試験体諸元を表-2に示す。

#### (2) 載荷方法

載荷は柱頭柱脚をピン支持として載荷装置に固定し、梁の柱フェイスから1125mmの位置に逆対称荷重を与え、正負交番漸増載荷とした。各サイクルで目標とする層間変形角は(1) 1/500 rad, (2) 1/200 rad, (3) 1/100 rad, (4) 1/67 rad, (5) 1/50 rad, (6) 1/40 rad, (7) 1/33 rad, (8) 1/25 rad, (9) 1/20 rad, (10) 1/15 radとした（括弧付数字はサイクルを表す）。柱の軸力は省略した。

## 2.2 実験結果

#### (1) 実験経過

接合部モーメント  $M_j$  および層間変形角  $R$  を次式で定義する。

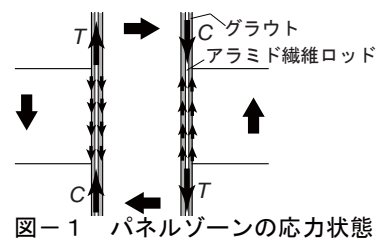


図-1 パネルゾーンの応力状態

\*1 九州産業大学 建築都市工学部建築学科 教授 博士（工学）（正会員）

\*2 株式会社ブルーム

\*3 九州大学大学院 人間環境学府 空間システム専攻 修士（工学）（学生会員）

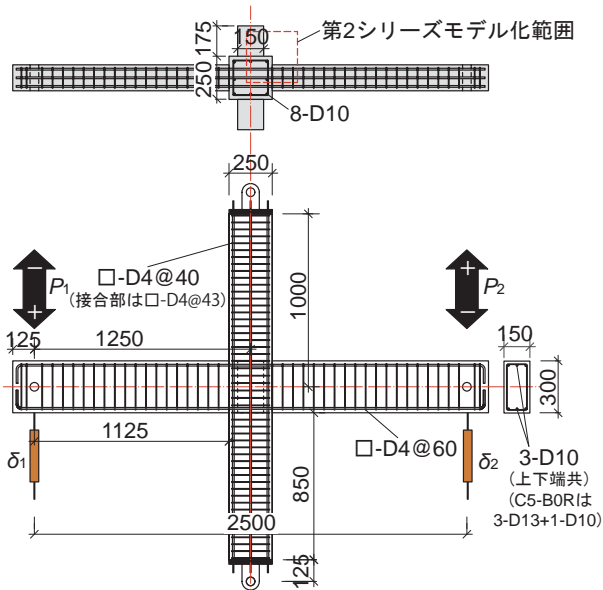
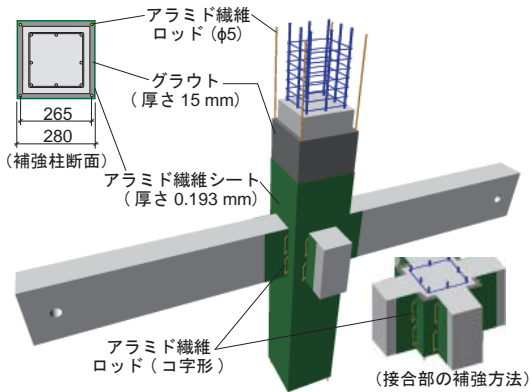
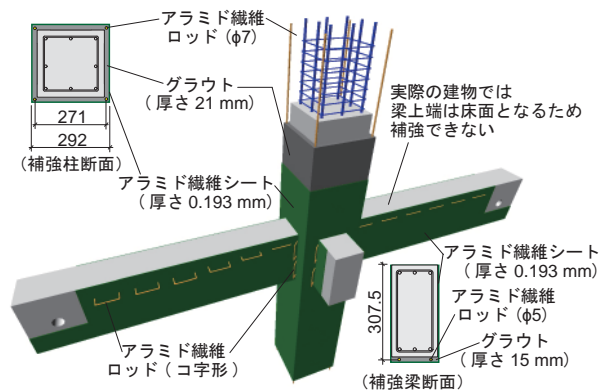


図-2 試験体形状 (第1シリーズ<sup>1)</sup>)



(a) C5-B0 および C5-B0R 試験体



(b) C7-B5 試験体

図-3 補強方法 (第1シリーズ<sup>1)</sup>)

$$M_j = M_{b1} + M_{b2} = \frac{(P_1 + P_2)L}{2} \quad (1)$$

$$R = \frac{\delta_1 + \delta_2}{L} \quad (2)$$

ここに、 $M_{b1}$ 、 $M_{b2}$ ：柱材軸での左右の梁のモーメント  
 $P_1$ 、 $P_2$ ：載荷点の荷重  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ ：載荷点の変位  
 $L$ ：載荷点間距離 (= 2500 mm)

表-1 材料特性 (第1シリーズ<sup>1)</sup>)

鉄筋	呼び名 (鋼種)		降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	
	D10 (SD295)		359	190	
	D13 (SD295)		361	189	
	D4 (SD295)		350	183	
補強材	種別	呼び名	公称直径 または厚さ (mm)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
	ロッド		φ5	1493	68.9
			φ7	1343	72.9
	シート		SA-40	0.193	2880
種別		圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	
コンクリート		31.0	2.83	28.9	
グラウト		65.7	3.84	26.6	

表-2 試験体諸元 (第1シリーズ<sup>1)</sup>)

試験体名		C0-B0	C5-B0	C5-B0R	C7-B5
柱	$b \times D$	250 × 250			
	主筋	8-D10			
	HOOP	□ -D4@40 (接合部は□ -D4@43)			
梁	$b \times D$	150 × 300			
	主筋 (上下端共)	3-D10	3-D13+ 1-D10	3-D10	
	STP	□ -D4@60			
補強方法	柱	無	4-φ5	4-φ7	
	梁	無			
想定する 破壊形式	柱降伏 先行	梁降伏 先行	柱降伏 先行	梁降伏 先行	

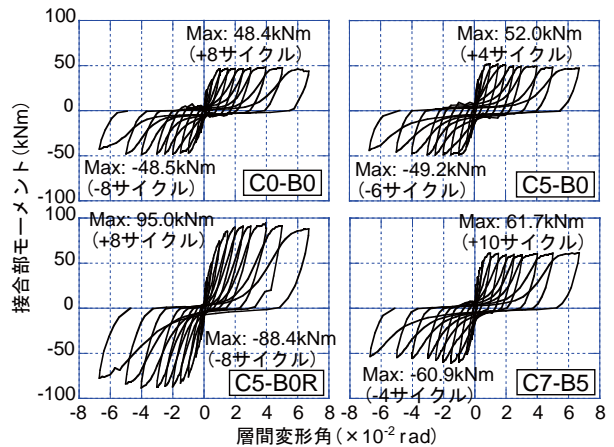


図-4 接合部モーメント-層間変形角関係

接合部モーメント-層間変形角関係を図-4に示す。

C0-B0 試験体は、±1 サイクルで梁の上端および柱に曲げひび割れが生じた。想定では柱降伏先行であったが、±3 サイクルで梁下端筋および柱主筋が降伏した。±8 サイクルで最大接合部モーメントに達した。なお、4 サイクル前後から梁の通し筋の定着が切れて、梁が抜け出すような破壊が生じた。

C5-B0 試験体は、±3 サイクルでシートが浮き始めた。+3 サイクルで梁の下端筋が降伏し、梁の上端仕口面にひび割れが生じ、シートが剥れた。正載荷では+4 サイクル、負載荷では-6 サイクルで最大接合部モーメント

に達した。±8サイクルで右の梁のシートがかなり剥れ、±9サイクルで梁下端仕口面が圧壊した。

C5-B0R 試験体は、-3サイクルで柱の主筋が降伏した。+4サイクルで接合部のシートが浮き始め、さらに梁の左上仕口面と右下仕口面のシートが破断した。+5サイクルで梁の下端筋が降伏した。+7サイクルで接合部にせん断ひび割れが生じた。±8サイクルで最大接合部モーメントに達した。

C7-B5 試験体は、±2サイクルで梁の仕口面の側部のシートが浮き始めた。+3サイクルで梁上端筋が降伏して、梁の上端仕口面でシートが切れひび割れが生じ、さらに接合部のシートを固定するコの字形ロッドも抜け始めた。負荷荷では-4サイクルで下階柱の柱頭部のシートに膨らみが生じ最大接合部モーメントに達した。正載荷では+8サイクルで梁上端仕口面が圧壊し、+10サイクルで最大接合部モーメントに達した。

## (2) 曲げ補強効果の検討

柱の曲げ補強効果について検討するため、柱の仕口部付近における柱主筋およびロッドが負担している引張力に着目して考察する。柱主筋およびロッドの引張力はひずみより算定した。C0-B0およびC5-B0試験体について、柱主筋およびロッドの引張力ならびに柱主筋と補強ロッドの合計の引張力を図-5に示す。

両試験体とも梁主筋の降伏ないしは拔出しにより最大耐力が決定されたため耐力上の差は見られないが、補強なしのC0-B0試験体は柱主筋が降伏したことにに対し、C5-B0試験体は柱主筋の引張力が小さくなり降伏しなかった。このことはロッドが柱主筋の引張応力を肩代わりしたことを示唆しており、ロッドで曲げ補強したことによる効果であると考えられる。

## (3) 接合部における柱主筋およびロッド付着の検討

接合部パネルゾーンにおいてロッドに生じた付着応力度を図-6に示す。C5-B0R および C7-B5 試験体は図に示すように大変形（層間変形角が概ね  $1/50 \text{ rad}$  以上）になると付着劣化が生じている。特に C5-B0R 試験体が顕著である。その原因として、C5-B0R 試験体は入力が大きく、付着応力度が RC 規準<sup>2)</sup>の付着割裂の基準となる強度  $f_b$  を超えていたためであると考えられる。

一方、C7-B5 試験体については、ロッド径が大きいためであると考えられる。今回の実験では、ロッドに対するグラウトのかぶり厚さを予備実験<sup>3)</sup>に基づき  $1.0d$  とし、C5-B0 および C5-B0R 試験体では  $5 \text{ mm}$ 、C7-B5 試験体では  $7 \text{ mm}$  とした。一般に、ロッドに生じる応力はその断面積に比例（ロッド径の2乗に比例）するが、付着面積は付着長さが同じならばロッド径に比例することとなる。そのため、ロッド径によらず付着応力度を同程度にするためには付着長さもロッド径に比例させる必要

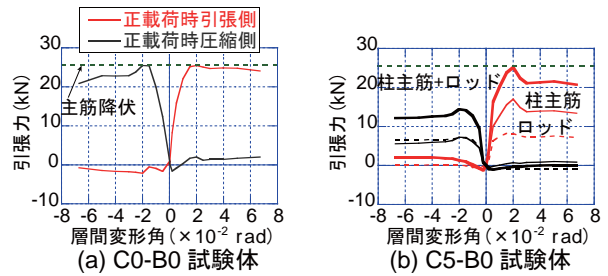


図-5 柱主筋およびロッド引張力-層間変形角関係

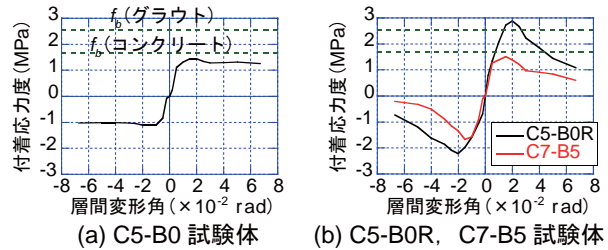


図-6 ロッドの付着応力度-層間変形角関係

がある。今回の実験の場合、付着長さ（＝梁せい）はいずれの試験体も同一の  $300 \text{ mm}$  であり（ただし、図-6の測定点間距離はひずみゲージの納まりの都合上梁せいよりやや大きい）、これをロッド径で表すと  $\phi 5$  ロッドを使用した C5-B0 および C5-B0R 試験体では  $60d$ 、 $\phi 7$  ロッドを使用した C7-B5 試験体では約  $43d$  となる。この違いにより C7-B5 試験体では C5-B0 試験体と比較して付着劣化しやすかったと考えられる。付着長さを変えずに付着性状を改善するためには、かぶり厚さを厚くすることで付着割裂を抑制する方法が考えられる。

## 3. ロッド引張実験（第2シリーズ）

前章においてロッドによる曲げ補強効果が確認されたが、接合部内での付着を見ると大変形時においてロッドの付着劣化が大きく、特にロッド径の大きな試験体では接合部でのかぶり厚さが付着長さに対し相対的に不足している結果となった<sup>1)</sup>。そこで、第2シリーズとしてロッド径とかぶり厚さ、シートの有無をパラメータとして接合部の要素実験を行った。

### 3.1 実験概要

#### (1) 試験体

試験体は十字形接合部を図-2の破線の部分で切り出すことを想定し、図-7のような形状とした。縮尺は実大とした。パラメータはロッド径 ( $\phi 11$ ,  $\phi 13$ ,  $\phi 15$ )、グラウトのかぶり厚さ ( $1.0d_b$ ,  $1.5d_b$ ,  $2.0d_b$ ,  $d_b$ はロッドの公称直径)、シートの有無とし20体製作した。使用材料の特性を表-3に、試験体諸元を表-4に示す。補強方法は柱の出隅部にロッドを配置してグラウトを増し打ちした。また、試験体名の頭文字が S である試験体については、シートを柱材軸直交方向に1層貼り付けて梁部

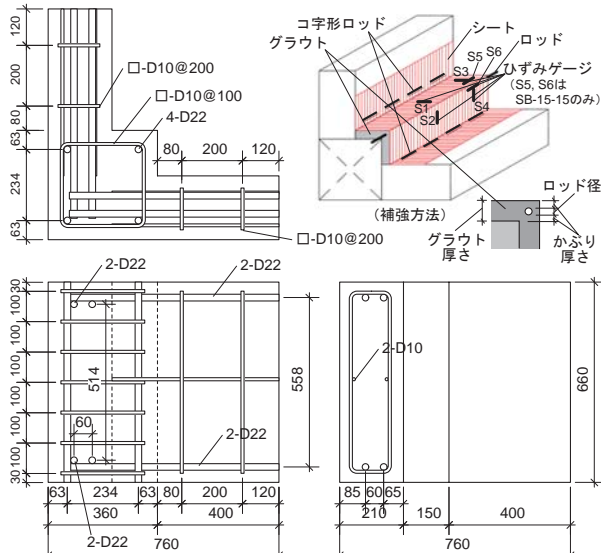


図-7 試験体形状および補強方法 (第2シリーズ)

表-3 材料特性 (第2シリーズ)

鉄筋	呼び名 (鋼種)	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)			
	D22 (SD345)	387	190			
D10 (SD295)	363	193				
補強材	種別	呼び名	公称直径 または厚さ (mm)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	
	ロッド		φ11	10.93	1386	71.8
			φ13	13.79	1232	66.1
			φ15	15.85	1227	66.2
シート	SA-40	0.193	2880	132		
種別		圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)		
コンクリート		27.4	2.38	26.5		
グラウト		67.5	2.87	29.9		

注) シートは第1シリーズ<sup>1)</sup>と同一製品・同一ロット

表-4 試験体諸元 (第2シリーズ)

試験体名	シート無	N-11-10	N-11-15	N-11-20	N-13-10	N-13-15	N-13-20	N-15-10	N-15-15		N-15-20
	シート有	S-11-10	S-11-15	S-11-20	S-13-10	S-13-15	S-13-20	S-15-10	S-15-15	SB-15-15	SB-15-20
柱	$b \times D$	360 × 360									
	主筋	4-D22									
	HOOP	□ -D10@100									
梁	$b \times D$	210 × 660									
	主筋	上端筋	2-D22								
		下端筋	2-D22								
	STP	□ -D10@200									
	腹筋	2-D10									
補強	ロッド (付着長さ)	φ11 (60.4 $d_b$ )			φ13 (47.9 $d_b$ )			φ15 (41.6 $d_b$ )			
	グラウトの かぶり厚さ	1.0 $d_b$	1.5 $d_b$	2.0 $d_b$	1.0 $d_b$	1.5 $d_b$	2.0 $d_b$	1.0 $d_b$	1.5 $d_b$	2.0 $d_b$	
	シート (S およ び SB 試験体)	SA-40 × 1 層								SA-40 × (縦 横各1層)	
試験体の命名方法		$\underline{N-11-10}$ (a) シートの有無 (N: なし S: SA-40×1層 SB: SA-40×(縦横各1層)) (a) (b) (c) (b) ロッド呼び径 (φ11, φ13, φ15) (c) グラウトのかぶり厚さ (1.0 $d_b$ , 1.5 $d_b$ , 2.0 $d_b$ )									

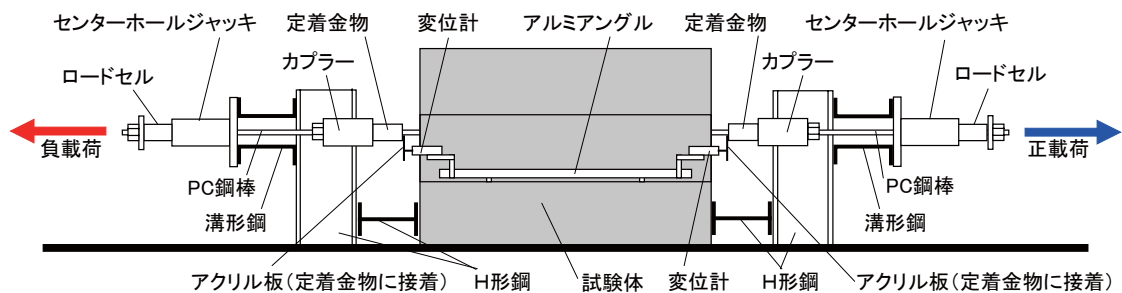


図-8 荷重および計測方法 (第2シリーズ)

分に 150 mm 伸ばし, コの字形に加工したロッドにより入隅部に固定した。SB-15-15 および SB-15-20 試験体は梁部分のシートおよびコ字形ロッドを省略した。SB-15-15 試験体はシートを柱材軸方向に 1 層重ね貼りした。

(2) 荷重方法および計測方法

荷重は図-8 に示すように試験体を固定し, ロッド両端に取り付けた定着金物およびカプラーを介して PC 鋼棒を接続してセンターホールジャッキにより引き抜く方法にて行った。次式により付着割裂耐力  $P_b$  を算定し,

荷重制御で (1) 約  $\pm(1/3)P_b$  で 1 往復, (2) 約  $\pm(2/3)P_b$  で 1 往復, (3) 約  $\pm P_b$  で 1 往復, を目標として正負交番漸増荷重とした (括弧付数字はサイクルを表す)。

$$P_b = l\psi\tau_b \quad (3)$$

ここに,  $l$ : 付着長さ (= 梁せい (= 660 mm))

$\psi$ : ロッドの公称周長 (=  $\pi d_b$ )

$$\tau_b = Kf_b \quad 2)$$

$$K = 0.3 \left( \frac{C+W}{d_b} \right) + 0.4 \leq 2.5$$

表-5 最大荷重および破壊形式

試験体名	最大荷重 (kN)			破壊形式
	載荷目標	実験値	計算値	
N-11-10	95	32.1	94.7	付着割裂破壊
N-11-15	112	35.0	111.4	
N-11-20	112	50.7	111.4	
N-13-10	112	47.7	112.8	
N-13-15	139	49.6	140.5	
N-13-20	139	61.5	140.5	
N-15-10	141	46.8	142.4	
N-15-15	160	67.6	161.5	
N-15-20	160	73.8	161.5	
S-11-10	95	94.8	89.8	コーン破壊
S-11-15	112	106.0	111.4	ロッドの破断 (参考)
S-11-20	112	106.7	111.4	ロッドの抜出し (付着すべり)
S-13-10	112	86.6	117.9	コーン破壊
S-13-15	139	92.9	140.5	
S-13-20	139	128.1	140.5	既存コンクリートとグラウトの間の剥離
S-15-10	141	132.2	136.0	
S-15-15	160	139.4	161.5	コーン破壊
S-15-20	160	147.5	161.5	付着割裂破壊
SB-15-15	160	146.6	161.5	
SB-15-20	160	160.2	161.5	

注) 最大荷重の載荷目標は載荷時に±3サイクルの目標とした値, 計算値は載荷後に再計算 (精算) した値である。

C: かぶり厚さの3倍かつ $5d_b$ 以下

W: ここでは0とした

計測は試験体に固定した変位計により定着金物の変位を測定した (図-8)。定着金物の変位は, その構造上, 載荷初期にすべりを生じるので, ±1サイクルの荷重-変位関係においてほぼ直線とみなせる範囲に最小二乗法を適用して原点補正を行った。

### 3.2 実験結果

#### (1) 実験経過

最大荷重および破壊形式の一覧を表-5に示す。また, 代表的な試験体について, 荷重-ロッドの伸びの関係を図-9に示す。ロッドの伸びは左右の定着金物の変位の差とした。なお, S-11-15試験体は載荷開始前にロッドを損傷させてしまった影響により載荷途中でロッドが破断したことに加え計測上も載荷開始当初から不具合があったため, 参考とし, 本論文の議論の対象外とする。

シートのない試験体はすべて, 遅くとも+2サイクルまでに脆性的に付着割裂破壊を生じた。最大荷重に着目すると, グラウトの厚さ (図-7参照) に依存する傾向が見られた。

一方, シートのある試験体で付着割裂破壊を生じたものはSB-15-15試験体以外にはなく, 主として図-10に示すような形状のコーン破壊であった。ただし, 試験体はロッド両端が自由端であるが実際の建物は柱が存在しているため, このような破壊は抑制されると考えられる。S-11-20およびS-13-10試験体はグラウトとロッドの界面ですべりが生じてロッドが抜け出し, S-15-10お

注) 図中の破線は定着金物の変位の計測に不具合のあった区間を示すが, 載荷は荷重制御で行ったため実験結果には影響しない。

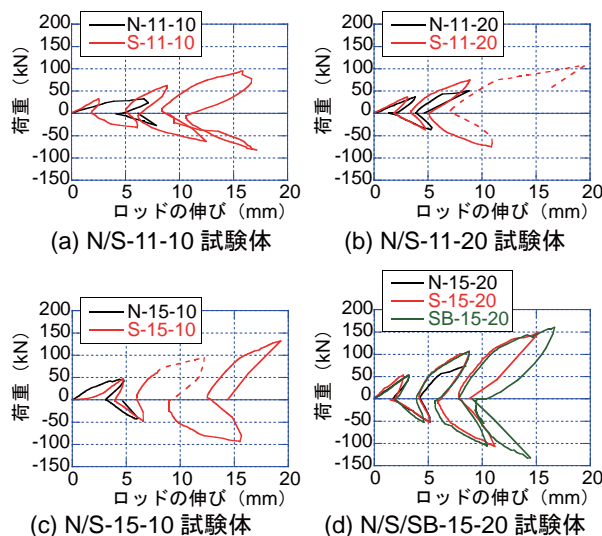


図-9 荷重-ロッドの伸び関係

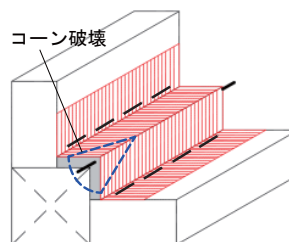


図-10 コーン破壊

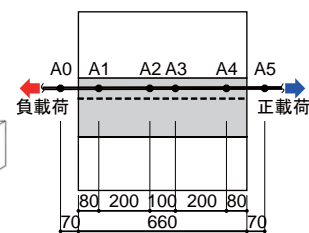


図-11 ひずみ測定位置

よびSB-15-20試験体は既存コンクリートとグラウトの間に剥離を生じて破壊した。最大荷重に着目すると, シートのある試験体はいずれも+3サイクルの途中まで破壊することなく, 同じロッド径・かぶり厚さのシートのない試験体より大幅に耐力が上昇した。特にS-11-10およびSB-15-20試験体については+3サイクルにおいて目標とした荷重にほぼ達し, -3サイクルの途中で破壊した。最大荷重が目標とした荷重にほぼ達したのはこの2体のみであったが, そのことについては次項で考察する。

#### (2) ロッドの付着性状

ロッドのひずみを図-11に示す位置で測定した。各サイクルの最大荷重時におけるひずみ分布の一例を図-12に示す。また, ひずみから算定した付着応力度分布の一例を図-13に示す。

シートのないN-11-20試験体, シートのあるS-11-20試験体とも, ±1サイクルでは試験体の載荷点寄りの部分のみが付着力を負担している。N-11-20試験体は+2サイクルで載荷点付近から付着劣化が生じて付着力を負担する範囲が試験体中央付近にシフトしている。S-11-20試験体では±2サイクルでは付着力を負担する範囲が内側に広がっているが付着劣化はなく, +3サイクルで載荷点付近から付着劣化が生じて付着力を負担する範囲が載荷点の反対側の領域にシフトしている。その結

果、最大荷重を迎えて破壊したと考えられる。N-15-20、S-15-20 試験体もほぼ同様の性状である。多くの試験体で最大荷重が式 (3) の荷重より小さかったのは、式 (3) ではロッドの付着範囲を試験体の全長と仮定していたのに対し、実際には付着が確保されていたのが局所的な範囲に限られていたからであると考えられる。

実際の建物では図-11に示すようにロッドは一端から引張力  $T$ 、他端から圧縮力  $C$  を受け、両者の合力と付着力が釣合うと考えられる。これを再現するならば目標荷重をロッド両端に分配して載荷すべきところ、載荷の都合上 ( $T+C$ ) に相当する引張力を一端に集約して加えているため付着応力が一端に集中し、実際の建物より不利な条件 (安全側) での実験となっていると考えられる。また、図-12、図-13を見ると、シート有では±2サイクルまでは試験体中央位置まで応力伝達がなされている。以上を鑑みると、今回の実験の範囲ではロッドに対するグラウトのかぶり厚さを  $2d_b$  (グラウト厚さを  $5d_b$ ) 以上としシートを施工すれば十字形柱梁接合部を通して配したロッドの定着が確保できると考えられる。

### (3) シートによる付着割裂抑制効果

シートのひずみを図-7に示す位置で測定した。荷重-シートのひずみ関係の一例を図-14に示す。同図 (a) (b) は S-11-20 試験体について試験体中央位置 (S1) と端部 (S3) を比較したもので、(c)(d) はシートを柱材軸方向に重ね貼りした SB15-15 試験体において柱材軸直交方向 (S4) と柱材軸方向 (S6) を比較したものである。

試験体端部ではシートが引張力を負担しており、これはシートがグラウトを拘束し付着割裂ひび割れの発生を抑制したことを示唆している。また、SB-15-15 試験体は、柱材軸方向のシートも引張力を負担しており、コーン破壊が抑制されたことで破壊モードが変化したと考えられ、柱材軸方向のシートの有効性が確認できた。

## 4. まとめ

RC 柱の周囲にアラミド繊維ロッドを配置しグラウトを増し打ちして曲げ補強した際の柱梁接合部におけるロッドの定着に関して実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) ロッドが主筋の応力を肩代わりし柱の曲げ補強効果が得られるが、十字形柱梁接合部でのロッドの定着が問題となる可能性がある。
- (2) グラウト厚さを十分に確保し (本実験の範囲では  $5d_b$  程度) シートを貼り付けることで、接合部を通して配したロッドの定着が確保できると考えられる。

## 謝辞

本研究に際し、株式会社ブルーム小林英二氏・小杉一正氏には多大なるご助力を賜った。また、九州産業大学

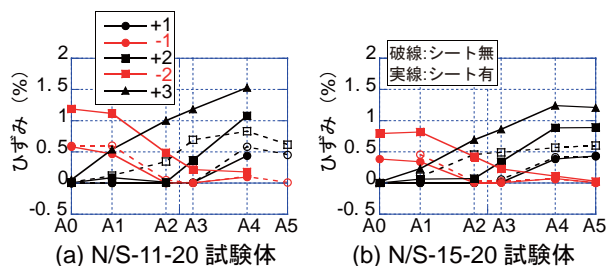


図-12 ロッドのひずみ分布

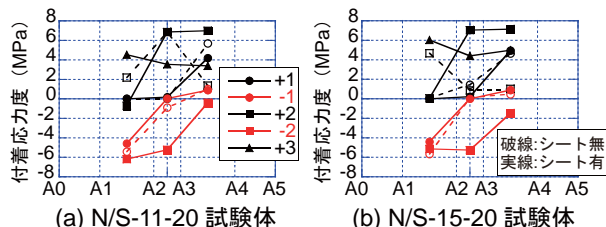


図-13 ロッドの付着応力分布

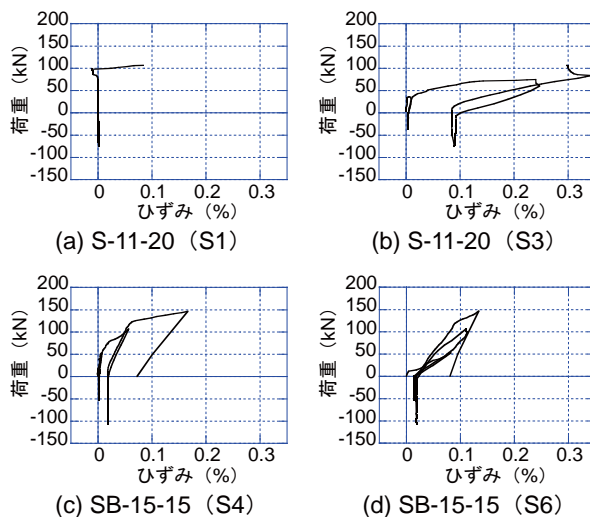


図-14 荷重-シートのひずみ関係

平成 28 年度卒業生酒井聡一君・鶴雄介君・三根貴太君、同平成 29 年度卒業生浅野智也君・小川公希君・河野純星君・田代渉君・溝口友望君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 小林英二, 董添文, 遠山孝行, 小杉一正, 花井伸明: 柱をアラミド繊維ロッドで曲げ補強した柱梁接合部の応力伝達に関する実験 その1・その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp. 229-232, 2017.8
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 3) 小林英二, 中井敏, 遠山孝行, 小杉一正: アラミドロッドを用いた既存 RC 柱の曲げ補強実験 (その1) (その2), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 55 号, pp. 181-188, 2017.2