

# 論文 炭素繊維シートを用いた壁付き柱の耐震補強法に関する実験的研究

石渡康弘\*<sup>1</sup> 市川昌和\*<sup>1</sup> 中澤敏樹\*<sup>2</sup> 福本昇\*<sup>2</sup>

**要旨:** 筆者らは、炭素繊維シート（以下：CFRP）を用いて袖壁付き鉄筋コンクリート（以下：RC）造柱を補強するために、CFRP 端部の効果的な定着方法について研究してきた。本論文は、新しく開発した定着金物を用いて補強を行った、袖壁付き RC 造柱の加力実験の結果および考察について述べたものである。壁は全て面外方向に設け、実験因子を補強量、壁位置（中央、偏心）とし、定着金物を用いた場合の補強効果について確認した。その結果、本補強法は、独立柱に CFRP を閉鎖型に巻き付けた場合と同等な補強効果があり、柱の変形能を改善できることが確認できた。

**キーワード:** 耐震補強, 炭素繊維シート, 端部定着, 袖壁付き鉄筋コンクリート造柱

## 1. はじめに

現在、CFRP を用いて袖壁付き RC 造柱を耐震補強する場合、袖壁を全長にわたり切断し、スリットを設け、独立柱と同様に CFRP を柱全周に巻く方法が通常用いられている。しかし、この方法では、対象とする壁が耐震壁の場合、耐震壁に断面欠損を生じさせることになり、構造的な性能上問題点が生じる。また、壁を切断しないで補強する方法としては、文献<sup>1)</sup>に金物とボルトを用いて、壁端部の CFRP を定着し、柱や梁を補強する方法が紹介されており、構造実験（例えば文献<sup>2)</sup>等）により、その有効性が確認されている。しかし、金物とボルトを含めた端部のディテールについては、まだ不明な点が多く、設計手法が確立されていない。さらに、L 型プレートを採用する場合には、コーナー部に円弧を設ける必要があり、その断面は大きくなる傾向にあり、仕上げ等を考慮した場合、納まりが難しい。

そこで、筆者らは、コンパクトな形状の定着金物の開発を含め、袖壁付き RC 造柱の補強法を確立するために、断面形状、材質、面取り寸法等を実験因子とした一方向引張試験を行い、金物とボルトのディテールについて検討した<sup>3)</sup>。

その結果、図-1 に示すような定着金物を考案した。この定着金物の材質は降伏強度が約 700MPa の高強度鋳鉄（オーステンパ球状黒鉛鋳鉄、以下：FCAD）であり、CFRP を巻き付けるコーナー部には面取り（ $r=10,5\text{mm}$ ）を設けている。また、定着金物の中央部はボルト頭、ボルトナットが収まるように、孔を二段に加工している。

本実験では、考案した定着金物と CFRP により補強した袖壁付き（面外方向）RC 造柱に対して加力実験を行い、その補強効果を確認することを目的とする。

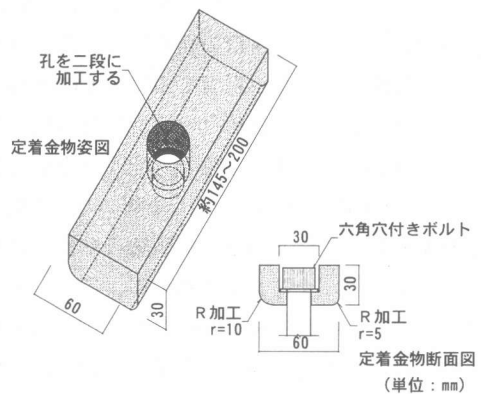


図-1 定着金物形状

\* 1 鉄建建設(株)技術研究所 (正会員)

\* 2 (株)浅沼組技術研究所 (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1 に試験体の諸元を、図-2 に試験体形状および配筋を示す。試験体は全て袖壁を面外方向に設けており、計3体計画した。独立柱の試験結果と、比較するために断面寸法、内法高さ ( $M/QD=1.5$ )、配筋 (主筋は12-D22、帯筋はD10@200) は、全て文献<sup>4)</sup>と同一とした。実験因子は壁の位置 (中央, 偏心), CFRP 補強量の違いである。また、表-1 中に文献<sup>4)</sup>の無補強試験体 (RC-14), 独立柱 CFRP2 層補強試験体 (CRC-26) の諸元も併せて示す。

WA1 は基準となる試験体で壁を柱の中央に配し, CFRP 補強量を2層とした試験体である。表中の  $pf_1$  は CFRP 全断面有効としたときの補強比であり,  $pf_2$  は金物幅 (ボルト孔部を除く) のみ有効とした補強比である。WA2 は壁位置を WA1 と同位置とし, CFRP3 層で補強を行い, 補強量の影響を把握する。WA3 は CFRP 補強量を WA1 と同量とし, 壁位置を偏心させ, 壁位置の影響を把握する。全ての試験体とも壁の厚さ (壁厚さ比:  $tw/b=0.3$ ,  $tw$ :壁厚,  $b$ :柱幅), 袖壁長さ (片側袖壁長さ比:  $\beta=0.65$ ), 壁の配筋は同じとした。

試験体の補強は, 以下の通り行った。

柱部, および壁の定着部まで下地処理, プライマー塗布, CFRP 貼り付けを行った後, 壁部の CFRP にボルト貫通用の孔を穿孔, 定着金物を壁両側からエポキシ樹脂を用いて CFRP 部に貼り付け, ボルトで締め付け固定した (図-3 参照)。ボルトは一方引張試験結果<sup>3)</sup>をもとに, 2層では M20, 3層では M22 を用いた。また, 壁を偏心させている WA3 試験体の壁面にはシートの抜け出しを防止するために, 予め L 型に成形 (硬化) した CFRP 板を用い, 補強用 CFRP と重ね継手により一体化する手法を用いた (図-3)。

### 2.2 使用材料

使用した材料は全て共通で, コンクリートは設計基準強度  $F_c24(\text{MPa})$  の普通コンクリートを,

表-1 試験体一覧

試験体	WA1	WA2	WA3	RC-14	CRC-26
$b \times D(\text{cm})$	50 × 50			50 × 50	
$h_0(\text{cm})$	150			150	
主筋	12-D22			12-D22	
$pg(\%)$	1.86			1.86	
帯筋	D10@200			D10@200	
$pw(\%)$	0.14			0.14	
壁位置	中央		偏心	—	
CFシート	2層	3層	2層	—	2層
$pf_1(\%)$	0.13	0.20	0.13	—	0.13
$pf_2(\%)$	0.10	0.16	0.10	—	—
金物形状(mm)	190 × 60 × 25			—	
ボルト	M20	M22	M20	—	
軸力 N(kN)	1382	1294	1667	1275	1395
$(N/bD \sigma_B)$	(0.2)			(0.2)	

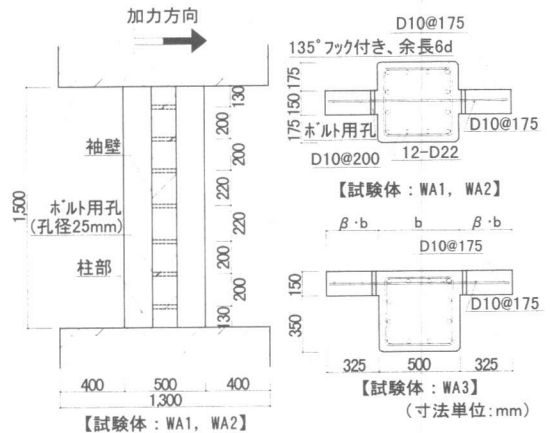


図-2 試験体形状および配筋

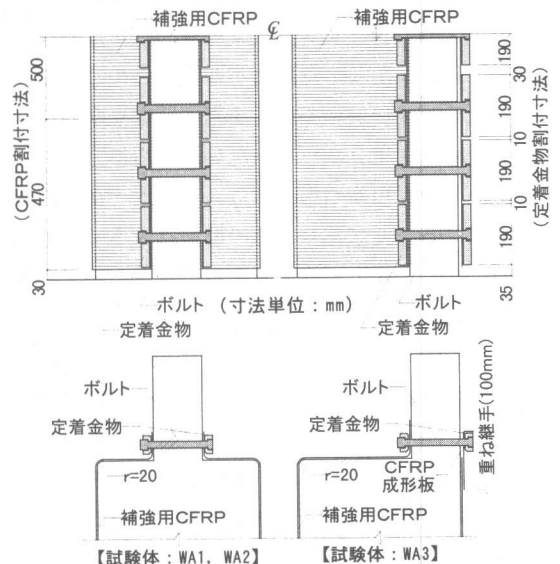


図-3 CFRP 貼り付け定着方法

表-2 コンクリート強度 試験結果 表-3 CFRPの引張試験結果

試験体	$\sigma_B$ (MPa)	$E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)	$\sigma_{ct}$ (MPa)	層数	$\sigma_{fu}$ (MPa)	$E_{fo}$ ( $\times 10^5$ MPa)
WA1	33.7	3.31	3.06	2層	4290	2.32
WA2	25.9	2.82	2.62	3層	4280	2.29
WA3	33.4	3.28	2.75			
RC-14	25.5	2.61	2.46			
CRC-26	27.9	2.67	2.16			

$\sigma_B$ : 圧縮強度、 $E_c$ : 弾性係数  
 $\sigma_{ct}$ : 割裂強度

$\sigma_{fu}$ : 引張強度  
 $E_{fo}$ : 引張弾性係数

表-4 鉄筋および金物の引張試験結果

部位	種類	$\sigma_y$ (MPa)	$E_s$ ( $\times 10^5$ MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	伸び (%)
主筋	D22(WA1,3)	409	1.99	587	20.9
	D22(WA2)	392	1.93	586	21.5
帯筋、壁筋	D10(WA1,3)	359	1.60	488	19.9
	D10(WA2)	391	1.61	554	15.9
定着金物	FCAD900-8	729 <sup>1)</sup>	1.59	978	11.0
高力ボルト	M20	608	2.20	827	25.7
	M22	1056	2.20	1146	18.1

$\sigma_y$ : 降伏強度、 $E_s$ : 弾性係数、 $\sigma_u$ : 引張強度  
 注 1): 0.2% オフセット法による

主筋には SD345 の D22 を、帯筋には SD295 の D10 を用いた。補強材の CFRP は繊維目付  $300\text{g}/\text{m}^2$  のものを用いた。定着金物は JIS G 5503 に規定されている FCAD900-8 を使い、金物固定用のボルトは高力ボルト F10T を用いた。コンクリートの強度試験結果を表-2 に、CFRP の引張試験結果を表-3 に、鉄筋、ボルトおよび FCAD の引張試験結果を表-4 に示す。

### 2.3 加力方法および計測方法

図-4 に加力装置図を示す。加力は、L型の加力梁に取り付けた 5000kN ジャッキにより一定軸力 ( $0.2 \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B$ ) を加えた状態で、パンタグラフにより加力梁の平行度を保ちながら、柱の反曲点位置に取り付けた 1500kN ジャッキにより荷重と変形を加える建研方式で行った。

加力サイクルは図-5 に示すように、柱の層間変形角  $R$  で制御し、 $R = \pm 1.25, 2.5 \times 10^{-3}(\text{rad.})$  を各 1 回、 $R = \pm 5 \times 10^{-3}(\text{rad.})$  以降各変形を 2 回、 $R = \pm 40 \times 10^{-3}(\text{rad.})$  を 1 回繰り返した後、正方向に押し切ることを標準とした。

計測は、軸力・水平荷重をロードセルにより計測し、層間変形・軸変形などを変位計で、CFRP・柱主筋・帯筋および壁筋のひずみをワイ

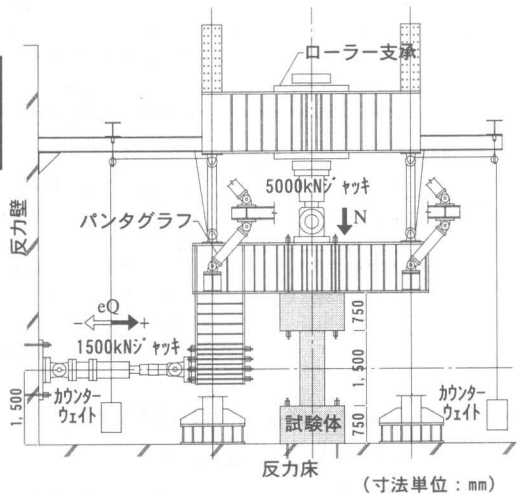


図-4 加力装置図

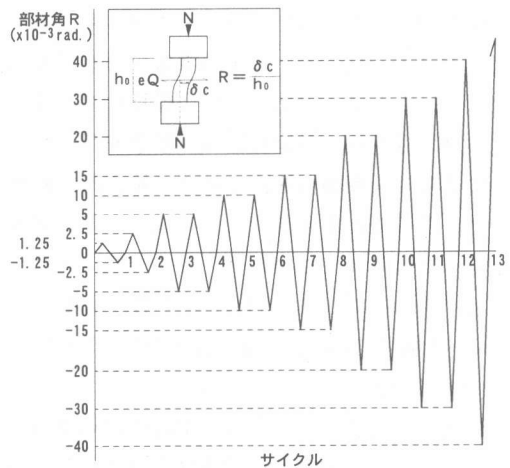


図-5 加力サイクル

ヤーストレインゲージにより計測した。

### 3. 実験結果

表-5 に実験値と計算値の関係を示す。曲げ終局強度の計算は文献<sup>1)</sup>に準拠し、注釈行に示した式を用いた。また、袖壁が偏心している WA3 は壁縦筋を考慮して計算した値である。図-6 に各試験体の荷重 ( $eQ$ ) - 変形 ( $\delta_c$ ) の関係を示す。

実験経過は、WA1~WA3 全ての試験体において、 $R = 1.25 \times 10^{-3}(\text{rad.})$  で柱脚、柱頭部分に曲げひびわれが生じ、 $R = 10.0 \times 10^{-3}(\text{rad.})$  のサイクルで主筋の引張降伏がみられた後、最大耐力に達し

表-5 実験結果および計算値

試験体	実験値						破壊モード*	計算値
	正加力時			負加力時				
	Qmax(kN)	Rm(rad.)	Qmax*0.8(kN)	Ru(rad.)	Qmax(kN)	Rm(rad.)		cQmu(kN)
WA1	908	9.4x10 <sup>-3</sup>	727	33.6x10 <sup>-3</sup>	-876	-10.0x10 <sup>-3</sup>	曲げ降伏	824
WA2	778	10.0x10 <sup>-3</sup>	623	52.0x10 <sup>-3</sup>	-737	-14.8x10 <sup>-3</sup>	曲げ降伏	704
WA3	929	10.0x10 <sup>-3</sup>	743	34.4x10 <sup>-3</sup>	-865	-10.1x10 <sup>-3</sup>	曲げ降伏	844
RC-14	624	4.8x10 <sup>-3</sup>	490	10.0x10 <sup>-3</sup>	-593	-4.6x10 <sup>-3</sup>	せん断破壊	679
CRC-26	836	14.3x10 <sup>-3</sup>	656	30.1x10 <sup>-3</sup>	-750	-14.7x10 <sup>-3</sup>	曲げ降伏	702

\*Qmax:最大耐力実験値  
 \*cQmu:曲げ終局強度<sup>1)</sup>

\*Rm:Qmax時部材角      \*Ru:限界部材角(Qmax\*0.8時の部材角)  
 $cQmu = \alpha \cdot Mu / h_0$  (ここで、 $\alpha = 2$ とする)  
 $Mu = 0.5 \cdot ag \cdot \sigma_y \cdot g1 \cdot D + 0.5N \cdot D(1 - N / (b \cdot D \cdot \sigma_B))$  (Nb ≧ N ≧ 0のとき)  
 ここで、ag:柱主筋全断面積、g1:引張筋重心と圧縮筋重心との距離と全成の比

た。また、壁縦筋の降伏状況は壁位置により異なり、壁を中央配置としたWA1, 2では20.0x10<sup>-3</sup>(rad.)のサイクルで、壁を偏心配置としたWA3では10.0x10<sup>-3</sup>(rad.)のサイクルでそれぞれ引張降伏がみられた。最大耐力後の耐力低下は緩やかで、加力終了まで急激な耐力低下を起こすこともなく、軸力も十分に保持しており、文献<sup>4)</sup>の独立柱の試験体同様、補強を行ったことによりせん断耐力を向上させ、脆性的な破壊を防止することが確認できた。また、壁を中央配置した試験体では実験終了時まで壁の圧壊がみられなかったのに対し、壁を偏心配置したWA3試験体では、30x10<sup>-3</sup>(rad.)のサイクルで、壁両端部で大きな圧壊がみられた。

最後まで、全ての試験体でCFRPの破断はみられず、また、CFRPの顕著な抜け出し等もみられなかった。L型に成形したCFRP板を用いたWA3においては、壁が取りついている側の柱の膨らみが顕著であったが、L型に成形を行っていたために実験終了時まで、CFRPの抜け出しは観察されなかった。

#### 4. 実験結果の検討

##### 4.1 変形能の比較

ここでは、各実験因子が変形能に及ぼす影響について検討を行う。変形能を比較するに当たって縦軸は、コンクリート強度等の影響を無くするために、実験値 eQ を曲げ終局強度計算値 cQmu で除し、無次元化した eQ/cQmu で以下の検討を行う。

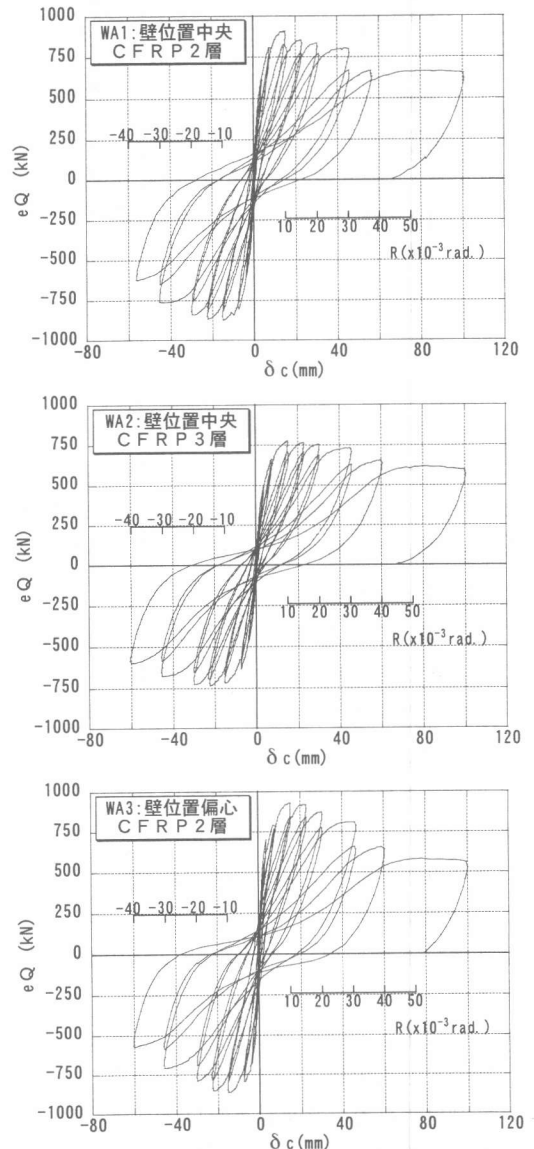


図-6 荷重 (eQ) -変形 (δc) 関係

### (1) CFRP 量の影響

図-7に、CFRP量が違うWA1, WA2の $eQ/cQ_{mu}-\delta c$ 関係の包絡線を示す。

最大耐力時の $eQ/cQ_{mu}$ は両試験体とも1.1程度と差はみられなかった。変形性状は、補強量を増すことにより、最大耐力以降の耐力低下が小さくなっている。特に、正側で、補強量を増すことによる履歴性状の改善効果がみられ、限界変形角 $R_u$ もWA1に比べWA2は約1.5倍と大きくなっている。

### (2) 壁位置の違いによる影響

図-8に、壁位置が異なるWA1, WA3の $eQ/cQ_{mu}-\delta c$ 関係の包絡線を示す。

両試験体とも最大耐力時の $eQ/cQ_{mu}$ は1.1程度とほとんど差はみられなかった。履歴性状は、壁を中央としたWA1に比べ、偏心させたWA3の方が、大変形時(特に正加力時 $R=30 \times 10^{-3}(\text{rad.})$ , および負加力時)において、耐力低下が若干大きかった。

### (3) 独立柱(閉鎖型補強)との比較

図-9に袖壁付き柱WA1と、独立柱CRC-26の $eQ/cQ_{mu}-\delta c$ 関係を示す。また、比較のために無補強のRC-14の包絡線もあわせて示す。

最大耐力時の $eQ/cQ_{mu}$ にはほとんど差はみられなかった。最大耐力以降の耐力低下は袖壁付き柱のWA1の方が小さい。これは、袖壁の軸力負担効果が表れたためと思われる。

## 4.2 ひずみ性状

図-10に大変形時の、袖壁付き試験体(WA1~WA3)と独立柱試験体(CRC-26)のCFRPのひずみ分布(正加力時1回目)を示す。

袖壁付き柱WA1と独立柱CRC-26のひずみ度の最大値は0.8%程度であり、定着金物を用いて疑似閉鎖型に補強をした場合にも、独立柱の場合と同様に、CFRPが補強に有効であることがわかる。

同図より補強量の違うWA1とWA2を比較すると、文献<sup>4)</sup>と同様に、補強量が増すに従いCFRPのひずみ度の値が小さくなる傾向がみられる。また、壁位置の違いをみると、壁を偏心

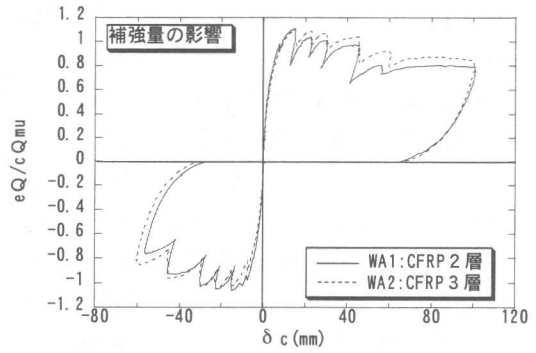


図-7 補強量の影響

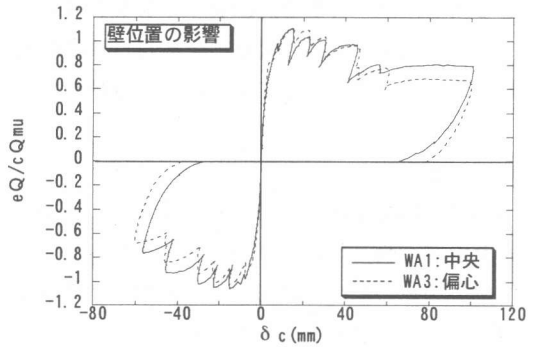


図-8 壁位置の影響

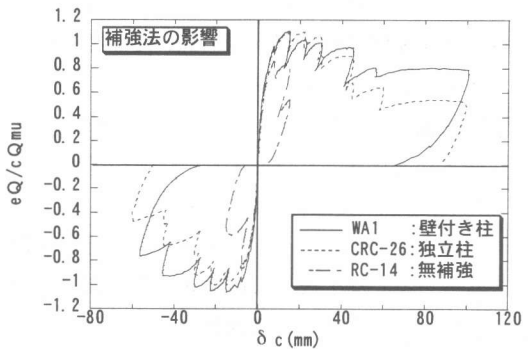


図-9 独立柱との比較

させたWA3の方が、全体的にやや大きなひずみ度を示している。これは、前項で述べたように、壁を偏心配置した場合には、壁端部に圧壊が起こり、柱の軸力負担が大きくなるためにより大きな拘束力が必要となり、その結果、CFRPに大きな引張力が作用したためと思われる。

### 4.3 ボルト負担力の検討

図-11にCFRPおよびボルトの負担引張力と部材角 $R$ の関係を示す。ボルト負担引張力は、柱頭・柱脚に設けた2本のボルトの平均である。

また、CFRP の負担引張力は、柱頭・柱脚それぞれ4点のひずみ度を平均し、引張弾性係数、断面積を乗じて荷重に換算した値である。

同図より、柱頭、柱脚の位置により、ばらつきがみられるが、ボルトの負担引張力は CFRP の負担引張力より大きな値を示している。特に、柱頭では CFRP の負担引張力に対して、ボルトは約2倍の引張力を示している。これは一方向引張試験<sup>3)</sup>で得られた荷重-ボルト伸び関係と同じ傾向を示している。これらの結果より、定着金物を固定する場合、CFRP による引張力の位置と、ボルト位置の偏心によるねじれ等の割り増しを考慮する必要があると考えられる。

### 5. まとめ

袖壁付き RC 造柱の耐震補強を目的として、新たな定着金物、および補強法を提案し、その補強効果確認のための静的加力実験を行った結果以下のことが明らかになった。

- (1)本定着金物を用いて、CFRP を定着することにより、閉鎖型に巻き付け補強した場合と同等なせん断補強効果が得られ、変形能も良好であることが確認できた。
- (2)壁を偏心させた場合の方が、大変形時の耐力低下が大きかった。

【謝辞】本研究は、(財)日本建築総合試験所構造部長 益尾潔工博にご指導を頂き、(株)日鉄コンポジットの杉山氏、(株)岡部エンジニアリングの阿部氏のご協力を得て行いました。ここに深く感謝いたします。

### 【参考文献】

- 1)日本建築防災協会：連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針，1999年
- 2)福山洋，藤本効他：連続繊維シートを用いた既存建築物の柱補強に関する実験的研究（その5 直交壁を有する柱の補強効果），日本建

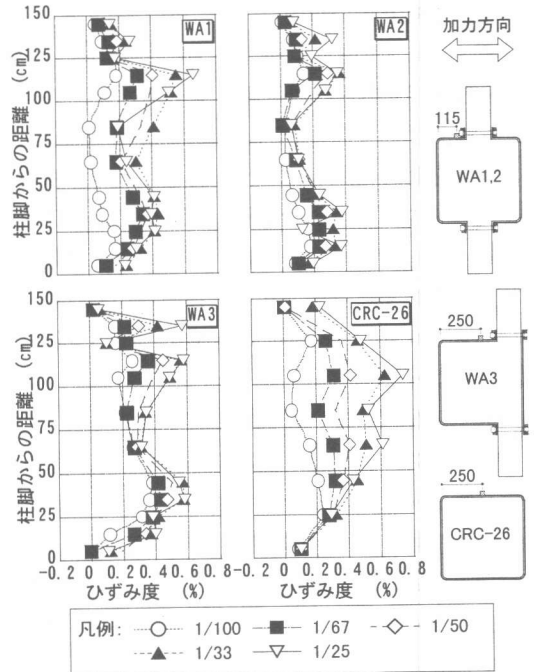


図-10 CFRP ひずみ度分布

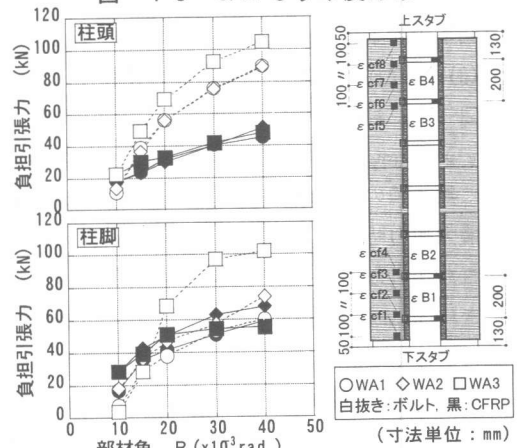


図-11 CFRP とボルトの負担引張力

築学会大会学術講演梗概集 C (九州), pp249 ~250,1998.9

- 3)石渡康弘，中澤敏樹他：炭素繊維シート端部定着に関する実験的研究（その1）実験概要，（その2）実験結果の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 C (中国), pp41~44,1999.9
- 4)石渡康弘，市川昌和，中島英一，荒川玄：GFRC と炭素繊維シートによる柱の耐震補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3, pp1405~1410,1999.6