

# 論文 定着金物を用いた連続繊維シートによる3方向壁付き柱のせん断補強効果

中村 洋行\*1・鈴木 英之\*2・福山 洋\*3・上田 正生\*4

**要旨**：三方向に壁を有する既存の柱をせん断補強する手法として、炭素繊維シートと定着金物を用いた工法を提案した。その補強効果を検証する目的で、実大スケールに近い大きさの試験体を製作し、構造実験を実施した。その結果、三方向に壁を有する柱試験体は、壁を貫通させたボルトと定着金物を介して、炭素繊維シートを周方向に連続させて補強することで、矩形断面に炭素繊維シートを閉鎖型に巻き付け補強した柱試験体と同等のせん断補強効果があることが明らかとなった。また、それらのせん断耐力および曲げ降伏後の靱性能は、既往の計算式によって安全側に評価できることを確認した。

**キーワード**：炭素繊維シート、定着金物、鉄筋コンクリート造、柱、せん断耐力

## 1. はじめに

連続繊維シートを矩形断面柱の表面に閉鎖的に貼り付けることによって、せん断補強効果を得、部材のせん断耐力あるいは靱性能が向上することが多くの研究により明らかとなっている。しかし現状の既存鉄筋コンクリート造柱には外壁・階段室等の非構造壁や耐震壁が付帯するため、連続繊維シートを全周に巻きつけることが困難な場合が多い。

現在までに、壁が付属する柱を連続繊維シートで補強し、その効果を確認している研究はいくつかある。磯ら<sup>[1]</sup>は、袖壁方向（面内方向）のせん断力に対して、連続繊維シートの一つである炭素繊維シート（以下、CFシート）を躯体に定着させなくても、CFシートとコンクリート間の付着力によって、袖壁付き柱の補強が可能であることを示し、その補強効果と耐力の評価法を提案している。塚越<sup>[2]</sup>らは、炭素繊維を束ねたCFアンカーを壁に設けた貫通孔に通し、樹脂で固めることでCFシートを擬似閉鎖型とする補強方法を提案しており、矩形断面に閉鎖型に巻きつけた場合と同等の補強効果があることを示している。これらの研究は、いずれも袖壁方向のせん断力に対する補強を対象としている。

一方で、柱に付属する壁と直交方向（面外方向）のせん断力に対する補強方法も提案されている。井上<sup>[3]</sup>は前述のCFアンカーを用いて、面外方向に袖壁を有する柱をせん断補強し、条件によってはCFアンカーのストランド部で破断が生じるものの、軸力比が0.2程度であれば矩形断面への巻き付け補強と同等の変形性能が得られるとしている。また、金物等を用いて連続繊維シートを定着する方法も提案されている。石渡<sup>[4]</sup>、鈴木

ら<sup>[5]</sup>、および筆者ら<sup>[6]</sup>の研究では、CFシートを金物で押さえ、金属製のボルトを用いて壁等に固定し、CFシートの定着を確保することで、壁付き柱のせん断補強が可能であるとしている。この場合は定着金物と壁を貫通するボルトが、せん断力を受ける部材の側面に位置するため、定着金物とボルトの変形や耐力が、部材のせん断耐力に及ぼす影響が大きく、定着金物の変形によってボルトに過大な応力が発生することも指摘されている。また、これらの研究の多くは、面外方向の壁と加力スタブの間にスリットを設けていないため、曲げモーメントおよび軸力の一部を袖壁が負担している。そのため、せん断耐力の上では面外方向の袖壁が有利に働いている可能性がある。このように、連続繊維シートを用いて壁付き柱の補強を行った既往の研究は、いずれも加力方向、または加力と直交方向のいずれかの方向に壁を有する柱の補強を対象としている。

耐震改修を必要とする中高層住宅では、柱の両側につく袖壁とそれに直交する戸境壁の3枚の壁が付くことが多い。通常、柱断面のせん断設計は一方毎に行うが、連続繊維シートを補強材として使用する場合は、せん断耐力を向上させる他にも、コンクリートを横拘束するという役割も重要である。つまり、連続繊維シートを用いて軸力を受ける柱を補強する場合は、せん断力が作用する方向だけでなく、それと直交方向の連続繊維も確実に応力を負担できるように、断面に対して疑似閉鎖型に巻きつける必要がある。

本論では、三方向に壁を有する柱に対して、筆者らが開発した定着金物とCFシートを用いて、疑似閉鎖型に巻きつけるせん断補強方法を提案する。そして、補強を

\*1 (株) コンステック 補強技術本部 本部長 工修 (正会員)

\*2 安藤建設(株) 技術研究所 上席研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 (独) 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員 工博 (正会員)

\*4 北海道大学工学研究科 教授 工博 (正会員)

施した実大スケールに近い大きさの柱試験体を用いた加力実験の結果を示し、既往の耐力式によって閉鎖型に巻き付け補強した場合と同様な耐力評価ができることを示す。

## 2. 壁付き柱の補強方法

### 2.1 定着金物

図-1 に壁付き柱の補強に使用する定着金物を示す。本定着金物は CF シートを閉鎖型に巻きつけられない部材を補強する際に、CF シートの端部をコンクリート躯体に定着するために開発された。CF シートを貼り付ける方向と、躯体への定着方向の組み合わせによって、平型プレートと縦型プレートの二種類がある。

図-2 に本定着金物を使用した CF シートのコンクリートへの定着方法を示す。両タイプとも金物内面側とコンクリート躯体で CF シートを押さえるとともに、シートの余長部分を折り返し、金物外面側に接着することでその定着を確保している。CF シートの定着部分は円弧の開始からであり、CF シートが補強に有効な部分と定着部分が明解に分かれていることが特徴である。

同図 c に示した平型プレートは、CF シートの引張力をボルトのせん断抵抗を介してコンクリートに伝達する。同図 d の縦型プレートではボルトの引張抵抗でコンクリートに伝達する。

### 2.2 壁付き柱の補強方法

図-3 に壁付き柱の補強例を示す。柱に付く壁の枚数は、1 から 4 枚であり、柱芯と壁芯が一致する場合、柱面と壁面が一致する場合等、様々な断面形状がある。本工法によれば、図-1 に示した平型プレートおよび縦型プレートを組み合わせることで、大抵の断面形状に対して CF シートを擬似閉鎖型に巻きつけて補強す

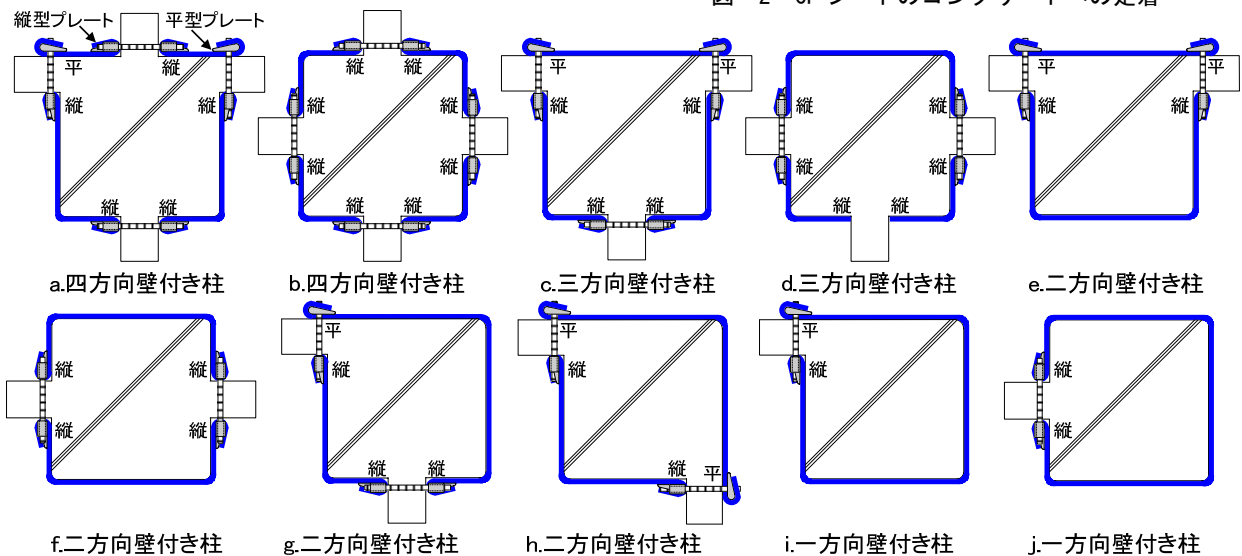


図-3 CF シートと定着金物を用いた壁付き柱の補強例

ることが可能である。本研究では、このうちの c. に示すような三方向に壁を有する柱を対象とした。

## 3. 準実大試験体による柱実験

### 3.1 試験体

図-4 に試験体の形状および配筋詳細図、表-1 に試験体一覧を示す。試験体は鉄筋コンクリート造集合住宅

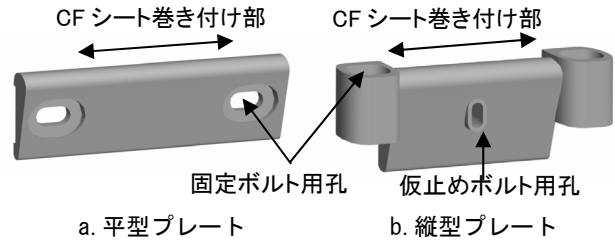
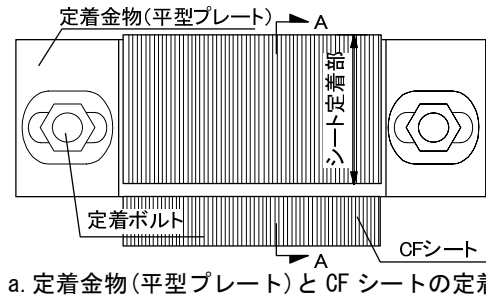
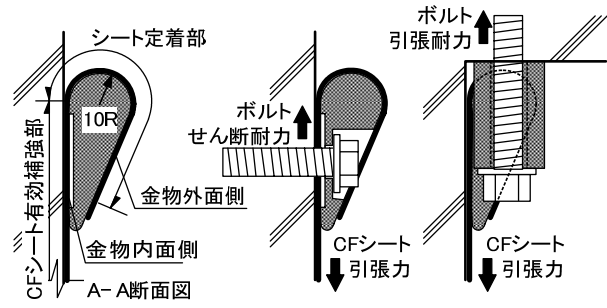


図-1 定着金物の形状



a. 定着金物(平型プレート)とCFシートの定着



b. CF シートの定着(断面) c. 平型 d. 縦型

図-2 CF シートのコンクリートへの定着

の壁付き柱を想定した実大スケールに近い試験体とし、試験体数は3体である。矩形断面のC-R-S試験体は柱断面 $b \times D = 520\text{mm} \times 520\text{mm}$ 、柱内のり高さを1560mmとし、せん断スパン比( $a/D$ )は1.5である。C-T-S、およびC-T-B試験体には袖壁および戸境壁を想定した壁を3方向に取り付けた。壁厚はすべて120mmとした。主筋は12-D19( $p_g = 1.27\%$ )とし、せん断破壊性状を把握するための試験体C-R-S、C-T-SにはSD685、曲げ降伏後の靱性能を把握するための試験体C-T-BにはSD295Aを使用した。帯筋は2-D6@150( $p_w = 0.08\%$ )、壁筋はD10@150とし、SD295Aを使用した。コンクリートの目標圧縮強度は $24\text{N/mm}^2$ とした。

矩形断面柱のC-R-Sは、目付け量 $300\text{g/m}^2$ のCFシートを幅125mm、間隔260mmとなるように2層貼付け、ラップ長200mm設けて閉鎖型となるように補強した。壁付き柱試験体のC-T-SおよびC-T-BのCFシートの補強量はC-R-Sと同様とし、CFシートの引張力が伝達できるように提案した2種類の定着金物と中ボルト(M16)を介してCFシートが疑似閉鎖型となるようにした。なお、125mm幅で2層分のCFシートの引張耐力よりも、ボルト2本の規格降伏耐力の方が大きくなっている。

柱断面の隅角部には半径20mmの面取りを施した。壁付き柱試験体の壁の上下には、幅20mmのスリットを設けた。また、壁付き柱試験体の補強においては、あらかじめ壁に設けた貫通孔にボルトを挿入し、定着金物を接続した後、CFシートを定着金物に貼付け接着し、ボルトを締め付けた。ボルトの締め付けは、長さ300mmのラチェットレンチを用いた手締めとした。

使用材料の一覧と材料試験結果を表-2に示す。コンクリートの養生は現場封緘養生とした。実験期間の始めと終わりにコンクリートの材料試験を行ったが、試験結果の差がほとんど無かったため、3試験体とも実験時のコンクリート強度は同じであるとして評価した。

### 3.2 実験方法

加力装置を図-5に示す。加力は、一定の軸力比( $N/bD\sigma_B = 0.15$ ,  $N$ : 軸力,  $\sigma_B$ : 材料試験結果によるコンクリートの圧縮強度)での正負交番繰返し载荷とした。試験体上下に取り付けたスタブが平行に維持されるよう

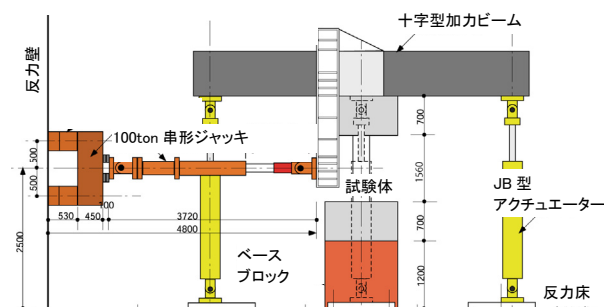
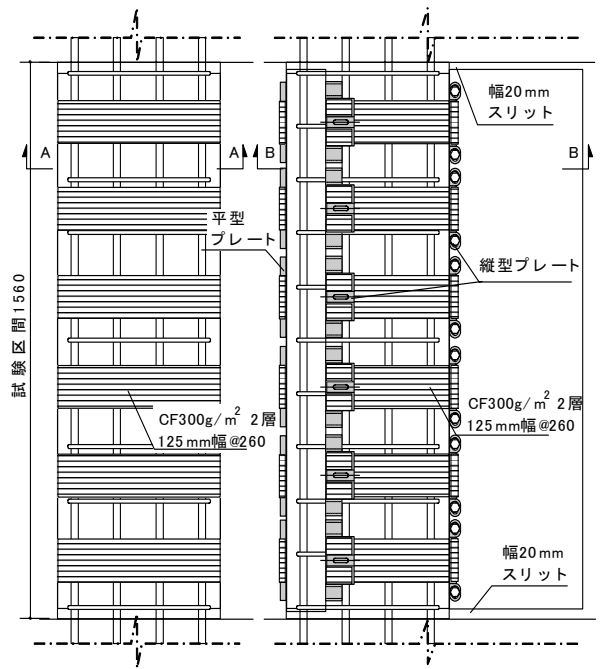
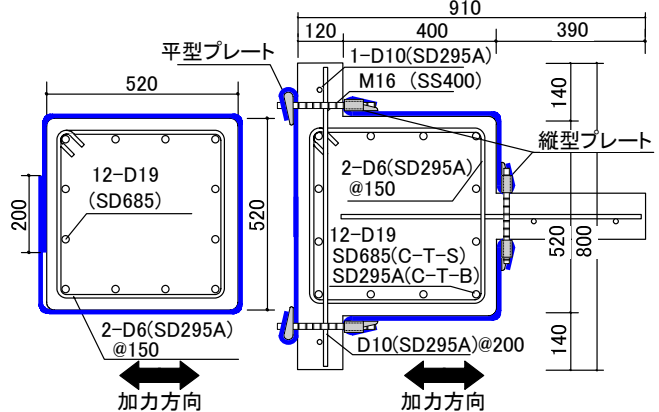


図-5 加力装置図



a. 配筋およびCFシート割付図



b. A-A断面図(矩形柱) c. B-B断面図(壁付き柱)

図-4 試験体形状と配筋詳細図

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	断面形状	主筋	帯筋	CFシート	備考
1	C-R-S	矩形柱	12-D19 (SD685)	2-D6 @150 (SD295A)	目付け量 300g/m <sup>2</sup>	せん断破壊型
2	C-T-S	3方向壁付き柱	12-D19 (SD295A)	$p_w = 0.082$ (SD295A)	125mm幅	曲げ降伏先行型
3	C-T-B				2層@260	

表-2 使用材料と材料試験結果

種類	材質	使用箇所	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D19	SD685	せん断型主筋	747	1018
D19	SD295A	曲げ型主筋	341	507
D10	SD295A	壁筋	342	482
D6	SD295A	帯筋	343	512
CFシート	目付け量	引張強度* (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数* (kN/mm <sup>2</sup> )	*メーカーによる製造ロット試験値
	300g/m <sup>2</sup>	4460	232	
コンクリート	最大骨材径	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
	20mm	24.5	2.37	22.7

表-3 加力サイクル

部材角 (rad.)	サイクル数		部材角 (rad.)	サイクル数	
	C-R-S, C-T-S	C-T-B		C-R-S, C-T-S	C-T-B
1/400	±1	±1	1/50	±1	±2
1/200	±1	±2	1/33	—	±1
1/100	±1	±2	1/25	+1	—
1/67	±1	±2	1/20	—	+1

に4本の鉛直方向アクチュエーターで制御しながら、柱内のり高さ中央位置で水平方向油圧ジャッキにより水平力を载荷した。表-3に加力サイクルを示す。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 破壊性状とせん断力-部材角関係

図-6にせん断力(Q) - 部材角(R)関係を、図-7に各試験体の最終破壊状況を示す。ここで縦軸のせん断力は、軸力によるP-Δ効果、および鉛直方向アクチュエーターの傾きによる補正を行っている。

矩形柱試験体C-R-Sは、部材角1/400rad.の载荷時に柱頭、柱脚に曲げひび割れが発生した後、1/200rad.の繰返し時にせん断ひび割れが発生した。その後、曲げひび割れ、せん断ひび割れが進展し、1/100rad.で最大耐力を迎えた。この時主筋は降伏してなく、最大耐力は748kNであった。その後の部材角の増大に伴い、せん断ひび割れが拡大し、帯状に巻き付けたCFシートに浮きが見られ、耐力が低下した。最終加力まで、CFシートの破断は無かった。破壊性状はせん断破壊であると考えられる。

壁付き柱試験体C-T-Sは矩形柱試験体C-R-Sと同様の破壊性状を示し、1/100rad.で最大耐力を迎え、最大耐力は736kNであった。

1/50rad.時に、図-8に示すように定着治具に接続されたボルトがCFシート引張力の偏心曲げにより変形し、定着金物が回転した。CFシートの定着金物への定着部分は、同図bに示すように円弧の開始から外側の部分であり、その定着性能は定着性能試験<sup>7)</sup>で確認されている。本実験では金物の回転により金物内面側の接着が切れても、CFシートの引張力をボルトに伝達できることが確認された。また、C-T-Sの最大耐力以降の耐力低下は、C-R-Sと比較して有意な差はなく、ボルトの変形による影響は見られなかった。また、C-R-Sと同様に最終加力までCFシートの破断は見られなかった。

曲げ降伏先行型の壁付き柱試験体C-T-Bは、1/160rad.で材端部の主筋が降伏した。その後、緩やかに耐力が上昇し、1/50rad.で最大耐力645kNとなった。1/50rad.以降はせん断破壊型試験体と同様にせん断ひび割れが広がり、CFシートの浮きが見られた。破壊性状は、曲げ降伏後のせん断破壊であると考えられる。最大耐力後の耐力低下は、せん断破壊型の2体と比較すると小さく、1/20rad.の時点で最大耐力の83.5%の耐力を保持していた。

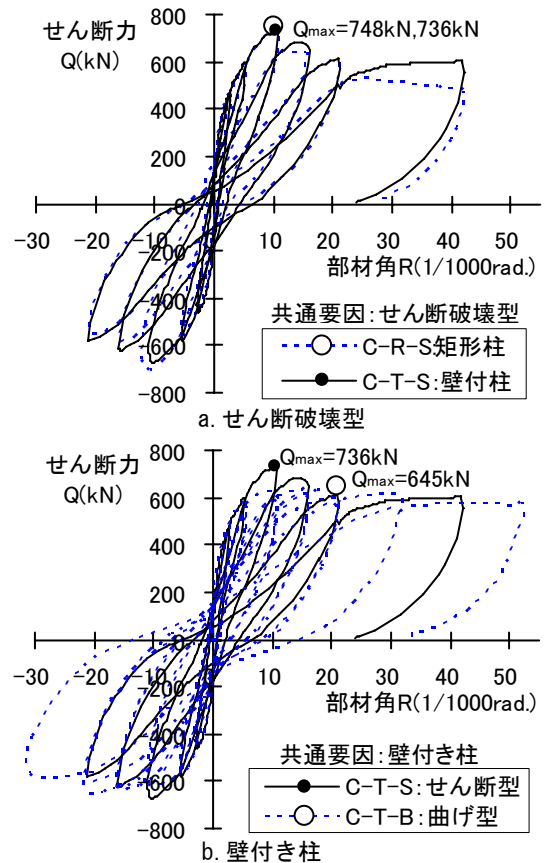


図-6 せん断力-部材角関係

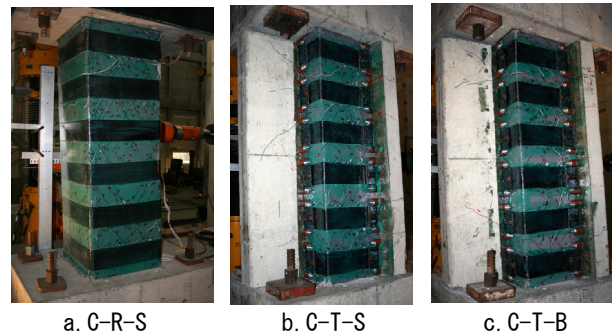


図-7 最終破壊状況

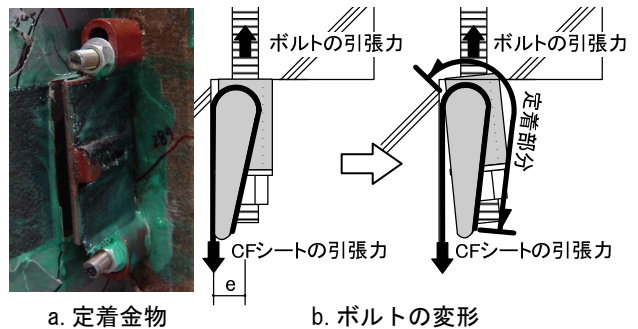


図-8 定着金物とボルトの変形模式図

##### 4.2 炭素繊維シートのみずみ

図-9に各試験体のCFシートおよび帯筋のみずみ分布を示す。せん断ひび割れが発生した1/270~1/250rad.以降に材端部1D区間の帯筋のみずみが徐々に増大し始め、せん断破壊したC-R-SとC-T-Sは最大耐力時に帯筋が降伏みずみに達した。また、1/50rad.以降において、試

験区間内すべての帯筋が降伏した。

C-R-SとC-T-Sの加力方向面におけるCFシートのひずみは、帯筋のひずみ分布と同様に1/200rad.以降に増大し始め、最大耐力時におけるCFシートのひずみはC-R-Sで0.2%、C-T-Sで0.3%程度であった。その後の部材角の増大に伴いCFシートのひずみは増大し、1/25rad.におけるひずみは0.4%~0.6%に達していた。加力直交面におけるCFシートのひずみは最大耐力後の1/67rad.以降に増大し始め、最終加力時には加力方向面と同程度のひずみを示した。結果として、定着金物とボルトを用いてCFシートを疑似閉鎖型としたC-T-Sと、巻き付け補強のC-R-Sでは、同様なひずみ分布を示しており、定着金物とボルトによってCFシートに発生した引張力を有効に伝達していることが確認された。また、ボルトが曲げ変形した1/50rad.以降においてもひずみの増大はC-R-Sと同様であり、ボルトの変形による影響は見られなかった。

曲げ降伏が先行したC-T-BのCFシートのひずみは、最大耐力後の1/33rad.に加力方向面、加力直交面共に急激に増大し始め、最終加力時にはせん断破壊型試験体と同程度のひずみを示した。

これらのことより、せん断破壊後の靱性を確保するためには、加力方向面だけでなく加力直交面のCFシートも有効に働かせる必要があり、柱に複数の壁が付随する場合においても確実にCFシートの応力を周方向に伝達させる機構が重要であることが確認された。

### 4.3 終局耐力の評価

表-4に各試験体の終局耐力計算値と実験値を示す。曲げ終局耐力は多段配筋式<sup>[8]</sup>、せん断終局耐力は修正大野荒川式<sup>[8]</sup>と靱性保証指針式<sup>[9]</sup>を準用し、材料強度は材料試験結果を用いた。但し、CFシートの設計用引張強度は連続繊維改修指針を参考とし、0.7%ひずみに材料試験結果の弾性係数を乗じた1624N/mm<sup>2</sup>とした。

靱性保証指針ではせん断補強筋で囲まれた範囲をトラス機構の有効断面積としている。ここで、CFシートで部材の外周を補強したときの有効断面積の採り方が問題となるが、ここでは安全側の評価となるようにCFシートによる補強分に対しても、トラス機構に有効な断面積は帯筋で囲まれた範囲とした。

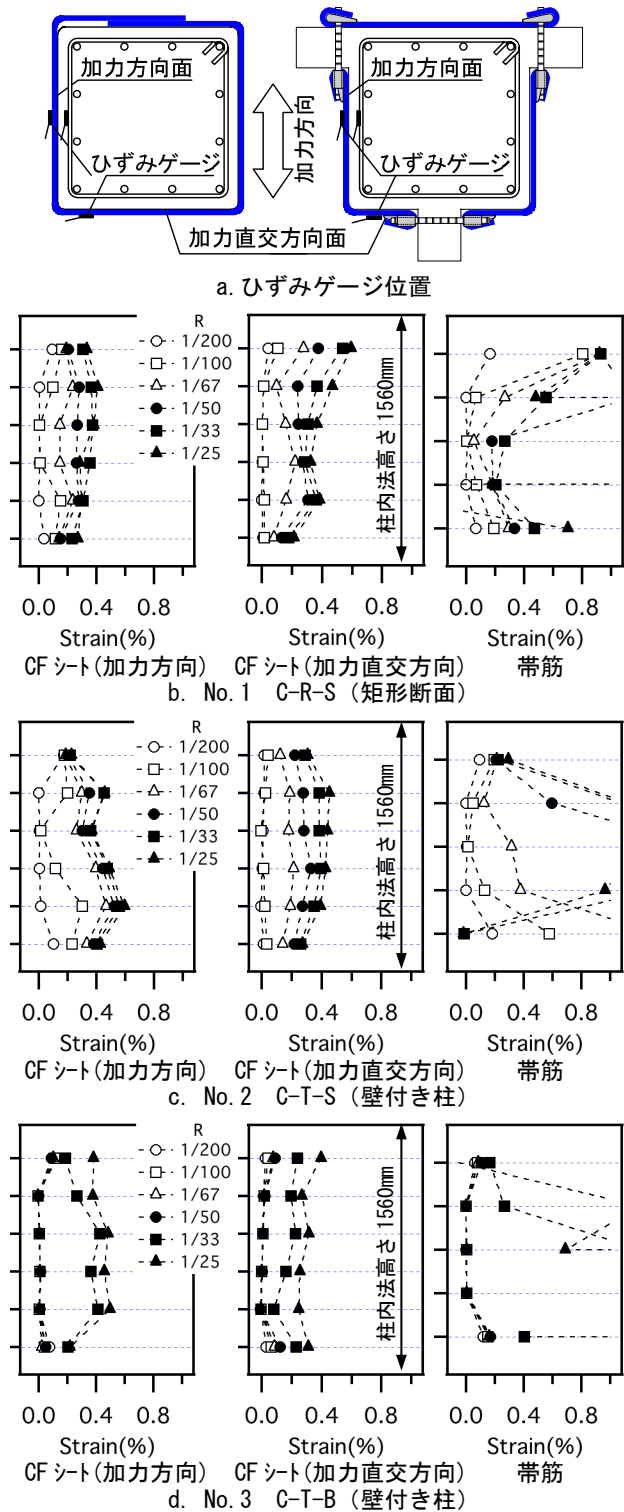


図-9 CFシートと帯筋のひずみ分布

表-4 最大耐力実験値と計算値の比較

No.	試験体名	実験値 最大耐力 Q <sub>max</sub> (kN)	曲げ耐力 Q <sub>mu</sub> (kN)	計算値			最大耐力実験値/計算値			備考
				せん断終局耐力			Q <sub>su1</sub> /Q <sub>mu</sub>	Q <sub>su2</sub> /Q <sub>mu</sub>	Q <sub>su2</sub> /Q <sub>mu</sub>	
			Q <sub>su1</sub> (kN)	Q <sub>su2</sub> (kN)	Q <sub>su2</sub> (R <sub>p</sub> 0.02)					
1	C-R-S	748	823	532 (0.65)	602 (0.73)	—	0.91	1.41	1.24	Q <sub>mu</sub> : 多段配筋式曲げ耐力時せん断力 <sup>[8]</sup> Q <sub>su1</sub> : 修正大野荒川min式(連続繊維改修指針) <sup>[8]</sup> Q <sub>su2</sub> : 靱性保証指針式 <sup>[9]</sup> ( )内はせん断余裕度
2	C-T-S	736	823	532 (0.65)	602 (0.73)	—	0.89	1.38	1.22	
3	C-T-B	645	526	532 (1.01)	602 (1.14)	378	1.23	1.21	1.07	

定着金物を使用し、せん断破壊した C-T-S の最大耐力のせん断終局耐力計算値に対する比は、連続繊維改修指針で 1.38 倍、靱性保証型指針で 1.22 倍を示し、矩形柱 C-R-S とほぼ同じ安全率で評価できる。

曲げ降伏が先行した C-T-B の連続繊維改修指針によるせん断余裕度は 1.01 であり、同指針による終局塑性率計算値は 1.1 となる。一方、C-T-B の実験結果より、最大耐力の 80% まで耐力低下した変形角は 1/20rad. 以上であり、これを限界変形角とすると終局塑性率は 8 以上となる。また、靱性保証指針式において塑性変形角  $R_p$  を 1/50rad. としたときの計算耐力は 378kN となる。降伏時変形角を 1/160rad. とすれば、 $R_p=1/50rad.$  は部材角 1/38rad. に相当する。この時、C-T-B はせん断ひび割れが拡大し耐力が若干低下していたが、せん断力は 600kN 以上であった。いずれの評価方法によった場合でも、壁付き柱に対して本工法による疑似閉鎖型として補強された柱の限界変形角は十分に安全側の評価になることが確認された。今回の実験では柱せいの 1/2 の間隔で縞模様状に CF シートを貼り付け、その効果を確認した。この間隔が更に広がった場合には、せん断補強およびコンクリートを拘束するという目的の上で不利に働くため、CF シートの間隔には制限が必要であると考えられる。

## 5. まとめ

- (1) 三方向に壁を有する柱に対して、CF シートを定着金物とボルトによって疑似閉鎖型に巻き付けるせん断補強方法を提案し、その効果を実大スケールに近い試験体の加力実験で検証した。
- (2) 本定着金物を用いた CF シート補強によって、矩形断面柱に巻き付け補強した場合と同等のせん断終局耐力が得られた。
- (3) 曲げ降伏後の靱性能を確保するためには加力直交方向の CF シートを有効に働かせる必要があり、複数の壁が柱に付随する場合においても、本工法によって周方向の応力伝達が可能であることが明らかとなった。
- (4) 提案した補強方法によるせん断耐力および靱性能は既往の計算式で十分に安全側に評価することができた。

## 付録

本文中の表-4 で使用した計算式は以下の通りである。

- ・多段配筋式による曲げ耐力時せん断力

$$Q_{mu} = 2c M_{mu} / L$$

$$cM_{mu} = 0.5 \cdot a_g \cdot \sigma_y \cdot g_1 \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D \cdot \left( 1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot \sigma_B} \right)$$

- ・修正大野荒川式によるせん断終局耐力

$$Q_{su1} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} \cdot (17.6 + \sigma_B)}{M / (Q \cdot d)} + 0.845 \sqrt{\Sigma p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} \cdot b \cdot j$$

- ・靱性保証指針式によるせん断終局耐力

$$Q_{su2} = \min \{ V_{u1}, V_{u2}, V_{u3} \}$$

$$V_{u1} = \mu \cdot \Sigma p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot b_e \cdot j_e + \left( v \sigma_B - \frac{5 \Sigma p_w \cdot \sigma_{wy}}{\lambda} \right) \cdot b \cdot D \cdot \tan \theta / 2$$

$$V_{u2} = \frac{\lambda v \sigma_B + \Sigma p_w \cdot \sigma_{wy}}{3} \cdot b_e \cdot j_e$$

$$V_{u3} = \frac{\lambda v \sigma_B}{2} \cdot b_e \cdot j_e$$

$$\mu = 2 - 20R_p$$

## 参考文献

- [1] 磯 雅人, 松崎 育弘, 園部 泰寿, 中村 洋行: 連続繊維シートによりせん断補強された袖壁付き RC 柱のせん断終局耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, No.542, pp. 147-154, 2001.4
- [2] 塚越英夫, 神野靖夫: 炭素繊維シートによりせん断補強された RC 柱および袖壁付柱の構造性能, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp. 217-218, 1998.7
- [3] 井上寿也, 益尾潔, 渡辺英義, 松井雅明, 藤井直人: 壁付き RC 柱の新しい耐震補強工法(CF アンカー)の開発: その 8 袖壁付き柱の面外加力下の構造性能, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp. 35-36, 1999.7
- [4] 石渡康弘, 市川昌和, 中澤敏樹, 福本昇: 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, Vol.22-3, pp.1543-1548, 2000
- [5] 鈴木英之, 西原寛, 松本智夫, 田畑卓: 炭素繊維シートで補強された T 型断面の梁および柱のせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20-3, pp.1183-1188, 1998
- [6] 福山洋, 藤本 効, 中村 洋行, 鈴木 英之: 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, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp. 249-250, 1998.7
- [7] 高橋茂治, 福山洋, 藤本効, 浅野芳伸, 加藤貴久, 中村洋行, 鈴木英之, 上田正生: 定着金物を用いた連続繊維シートによる RC 構造物補強工法の開発 その 2 定着金物を使用した連続繊維シート引張試験, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.475-477, 2007.8
- [8] 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およ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・同解説, 1999
- [9] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999