壁付き RC 柱への適用を想定したアラミド繊維補強工法に関する実験 EXPERIMENTS ON ARAMID FIBER RETROFIT FOR RC COLUMNS WITH WALLS

花井 伸明*, 小杉 一正**, 市之瀬 敏勝***, 白川 敏夫****

*Nobuaki HANAI, Kazumasa KOSUGI, Toshikatsu ICHINOSE
and Toshio SHIRAKAWA*

A new method for retrofitting RC columns having walls is proposed. The method is as follows: paste thin aramid fiber sheets on the column and bind the column with narrow aramid fiber sheets at large intervals. And, experiments on the shear strength, the deformation capacity, the bond performance and the applicability to short column were conducted. As a result, (1) the shear strength, the deformation capacity and the bond behavior could improve using the proposed method; (2) the mechanism of shear failure was different depending on the axial load.

Keywords: Aramid fiber, Column with wall, Shear strength, Deformation capacity, Bond splitting failure, High axial load

アラミド繊維, 壁付き柱, セン断強度, 変形性能, 付着割裂破壊, 高軸力

1. はじめに

既存不適格 RC 建物に対する耐震補強工法として, 柱を鋼板や連続繊維補強材で巻き立てる工法が一般に行われている。連続繊維補強材を用いた補強は補強材をあらかじめ成形することを要せず, 現場で直接的に柱に巻きつけることができるため, 隙間をグラウトで埋めたりせずに済むなど, 施工が容易である。しかし, 壁付き柱に適用することは困難である。

連続繊維補強材による壁付き柱のせん断補強方法として, たとえば炭素繊維を用いた工法で文献 1) のように壁に孔をあけて繊維を貫通させる補強方法が提案されている。この方法では図 1 のように孔のすぐ外側で繊維を扇状に広げることが前提としているが, 繊維を束ねたり広げたりすることなく補強できる方が都合がよい。

一方, アラミド繊維は柔らかく施工性が高い, 非導電性であるため電気設備の周囲でも施工しやすい, 等のメリットがある²⁾。アラミド繊維による壁付き柱の補強方法としては, たとえば図 2 のように繊維シートの端部をボルトと定着金物を用いて壁に固定する工法³⁾が挙げられるが, この場合繊維シートと壁の定着部分が弱点となる可能性がある。

筆者らはこれまで, 図 3(a) に示すような壁を有する RC 柱を想定してアラミド繊維による継手を設けない閉鎖的な補強方法を提案し, セン断強度や変形性能などに関して検討してきた^{4)~7)}。その補強方法とは, はじめに壁に貫通孔をあけ, 次に非常に薄いアラミド

繊維シートをカバー状に柱表面に貼り付け (以下, 「カバーシート」と呼ぶ), 最後にアラミド繊維帯を粗い間隔で各箇所を重ねて巻きつける (以下, 「帯シート」と呼ぶ) 方法である。なお, 実験においてはいずれの試験体も壁を省略し, カバーシートの上からそのま

図 1 CF アンカーを用いた工法¹⁾

図 2 定着プレートとボルトによる工法²⁾

図 3 本研究による工法

* 九州産業大学工学部住居・インテリア設計学科
准教授・博士(工学)

** ファイベックス(株)

*** 名古屋工業大学建築・デザイン工学科 教授・工博

**** 九州産業大学工学部住居・インテリア設計学科
講師・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Housing and Interior Design, Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University, Dr. Eng.
Fibex Co., Ltd.

Prof., Dept. of Architecture and Design, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Housing and Interior Design, Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University, Dr. Eng.

表 1 シリーズの一覧

シリーズ	S	Fn	Fh	Fv	B	St
主筋	D16*	D13		D16	D16*	D10
横補強筋	φ4			D4	φ4	
コンクリート 強度 (N/mm ²)	15.6	15.6 ～ 19.9	24.3	25.2	24.3	
シアスパン比 (形式)	1.6 (片持ち)			3.0 (片持ち)	2.0 (逆対称)	0.72 (逆対称)

* 高強度 (SD785 相当)

表 2 試験体名称と補強方法の一覧

記号	0	A	B	L	C	V
補強方法	無	AK90 × 1 層 (全面補強)	AK90 × 6 層	AK90 × 3 層	AK90 × 6 層	AK90 × 6 層
カバーシート	無	無	無	無	AK16 × 1 層 (横貼り)	AK16 × 1 層 (縦貼り)
シリーズ	S	SA	SB	—	SC	SV
Fn	Fn0	FnA	FnB	FnL	FnC-1 FnC-2	—
Fh	Fh0	FhA	—	—	FhC	—
Fv	—	—	—	—	FvC-1 FvC-2 FvC-3	—
B	B0	BA	—	—	BC	—
St	—	—	—	—	StC	—

試験体名称のつけ方

Fn C -1

— 同一仕様の試験体が複数ある場合の通し番号
 — 補強方法による記号 (0, A, B, L, C, V)
 — シリーズ (S, Fn, Fh, Fv, B, St)

ま帯シートを巻き付けた。これは、両側に袖壁のついた柱を帯状にせん断補強し袖壁の面内方向に载荷した既往の実験¹⁾において、破壊形式が柱部曲げ破壊の場合は最終破壊状態では柱のみが軸力とせん断力を負担することが報告されており、壁を省略しても差し支えないと判断したからである。

本稿は、既報^{4)~7)}に以下の2点について新たな検討を加えて再構成したものである。

- (1) 既報^{4)~7)}ではせん断強度評価式について試行錯誤の途中段階であったため、発表年次により異なった式となっているが、これを統一して再検証した。
- (2) 軸力条件の異なる実験^{5)~7)}について軸力の影響を検討し、既報では未検討であった軸力による破壊メカニズムの違いについて新たに言及した。

2. 研究概要

本研究では、(1) せん断強度に関する検討 (S シリーズ)、(2) 変形能力に関する検討 (Fn, Fh, Fv シリーズ)、(3) 附着に関する検討 (B シリーズ)、(4) 短柱への適用性に関する検討 (St シリーズ)、の4項目6シリーズについて対象としている。シリーズの一覧と各シリーズ内で共通する事項について表1に示す。試験体は縮尺 1/2.5 を想定し、それぞれのシリーズについて補強方法を以下に述べるように変化させて15種類21体の試験体を計画した。試験体形状を図4に示す。

補強は壁のない部分に貼り付けるカバーシートと壁に開けた孔を貫通してカバーシートの上から巻き付ける帯シートを併用する形式を基本とし、それぞれの繊維シートの有無や重ね枚数、張付け方向をパラメータとした。カバーシートには呼び名 AK16 のアラミド繊維シート (呼び名の数値は保証耐力 (tf/m) を示す) を用い、図5

図 4 試験体形状

図 5 アラミド繊維シートの配置

に示すように壁に相当する部分を避けて1層貼り付けた。帯シートには幅 20 mm の呼び名 AK90 のアラミド繊維シートを用い、横補強筋と同じ高さ位置に 120 mm ピッチで連続して巻き付け、端部は 250 mm ラップさせた (図5参照)。その際、ラップさせる位置はランダムとし施工にあたり上下に隣接した帯シートのラップ位置が近接しないよう留意した。試験体名称と補強方法の一覧を表2に示す。

3. セン断強度に関する検討

3.1 実験概要

試験体諸元を表3に示す。補強によりせん断終局強度がどれぐらい上昇するかを確認するため、曲げ降伏を生じないように主筋にSD785級の高強度鉄筋を使用し10-D16とした。横補強筋は□-φ4@120とした。コンクリートは普通コンクリートを用いた。鉄筋およびアラミド繊維シートの材料特性を表4、表5に示す。

補強パターンは以下のとおりとした。S0試験体は比較のため無補強とし、SA試験体は壁のない柱を想定して全面にAK90のアラミド繊維シートを1層巻きつけた。SB試験体は帯シートのみの補強とし、アラミド繊維補強量 $p_{wf}\sigma_{wyf}$ (p_{wf} : 帯シートのせん断補強比, σ_{wyf} : 帯シートのせん断設計用強度) がSA試験体と同量となるようにAK90を6層重ねて巻きつけた。SC, SV試験体は帯シートとカバーシートを併用し、SC試験体ではカバーシートの繊維方向が横補強筋と平行に、SV試験体ではカバーシートの繊維方向が主筋と平行になるように貼り付け、いずれも帯シートはAK90を6層重ねて巻きつけた。

せん断終局強度 Q_{su} は荒川min式により算定した。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (17.6 + \sigma_B)}{(M/Qd) + 0.12} + 0.845 \sqrt{p_w \sigma_{wy} + 0.1 \sigma_0} \right\} bj \quad (1)$$

p_t : 引張鉄筋比

σ_B : コンクリート強度

M/Qd : シアスパン比

σ_0 : 軸応力度

b : 柱幅

j : 応力中心間距離

ここで、 $p_w \sigma_{wy}$ はアラミド繊維補強量を横補強筋に換算して累加したものであり、全面補強と120 mmピッチの離散的な補強とで補強量が等しくても補強効果が違うことを考慮するため、アラミド繊維補強量分に $(1 - s/\alpha D)$ ($s = 100$ mm: 繊維帯のあき間隔, α : カバーシートの効果による係数。カバーシートを併用する場合は3, それ以外は1) を乗じた。

$$p_w \sigma_{wy} = p_{ws} \sigma_{wys} + \left(1 - \frac{s}{\alpha D} \right) p_{wf} \sigma_{wyf} \quad (2)$$

$$\sigma_{wyf} = \min [0.008 E_f, (2/3) \sigma_f] \quad (3)$$

p_{ws} : 横補強筋比

σ_{wys} : 横補強筋強度

E_f : 帯シートの弾性係数

σ_f : 帯シートの引張強度

ここで、 $(1 - s/\alpha D)$ とは、帯シートの間隔が広がるにつれせん断応力伝達に寄与する有効せいが図6(a)のように減少すると仮定したものである。また、カバーシートを併用する場合は、後述のようにカバーシートは小変形時にはせん断応力伝達に寄与するが、変形が大きくなると端部から剥離してその効果が減少する。しかし隅角部は大変形時でも剥がれにくく、帯シートの支圧を緩和して帯シートの間隔による低減を図6(b)のように緩和すると仮定し、係数 α を導入する。 α の値($\alpha = 3$)に明確な根拠はないものの、上述のようなカバーシートの効果を勘案して便宜的に与えた。横補強筋に関しては、 p_{ws} が小さくピッチの影響はあまり大きくないと考え、設計の便に配慮してこれを考慮しないこととした。なお、連続繊維耐震改修指針⁸⁾では連続繊維補強材の有効ひずみ度を繊維種別を問わず0.7%としているが、アラミド繊維シートは炭素繊維シートよりヤング係数が小さく、破断時のひずみ度が大きいことを考慮し、式(3)において

表3 試験体諸元 (Sシリーズ)

試験体		S0	SA	SB	SC	SV
$b \times D$		250 × 250				
主筋	本数・径	10-D16				
	p_l (%)	1.59				
横補強筋	本数・径	□ - $\phi 4@120$				
	p_{ws} (%)	0.083				
アラミドシート	帯シート	無	AK90 × 1 層 (全周)	AK90 × 6 層 @120		
	カバーシート	無		無	AK16 × 1 層	AK16 × 1 層 (縦貼り)
	p_{wf} (%)	0	0.34			
	コンクリート強度 (MPa)		15.6			
シアスパン比		1.6				
軸力比		0.26				
せん断強度算定値 (kN)		97	162	143	156	143*

* カバーシートは無視して算定

表4 鉄筋の材料特性 (Sシリーズ)

種別	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)
D16 (SD785 相当)	914	1.91×10^5
φ4	485	1.86×10^5

表5 アラミド繊維シートの材料特性 (Sシリーズ)

種別	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	設計厚さ (mm)
AK90	2636	1.59×10^5	0.43
AK16	3240	1.54×10^5	0.076

図6 セン断応力伝達に寄与する有効せい

はこれを0.8%としている。これは、同指針の解説で種々の実験データ^{9) ほか}を基に有効ひずみ度について検討がなされており、終局時における繊維材のひずみ度はアラミド繊維の方が炭素繊維より大きいことが指摘されていることを鑑みたものである。この扱いの妥当性については後述する。

載荷は250 kN (軸力比0.26) 一定軸力下における一方向単調載荷とし、シアスパン比が1.6となるように柱脚から400 mmの位置に水平力を作用させた。

3.2 実験結果

最終破壊状況を写真1に示す。いずれの試験体もアラミド繊維シートの破断は見られなかった。SB試験体では大きなせん断ひび割れが生じているにも拘らず脆性的な破壊には至らなかった。SC, SV試験体では変形が進むにつれカバーシートが端部より剥離し浮き上がりが生じた。

せん断力-変形角関係を図7に示す。いずれの試験体もアラミド繊維による補強によりせん断強度の大幅な改善が見られた。カバーシートの効果について、全面補強のSA試験体とカバーシートを併用したSC試験体を比較すると、小変形時にはSC試験体の方が耐力が大きいが、変形が進むにつれSC試験体の耐力低下が大きく、

(a) SB

(b) SC

写真 1 最終破壊状況 (S シリーズ)

図 7 セン断力-変形角関係
(S シリーズ)

図 8 実験値と算定値の比較
(S シリーズ)

大変形になると逆転する。これは、カバーシートが剥離してその効果が減少したからであると考えられる。また、カバーシートの繊維方向の違いを比較すると、カバーシートを横方向に貼り付けた SC 試験体では帯シートのみ補強とした SB 試験体と比べせん断強度が大幅に向上しているが、縦方向に貼り付けた SV 試験体では SB 試験体とあまり変わらなかった。つまり、カバーシートを縦方向に貼り付けてもせん断強度の改善効果は期待できない。

せん断強度の実験値と算定値の比較を図 8 に示す。補強試験体のせん断強度は式 (1) ~ (3) により安全側に評価できる。つまり、 p_{wf}

が 0.3 % 程度までであれば、本実験の範囲内ではアラミド繊維シートの有効ひずみ度を 0.8 % としても安全側の評価となることが確認された。

4. 変形能力に関する検討

4.1 実験概要

試験体諸元を表 6 に示す。主筋は Fn, Fh シリーズでは 8-D13 (SD295), Fv シリーズでは 8-D16 (SD345) とした。横補強筋は Fn, Fh シリーズでは $\square - \phi 4 @ 120$, Fv シリーズでは $\square - D4 @ 120$

表 6 試験体諸元 (Fn, Fh, Fv シリーズ)

試験体		FnC-1	Fn0	FnA	FnB	FnL	FnC-2
b × D		250 × 250					
主筋	本数・径	8-D13(1)	8-D13(2)				
	p _t (%)	0.81					
横補強筋	本数・径	□ -φ4(1)@120	□ -φ4(2)@120				
	p _{ws} (%)	0.083					
アラミドシート	帯シート	AK90(1) × 6 層 @120	無	AK90(1) × 1 層 (全周)	AK90(1) × 6 層 @120	AK90(1) × 3 層 @120	AK90(1) × 6 層 @120
	カバーシート	AK16(1) × 1 層	無		無		AK16(1) × 1 層
	p _{wf} (%)	0.34	0	0.34		0.17	0.34
コンクリート強度 (MPa)		15.6	19.9				
シアスパン比		1.6					
軸力比		0.26	0.20				
終局強度	曲げ	157	154				
算定値 (kN)	せん断	149	102	162	144	127	156
試験体		Fh0	FhA	FhC	FvC-1	FvC-2	FvC-3
b × D		250 × 250					
主筋	本数・径	8-D13(3)			8-D16		
	p _t (%)	0.81			1.27		
横補強筋	本数・径	□ -φ4(3)@120			□ -D4@120		
	p _{ws} (%)	0.083			0.087		
アラミドシート	帯シート	無	AK90(3) × 1 層	AK90(2) × 6 層 @120			
	カバーシート	無	(全周)	AK16(2) × 1 層			
	p _{wf} (%)	0	0.26				
コンクリート強度 (MPa)		24.3			25.2		
シアスパン比		1.6			3.0		
軸力比		0.33			0 ～ 0.40	0 ～ 0.50	0 ～ 0.60
終局強度	曲げ	202			146	131	116
算定値 (kN)	せん断	120	163	163	152	164	177

表 7 鉄筋の材料特性 (Fn, Fh, Fv シリーズ)

種別		降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)
$\phi 4$	(1)	485	1.86×10^5
	(2)	740	2.05×10^5
	(3)	451	1.95×10^5
D4 (SD295)		391	2.14×10^5
D13 (SD295)	(1)	388	1.99×10^5
	(2)	360	1.96×10^5
	(3)	381	1.90×10^5
D16 (SD345)		389	2.12×10^5

表 8 アラミド繊維シートの材料特性 (Fn, Fh, Fv シリーズ)

種別		引張強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	設計厚さ (mm)
AK90	(1)	2636	1.59×10^5	0.43
	(2)	2710	1.28×10^5	0.33
	(3)	2500	1.09×10^5	0.33
AK16	(1)	3240	1.54×10^5	0.076
	(2)	3010	1.30×10^5	0.054

(SD295) とした。コンクリートは普通コンクリートを用いた。鉄筋およびアラミド繊維シートの材料特性を表 7、表 8 に示す。なお、表 6 において「D13(1)」「AK90(1)」等の括弧付き数字は、同じ呼び名で製造ロットの違う鉄筋やアラミド繊維シートを区別するために付した番号である。表 7、表 8 においても同様である。表 8 を見るとアラミド繊維シートではロットによりヤング係数や設計厚さのばらつきが大きい、ヤング係数は式 (3) において考慮されている。また、設計厚さのばらつきは織りの強さに起因するものであり、同じ呼び名ならば繊維量は同じであるので、影響はないものとする。

補強パターンは以下のとおりとした。Fn0, Fh0 試験体は無補強とし、FnA, FhA 試験体は全面に AK90 のアラミド繊維シートを 1

図 9 Fv シリーズ荷重方法

図 10 Fv シリーズの変動軸力ルール

(a) Fn0

(a) FnC-1

(b) Fn0

(c) FnA

(b) FnB

(d) FnB

(e) FnL

(f) FnC-2

(c) FnC-2

(g) Fh0

(h) FhA

(i) FhC

(d) FvC-2

(j) FvC-1

(k) FvC-2

(l) FvC-3

写真 2 最終破壊状況
(Fn, Fv シリーズ)

図 11 せん断力-変形関係 (Fn, Fh, Fv シリーズ)

層巻きつけた。FnB 試験体は帯シートのみの補強とし、アラミド繊維補強量が FnA 試験体と同量となるように AK90 を 6 層重ねて巻きつけた。FnL 試験体は FnB 試験体とほぼ同様であるが帯シートの重ね枚数を 3 層とした。FnC-1, FnC-2, FhC および FvC-1 ~ FvC-3 試験体は帯シートとカバーシートを併用した。

図 12 耐力低下点の変形角

載荷は Fn シリーズは 250 kN (軸力比 0.2) 一定軸力下, Fh シリーズは 500 kN (軸力比 0.33) 一定軸力下における正負交番漸増繰り返し載荷とした。載荷位置は前章と同様とした。Fv シリーズは変動軸力下における正負交番漸増繰り返し載荷とし、シアスパン比が 3.0 となるようにクレビスを介して水平力と軸力を加えた (図 9)。軸力は図 10 に示すように正側載荷のときに軸力比 0.4, 0.5 および 0.6, 負側載荷のときに 0 となるように与えた。

4.2 実験結果

代表的な最終破壊状況を写真 2 に、せん断力-変形角関係を図 11 に示す。低軸力下における結果を見ると、無補強の Fn0 試験体は曲げ降伏前にせん断破壊しきわめて脆性的であり、補強量の少ない FnL 試験体も脆性的に破壊している。一方、十分な量のアラミド繊維補強を施した試験体は変形性能の改善が確認できた。特に、全面補強の FnA 試験体は 65/1000 rad という大変形まで荷重を保持しており、他の試験体に比べ大幅に変形性能が優れている。帯シートのみの補強とした FnB 試験体も、せん断ひび割れが生じているものの脆性的な破壊には至らなかった。カバーシートを併用した FnC-2 試験体は FnB 試験体と比較して最大耐力は変わらないが耐力低下開始時の変形が大きく、カバーシートの効果が認められる。

軸力比を 0.33 とした Fh シリーズでは、軸力比が 0.2 のときと比較して変形性能は劣っており最大耐力後の耐力低下も急激であったが、補強により無補強の場合に対して約 2 倍の耐力向上が見られた。つまり、補強前は曲げ終局強度よりかなり小さな荷重でせん断破壊していたところが、補強によりせん断強度が改善され曲げ降伏に至ったといえる。

Fv シリーズの変動高軸力下における結果を見ると、いずれの試験体も負サイクルでカバーシートもろとも曲げせん断ひび割れが生じ、20 ~ 30/1000 rad まで荷重を保持した後、圧縮側面が急速に破壊し耐力が低下した。また、このときに上述の曲げせん断ひび割れによるカバーシートの亀裂から破れが生じて剥離した。

せん断力-変形角関係の包絡線上で最大耐力の 80 % まで耐力低下した点を耐力低下点と定義する。軸力比と耐力低下点の変形角の関係を図 12 に示す。軸力比 0.2 の FnC-2 試験体では変形能力 (耐力低下点の変形角) が 48/1000 rad であったのに対し軸力比 0.33 の FhC 試験体では変形能力は 29/1000 rad であり、軸力比が約 1.7 倍になることで変形能力が約 1/1.7 倍となった。Fv シリーズは変動軸力でありシアスパン比も FnC, FhC 試験体と異なるため一概に比較できないが、FvC-1 試験体は変形能力が 33/1000 rad, FvC-2 試験体は変形能力が 29/1000 rad, FvC-3 試験体は変形能力は 22/1000 rad で

表 9 試験体諸元 (B, St シリーズ)

試験体		B0	BA	BC	StC
$b \times D$		250 × 250			
主筋	本数・径	10-D16			8-D10
	p_t (%)	1.59			0.34
横補強筋	本数・径	□ - $\phi 4@120$			
	p_{ws} (%)	0.083			
アラミドシート	帯シート	無	AK90(3) × 1 層	AK90(2) × 6 層 @120	
	カバーシート	無	(全周)	AK16(2) × 1 層	
	p_{wf} (%)	0	0.26		
コンクリート強度 (MPa)		24.3			
シアスパン比		2.0			0.72
軸力比		0.20			
終局強度	曲げ	401			259
算定値 (kN)	せん断	101	143	144	187

表 10 鉄筋の材料特性 (B, St シリーズ)

種別	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)
φ4	451	1.95×10^5
D10 (SD295)	380	1.99×10^5
D16 (SD785 相当)	855	1.98×10^5

図 13 荷重-変形角関係 (B, St シリーズ)

あり軸力比が約 1.25 倍になると変形能力が約 1/1.14 倍, 軸力比が約 1.5 倍になると変形能力が約 1/1.5 倍となった。全面補強したものについても、軸力比 0.2 の FnA 試験体の変形能力は 65/1000 rad であるのに対し、軸力比 0.33 の FhA 試験体の変形能力は 33/1000 rad であり軸力比が約 1.7 倍になることで変形能力が約 1/2 倍となった。つまり、Fn, Fh, Fv シリーズに関しては変形能力が軸力比にほぼ反比例する結果となった。

5. 付着および短柱に対する適用性に関する検討

5.1 実験概要

試験体諸元を表 9 に示す。付着に関する検討を目的とした B シリーズは付着割裂破壊先行型となるように計画し、逆対称形式として主筋を 10-D16 (SD785 相当) とした。短柱に対する適用性に関する

検討を目的とした St シリーズはせん断破壊先行型となるよう計画し、主筋を 8-D10 (SD295) とした。横補強筋は $\square - \phi 4 @ 120$ とした。コンクリートは普通コンクリートを用いた。鉄筋の材料特性を表 10 に示す。アラミド繊維シートとカバーシートの材料特性は表 8 を参照されたい。

補強パターンは以下のとおりとした。B0 試験体は無補強とし、BA 試験体は全面に AK90 のアラミド繊維シートを 1 層巻きつけた。BC、StC 試験体は帯シートとカバーシートを併用した。

載荷は 304 kN (軸力比 0.2) 一定軸力下における正負交番漸増繰返し載荷とした。変形は上下スタブ間の層間変位とした。

5.2 実験結果

せん断力-変形角関係を図 13 に示す。B シリーズでは、すべての試験体において主筋位置に沿って付着ひび割れが生じた。無補強とした B0 試験体では顕著な付着ひび割れが生じるとともに急激に耐力が低下し、以降正方向の耐力の上昇は見られなかったが、BA、BC 試験体では無補強の B0 試験体の場合と比べ、耐力低下が緩やかとなった。しかし、帯シートとカバーシートを併用した BC 試験体の耐力低下の程度は全面補強とした BA 試験体より大きく、早く耐力低下している。

主筋の上下危険断面位置でのひずみを図 14 に示す。図中矢印は最大耐力点を示す。無補強の B0 試験体では、特に正側サイクルにおいて付着がほとんど失われているのに対し、BC 試験体では最大耐力点付近以降、徐々に主筋とコンクリートの付着が減少するが、載荷終了時においても最大耐力点の 1/3 ~ 1/4 程度まで付着力が減少したにとどまり、帯状の補強でも付着性状の改善が確認された。

短柱とした StC 試験体では、最大耐力はせん断強度計算値の約 1.3 倍となったものの、早期にひび割れが急激に成長し、帯の間でせん断すべりが発生し変位制御ができなくなり終局に至った。載荷終了後に試験体を観察すると、隅角部で帯シートがカバーコンクリートに食い込んでいた (図 15、写真 3)。これは、短柱試験体のようにせん断応力度の大きな柱に帯状の補強を施すと、帯が健全であっても、帯の食い込みにより拘束効果が減少しせん断補強効果が期待できなくなってせん断破壊に至る可能性を示唆している。

6. 靱性指標および内部ひずみに関する考察

6.1 靱性指標

帯シートによる補強を施し正負交番漸増繰返し載荷を行った試験体 (表 11 参照) について、耐震診断基準¹⁰⁾に基づき靱性指標 F を算定した。表中の記号とは後述の図 16 のプロットに用いた記号である。 F 値の実験値と算定値の比較を図 16 に示す。算定値はいずれの試験体も曲げ柱として次式により算定した。

$$F = 1 + 0.27 \frac{R_{mu} - (1/250)}{R_y - (1/250)} \quad (R_{mu} < R_y) \quad (4a)$$

$$F = \frac{\sqrt{2(R_{mu}/R_y) - 1}}{0.75 \{1 + 0.05(R_{mu}/R_y)\}} \quad (R_{mu} \geq R_y) \quad (4b)$$

R_y : 層の降伏変形角 (=1/150) R_{mu} : 曲げ終局層間変形角

なお、横軸の算定値を求める際、 R_{mu} の算定に用いる柱の曲げ塑性変形角 ϵ_{mp} や R_{mu} の上限等に横補強筋間隔 100 mm で場合分けがなされる¹⁰⁾が、カバーシートを併用する場合には横補強筋間隔 100

図 14 主筋ひずみ-変形角関係 (B シリーズ)

図 15 StC 試験体破壊状況

写真 3 帯シートの食い込み状況

表 11 靱性指標の算定に用いた試験体一覧

試験体	記号	補強方法	
		カバーシート	帯シート
FnC-1	◇	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層
FnB	×	無	AK90 × 6 層
FnL	○	無	AK90 × 3 層
FnC-2	△	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層
FhC	□	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層
BC	◆	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層
StC	▼	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層
FvC-1	●	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層
FvC-2	▲	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層
FvC-3	■	AK16 × 1 層	AK90 × 6 層

図 16 F 値の実験値と算定値

図 17 内部ひずみ測定方法

mm 以下とみなし、併用しない場合は 100 mm 超としてそれぞれ算定した。また、本則は $p_t > 1.0\%$ なる場合は R_{mu} の上限が 1/250 に制限されるところ、前述のように補強による拘束効果により付着性状の改善が認められたので、これを考慮して p_t を 1.8% まで緩和して求めた。また、内りの高さによる曲げ終局変形角の上限を考慮する際、片持ち形式の試験体についてはシアスパンの 2 倍を内りの高さとして仮定した。実験値の算出にあたっては耐力低下点の変形角を R_{mu} とした。ただし、曲げ破壊モードとならなかった FnL、BC、StC 試験体については最大耐力点の変形角を R_{mu} とし式 (4a) を適用した。

いずれの試験体も補強による靱性の改善効果が顕著であり、また

図 18 内部ひずみー変形角関係 (FvC-1 下段)

図 19 断面の変形状態

実験値が算定値を上回り安全側の評価となった。

6.2 内部ひずみ

図 17 のように柱脚から 2, 3 本目 (図中, 「下段」「上段」と表記。以下同様) の帯シートに変位計を取り付け, 対面する変位計の出力を合計してはらみ出し量を測定した。これを断面幅またはせい 250 mm で除して内部ひずみとした。内部ひずみは各段とも荷重方向に「center」および「side」2 箇所の計 3 箇所, 荷重直交方向に 1 箇所測定した。また, 帯シートに貼付したひずみゲージにより, 帯シートのひずみを測定した。

内部ひずみー変形角関係の一例を図 18 に示す。図 18(a) は荷重方向, 図 18(b) は荷重直交方向である。図 18(a) 中, 実線は「center」の値, 破線は「side」の値である。なお, いずれの試験体も 2 箇所の「side」ともほとんど同じ挙動を示していたので, 図 18(a) では両「side」の平均値を取って表示する。図 11 と見比べると, 耐力が顕著に低下したサイクルの正側荷重時において内部ひずみが急激に増加していることが分かる。また, 「center」の内部ひずみと荷重直交方向内部ひずみが大きく, 「side」の内部ひずみが小さい。これは, 図 19 のようにコンクリート内部のひび割れが拡大して断面が樽形に膨らみ帯シートを押し出しているためである。このような断面の変形は一般に $p_n \sigma_{wy}$ が大きく横補強筋が降伏しないときに見られる破壊性状であり¹¹⁾, この結果は帯シートが十分なせん断補強効果・拘束効果を発揮したことを示唆している。

左右の変位計の挙動を別々に見ると, 軸力比の低い FnC 試験体では, 正荷重時に圧縮となる側では負荷荷において, 正荷重時に引張となる側では正荷重においてそれぞれ帯シートがはらみ出している (図 20(a)(b))。このことは, 衣笠ら¹²⁾ による報告とも一致する。軸力比がやや高い FhC 試験体でも同様の傾向にあるが, 若干その傾向が弱い (図 20(c))。一方, 変動高軸力とした Fv シリーズでは, い

図 20 帯シートのはらみ出しー変形角関係

図 21 帯シートのひずみー変形角関係 (「フランジ」面)

図 22 帯シートのひずみー変形角関係 (「ウェブ」面)

ずれの試験体も正荷重時に圧縮となる側, 引張となる側ともに正荷重においてははらみ出しが増加している (図 20(d))。すなわち, 軸力が高いと引張側がはらみ出し, 低いと圧縮側がはらみ出す。これは, 低軸力では部材内部におけるせん断ひび割れの拡大がはらみ出しの要因として大きく, 高軸力では圧壊によるはらみ出しが要因として大きいからであると考えられる。つまり, 軸力によって内部ひずみの生じるメカニズムが異なる。

Fv シリーズについて、「フランジ」面における下段の帯シートのひずみ-変形角関係を図 21 に、「ウェブ」面における帯シートのひずみ-変形角関係を図 22 に示す（「フランジ」面、「ウェブ」面の定義は図 17 参照）。なお、帯シートをラップさせた面（図 5 参照）では他の 3 面（6 層）より帯シートが 1 層余分に重なっているためひずみが若干小さくなるが、その影響は最大でも 6/7 であるので無視した。図より、「フランジ」面でのひずみが大きく、「ウェブ」面でのひずみが小さい。これは、図 19 に示したように、「フランジ」面において帯シートが押し出されてはらんだことによる成分が大きく、帯シートの伸び自体はあまり大きくなかったためであると考えられる。帯シートのはらみは正側載荷時に圧縮となる側より顕著であった。これは、圧縮側においてコンクリートの圧壊によるはらみ出しがより顕著であったためである。また、「ウェブ」面における帯シートのひずみはカバーシートを全面張りとした後面が前面より大きい傾向が見られた。これは、ひずみゲージを貼付する際、内部ひずみ測定治具を避けかつリード線进行处理するために、各面の中央ではなくやむを得ず一定の方向にオフセットしたため（図 5 参照）、前面では正側載荷時に引張となる側に近い方、後面では正側載荷時に圧縮となる側に近い方にひずみゲージを貼付したことの影響によるものと考えられる。言い換えれば、「ウェブ」面のひずみにおいても圧縮側と引張側で有意な差が見られたとも言える。

7. まとめ

壁付き RC 柱を想定してアラミド繊維による継手を設けない閉鎖的な補強方法を提案した。本研究により、以下の知見が得られた。

- (1) 提案した補強方法により、RC 柱の強度と変形性能が向上した。
また、主筋の付着性状についても改善が見られた。
- (2) 帯シートによる補強効果を帯間隔を考慮して低減させた上で横補強筋の $p_w \sigma_{wy}$ に累加することにより、せん断強度および靱性指標の算定値は実験値を良好かつ安全側に評価できた。カバーシートは帯間隔による低減を抑制する。
- (3) 補強試験体においては、部材断面中央付近の内部ひずみが卓越し帯シートが押し出されて、断面が樽形に変形した。このことは帯シートが十分なせん断補強効果・拘束効果を発揮したことを示唆する。ただし、軸力によって内部ひずみの生じるメカニズムは異なる。低軸力では部材内部におけるせん断ひび割れの拡大が内部ひずみの要因として大きく、高軸力では圧壊によるはらみ出しが内部ひずみの要因として大きい。

謝辞

本研究にあたり、三井住友建設株式会社・谷垣正治博士には多大なるご助言・ご助力を賜りました。また、本稿執筆に際しては元九州産業大学学生・福岡洋君の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 矢部喜堂ほか：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 1 ～その 8, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 21-36, 1999.9
- 2) “アラミド補修補強工法”, アラミド補強研究会, <http://aramid-ken.jp/03.html> (2010.9.4 参照)
- 3) 岡本直, 石橋一彦, 谷垣正治, 伊吹英昭：腰壁によって短柱化した柱のアラミド繊維シートによる補強効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp. 93-94, 1999.9
- 4) 伊藤陽祐, 花井伸明, 市之瀬敏勝, 小杉一正：壁を想定した鉄筋コンクリート柱のアラミド繊維補強, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1069-1074, 2005.6
- 5) 西健太郎, 伊藤陽祐, 花井伸明, 市之瀬敏勝：粗い間隔でアラミド繊維補強を施した RC 柱の変形性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 2, pp. 1429-1434, 2006.7
- 6) 花井伸明, 西健太郎, 日比野陽, 市之瀬敏勝：粗い間隔でアラミド繊維補強を施した RC 柱の曲げせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 1531-1536, 2007.7
- 7) 花井伸明, 小杉一正, 谷垣正治, 市之瀬敏勝：粗い間隔でアラミド繊維補強を施した RC 柱の変動高軸力下における変形性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 1351-1356, 2009.7
- 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, 2010
- 9) 朝倉見, 岡本直, 谷垣正治, 小田稔：高強度繊維巻付けによる既存 RC 柱のせん断補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 1061-1066, 1994.6
- 10) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 2001
- 11) 花井伸明, 市之瀬敏勝, 梅村恒, 野田聡：載荷履歴と配筋が RC 柱の耐力低下に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp. 175-180, 2004.7
- 12) 衣笠秀行, 野村設郎：曲げ降伏後の大変形繰返し載荷を受ける RC 梁部材のスリップ域における横方向歪蓄積により発生する破壊のメカニズム, 日本建築学会構造系論文集, No. 538, pp. 147-153, 2000.12

(2010年6月4日原稿受理, 2010年10月6日採用決定)