

論文 壁を想定した鉄筋コンクリート柱のアラミド繊維補強

伊藤 陽祐^{*1}・花井 伸明^{*2}・市之瀬 敏勝^{*3}・小杉 一正^{*4}

要旨：壁のついたRC柱のアラミド繊維補強方法として、壁に孔を開けてアラミド繊維帯を貫通させる方法を考案し、実験によりその最も効果的な補強スタイルを検討した。本実験の結果、アラミド繊維補強によって試験体のせん断強度が大幅に改善された。また、アラミド繊維の拘束により、せん断破壊後の急激な耐力低下が抑制され、単調載荷、繰り返し載荷ともにゆるやかな勾配で耐力が低下した。どの試験体においてもアラミド繊維帯の破断、剥落は見られず、本実験において提案したアラミド繊維補強方法の有効性が確認された。

キーワード：アラミド繊維、耐震補強、壁付き柱、せん断強度

1. はじめに

壁のついた柱をせん断補強する方法として、壁に孔を開けて繊維を貫通させるという提案がなされている¹⁾。この方法では孔のすぐ外側で繊維を広げる事を前提としているが、アラミド繊維においては繊維を広げることなく補強でき、また孔の間隔はなるべく広い方が施工上都合がよい。既述の文献²⁾によると、アラミド繊維における壁付き柱の補強方法としてはアラミド繊維を曲げ加工した定着プレートと直交壁を貫通するボルトを使用したものが挙げられるが、この方法では繊維シートと壁の定着部分が弱点となる危険性があり、継ぎ手部分の強度が非常に重要視されるアラミド繊維補強においてはあまり好ましい補強方法とはいえない。本研究では図-1(a)のように、壁に開けた孔にアラミド繊維帯を貫

通させることにより柱に対し閉鎖的なアラミド繊維補強を行い、継ぎ手を設けなかった。また、柱の一部の壁のない部分を非常に薄いアラミド繊維カバーで覆うことによりひび割れの発生を抑制し、コンクリートのはらみ出しを防ぐという効果についても検討した。

図-1(a)のように両側に壁の付いた柱をせん断補強すると、小さな変形で壁のせん断破壊が起こり大変形では柱のみがせん断力と軸力を負担するこ

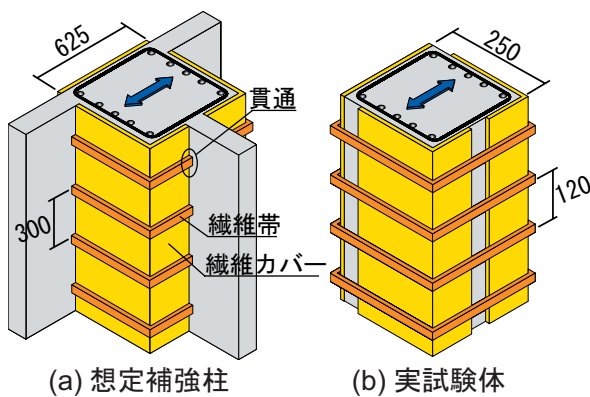


図-1 アラミド繊維補強方法

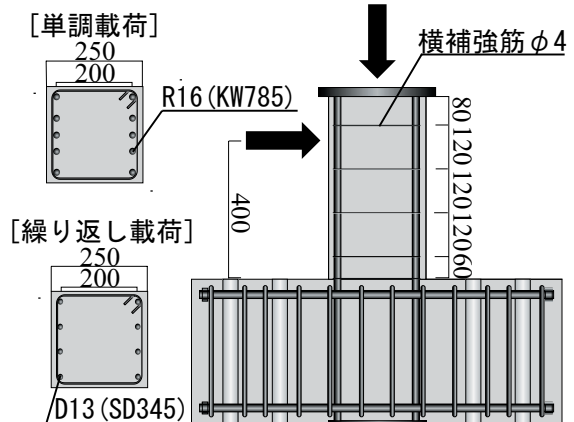
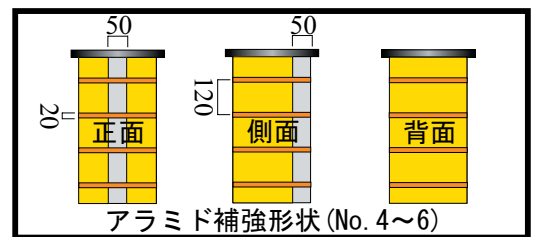


図-2 試験体形状

*1 名古屋工業大学大学院 博士前期課程社会工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 博士後期課程社会工学専攻 修士(工学) (正会員)

*3 名古屋工業大学大学院 建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)

*4 ファイベックス株式会社 建築部

とが実験で確認されている¹⁾。そこで本研究では試験体モデルを図-1(b)のように壁のないものとした。

2 実験概要

2.1 試験体形状

本実験で使用した試験体の形状、および配筋詳細を図-2に示す。横補強筋にはφ4(SS400)を使用し、横補強筋間隔は120mmとした。単調載荷ではせん断破壊型とするため主筋にリバーボンR16(KW785)を使用し、繰返し載荷では曲げ降伏先行型とするため主筋にD13(SD345)を使用した。鉄筋およびコンクリートの材料特性を表-1, 2に示し、また今回RC柱の補強に用いたアラミド繊維AK90の材料特性を表-3に示す。

2.2 試験体補強パターンと予想強度

試験体の各補強パターンを表-4に示す。試験体No.1～5までの試験体で単調載荷を行った。試験体No.6は繰返し載荷とした。試験体No.2はAK90を全周に巻き付けた。試験体No.3は幅20mmのAK90の帯を6枚重ねて巻き付けた。試験体No.2とNo.3のアラミド繊維補強量は同量であり、 $p_w=0.34\%$ である。No.4～6の試験体について

表-1 鉄筋材料特性 (N/mm²)

	降伏強度	引張強度	弾性係数
主筋(R16)	914.7	1047.8	1.91×10^5
主筋(D13)	387.9	565.8	1.99×10^5
横補強筋(φ4)	485	522.1	1.86×10^5

表-2 コンクリート材料特性 (N/mm²)

圧縮強度	弾性係数	材齢(日)
15.62	16.88×10^3	45～56

表-3 アラミド繊維材料特性 (N/mm²)

繊維名	引張強度	弾性係数	設計厚さ(mm)
AK90	2636	1.59×10^5	0.43
AK16	3240	1.54×10^5	0.076

表-4 試験体パラメータ詳細

No	載荷方法	パラメータ		せん断強度(kN)		実験強度(kN)	曲げ強度(kN)
		カバー	帯(AK90×6)	算定式1	算定式2		
1	単調	なし	なし	80	93	93	513
2		横方向全面(AK90)		204	169	186	
3		なし	120mmピッチ	155	146	165	
4		横方向(AK16)				221	
5		縦方向(AK16)				171	
6		繰返し 横方向(AK16)				158	

※ 算定式1は塑性変形能力を0とした値である

はアラミド繊維帯に加え、非常に薄いアラミド繊維カバー(AK16)を試験体表面に貼り付けてある。No.4と6は繊維が横方向、No.5は縦方向となるように貼り付けた。

表-4における算定式(1)は文献³⁾による算定式であり、トラス機構の有効係数λを操作することにより120mmピッチ、全体補強の各パターンに対応した。

$$V_u = \min \left(\frac{\lambda v \sigma_B + \sum p_w \sigma_{wy} b_e j_e}{3}, \frac{\lambda v \sigma_B b_e j_e}{2} \right) \quad (1)$$

・トラス機構の有効係数λ

$$\lambda = 1 - \frac{s}{2j_e} - \frac{b_s}{4j_e} \Rightarrow \text{この場合, } j_e = b_s = D \text{ とした。}$$

b: 柱断面幅 D: 柱断面せい

$v \sigma_B$: コンクリートの有効圧縮強度

j_e, b_e : トラス機構に関与する断面の有効せいと幅

$p_w \sigma_{wy}$: せん断補強量

s: 横補強筋間隔

b_s : 横補強筋の断面方向の最大間隔

なお、繊維カバーの効果は無視した。

次に、算定式(2)は文献⁴⁾による算定式であり、本実験では従来のような全体補強と120mmピッチ補強の格差を考慮するため、式のせん断補強量分に $(1 - s/D)$ を乗じた。

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (17.6 + \sigma_B)}{M / (Qd) + 0.12} + 0.845 \sqrt{(1 - \frac{s}{D}) \sum p_w \sigma_{wy} + 0.1 \sigma_0} \right\} b j \quad (2)$$

・アラミド繊維設計用引張強度

$$\sigma_{fd} = \min[0.07 E_{fd}, (2/3) \sigma_f]$$

M/Q: せん断スパン j: 応力中心間距離

d: 柱断面有効せい p_t : 引張鉄筋比

σ_0 : 軸方向応力度

なお、この式においても、繊維カバーの効果は無視した。

2.3 アラミド繊維補強手順 (試験体 No.4 ~ 6)

[1] 繊維シートを柱の四隅に定着させるため、試験体の四隅をサンダーにより2mm程度面取りする。

[2] 試験体の表面の凹凸をなくすため、よく研磨し、アセトンでほこりを拭き取る。

[3] エポキシとコンクリート表面の定着を促すため、試験体表面にプライマーを塗布する。

[4] まずは非常に薄いアラミド繊維カバーであるAK16を貼り付ける。カバー全体をエポキシ樹脂に浸した後、コンクリート表面に貼り付け、ローラーで定着させた。

[5] 次に同様の手順でアラミド繊維帯を巻き付けた。この際、一本のアラミド繊維帯を試験体に連続して巻きつけるように施工し、継ぎ手を設けなかった。また、アラミド繊維帯の端部定着位置は高さ方向に一面ずつずらして施工した。

2.4 載荷方法

試験体 No.1 ~ 5 は単調載荷、試験体 No.6 は正負交番漸増載荷とし、250kN 一定軸力下で載荷を行った。

3 実験結果

3.1 破壊性状

アラミド繊維養生 6 ~ 10 日後に載荷を行った。写真-1 は載荷終了後の各試験体写真である。補強試験体は全て、アラミド繊維帯 (AK90) の破断、および剥離は見られなかった。試験体 No.3 では、写真のような大きなせん断ひび割れが入っているにも関わらず、脆性的な破壊には至らなかった。また、変形が進むにつれて、試験体 No.4 ~ 6 に貼り付けたアラミド繊維カバー (AK16) が端部より剥がれ、試験体表面より浮き上がってしまった。荷重-変形関係を図-3 に示す。

3.2 単調載荷の荷重-変形関係

試験体 No.1 ~ 5 における片側押し切り載荷の荷重-変形関係を図-3 (a) に示

す。どの試験体においても初期剛性は同程度であるが、アラミド繊維による補強により、最大耐力の大幅な改善がみられた。また、それぞれの補強パターンにおいても明らかな格差が見られた。横方向繊維カバー (AK16) については、非常に微少な補強量であるため、せん断強度算定には考慮していなかったが実際の実験結果ではこのように大きなせん断強度の格差が生じ、カバーの効果がかかなり高いことが判明した。

また、せん断破壊後の性能についてであるが、無補強試験体においては横補強筋が破断し、そのたびに急激な耐力低下が見られた (図中矢印)。しかしアラミド繊維補強を施した試験体では、どの試験体においてもせん断破壊後の急激な耐力低下、横補強筋の破断などは見られず、その後は曲げ破壊のようなゆるやかな勾配で耐力が低下した。No.2 との比較により、本実験で提案した補強方法においても、従来のような全体を覆うような補強と同程度



[No.2]



[No.3]



[No.4]



[No.6]

写真-1 載荷後試験体

の変形性能改善能力が期待できるということが判明した。

図-3 (b) に、各補強パターンにおけるアラミド繊維補強試験体のせん断終局強度算定値と実験値の関係を示す。算定式 (1) では 120mm ピッチ補強試験体で精度の良い予測ができています。しかし、全体補強 (試験体 No.2) では予測値が高すぎ、精度の良い予測とは言えない。また、算定式 (2) では 120mm ピッチ、全体補強の各試験体ともに +10 ~ 30% 程度の精度で安全側の予測ができています。しかし、試験体 No.4 については実験値が予測値をはるかに上回っており、これは非常に薄い横方向アラミド繊維カバー AK16 の効果であると考えられる。今回、非常に微少な補強量であること、継ぎ手により連結されていなかったこと、などの理由によりせん断終局強度算定には考慮していなかったが、今後本実験による補強スタイルを適用する場合には、この繊維カバーの考慮が必要であろう。

3.3 繰り返し载荷の荷重-変形関係

両側漸増繰り返し载荷を行った。図-3 (c) にその荷重-変形関係を示す。繰り返し载荷においても最大耐力を示したサイクル後の変形において、脆性的な破壊は発生しておらず、またプラス側、マイナス側両方において変形角およそ $25 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大耐力に達している。以上により、アラミド繊維補強による変形性能の大幅な改善が判明した。本研究で提案した補強方法は繰り返し载荷に対しても有効である。

図-3 (c) には算定式 (1),(2) によるせん断終局

強度もプロットしている。ここで、算定式 (1) では曲げ変形による降伏ヒンジを計画している。算定式 (1) では耐力低下の勾配に関して、精度の良い予測ができていていると言える。

3.4 軸方向ひずみ

軸方向変位は試験体の四隅より载荷方向に 90 ~ 120mm 程度の位置で測定し、その 4ヶ所の平均をとる。軸方向変位を柱高さ 500mm で除したものを軸方向ひずみとする。また、伸びを正、縮みを負符号とする。

単調载荷の軸方向ひずみ-変形関係を図-4 (a) に示す。まず単調载荷であるが、試験体 No.1 と各補強試験体を比較すると分かるように、補強することによって最大耐力時の軸方向ひずみがおよそ半分にまで低減されている。また、試験体 No.1 では横補強筋量も少なく拘束効果も不十分であるため非常に早い段階から、軸方向ひずみが減少した。一方、補強試験体では耐力低下が開始するまで順当に軸方向ひずみが増加し、耐力低下と共にゆるやかに減少している。これはアラミド繊維により十分な拘束効果が与えられていることを意味している。

繰り返し载荷の軸方向ひずみを図-4 (b) に示す。単調载荷と同様、耐力低下に至るまで軸方向ひずみは順当に増加し、耐力低下開始後は軸力により軸方向ひずみが徐々に低下した。これは繰り返し载荷においても、アラミド繊維による拘束効果が有効に作用していることを示している。

3.5 内部ひずみ

コアコンクリートのはらみ出しを測定するため、図

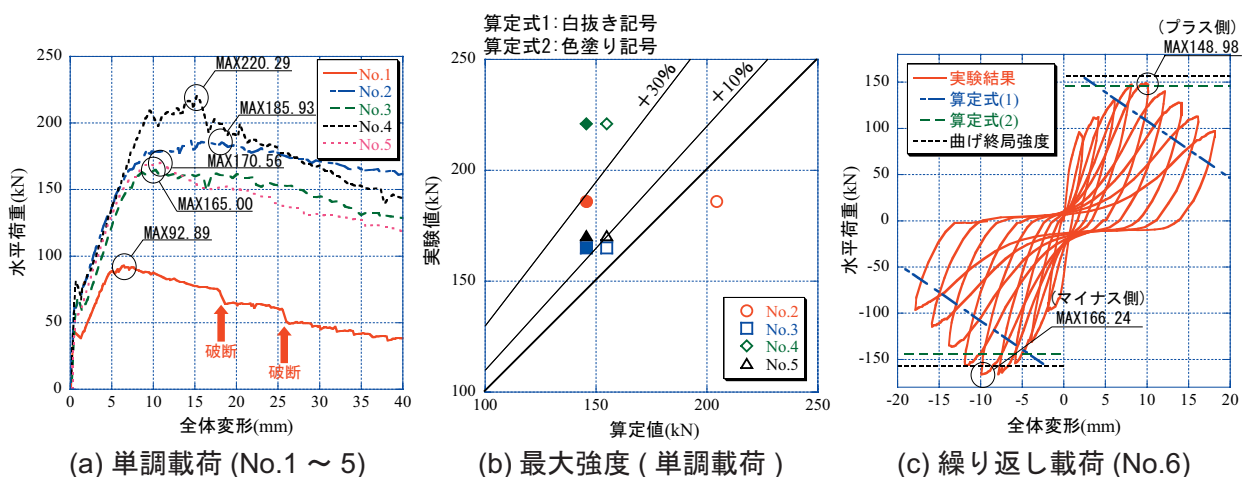
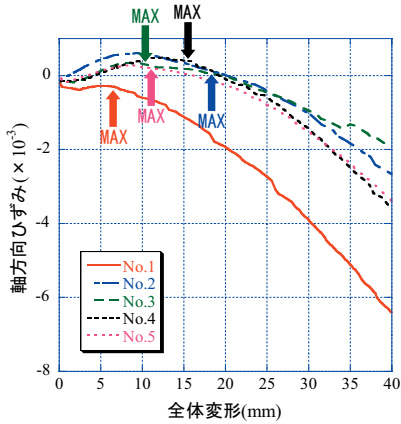
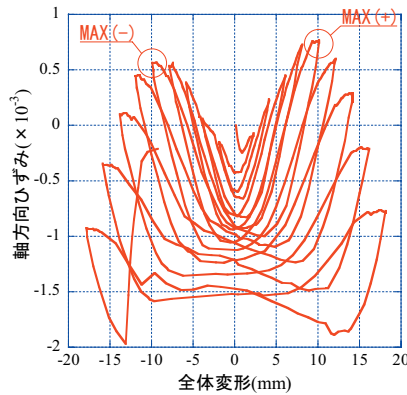


図-3 荷重-変形関係



(a) 試験体 No1 ~ 5



(b) 試験体 No.6

図-4 軸方向ひずみ-変形関係

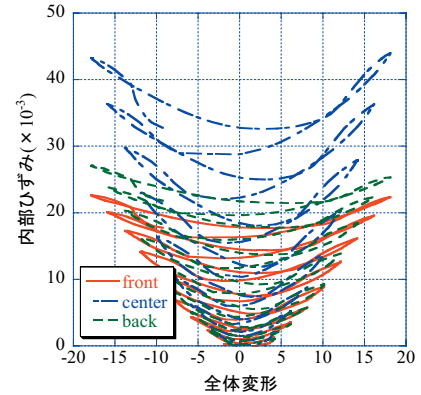


図-6 内部ひずみ-変形関係 (No.6)

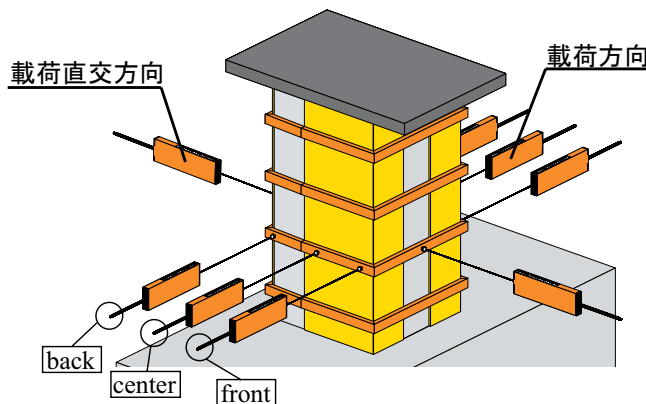


図-5 内部ひずみ測定方法

図-5のように、2個の変位計を1対として対面するように設置した。対となる変位計の測定値の和がコンクリートのはらみ出し量である。その値を断面せい250mmで除したものを内部ひずみとする。なお、測定位置は柱脚より2本目の横補強筋位置で、載荷方向は front, center, back の3点、載荷直交方向は中央の1点とした。変位計はアラミド繊維帯に直接接着されており、よってかぶりコンクリートの浮上りの影響は受けない。

試験体 No.6 における載荷方向内部ひずみ-変形関係を図-6に示す。center の内部ひずみは front, back よりかなり大きく、最大変形時にはおよそ2倍の大きさになる。つまり、コアコンクリートが内部で膨らみ、アラミド繊維を押し出しているのである。このような形態のせん断破壊は文献⁹⁾で示すように、横補強筋が十分強く降伏しないような場合に見受けられる。

よって今回の実験においてもアラミド繊維帯が横補強筋の代わりとなり、十分なせん断補強効果、拘束効果を試験体に寄与したものと考えられる。

3.6 繊維ひずみ

図-7は、試験体4面に貼り付けたひずみゲージにより計測した繊維ひずみ-変形関係である。内部ひずみと同じく、柱脚より2本目の横補強筋位置において計測を行い、載荷方向、直交方向それぞれにおいて表裏対となる2枚のゲージの測定値を平均し、各繊維ひずみとして算出した。

載荷方向、直交方向ともに同程度の繊維ひずみである。これは、アラミド繊維帯が帯全体で引張力を負担していることを示しており、よってアラミド繊維補強においては継ぎ手部分の強度が非常に重要であると言える。また、内部ひずみと比較し、繊維ひずみの値はおよそ 3×10^{-3} と、著しく小さい値となっている。また、最大耐力時(変形10mm)以降、内部ひずみは著しく増加を続けるのに対し、繊維ひずみはほとんど増加しない。すなわち、最大耐力以降の内部ひずみはそのほとんどがコアコンクリートのはらみ出し効果によるものであることが判明した。

3.7 繊維はらみ出し形状

さらに、これまでに計測した内部ひずみ、直交内部ひずみ、繊維ひずみを用いてアラミド繊維帯のはらみ出し形状を図-8に示す。試験体 No.6 での、載荷前、最大耐力時、載荷終了時の3パターンにおいてその形状を描写し、また破壊モードの違いによる比較を行うため試験体 No.4 においても試験体 No.6 と同様の3パターンの変位において、その形状を描写した。はらみ出し効果をより分かり易く表現するため、内部ひずみ、直交内部ひずみ、

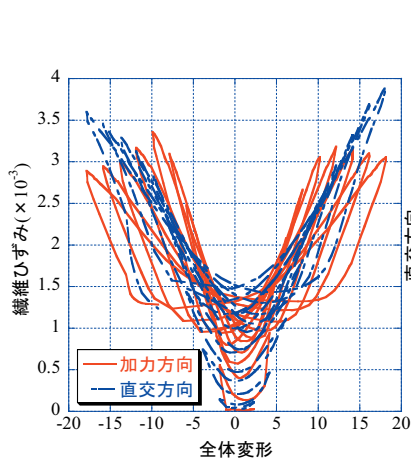


図-7 繊維ひずみ-変形関係 (No.6)

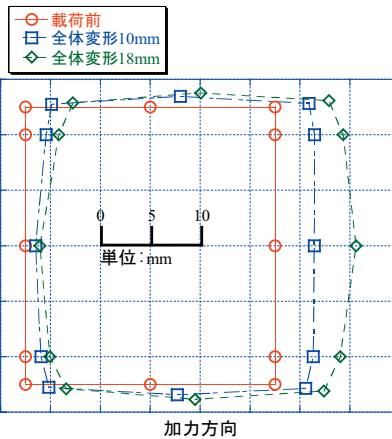
繊維ひずみにより算出した各変位を10倍し、プロットしている。

試験体隅角部のアラミド繊維帯は荷前には直角であったが、変形が進むにつれ鈍角に開き、全体的に膨らむようにはらみ出していることが分かる。最大耐力までは試験体 No.4,6 とともに左右同程度のはらみ出し量であるが。耐力低下後、試験体 No.6 では、荷方向プラス側の変形が卓越し、試験体 No.4 の倍程度のはらみ出しとなっている。これは耐力低下とともにコアコンクリートが破壊し、荷方向に大きくはらみ出したものと思われる。また、試験体 No.6 では耐力低下後の左右への繰り返し変形により塑性変形が進行し、荷終了時には荷方向マイナス側のはらみ出し変形がマイナス方向に残留していることが分かった。

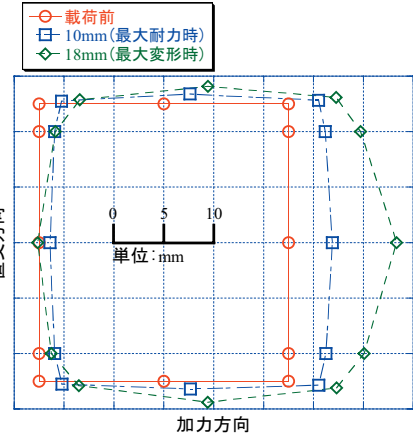
4 まとめ

本研究により以下の結果が得られた。

- (1) 単調荷、繰り返し荷両方において、本研究で提案したアラミド繊維補強方法によるせん断強度、変形能力の大幅な改善が確認された。
- (2) 変形が進み耐力低下が進行しても、アラミド繊維帯自体のひずみは 3×10^{-3} 程度であり、常に試験体を拘束し続けていた。このことがせん断破壊による急激な耐力低下を抑制する一因であると考えられる。
- (3) コアコンクリートのはらみ出しによるアラミド繊維の変形は単調荷と繰り返し荷において耐力



(a) 試験体 No.4



(b) 試験体 No.6

図-8 アラミド繊維はらみ出し形状

低下前は同程度であったが、耐力低下後は異なった形状を示した。繰り返し荷でははらみ出し量がおよそ2倍となり、左右非対称にはらみ出した。

謝辞

試験体製作に当たり、JFE テクノワイヤ株式会社には高強度鉄筋の供与を得ました。また、三井住友建設株式会社の谷垣正治博士には貴重なご助言を賜りました。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 1～8, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, pp.21-36, 1999.9
- 2) 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
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針, 1999
- 4) 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, 1999.9
- 5) 花井伸明, 市之瀬敏勝, 梅村恒, 野田聡：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