

# 論文 アラミド繊維シートの巻数が耐震補強 RC 柱の靭性向上に及ぼす影響

稲葉 はるか<sup>\*1</sup>・山川 哲雄<sup>\*2</sup>・張 爰暉<sup>\*3</sup>・岡 敬人<sup>\*4</sup>

**要旨:** 貧弱な帶筋量 ( $p_w = 0.08\%$ ) のためせん断破壊するせん断スパン比 2.0 の RC 柱をアラミド繊維シートで耐震補強した場合、その連続繊維シートの巻数 (1, 3, 6 プライ) や、柱隅角部の面取り半径 (10, 30mm) が柱の靭性向上に及ぼす影響について実験および解析的に検討し、これらの耐震補強効果を検証した。

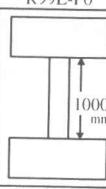
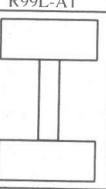
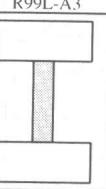
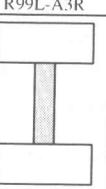
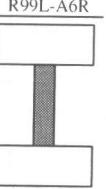
**キーワード:** アラミド繊維シート, RC 柱, 耐震補強, 靭性, 面取り半径, 巒数

## 1. 序

著者らはアラミド繊維シートで RC 柱を耐震補強する場合、靭性に富んだ曲げ破壊を期待するためにはシートによる十分な横拘束効果と、柱隅角部の面取り半径も重要であることを指摘した<sup>1)</sup>。本研究では貧弱な帶筋量 ( $p_w=0.08\%$ ) のためせん断破壊するせん断スパン比 2.0 の RC 柱をアラミド繊維シートで耐震補強した場合、その連続繊維シートの巒数 (1, 3, 6 プライ) や、柱隅角部の面取り半径 (10mm, 30mm) が柱の靭性向上に及ぼす影響について実験および解析的に検討し、これらの影響を明らかにすることが本研究の目的である。

## 2. 実験計画

Table 1 Column specimen

	R99L-P0	R99L-A1	R99L-A3	R99L-A3R	R99L-A6R
Specimen					
Ply	-	1	3	6	
$\sigma_B$ (MPa)	21.2	19.9	19.0	19.0	19.9
Curvature radius		$r=10\text{mm}$		$r=30\text{mm}$	
Reinforcement	Rebar: 12-D13 ( $P_g=2.44\%$ )		Hoop: 3.7φ -@105 ( $P_w=0.08\%$ )		

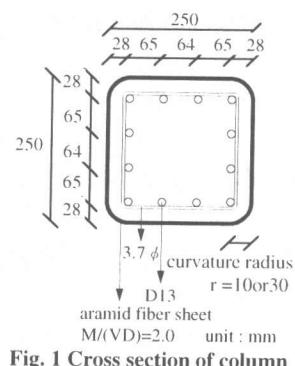


Fig. 1 Cross section of column

\* 1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

\* 2 琉球大学 教授・工博 (正会員)

\* 3 琉球大学 助教授・学術博士 (正会員)

\* 4 東洋建設

**Table 2 Mechanical properties of material**

	Thickness or cross section area	$\sigma_y$ (MPa)	$s\epsilon_y$ (%)	$sE$ (GPa)
Aramid fiber sheet*	0.193mm	2059	1.75	117.7
Rebar (D13)	127mm <sup>2</sup>	359	0.18	199.6
Hoop ( $\phi 3.7$ )	11mm <sup>2</sup>	333	0.17	195.9

\*  $\sigma_y$  and  $s\epsilon_y$  for fiber sheet are the stress and strain of fracture.

べて同じである。使用材料の力学的特性を**Table 2**に示す。連続繊維シートは厚さ0.193mm、幅300mmであり、flange中央部で定着したシートの重ね長さは200mmとし、柱高さ方向には重ねることなく、しかも隙間ができないようにそれぞれ単独に柱の外周方向に沿って巻いた。

載荷方法は一定軸圧縮力比0.2のもとで、正負繰り返し水平加力実験を行った。建研式加力装置を用い、部材角R=3%まで0.5%ずつ増分させながら各部材角で3回ずつ繰り返した。R=3%まで至っても、最大水平耐力の80%以上を維持している状態であれば、R=4%及び5%で正負1回繰り返し、耐震性能の確認を行った。

### 3. 実験結果と考察

柱試験体のせん断力一部材角関係を**Fig. 2**に示す。なお、**Fig. 2**に多段配筋柱の略算式<sup>6</sup>による曲げ強度に関しても、p-δ効果を考慮して点線で示す。耐震補強前の基準RC柱試験体R99L-P0はR=0.35から0.42%にかけて柱頭、柱脚のflange部に水平曲げひび割れが生じるとともに、R=0.5%前後で柱頭、柱脚のweb面にせん断ひび割れが発生した。R=0.5%の繰り返し加力途中で、web面中央に大きなせん断ひび割れが生じ、耐力が低下した。さらにR=1%に向かう1回目のサイクルの途中、大きなせん断ひび割れが発生した。この試験体の破壊モードはせん断破壊である。

アラミド繊維シート1プライで耐震補強した試験体R99L-A1(面取り半径10mm)は、R=±1%の1回目の加力途中で、耐力が若干低下した。R=±1.5%で最大耐力となり、3回目の加力途中柱頭近傍でシートの膨らみが生じた。R=±2%以降は、正負繰り返すごとに水平耐力が少し

づつ低下し、ループ形状も逆S字形となり、付着すべりの傾向がでてきた。加力実験終了後、シートをはぎとりひび割れ状況を観察した結果、主筋に沿ったひび割れが観察された。この試験体の最大耐力は曲げ耐力の計算値に達していないことから、破壊モードは付着破壊と判断した。

柱隅角部の面取り半径が10mmでアラミド繊維シート3プライの試験体R99L-A3は、R=1.5%のサイクルで最大耐力を示し、R=2~4%の処女サイクルのピーク時のせん断力は最大耐力からほとんど低下しておらず、かつ曲げ耐力を下回ることがないことから、この試験体の破壊モードは曲げ破壊と判断した。しかし、ループ形状は若干逆S字形を示し、かつその開む面積は小さく、一部付着すべりの傾向が見られる。

柱隅角部の面取り半径が30mmでアラミド繊維シート3プライの試験体R99L-A3Rは、同じ3プライで面取り半径10mmの試験体R99L-A3とほぼ同様に曲げ破壊となり、一部付着すべりの傾向も見られる。面取り半径が大きいため、R=4,5%の大変形時の性状は若干改善された。

柱隅角部の面取り半径が30mmでアラミド繊維シート6プライの試験体R99L-A6Rは、**Fig. 2**に示すように耐力低下も無く、しかもループ形状に逆S字形もほとんど無く、安定した履歴曲線を示す曲げ破壊となった。

アラミド繊維シート上で測定したひずみによると、繊維シートの巻数が最も少ない1プライ試験体R99L-A1で、最も大きなひずみが測定されている。その最大値は柱頭web中央面で約0.6%である。シートの巻数が多くなるにつれて、繊維シートの引張りひずみは小さく、また柱頭より柱中央部のひずみがやや小さい傾向にある。繊維シートのひずみが小さいことは、柱の損傷が小さく耐震性能が着実に改善されているとみなすことができる。web面とflange面ではひずみに差異は認められないが、web面が総体的には若干大きい。アラミド繊維シートを6プライ巻いた試験体R99L-A6Rのひずみが全体的にやや小さい傾向にあり、大きくて柱頭web中央面で最大0.2

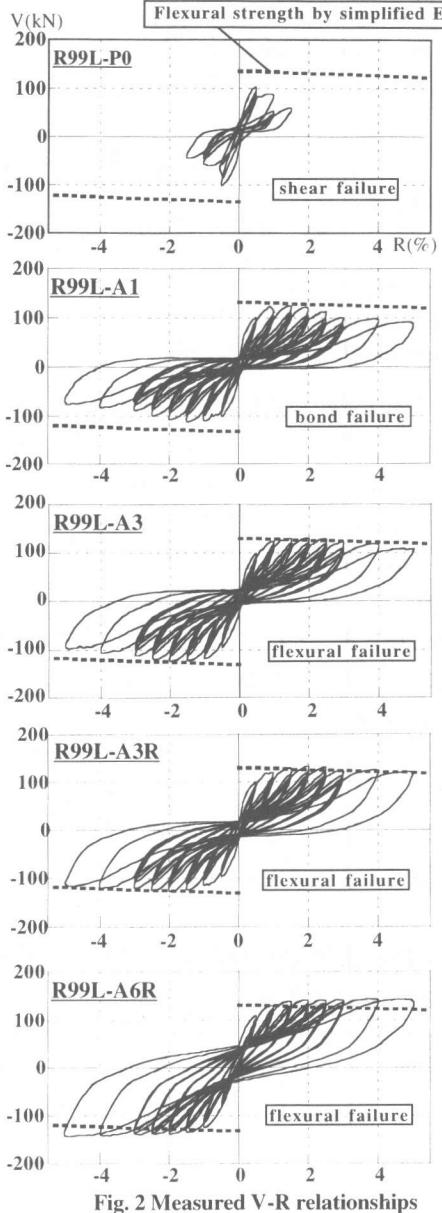


Fig. 2 Measured V-R relationships

%前後である。詳細は文献2)を参照されたい。

Fig. 3にスケルトンカーブの比較を、Fig. 4に累積吸収エネルギーの比較をそれぞれ示す。なお、Fig. 4で $R=3\%$ を境に曲線が不連続な理由は繰り返し回数が3回と1回の差異によるものである。アラミド繊維シート6プライ試験体R99L-A6Rが、当然ながら最も優れた耐震性能を示している。柱隅角部の面取り半径の効果はFig. 3およびFig. 4より、部材角が大きくなるにつれて若干

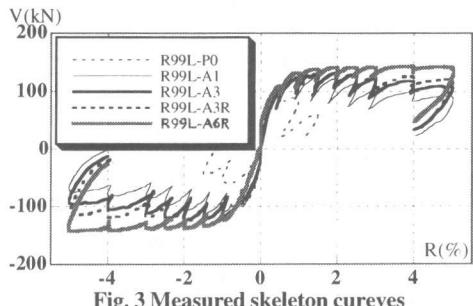


Fig. 3 Measured skeleton curves

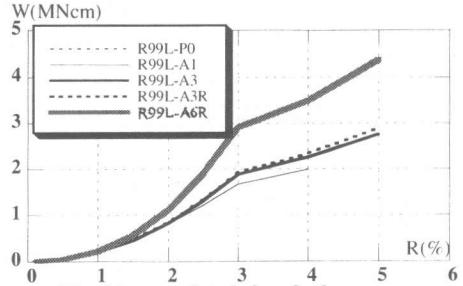


Fig. 4 Accumulated absorbed energy

認められる。しかし、文献1)で示したほどの効果は認められない。これは軸力比が小さくコンクリート強度が低いため、顕著な効果として表れなかつたと思われる。

Fig. 5に塑性率とせん断余裕度の関係を示す。塑性率は文献3)の定義に従い、最大耐力の80%に水平耐力が低下した時の部材角を、降伏強度時の部材角で除して求めた。参考までにせん断破壊した試験体も示した。Fig. 5に示すようにせん断破壊した試験体R99L-P0の塑性率は1以下となっている。また、図中の矢印は塑性率がそれ以上にあることを示す。これは加力実験が最大 $R=5\%$ で終了し、その時点でも水平耐力が最大耐力の80%以下に低下していないからである。Fig. 5よりせん断余裕度が大きくなるにつれて、塑性率も大きくなっている。なお、せん断強度Vsはスケールエフェクトを考慮した修正荒川mean式により計算した。その際、文献11)に従って繊維の計算上の降伏強度を繊維のひずみが0.7%時の応力とした。

Fig. 6にせん断余裕度 $V_s/V_f$ を横軸とし、実験値を横軸の $V_f$ と同じ多段配筋柱の曲げ強度略算値<sup>9)</sup>で除した値 $V_{exp}/V_f$ 、実験値をスケールエフェクトを考慮した修正荒川mean式<sup>10)</sup>によ

$\tau_{bu}$ =bond strength ,  $\tau_f$ =bond stress ,  $V_{bu}$ =shear strength due to bond failure ,  $V_f$ =flexural strength ,  $V_s$ =shear strength ,  $\mu$ =ductility factor ,  $V_{exp}$ =measured lateral capacity

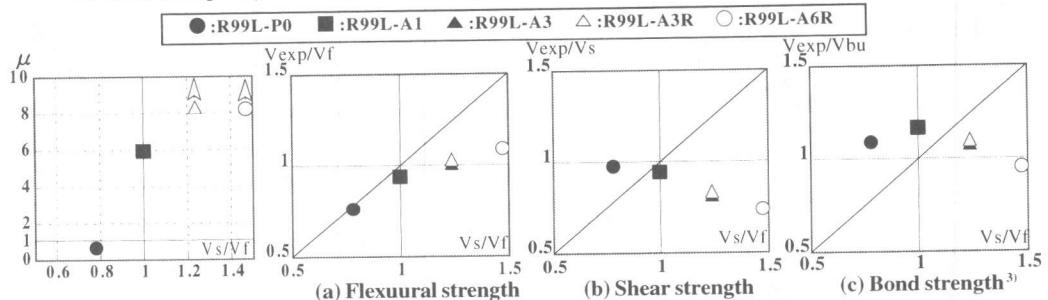


Fig. 5 Ductility factor

Fig. 6 Measured and calculated lateral capacity

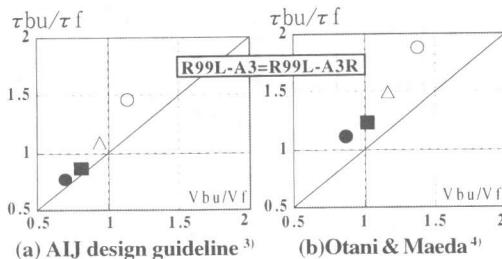


Fig. 7 Bond strength

るせん断強度計算値で除した値 $V_{exp}/V_s$ 、および実験値を付着破壊時のせん断強度 $V_{bu}$ で除した値 $V_{exp}/V_{bu}$ をそれぞれ示す。なお、 $V_{bu}$ は文献3)よりAIJの韌性指針式として計算し、その時の $\tau_{bu}$ も同様である。Fig. 6より、せん断余裕度が1を超えると曲げ破壊の性状を示し、せん断余裕度が1以下になるとせん断破壊の性状を示してくる。実験値を計算値の曲げ強度やせん断強度で除した値に上記のおおまかな傾向が認められる。Fig. 6(c)によれば、試験体R99L-A3及びR99L-A3Rの付着破壊時のせん断強度計算値 $V_{bu}$ は実験値 $V_{exp}$ より小さい。しかし、Fig. 6(a)、(b)より、これらの両試験体の曲げ強度計算値 $V_f$ は実験値 $V_{exp}$ にほぼ等しいが、せん断強度計算値 $V_s$ は実験値 $V_{exp}$ より20%前後大きい。このことより、R99L-A3及びR99L-A3Rは曲げ降伏の先行にともない、付着劣化も計算上予測される。このことは、Fig. 2のヒステリシスループからも観察され、実験結果の考察としてすでに述べた。

付着余裕度は付着強度 $\tau_{bu}$ を曲げ降伏時の付着応力 $\tau_f$ で除することによっても与えられるので<sup>3)</sup>、 $\tau_{bu}/\tau_f$ と $V_{bu}/V_f$ の関係をFig. 7に示

す。付着強度の評価はAIJの韌性指針式<sup>3)</sup>と、その原型となった小谷・前田式<sup>4)</sup>をFig. 7に示す。両者とも $\tau_{bu}/\tau_f$ が $V_{bu}/V_f$ よりも大きい傾向にあるが、 $V_{bu}/V_f$ が大きくなるにつれて $\tau_{bu}/\tau_f$ も大きくなる。AIJの韌性指針式は設計式のため、前田・小谷式よりも付着強度を低めに評価している。韌性指針式によれば、せん断破壊や付着破壊した試験体（黒色）の付着余裕度は、応力度レベルでも断面力レベルでもともに1以下になっている。さらに、繊維シート3プライで補強した試験体も $V_{bu}/V_f$ が1より小さく、付着劣化を防止するためには繊維量が不足していることを計算上示唆している。

#### 4 . 卷数と面取り半径がコンクリートの構成則に及ぼす影響

アラミド繊維の巻数と柱隅角部での面取り半径が、耐震補強後のRC柱の耐震性能に及ぼす影響については、前節までの実験結果と解析である程度明らかになった。特に、面取り半径が補強柱の弾塑性挙動に及ぼす影響を、前述までの断面力レベルや応力度レベルの強度計算式で検討することは不可能である。また、断面強度がコンクリートの強度とひずみ性状、いわゆる構成則に影響を受けることは明らかである。このことを考慮し、その影響に関して非線形有限要素法（プログラムMicro-DIANA）による検討を試みた。

ここでは、柱断面の1/4領域で、帯筋間隔の長さ部分を切り出して、これを解析の対象とした。コンクリートは三次元要素、せん断補強筋は埋め

込みト拉斯要素、纖維は線材ト拉斯要素とした。柱隅角部の面取り半径  $r$  は 5, 10, 30mm について解析を行った。 $r = 10\text{mm}$  の要素分割例を Fig. 8 に示す。コンクリート要素の高さは要素の水平方向の寸法より極端に大きいが、予備解析により、高さ方向を一分割であれ多分割であれ、解析結果に影響を与えないことを確かめた。

本解析に用いた各種要素の構成則を Fig. 9 に示す。コンクリートの引張側では、ひび割れまでを弾性、ひび割れ後では直線的に強度低下するものとした。圧縮側ではプレーンコンクリートに関する定義された Mander 式を用いた<sup>5)</sup>。破壊基準は(1)式で与えられる Drucker-Prager の降伏曲面を採用し、内部摩擦角は 25 度とした。コンクリートには分布ひび割れモデルを用いた。ひび割れ発生後のせん断応力伝達係数  $\beta$  はひび割れと直交方向のひずみ  $\epsilon'$  の関数 [ $\beta = 1/(1+4447 \epsilon')$ ] とした<sup>6)</sup>。帶筋の構成則は bi-linear 型、纖維の構成則は破断まで弾性とした。

三つの纖維補強量レベルについて面取り半径  $r$  をパラメーターとした解析結果を Fig. 10 に示す。アラミド繊維 1 プライの場合、面取り半径  $r$  による影響は殆どないが、繊維層数が増えるにつれ、最大耐力後の性状に  $r$  による影響が顕著に生じた。 $r$  が大きい場合は小さい場合に比較

し、コンクリートの圧壊性状は若干改善される。これは面取り半径が大きくなるにつれ、より有效地に中央部のコンクリートに拘束圧を与えるか

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I_1 : 応力の1次不変量 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 : 偏差応力の2次不変量 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]/6$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad k = \frac{6 \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} c, \quad c = \sigma_b \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi}$$

$c$ : 粘着力  $\phi$ : 内部摩擦角  $\sigma_b$ : コンクリート圧縮強度

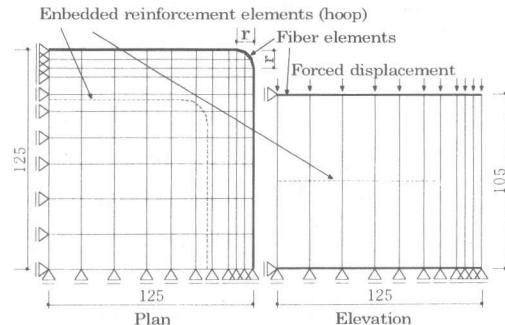


Fig. 8 An example of numerical model ( $r=10\text{mm}$ )

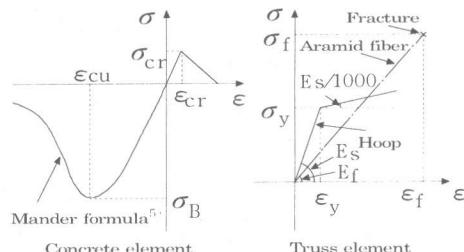


Fig. 9 Constitutive laws

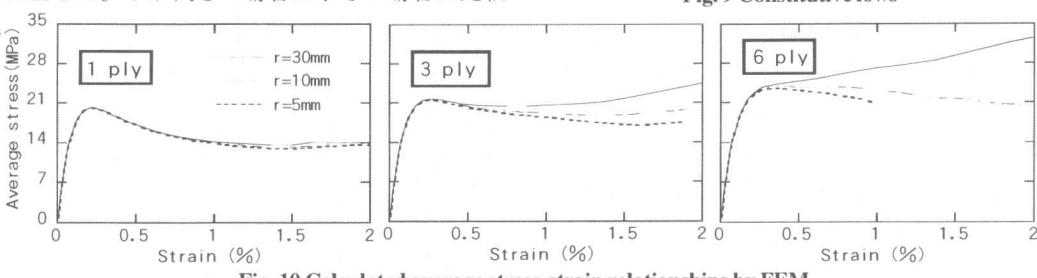


Fig. 10 Calculated average stress-strain relationships by FEM

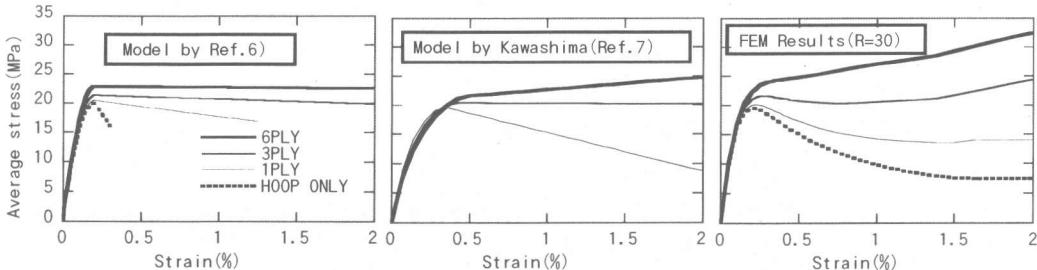


Fig. 11 Comparison of calculated results by the proposed models and by FEM

らと考えられる。また、繊維6プライの場合で $r=5\text{mm}$ の解析では、柱隅角部のコンクリート要素の支圧破壊により、軸圧縮ひずみが約1%の低いレベルで解析結果が収斂しなくなった。繊維量が多いほど、面取り半径を大きく取ることが重要であることを示唆している。

アラミド繊維層数をパラメーターとした解析結果をFig. 11に示す。比較のために既往の提案モデルもFig. 11に併記した。既往の提案モデルでは柱隅角部の面取り半径を考慮にいれることはできない。しかし、FEM解析では面取り半径の大小をFig. 10に示すように、解析上容易に組み込むことができる。従って、Fig. 10から最も影響の大きい面取り半径 $r=30\text{mm}$ についてFEM解析を行い、その解析結果をFig. 11に示し、既往の提案モデルと比較検討を行った。アラミド繊維補強研究会提案モデル<sup>6</sup>及び炭素繊維シートを準用した川島モデル<sup>7</sup>に比べ、FEM解析は繊維の拘束効果を若干過大評価する傾向があるが、コンクリートの圧縮性状が繊維量の増加と共に改善されることが定性的に評価できた。また、アラミド繊維補強研究会提案モデルでは、繊維量が極端に多い場合でも最大強度以降負剛性が生じるが、FEM解析では繊維巻数が6プライで負剛性が生じることはなかった。この傾向は川島モデルと類似している。

Fig. 10に示すように、繊維層数が3プライ以上では、柱隅角部面取り半径がコンクリートの高压縮ひずみ領域の性状に影響を及ぼす。このことはR99L-A3R( $r=30\text{mm}$ )がR99L-A3( $r=10\text{mm}$ )より大変形時の形状が若干改善されていることに対応している。

## 5. 結論

- 1) アラミド繊維シートの巻数が多くなるほど耐震性能は着実に改善される。本実験においては1プライの補強でもせん断破壊を防ぐことはできたが、付着劣化を防止することはできなかった。しかし、繊維シート巻数を多くするにつれて、付着劣化を改善することがで

き、本実験の場合3プライで柱が曲げ破壊になるよう補強できたが、付着劣化の改善には6プライを必要とした。

- 2) 柱隅角部の面取り半径の効果は、本実験で若干認められた程度である。三次元非線形FEM解析によると繊維量が多いほど、面取り半径を大きく取ることが重要であり、しかもコンクリートの構成則に及ぼす面取り半径の効果は大きいようである。

## 謝辞

本試験体の耐震補強用材料を横浜ゴム(株)から提供して頂き、その施工は地元沖縄の(株)トクシユに担当して頂きました。

## 参考文献

- 1)岡敬人, 山川哲雄, 張愛暉, 仲鵬:帶筋量の少ないRC柱にアラミド繊維シートを用いた耐震補強実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21 No. 3, pp1393-1398, 1999. 6
- 2)稻葉はるか, 山川哲雄, 張愛暉, 岡敬人:アラミド繊維シートで補強したRC柱の韌性向上に関する実験的研究, 日本建築学会研究報告九州支部, 2000. 3
- 3)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の韌性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999. 8
- 4)小谷俊介, 前田匡樹:異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着割裂強度式(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)構造II, C構造II, pp. 655-658, 1994. 9
- 5)Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 144, No. 8, pp. 1804-1826, Aug. 1988
- 6)アラミド繊維補強研究会:アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案), アラミド繊維補強研究会, 1998. 1
- 7)細谷学, 川島一彦, 星隈順一:炭素繊維シートで横拘束されたコンクリート柱の応力-ひずみ関係, 東京工業大学地震工学研究グループ, TIT/EERG 96-2, 1996. 9
- 8)J.G. Rots : Computational Modeling of Concrete Fracture, Dissertation, Delft Univ. of Technology, 1988
- 9)日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-1999, 日本建築学会, 1999. 11
- 10)李正浩, 清水泰:鉄筋コンクリート柱部材の終局限耐力に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, No483, pp. 121-128, 1996. 5
- 11)建設省住宅局建築指導課:連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造建物の改修設計・施工指針, 日本建築防災協会, 1999. 9