

論文

[1176] 高強度繊維巻付けによる既存 RC 柱のせん断補強

浅倉 晃*1・岡本 直*2・谷垣 正治*3・小田 稔*3

1. はじめに

本研究は、既存鉄筋コンクリート構造物に高強度繊維を巻付けてせん断補強を行う工法に関するものである。この方法は、軽量でしなやかな繊維材料を用いるという点で、従来の鋼板接着工法 [1] に比較して施工性に優れ、大巾な工期短縮が期待できる。筆者らは、すでにアラミド繊維テープを巻付けた場合のせん断補強に関する基礎的実験 [2] について報告した。本論文では、アラミド繊維およびカーボン繊維を巻付けた部材のせん断耐力をより定量的に把握することを目的とし、部材の曲げせん断加力実験を行い、せん断耐力の評価式の提案を行った。

2. 実験方法

2. 1 巻付け繊維材料

実験に用いた巻付け材料は写真 1 に示すテープ状の織物で、軸方向にアラミド繊維またはカーボン繊維を用い、軸直交方向にナイロン繊維を用いている。表 1 に巻付け材料の諸元を示す。巻付け材料は、「アラミドテープ」、「1/2アラミドテープ」、「1/4アラミドテープ」、「1/4カーボンテープ」の 4 種類である。アラミドテープは、幅約 75mm で繊維量は 307,200 デニール (1 デニール=1g/9000m) である。1/2アラミドテープは、アラミドテープと同幅であるが、繊維量は半分である。1/4アラミドテープは、アラミドテープと比較して幅が半分で、繊維量が 1/4 である。1/4カーボンテープは、1/4アラミドテープと同幅、同繊維量である。表 1 に巻付け材料の材料試験結果を示す。材料試験には、各テープを常温硬化型エポキシ樹脂 (以下樹脂とする) で含浸し硬化させたものを用いた。アラミドテープおよび 1/2アラミドテープの引張強度は、1/4アラミドテープと比較して若干小さな値であるが、これはテープ幅が大きいものでは引張応力が幅方向に一様に分布しないためと考えられる。

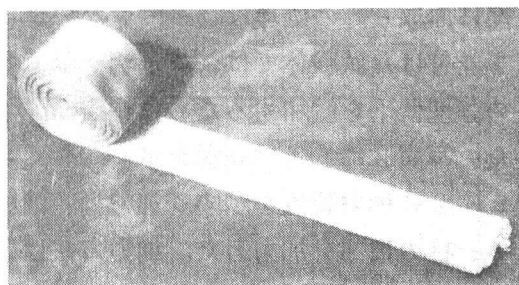


写真 1 巻付け繊維材料

表 1 巻付け材料の諸元および材料試験結果

名称	繊維量 ×6000 デニール	幅 (mm)	断面積*1 (cm ²)	引張耐力 (kgf)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)
アラミドテープ	51.2	75	0.3450	4,570	13,246	0.6×10 ⁶
1/2アラミドテープ	25.6	75	0.1725	2,240	12,986	0.6×10 ⁶
1/4アラミドテープ	12.8	37.5	0.0863	1,390	16,125	0.6×10 ⁶
1/4カーボンテープ	12.8	37.5	0.0863	1,190	13,805	1.0×10 ⁶

*1: 樹脂含有率50%と仮定した値

2. 2 試験体

表 2 に試験体一覧を示す。各試験体とも既存 RC 造柱は同一形状で、試験体のパラメータは、巻付け材料、巻付け繊維量、既存 RC 柱と繊維の接着の有無、加力方法の 4 種類である。

- * 1 ショーボンド建設 (株) 建築事業部技術部 (正会員)
- * 2 三井建設 (株) 技術開発推進部 主席研究員 (正会員)
- * 3 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 (正会員)
- * 4 三井建設 (株) 技術研究所 (正会員)

巻付け材料の種類は2.1に示した4種類で、1/4アラミドテープを中心に実験を行った。巻付け繊維量は、巻付け繊維せん断補強比 (p_w) でアラミド繊維が0.046~0.368%、カーボン繊維が0.046~0.138%であり、巻付けなしの試験体も1体行った。CA22-U10, U5試験体では、ビニールシートを用いて既存RC柱と繊維の接着を切っている。

既存RC造柱は、巻付け繊維のせん断補強効果を明瞭にするため、図1に示すように横補強筋を有していない。主筋の材料試験結果を表3に、コンクリートの材料試験結果を表4に示す。

柱への巻付けは、樹脂を柱表面に塗った後、繊維テープを巻付け、その上から樹脂を含浸させる方法で行った。アラミド繊維を巻付けた試験体は、コーナー部に面取り等の処理は行っていないが、カーボン繊維を巻付けた試験体では、コーナー部でのカーボン繊維の強度低下を緩和するために幅1cmの面取りを行った。写真2に巻付け状況を示す。

図2に加力装置を示す。加力は、油圧ジャッキを用い、柱の頂部を加力した。加力方法は、CA22-3.75C試験体のみ正負交番繰返し载荷とし、その他の試験体は一方方向単調载荷とした。

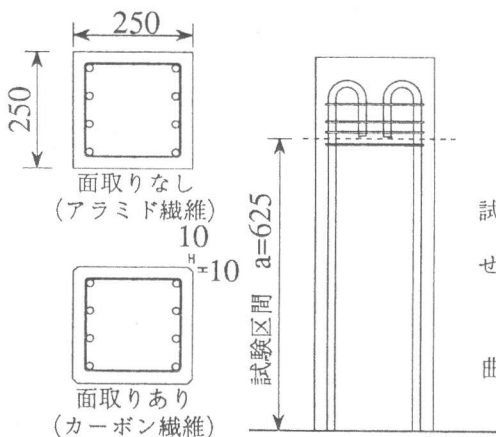


図1 既存RC造

表2 試験体一覧

試験体名	巻付け材料	巻付けピッチ (mm)	p_w^{*1} (%)	接着の有無	面取りの有無	加力方法			
C-0	なし	—	—	—	—	単調			
CA22-15	1/4アラミドテープ	150	0.046	有	無				
CA22-12.5		125	0.055						
CA22-10		100	0.069				無		
CA22-U10				75				0.092	有
CA22-7.5									
CA22-5									
CA22-U5		50	0.138	無					
CA22-3.75		37.5	0.184						
CA22-3.75C				繰返し					
CA2-10	1/2アラミドテープ	100	0.138	有	有				
CA2-7.5		75	0.184						
CA-10	アラミドテープ	100	0.276						
CA-7.5		75	0.368						
CC22-15	1/4カーボンテープ	150	0.046						
CC22-10		100	0.069						
CC22-5		50	0.138						

*1: 巻付け繊維せん断補強比

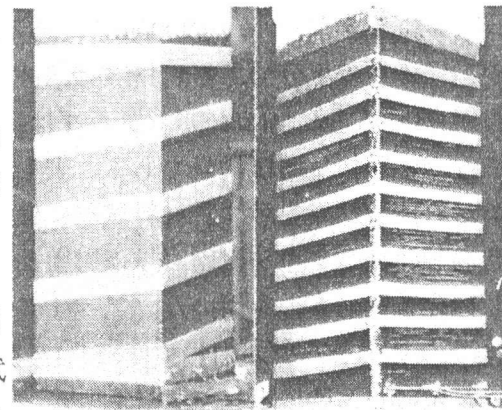


写真2 巻付け状況

表3 鉄筋の材料試験結果

種類	材質	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)
D16	SD390	4,516	6,666	1.85×10 ⁶

表4 コンクリート材料試験結果

材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)	ポアソン比	割裂強度 (kgf/cm ²)
28	211	2.49×10 ⁶	0.200	19.03
60	251	2.81×10 ⁶	0.184	26.60
77	254	2.65×10 ⁶	0.174	27.40

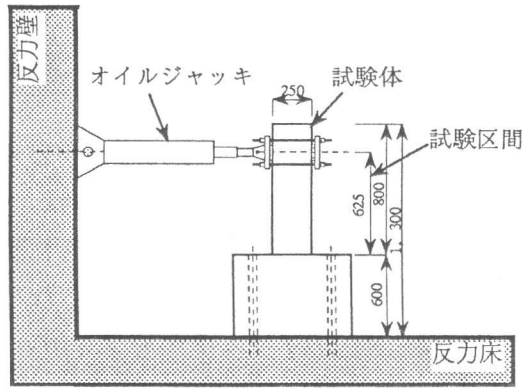
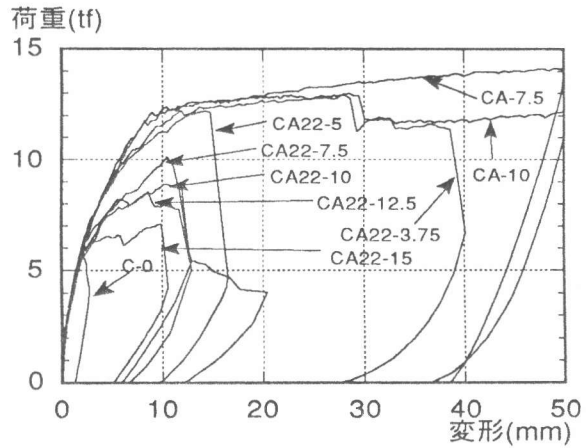
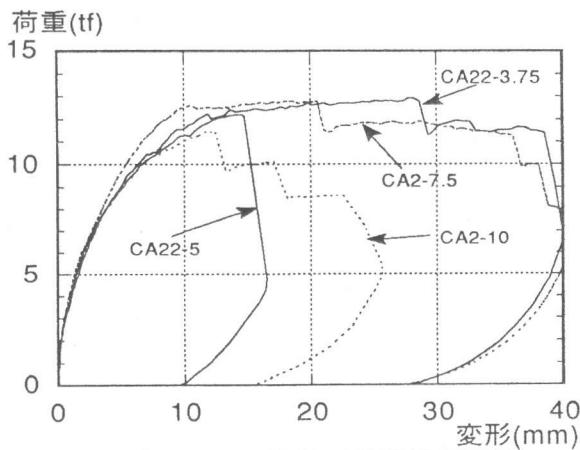


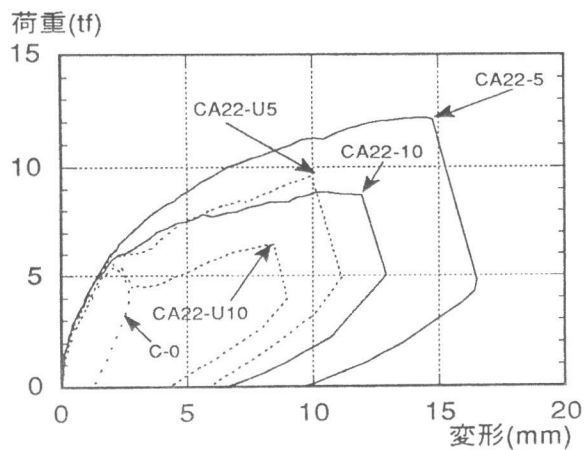
図2 加力装置



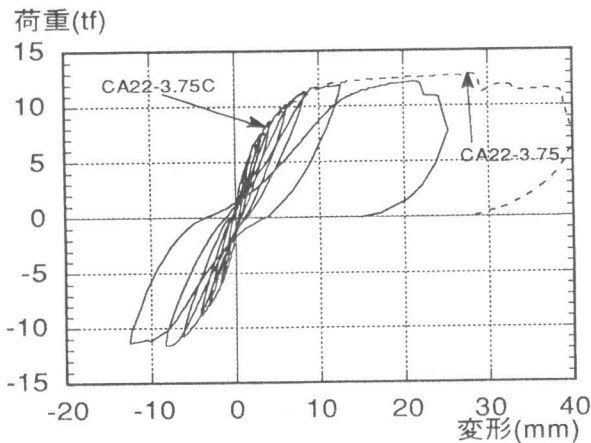
(a) 巻付け繊維量による比較



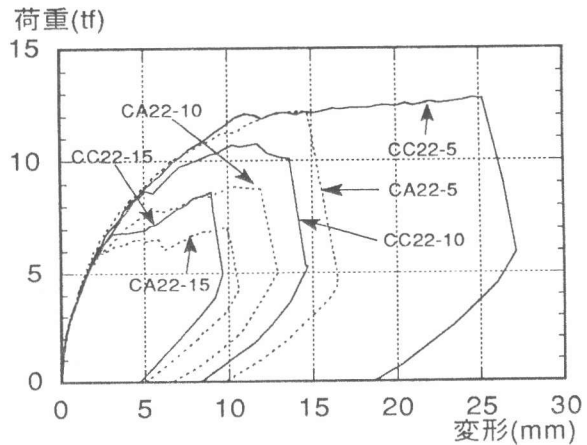
(b) 幅の違いによる比較 (同繊維補強量)



(c) 接着の有無による比較



(d) 単調荷重と繰返し荷重の比較



(e) アラミド、カーボンの比較

図3 荷重-変形関係

3. 実験結果

3.1 荷重-変形曲線の比較

図3 (a) にアラミド繊維の巻付け補強量の違いによる比較を示す。巻付けなしのC-0試験体は、変形角 $1/285\text{rad}$ 時に5.68tonでせん断破壊している。巻付け補強した試験体も、せん断ひびわれは変形角 $1/285\text{rad}$ 時に入り、その後繊維と既存RC部の接着が徐々に剥がれ始める。CA22-15, 12.5, 10, 7.5, 5試験体は、繊維がコーナー部で破断しせん断破壊した。CA22-3.75試験体は、主筋が曲げ降伏した後、変形角 $1/22\text{rad}$ 時に若干耐力が低下し、変形角 $1/16\text{rad}$ 時にコー

ナー部の繊維破断によりせん断破壊した。CA-10, 7.5試験体は曲げ降伏破壊で、CA-7.5試験体は変形角 $1/25\text{rad}$ 時においても耐力低下が見られなかったが、CA-10試験体は、部材変形角 $1/21\text{rad}$ 時に若干の耐力低下が見られた。

せん断破壊した試験体においては、巻付け補強量の増加にともなって、せん断ひびわれ後の剛性低下が小さくなっている。また、巻付け繊維量の少ないCA22-15, 12.5, 10試験体は、せん断ひびわれが入ることにより若干の耐力低下が見られるが、その後変形が進むとともに耐力は上昇している。CA22-7.5, 5試験体では、せん断ひびわれが入っても耐力の低下は見られない。

図3 (b) に同補強量で $1/4$ アラミドテープを用いた試験体と $1/2$ アラミドテープを用いた試験体の比較を示す。同繊維量の比較では、 $1/4$ アラミドテープを用いた試験体の方が、 $1/2$ アラミドテープを用いた試験体よりも最大耐力、変形性能が若干高くなっているが、大きな違いは見られなかった。

図3 (c) に既存RC柱と繊維の接着の有無による比較を示す。接着がないCA22-U10, U5試験体は、せん断ひびわれが入ると剛性が低下し、最大耐力、変形性能ともに接着があるものよりも低下している。

図3 (d) に加力方法の違いによる比較を示す。単調载荷の試験体と繰返し载荷の試験体とも、最大耐力まで荷重-変形関係に大きな違いはないが、その後の変形性能は繰返し载荷の試験体の方が小さい。

図3 (e) にアラミド繊維とカーボン繊維の試験体を比較して示す。カーボン繊維を用いた試験体はアラミド繊維を用いた試験体よりも、せん断ひびわれ後の剛性が高くなっている。これは、カーボン繊維のヤング率が、アラミド繊維のヤング率よりも高いためと思われる。カーボン繊維では、柱コーナー部の面取りを行っているので、繊維の強度を直接比較することはできないが、カーボン繊維を用いた試験体の方がアラミド繊維を用いた試験体よりも耐力が高くなっている。

3. 2 繊維のひずみ

図4にCA22-7.5試験体の繊維のひずみ分布を示す。ひずみの値は、各変形時の各段の最大の値を示した。各段のひずみは、ひび割れ近傍で大きくなる傾向にあった。繊維材料は弾性であり、ひずみ値は応力度に比例するので、この図より各段の繊維の引張力が必ずしも同一でないことがわかる。したがって、せん断破壊時においてせん断ひびわれを横切る各段の繊維は必ずしも引張強度に達しているとは限らない。アラミド繊維とカーボン繊維で同繊維量の補強をした試験体を比較すると、同一変形角では同程度のひずみを示した。

4. 考察

4. 1 最大耐力

表5に曲げ耐力、せん断耐力の計算値および実験より得られた最大耐力と最大変形、破壊形式を示す。せん断耐力の計算値は、荒川mean式と日本建築学会指針式（以

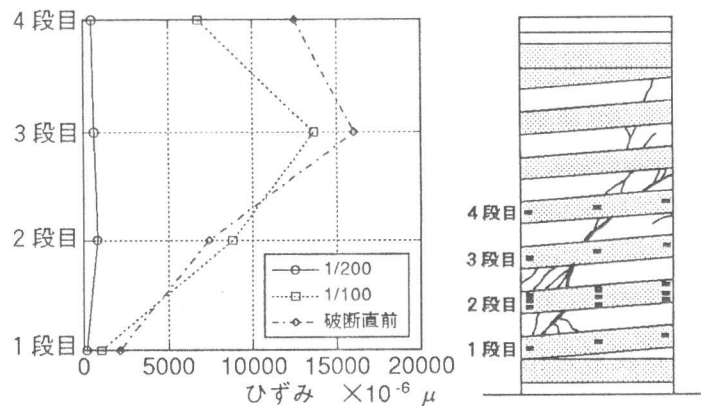


図4 繊維のひずみ分布 (CA22-7.5)

下、学会指針式)を用いて算出し、せん断補強量 $p_w \sigma_{wy}$ は(1)式により算出した。

$$p_w' \sigma_{wy} = p_w' \sigma_{wy} + \alpha \cdot p_w' \sigma_{wy} \quad (1)$$

p_w' : 巻付け繊維せん断補強筋比

$f \sigma_{wy}$: 繊維直線部の引張強度

p_w' : 既存RC部せん断補強筋比

σ_{wy}' : 既存RC部せん断補強筋引張強度

α : 低減係数 ($\alpha = 1/3$)

低減係数 α は、鉄筋と繊維のヤング係数の違いや繊維のコーナー部での耐力低下を考慮して1/3とした[2]。 $p_w' \sigma_{wy}'$ は、既往の実験結果[2]を評価する際に用いている。

図5にせん断余裕度(cQs/cQm)と最大耐力を曲げ耐力

計算値で除した値(eQ/cQm)の関係を文献[2]の試験体も含めて示す。図5(b)(学会指針式)には、せん断破壊した試験体のデータを回帰した直線も示す。最大耐力を荒川mean式で計算すると、補強量の少ない試験体(CA22-15)が計算値を下回った他は計算値を上回っている。しかし、巻付け補強量が増えるに従って、最大耐力を過小評価する傾向があり、カーボン繊維で補強した試験体は特にその傾向が強い。最大耐力を学会指針式で計算すると、せん断耐力は計算値よりも多少過小評価しているが、傾向はよくあっている。せん断破壊した試験体の回帰直線と比較すると、学会指針式は、せん断耐力を3割程度安全側に評価している。また、曲げ耐力

表5 計算耐力と実験結果の一覧

試験体名	計算値			実験結果		
	曲げ耐力 cQm^{*1} (ton)	せん断耐力		最大耐力 eQ (ton)	最大変形 $e\delta$ (mm)	破壊形式 ^{*4}
		$cQs1^{*2}$ (ton)	$cQs2^{*3}$ (ton)			
C-0		5.61	4.31	5.68	2.19	SD
CA22-15		7.61	6.15	7.08	9.89	SD
CA22-12.5		7.80	6.52	8.53	8.63	SD
CA22-10		8.06	7.07	8.88	11.95	SD
CA22-U10		8.06	7.07	6.45	8.45	SD
CA22-7.5		8.43	7.99	10.13	10.49	SD
CA22-5		9.07	9.83	12.20	14.76	SD
CA22-U5		9.07	9.83	9.63	9.97	SD
CA22-3.75	11.13	9.60	11.67	12.90	28.65	BSD
CA22-3.75C		9.60	11.67	12.23	21.96	BSD
CA2-10		8.71	8.76	11.48	12.43	SD
CA2-7.5		9.20	10.24	12.78	20.55	BSD
CA-10		10.04	13.39	13.00	50.08	BD
CA-7.5		10.73	16.42	14.20	50.04	BD
CC22-15		7.46	5.88	8.63	8.98	SD
CC22-10		7.87	6.67	10.57	11.73	SD
CC22-5		8.81	9.04	12.78	25.19	BSD

*1: 曲げ略算式 $cQm = 0.9a \cdot \sigma_y \cdot d/a$

*2: 荒川mean式

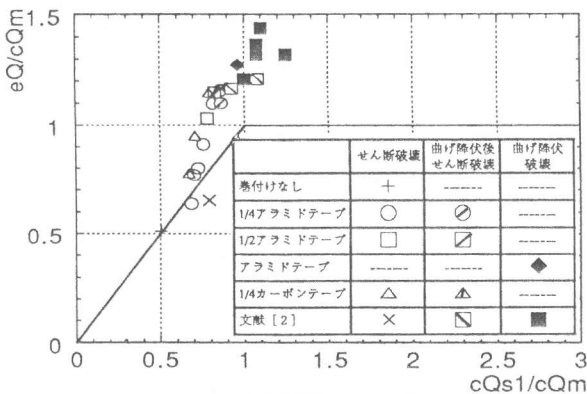
$$cQs1 = \left\{ \frac{0.068 p_w'^{0.23} (180 + F_c)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w' \sigma_{wy}} \right\} b_j$$

*3: 学会指針式

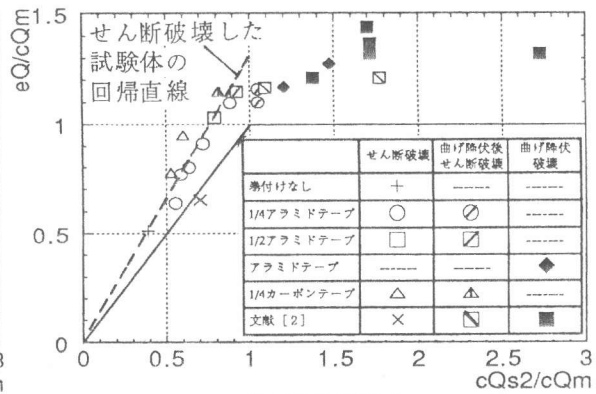
$$cQs2 = b_j \cdot p_w' \sigma_{wy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D \nu \sigma_{R/2}$$

*4: 破壊形式

BD: 曲げ降伏 BSD: 曲げ降伏後せん断破壊 SD: せん断破壊



(a) 荒川mean式



(b) 学会指針式

図5 せん断余裕度—最大耐力/曲げ耐力計算値関係

は、計算値に比べて若干高くなっており、巻付け量が多い試験体程その傾向が強い。

4.2 変形性能の評価

図6にせん断補強量($p_w \sigma_{wy}$)と終局部材角(R_u)の関係を示す。終局部材角は、最大変形を試験区間で除したものである。せん断破壊した試験体では、補強量の差による変形性能の差はあまり顕著でない。曲げ降伏した試験体では、補強量が増すにしたがって変形能力が大きくなっており、 $p_w \sigma_{wy}$ が12以上の試験体は部材変形角1/12.5radにおいても耐力低下がみられず、変形能力はさらに大き

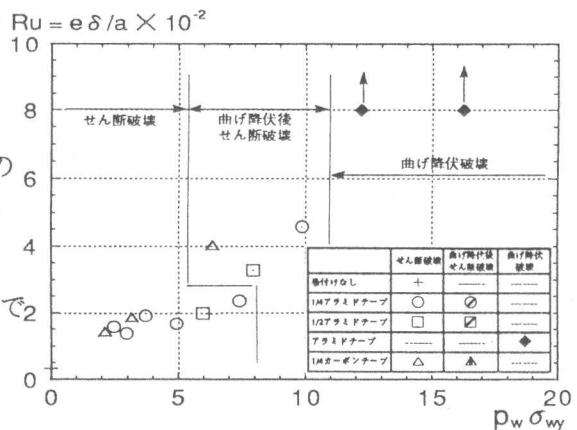


図6 せん断補強量—終局部材角関係

なることが予想される。また、巻付け補強量の多い試験体ほど、柱脚部のコンクリートの終局時圧縮ひずみは大きくなる傾向にあった。したがって、巻付けによる変形性能の改善には、せん断耐力の上昇による効果だけでなく、圧縮側コンクリートの拘束作用によりコンクリートの圧縮靱性が向上する効果も寄与しているものと考えられる。

5. まとめ

本実験から得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 〈1〉 高強度繊維を巻付けた柱のせん断耐力は、補強量に応じて上昇し、せん断破壊は柱コーナー部での繊維破断によって生じた。
- 〈2〉 高強度繊維を巻付けた柱のせん断耐力評価に既往の算定式を用いる場合、繊維が弾性材料であること、コーナー部で強度低下すること等を考慮する必要がある。本実験結果によれば、せん断補強量を(1)式で評価した学会指針式でせん断耐力を3割程度安全側に評価することができた。
- 〈3〉 巻付け補強量が増加するに従って曲げ降伏後の変形性能が向上し、曲げ耐力も若干上昇する傾向にあった。

最後に、巻付け繊維の材料強度は、試験片の幅や直線状かコーナー部を有するか等の形状によって変わってくるので、材料の基本的性状を把握するための試験方法の確立が望まれる。また、繊維のヤング率の相違がせん断耐力に及ぼす影響の評価も今後の課題として残っている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重な御助言を頂いた東京理科大学建築学科 野村設郎教授ならびに本論文作成に協力頂いた同卒論生広瀬雅登君に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 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，1990
- [2] 小田 稔・岡本 直ほか：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.15，No.2，pp.755-760，1993
- [3] 日本建築センター：構造計算指針・同解説，1991
- [4] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990