

論文 アラミド繊維補強材を用いたコンクリート梁部材の曲げせん断実験

白都 滋^{*1}・磯 雅人^{*2}・中村 洋行^{*3}・渡部 憲^{*2}

要旨：軽量かつ非磁性材料であるアラミド繊維ロッドを補強筋として用いたコンクリート部材の開発に伴う基礎資料を得るために、アラミド繊維ロッドの付着試験およびアラミド繊維ロッドを補強筋に用いたコンクリート梁部材の曲げせん断実験を行った。その結果、アラミド繊維ロッドの平均最大付着応力度は異形鉄筋を用いた場合より40%~60%程度低いこと、また、梁部材のせん断耐力は主筋に用いたアラミド繊維ロッドの付着耐力で頭打ちとなることを示した。

キーワード：アラミド繊維ロッド, コンクリート梁部材, 付着耐力, せん断耐力

1. はじめに

連続繊維補強材の一つであるアラミド繊維は鋼材より軽量かつ高强度といった特性を有しており、兵庫県南部地震以来、耐震補強の必要性の高まりによりシート状補強材としての利用に関する研究が行われ、実際の補強工事に適用されている。また、アラミド繊維は磁気や電磁波を伝えない絶縁性を有しており、磁場対策技術の一つとしてコンクリート部材の補強材として鉄筋の代わりにアラミド繊維ロッドの利用が考えられる。しかし、アラミド繊維ロッドを補強筋に用いたコンクリート部材に関する研究は少ない。

本研究は、アラミド繊維ロッドをコンクリート部材の補強筋に用いた構造物の開発を目的とし、アラミド繊維ロッドの付着試験および梁部材の曲げせん断実験を行い、その性能評価法の基礎的資料とするものである。

2. アラミド繊維ロッドの付着試験

2.1 試験体および試験方法

アラミド繊維の特性（カタログ値）お

びアラミド繊維ロッドの材料試験結果を表-1、表-2に示す。アラミド繊維ロッドは、アラミド繊維を束ね、ビニールエステル樹脂を含浸させた後所定の形状に整形した。また、同時に表面を樹脂で高さ0.35mmの凸凹を施し、熱を加えて硬化させた。

付着試験に使用したアラミド繊維ロッドの断面形状は、長方形（以下APタイプ：断面3.2mm×14.0mm）と正方形（以下APSタイプ：断面15.2mm×15.2mm）の2種類とした。また、比較用に異形鉄筋D13（SD295A）も合わせて試験した。

試験体および試験装置の概略図を図-1に

表-1 アラミド繊維の特性

	破断強度 σ_u (MPa)	引張弾性率 E_s (GPa)	破断伸び (%)
アラミド繊維	2800	125	2.0

1)カタログ値

表-2 アラミド繊維ロッドの材料試験結果

アラミド繊維ロッド名	断面 (mm×mm)	繊維断面積 (mm ²)	破断強度 σ_u (MPa)	引張弾性率 E_s (GPa)
AP	3.2×14.0	22.22	3020	143
APS	15.2×15.2	144.43	2350	124
NS	—	50.00	1820	122

1)APは9本, APSは6本, NSは8本の平均値

*1 東急建設（株）技術研究所 Ph.D.（正会員）

*2 東急建設（株）技術研究所 工修（正会員）

*3 東急建設（株）建築エンジニアリング部 工修（正会員）

示す。試験体は100mm角正方形断面（高さ100mm）コンクリートの中央部にアラミド繊維ロッドを配置したものとした。ロッドの付着長さは60mmとし、それ以外の部分ではロッドにテフロンシートを巻き付けて付着を絶縁した。また、ロッド引き抜き時に発生するコンクリートの割裂破壊を防止するためにスパイラル筋(6φ@30)を配置した。

コンクリートは横方向打設とした。使用したコンクリートの材料試験結果を表-3に示す。

荷重はアムスラー試験機を用い、静的単調引張荷重とした。引張荷重はロードセル、アラミド繊維ロッド自由端滑り量は変位計により計測した。

2.2 試験結果

付着試験結果を表-4に示す。表中の数値は、APタイプでは5本、その他の試験体では4本の平均値を示した。また、代表的な平均付着応力度と自由端滑り量の関係を図-2に示す。図中▼印は、最大付着応力度発現時を示す。平均付着応力度は、ロードセルより検出された荷重をロッドの公称周長と付着長さで除して求めた。

自由端での滑り開始後の剛性は、異形鉄筋、APタイプ、APSタイプの順に高くなった。最大付着応力度発現時の自由端滑り量は、異形鉄筋、APSタイプ、APタイプの順に大きな値を示した。また、異形鉄筋では、最大付着応力度発現時に、コンクリートの割裂が観察された。最大平均付着応力度発

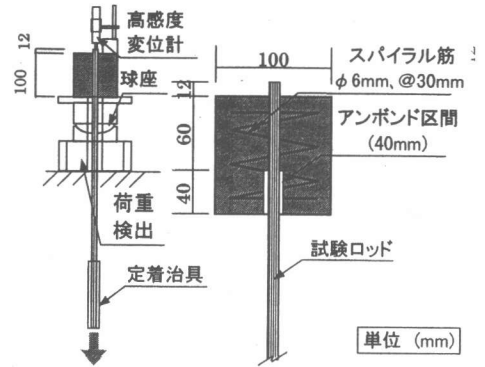


図-1 試験体および試験装置概略図

表-3 コンクリートの材料試験結果

試験種別	鉄筋またはアラミドロッド名	圧縮強度 σ_B (MPa)	弾性係数 E_B (GPa)	割裂強度 σ_t (MPa)
付着試験	D13	32.6	33.0	2.74
	AP	32.9	33.5	2.40
	APS	31.7	31.4	1.83
曲げせん断実験	APS	41.9	25.7	3.38

1)付着試験(APS)は気乾養生、その他は封緘養生

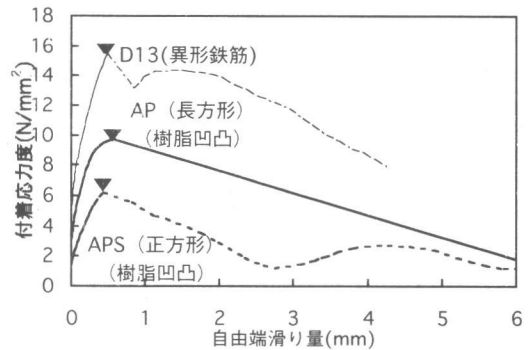


図-2 代表的な平均付着応力度と自由端滑り量の関係

表-4 付着試験結果

使用鉄筋またはアラミドロッド名	公称断面積 (mm ²)	公称周長 (mm)	最大平均付着応力度 τ_{bmax} (MPa)	τ_{bmax} 発現時 滑り量s(mm)	s=0.025mm時の平均付着応力度 τ_{bo} (MPa)
D13(SD295A)	126.7	40.0	16.0	0.604	5.66
AP	39.2	34.4	9.8	0.443	4.19
APS	210.3	58.0	6.7	0.481	2.43

1) $\tau_{max} = P_{max} / \psi \cdot l_b$ ここに、 P_{max} は最大引張荷重、 ψ は公称周長、 l_b は付着長さ(=60mm)

2)APは5本の平均値、その他は4本の平均値

現後の挙動は、APタイプでは急激に耐力が低下したが、異形鉄筋、APSタイプでは耐力が再び上昇する挙動が見られた。

自由端滑り量 s が0.025mm時の平均付着応力度 τ_{b0} および最大付着応力度 τ_{bmax} は、異形鉄筋、APタイプ、APSタイプの順に高くなった。アラミド繊維ロッドの τ_{bmax} は、APタイプで9.8MPa、APSタイプで6.7MPaであり、それぞれ異形鉄筋の τ_{bmax} より40%、60%程度低い値を示した。また、正方形断面（APSタイプ）のアラミドロッドの τ_{bmax} は長方形断面（APタイプ）より30%程度小さな値となり、断面形状による付着応力度の差が見られた。

3. 梁の曲げせん断実験

3.1 試験体

アラミド繊維ロッドを補強筋に用いた梁試験体の形状および配筋を図-3に示す。試験体は2体（NO.1, NO.2）とし、肋筋の間隔を変動因子とした。

梁の断面幅 b は400mm、せい D は700mm、内法スパン L_0 は2100mm（せん断スパン比 $a/D=1.5$ 、ここに a はせん断スパン2100mm/2）とした。試験体の主筋には、付着試験で用いたアラミド繊維ロッドAPSタイプを用い、引張鉄筋比 p_t は0.21%（4-APS）とした。肋筋に

は、主筋同様アラミド繊維を樹脂で含浸させたロッド（以下NSタイプ、表2参照）を使用した。肋筋の間隔は、NO.1で250mm、NO.2で125mmとし、肋筋比 p_w はそれぞれ0.10%（2-NS@250）、0.20%（2-NS@125）である。各ロッドのアラミド繊維断面積を表-2に示す。

3.2 試験体の製作と使用材料

試験体は水平方向打設とし、コンクリートの目標圧縮強度は36N/mm²とした。

コンクリートおよびアラミド繊維ロッドの材料試験結果を表-2、表-3に示す。

3.3 荷重方法

加力装置を図-4に示す。加力は、軸力 $N=0$ kNの下での正負交番繰り返し荷重とした。上部スタブと下部スタブを平行に維持されるよう2本の鉛直方向アクチュエータにより制御しながら、試験体内法スパン中央位置で水平方向に設置したアクチュエータにより水平力を荷重した。

荷重は、上下スタブ間の相対水平変形 Δ を試験体スパン内法長さ（=2100mm）で除した変形角（以下、水平変形角 R ）による変形制御とした。荷重履歴は、 $R=1/400$ 、 $1/200$ を各1回、 $R=1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/67$ を各2回、 $R=1/50$ 、 $1/33$ を各1回繰り返すことを目標とした。

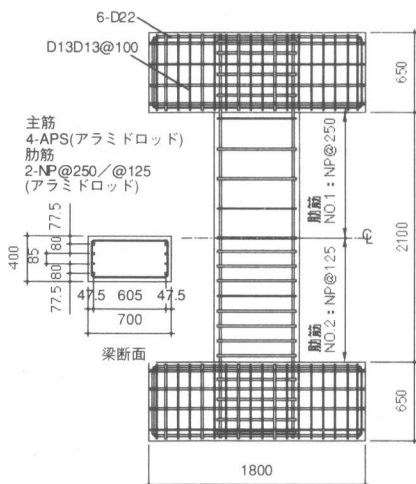


図-3 試験体の形状および配筋図

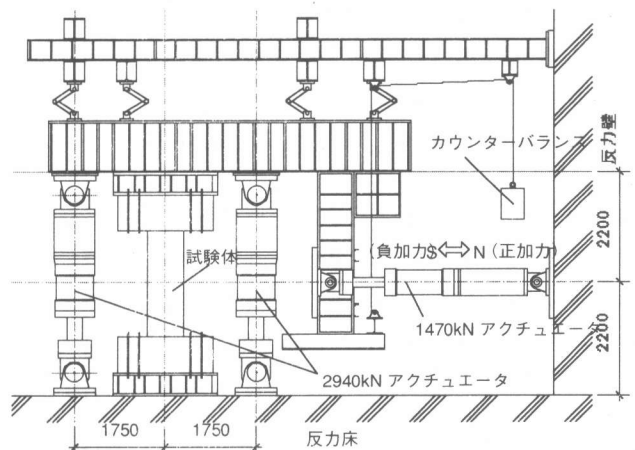


図-4 加力装置

3. 4 実験結果と考察

(1) 水平力-水平変形角曲線と破壊性状

最終破壊状況を写真-1に、水平力と水平変形角の関係を図-5に示す。また、実験結果一覧を表-5に示す。

両試験体とも水平変形角 $R=1/400$ の載荷時に梁端部 $1.0D$ 区間に曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生し、 $R=1/200$ の繰返し時において曲げひび割れ、せん断ひび割れが進展した。 $R=1/100$ 以降の載荷では新しいひび割れが発生することなく、曲げひび割れおよびせん断ひび割れが進展し、特に梁端部のせん断ひび割れ幅が拡大した。 $R=1/33$ の繰返し時において、梁端部でかぶりコンクリートの剥落が見られた。筋筋比の小さなNO.1では、主筋に沿った付着割裂ひび割れも観察された。

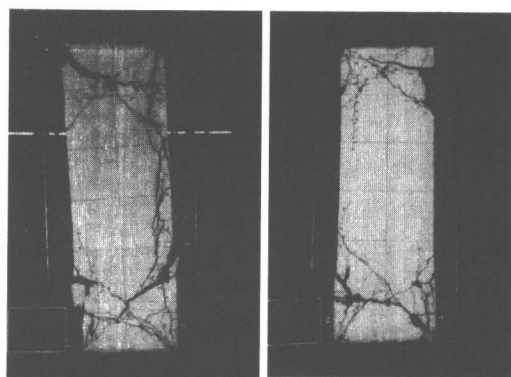
両試験体とも水平変形角 $R=1/100$ 以降の変形における水平力は頭打ちとなった。 $R=1/33$ の載荷時における水平力の低下は、筋筋比の小さなNO.1で顕著となった。最大耐力 P_{max} は、NO.1で $R=1/50$ 、NO.2で $R=1/67$ で得られ、NO.1で307kN、NO.2で347kNとなり、筋筋比を2倍としたNO.2の方が13%大きな値を示した。

(2) 初期剛性とひび割れ耐力

初期剛性およびひび割れ耐力の計算値を表-5に示す。また、計算値に対する実験値の比も併せて示す。計算値は材料試験結果による材料強度を用いて計算した。

初期剛性の計算値 K_{e-cal} に対する実験値 K_e の比は、NO.1で0.19、NO.2で0.28となり、アラミド繊維ロッドを用いた梁の初期剛性は既往の評価式による剛性よりかなり小さい。曲げひび割れおよびせん断ひび割れ耐力の比は、NO.1で0.86、0.82、NO.2で0.96、0.81となり、ひび割れ耐力は、材料試験結果による材料強度を用いれば、既往の評価式でおおよそ評価が可能と考えられる。

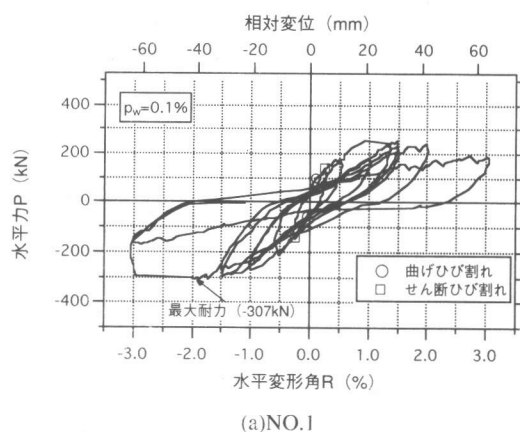
(3) 主筋のひずみと平均付着応力度



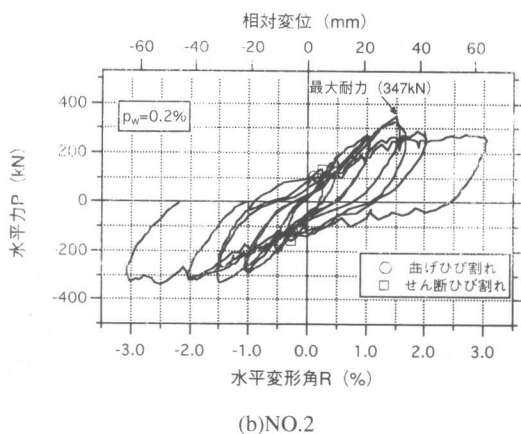
(a)NO.1

(b)NO.2

写真-1 最終破壊状況



(a)NO.1



(b)NO.2

図-5 水平力-水平変形角曲線

主筋のひずみ分布および平均付着応力度分布を図-6、図-7に示す。主筋の引張ひずみは、部材角の増大に伴い増大したが、最大耐力が頭打ちとなった $R=1/100$ 以降における引張ひずみの増大は小さい。危険断面位置の最大

表-5 実験結果一覧

試験体名	初期剛性の 実験値 K_e (kN/mm) [$K_e / K_{e,cal}$]	曲げひび割れ 耐力の実験値 P_{fc} (kN) [$P_{fc} / P_{fc,cal}$]	せん断ひび割れ 耐力の実験値 P_{sc} (kN) [$P_{sc} / P_{sc,cal}$]	最大耐力の 実験値 P_{max} (kN)	曲げ耐力の 計算値 V_{mu} (kN) [P_{max} / V_{mu}]	せん断耐力の 計算値 V_{su} (kN) [P_{max} / V_{su}]	付着耐力の 計算値 V_{bu} (kN) [P_{max} / V_{bu}]
NO.1	55.6 [0.19]	98.0 [0.86]	139 [0.82]	307	749 [0.41]	765 [0.40]	225 [1.36]
NO.2	81.0 [0.28]	109 [0.96]	135 [0.81]	347	749 [0.46]	803 [0.43]	225 [1.54]

*1 $1/K_{e,cal} = L^3 / 3E_c I_e + \kappa L^3 / G_c A_c$ *2 $P_{fc,cal} = 2 \cdot 1.8 \sqrt{\sigma_B} \cdot Z_e / L_0^2$

*3 $P_{sc,cal} = 0.085 K_c (500 + \sigma_B) / (M/Qd + 1.9)^2$ *4 V_{mu} : e関数法による最外縁コンクリート圧縮ひずみ0.3%時曲げ耐力

*5 V_{su} : 指針式A法によるせん断耐力 (最大耐力発現時の筋筋のひずみを用いた場合)

*6 V_{bu} : 付着強度で決まる場合のせん断耐力 = $\min(\tau_{bu} \cdot \Sigma \psi \cdot j_l + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot \nu \sigma_B / 2, \tau_{bu} \cdot \Sigma \psi \cdot j_l \cdot b \cdot j_l \cdot \nu \sigma_B / 2)$

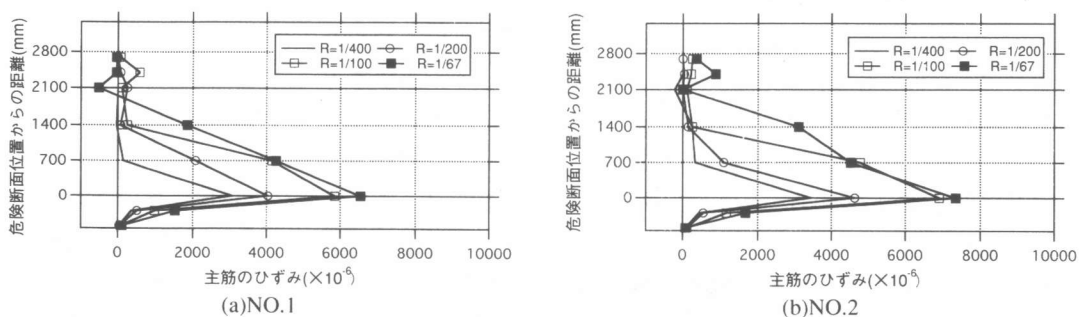


図-6 主筋のひずみ分布

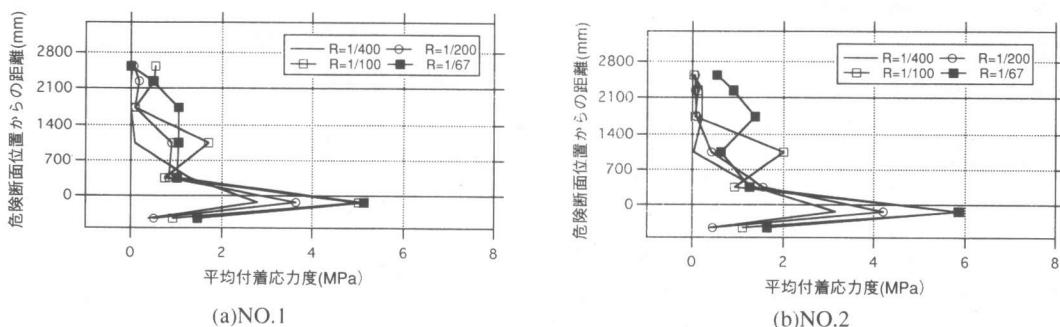


図-7 平均付着応力度分布

引張ひずみはNO.1で6300 μ , NO.2で7500 μ 程度であった。一方、危険断面位置における圧縮ひずみは、R=1/67の荷重時までほぼゼロであった。また、R=1/67の荷重時のひずみは曲げモーメント分布とほぼ一致した分布を示し、スパン内全域でほぼ引張ひずみを示した。

スタブ内の平均付着応力度は、部材角の増大に伴い増大した。最大付着応力度は、NO.1で5.0MPa, NO.2で6.0MPa程度であり、2.2

節で述べた付着実験の最大値6.7MPaより小さな値を示した。試験スパン内の付着応力度は、梁端部引張側では、R=1/400または1/200までは増大したが、それ以降減少した。スパン中央の付着応力度は、梁端部引張側の付着応力度が減少し始めると同時に増大したが、R=1/100をピークとして、それ以後減少した。梁端部圧縮側では、R=1/67で最大付着応力度を示した。アラミド繊維ロッドをコンクリート梁の主筋に用いた場合の付着応力度は、早

期に低下する傾向が見られた。スパン中央部で得られた最大付着応力度は、最大耐力が頭打ちとなった $R=1/100$ の載荷時に得られ、NO.1で1.7MPa、NO.2で2.0MPaであった。肋筋量を2倍としたNO.2の最大付着応力は、NO.1より18%程度高い値を示したが、その差は明確ではなかった。

(4) 最大耐力

アラミド繊維ロッドを補強筋に用いたコンクリート梁の最大耐力を評価するために、曲げ耐力 V_{mu} 、せん断耐力 V_{su} を既往の評価式で計算した結果を表-5に示す。曲げ耐力は、e関数法を用い、最外縁コンクリート圧縮ひずみが0.3%時で評価した。また、せん断耐力は指針式³⁾より計算し、肋筋の応力度 σ_{wy} は、実験で得られた最大耐力発現時の肋筋のひずみ(NO.1で7100 μ 、NO.2で4000 μ)を用いて評価した。

曲げ耐力およびせん断耐力の計算値に対する最大耐力の実験値の比はNO.1で0.41、0.40、NO.2で0.46、0.43となり、最大耐力の実験値は既往の評価式による曲げ耐力、せん断耐力を50%以上下回った。

前節で述べたように、アラミド繊維ロッドとコンクリートの付着は早期に劣化している。したがって、指針式によるせん断耐力は、主筋の最大付着応力度 τ_{hu} で頭打ちとなり付着耐力に達したと考えられる。ここでは、勝俣等の提案する評価式⁴⁾による付着耐力 V_{hu} の計算結果を表-5に示す。アラミドロッドの最大付着応力度 τ_{hu} は実験で得られた1.7MPaとした。付着耐力に対する最大耐力の比はNO.1で1.36、NO.2で1.54となり、安全側に実験値を評価した。

4. まとめ

アラミド繊維ロッドをコンクリート部材の補強筋に用いた構造物の開発を目的とし、アラミド繊維ロッドの付着試験および梁部材の曲げせん断実験を行い、以下のこと

が明かとなった。

(1)アラミド繊維ロッドの最大付着応力度は、APタイプで9.8MPa、APSタイプで6.7MPaとなり、異形鉄筋より40%、60%程度低い値を示した。また、正方形断面(APSタイプ)のアラミドロッドは長方形断面(APタイプ)より30%程度小さな値となり、断面形状による付着応力度の差が見られた。

(2)梁の初期剛性は既往の評価式による剛性よりかなり小さい。曲げひび割れおよびせん断ひび割れ耐力は、材料試験結果による材料強度を用いれば、既往の評価式でおおよそ評価が可能と考えられる。

(3)梁の最大耐力は、アラミドロッドの付着耐力を用いることにより安全側に評価することができた。

(4)アラミド繊維ロッドは曲げ補強筋として利用可能であると考えられるが、部材の剛性、耐力の評価法を確立するためには、ロッドの付着に関する研究の蓄積が必要と考えられる。また、長期性状(クリープ、乾燥収縮、温度等によるたわみ、ひび割れ制御)に関する研究も重要である。

謝辞

アラミド繊維を提供して頂いた日本アラミド有限公司、ロッドを加工して頂いた日東シンコーに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)日本建築学会 構造委員会：連続繊維補強材のコンクリート構造への応用、日本建築学会大会構造部門(連続繊維) PD資料、1998
- 2)日本建築学会：鉄筋コンクリートの終局強度設計に関する資料、1987
- 3)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
- 4)勝俣英雄、萩尾浩也、小島克朗：炭素繊維ストランドによる既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強(その4 付着割裂破壊耐力の評価方法の検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、pp.671-672、1997