

論文 連続繊維シートで補強された RC 部材の付着割裂強度

松野一成*1・河野進*2・小幡有香*3・角徹三*4

要旨: 連続繊維シートがRC部材の付着割裂破壊抑止用補強材として有効かどうかを検討するために、キャンティレバー型の付着試験を実施した。実験変数は試験鉄筋の本数(2本あるいは4本)および公称径(D19あるいはD25)、試験鉄筋の断面内での鉛直方向かぶり深さ、連続繊維の種類と巻き付け量とした。実験の結果、シート貼付技術が確実であればシート補強なしと比較して20%~40%の強度増大が認められ、これを藤井・森田式の横補強筋の効果と比較すると同一補強量で2倍から6倍近くの負担をしていることが明らかとなった。

キーワード: 連続繊維シート, 付着割裂強度, サイドスプリット破壊, 炭素, アラミド

1. はじめに

連続繊維シート巻き付けによるRC部材のせん断破壊抑止効果についてはこれまでに多くの実験がなされ強度式も提案されているが¹⁾、同じ脆性破壊である付着割裂破壊抑止効果については、実験も少なく早急な解明が望まれている。著者等は試験鉄筋が1本のみの簡易型付着試験によって連続繊維の付着強度増大効果を定量化し、RC部材の付着割裂強度式の大枠を提案した²⁾。しかし、2本以上の群としての鉄筋の付着性状の解明が必須であるとの認識から、RCはり材の一部をモデル化したキャンティレバー型で試験鉄筋が2本および4本ある付着試験を実施し、主としてサイドスプリット型破壊の付着性状と連続繊維の付着強度増大効果を検討した。

るのを防ぐ為に、自由端から100mmの部分では鉄筋外周に鋼管を配置して付着をカットしている。試験体腹部には、せん断破壊防止に十分な鉄筋を配した。試験鉄筋を直接拘束する横補強筋としては2-φ6@200 ($p_{ws}=0.186\%$)を配した。断面の寸法と試験筋の配置決定にあたっては、藤井・森田式(以下FM式と略す)に従えばサイドスプリット先行型の付着破壊が先行するよう留意されている。

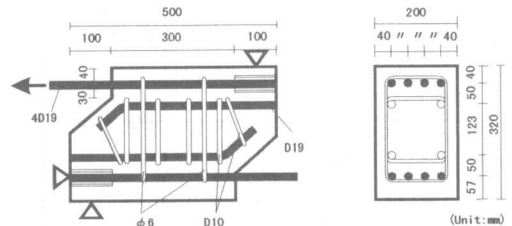


図-1 試験体図

表-1 使用コンクリートの特性

(a) 配合表					
					[kg/m ³]
W/C(%)	S/A(%)	セメント	水	細骨材	粗骨材
63.0	47.0	278	175	852	986

(b) 力学特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	割線弾性係数 (N/mm ²)
1 シリーズ	29.4	2.70	2.47×10 ⁴
2 シリーズ	24.5	1.65	2.09×10 ⁴

図-1に試験体の配筋詳細を示す。形状は全試験体共通であり、上下に試験筋を配し順次引抜き試験を行い、一体の試験体から二つのデータを得た。付着長さは載荷側から300mmまでとし、鉄筋に直交する反力が試験筋を拘束す

- *1 呉工業高等専門学校助手 建築学科 (正会員)
- *2 京都大学助手 工学部建築学科 Ph. D. (正会員)
- *3 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻
- *4 豊橋技術科学大学教授 工学部建設工学系 工博(正会員)

2.2 使用材料の性質

(1) コンクリート: 使用したコンクリートの特性を表-1に示す。粗骨材には最大粒径20mm, 目標スランプ15cm, 目標強度24N/mm²とした。配合表を同表(a)に示す。打設時期を2期に分けたため同一配合にもかかわらず強度に差が生じた。各シリーズの力学特性を同表(b)に示す。

(2) 鉄筋: 使用鉄筋の力学的特性を表-2に示す。試験筋はD19とD25の2種類としたが、

表-2 使用鉄筋の力学特性

	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D25 (主筋)	889	703	1.92×10 ⁵
D19 (主筋)	840	720	2.00×10 ⁵
φ6 (1シリーズ)	397	272	1.97×10 ⁵
φ6 (2シリーズ)	414	277	1.73×10 ⁵

表-3 連続繊維シートの力学特性

	炭素繊維シート	アラミド繊維シート
繊維目付 (gr/m ²)	300	415
繊維比重 (gr/m ³)	1.80	1.45
設計厚さ (mm)	0.167	0.286
引張強度 (N/mm ²)	3400	2000
引張弾性率 (N/mm ²)	2.30×10 ⁵	1.18×10 ⁵
破断伸度 (%)	1.5	1.8

両者とも付着割裂前の降伏先行とならないよう高強度筋 ($\sigma \geq 700\text{N/mm}^2$) を使用している。

(3) 連続繊維シート: 本実験では主として炭素繊維シートの効果を対象としたが, 比較としてアラミド繊維も一部使用した。これらの特性値を表-3に, シートの巻き付け要領を図-2に示す。試験区間の範囲をストライプ状に3カ所で試験筋に直交する方向に巻き付けた。図は $p = 0.168\%$ の場合に対応している。補強比は横補強筋比と同様の算出方法であり, シート断面積を拘束するべきコンクリートの面積で除した値で定義する。

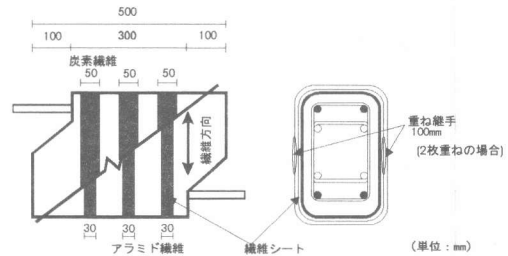


図-2 繊維シート貼付要領

表-4 試験体の詳細

シリーズ	試験体番号	試験体名 *1	打設位置 *2	横補強筋	連続繊維シート		試験鉄筋			σ_b (N/m ²)
					種類 *3	補強量 p_{wf} (%)	公称径 (mm)	本数	鉛直かぶり Cv (mm)	
1	1	C00-2D19-40	T	2-φ6 @200 $p_{ws} = 0.186\%$	C	0.00	19	2	40	29.4
	2	C00-2D19-57	B						57	
	3	C16-2D19-40	T						40	
	4	C16-2D19-57	B						57	
	5	C00-4D19-40	T						40	
	6	C00-4D19-57	B			57				
	7	C16-4D19-40	T			40				
	8	C16-4D19-57	B			57				
	9	C25-4D19-40	T			40				
	10	C25-4D19-57	B			57				
2	11	C00-2D19-72	T	A	0.00	25	2	72	24.5	
	12	C00-2D25-57	B					57		
	13	C16-2D19-72	T					72		
	14	C16-2D25-57	B					57		
	15	C00-2D25-40T	T					40		
	16	C00-2D25-40B	B		40					
	17	C16-2D25-40T	T		40					
	18	C16-2D25-40B	B		40					
	19	A16-2D19-40	T		40					
	20	A16-2D19-57	B		57					

*1 C00-2D19-40

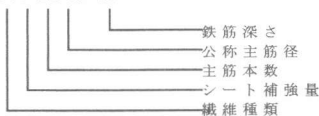
*2 試験対象鉄筋の打設位置

T ---- 上端 B ---- 下端

*3 連続繊維シートの種類

C ---- 炭素繊維シート

A ---- アラミド繊維シート



2.3 実験変数

表-4に試験体の詳細を示す。実験変数は、まずシート補強の有無およびその量 ($p_{wf} = 0.168\%, 0.25\%$) と種類とした。炭素繊維を主とし、一部アラミドも用いた。次に試験鉄筋の径 (D19とD25) と本数 (2本と4本) を設定した。最後に、試験鉄筋の断面内での位置として、側面かぶりを一定 ($C_s=40\text{mm}$) とし、鉛直かぶり (C_v) を40, 57, 72mmに設定し、鉄筋位置がシートの拘束効果に与える影響を調べた。

3. 実験結果

3.1 付着強度

実験結果の一覧を表-5に示す。表中(1)欄の付着強度 $\tau_{u,exp}$ は最大荷重を P_{max} として次式で定義する。

$$\tau_{u,exp} = P_{max} / (L \cdot \phi \cdot N) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

但し、L:付着長さ、 ϕ :周長、N:試験筋本数

表中(2)欄、正規化した付着強度 $\gamma_{u,exp}$ とは、次式で定義された無次元量である。

$$\gamma_{u,exp} = \tau_{u,exp} / (\rho \cdot \sqrt{\sigma_b}) \quad (2)$$

但し、 σ_b :コンクリート実圧縮強度、 ρ :上端筋の付着強度を1.0としたときの下端筋の付着

強度の係数、 $\rho = 1.22$ として計算する³⁾。

すなわち、(2)によって、上端、下端の個々のデータをすべて上端の強度に統一した後、コンクリート強度の相違も $\sqrt{\sigma_b}$ で無次元化して、後の考察に用いた。

表中(3)欄はSI単位系に換算したFM式による、シート無補強の付着強度の計算値の正規化値である。

$$\gamma_{u,cal} = \tau_{u,cal} / \sqrt{\sigma_b} = (\tau_{co,cal} + \tau_{st,cal}) / \sqrt{\sigma_b} \quad (3)$$

$$\tau_{co,cal} / \sqrt{\sigma_b} = 0.096 \cdot bi + 0.13 \quad (4)$$

$$\tau_{st,cal} / \sqrt{\sigma_b} = 7.80 \cdot p_{ws} \cdot b / (N \cdot db) \quad (5)$$

但し、 $bi = bsi = b / (N \cdot db) - 1.0$, p :横補強筋比、 b :部材幅、 N :主筋本数、 db :主筋径

図-3にシート補強しない試験体の実験値と計算値 (FM式) との比較を示しておく。計算値は実験値の下限値であり、No. 11等では計算値の1.5倍強の値となった。

3.2 ひびわれ状況および破壊モード

計算上では、すべてサイドスプリット破壊であるが、水平かぶりと鉛直かぶりの等しい試験体 (No. 1, 3, 15, 16, 19) ではコーナースプリットあるいはコーナーとサイドの複合破壊の様相を呈した。

表-5 試験結果一覧

試験体番号	試験体名	(1) 付着強度 (N/mm^2) $\tau_{u,exp}$	(2) 正規化した 付着強度 $\gamma_{u,exp}$	(3) $\gamma_{u,cal}$	(4) 破壊 モード *1	(5) β	(6) α
1	C00-2D 19-40	4.16	0.77		C	-	-
2	C00-2D 19-57	6.02	0.91	0.62	S	-	-
3	C16-2D 19-40	5.27	0.97	-	CS	1.26(1)	3.04
4	C16-2D 19-57	7.11	1.07	-	S	1.18(2)	2.44
5	C00-4D 19-40	2.08	0.38		S	-	-
6	C00-4D 19-57	3.00	0.45	0.33	S	-	-
7	C16-4D 19-40	3.20	0.59	-	S	1.55(5)	6.39
8	C16-4D 19-57	4.31	0.65	-	S	1.44(6)	6.09
9	C25-4D 19-40	2.78	0.51	-	S	1.34(5)	2.53
10	C25-4D 19-57	3.78	0.57	-	S	1.27(6)	2.34
11	C00-2D 19-72	4.65	0.94	0.62	S	-	-
12	C00-2D 25-57	4.31	0.71	0.48	S	-	-
13	C16-2D 19-72	5.50	1.11	-	S	1.18(11)	2.59
14	C16-2D 25-57	5.33	0.89	-	S	1.25(12)	3.41
15	C00-2D 25-40T	2.55	0.51		S	-	-
16	C00-2D 25-40B	4.02	0.66	0.48	CS	-	-
17	C16-2D 25-40T	4.33	0.87	-	S	1.73(15)	7.41
18	C16-2D 25-40B	4.90	0.81	-	S	1.21(16)	2.80
19	A16-2D 19-40	4.41	0.89	-	C	1.16(1)	1.83
20	A16-2D 19-57	5.64	0.93	-	S	1.02(2)	0.30

*1 破壊モード

C:コーナースプリット、S=サイドスプリット、
CS:コーナーとサイドの複合

今回の実験結果の中から、シート補強無しと有りの違いがひびわれや破壊モードにどう影響するかを図-4を用いて説明する。

(a)では、シート巻き付けによって破壊モードがコーナー破壊からサイド破壊に移行しているが、26%の強度増加がみられる。

(b)では、(a)よりも鉄筋のかぶり深さが大きく設定されているが、破壊モードは両者ともサイドスプリットである。しかし、シート補強無しの場合のひびわれ面が単純であるのに対し、シート補強を行うと、最初のひびわれ後もシートの拘束が保持され、側面に細かい数多のひびわれが発生した。強度増大率は18%となり(a)よりも落ちる。

(c)は(a),(b)とは異なり鉄筋が4本並んだ場合である。ひびわれと破壊モードは(b)と同様であるが、強度増大は44%と3つのうちで最も大きい。この傾向は、部材主筋群を外周する横補強筋の補強効果は主筋本数が多いほど低下するという周知の傾向と全く逆であり、部材全体を外から巻くことの拘束効果の優位さを示すものとして注目に値する。

3.3 強度増大率 β とシート負担係数 α

3.2でも触れた強度増大率を一般的に以下のように定義しておく。

$$\text{強度増大率}(\beta) = \frac{\text{シート補強試験体Aの付着強度}}{\text{シート補強無し、他はAと同一条件の試験体の付着強度}} \quad (6)$$

表-5中(5)の欄には β の値および(6)式の分母に相当する試験体番号を()内に示した。次に、連続繊維シートの付着強度負担係数 α を以下のように定義する。(6)式の分子を $\tau_{u,exp} A$ 、分母を $\tau_{u,exp} A'$ とする。

$\Delta \tau_{u,exp} = \tau_{u,exp} A - \tau_{u,exp} A'$ は、連続繊維シートのみによって負担される付着応力度と考えることが出来る。一方、FM式の中で連続繊維シートが横補強筋と全く同じ要因で付着応力を負担するものと仮定すると、シートの負担分を τ_{wf} は次のように表わせる。

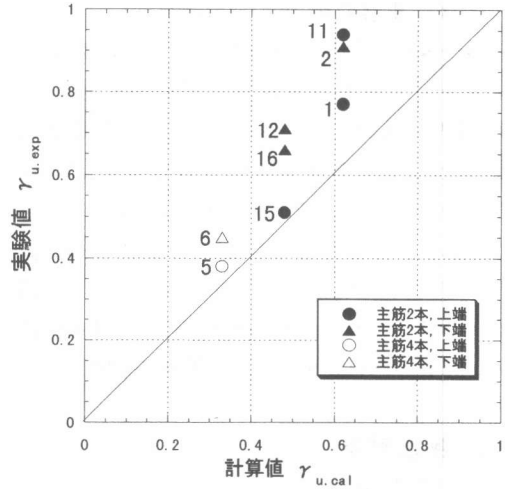


図-3 実験値と計算値の比較 (シート補強無について)

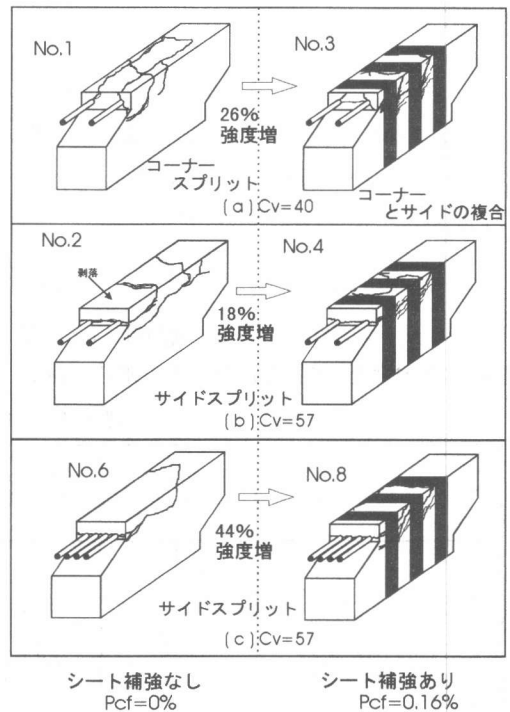
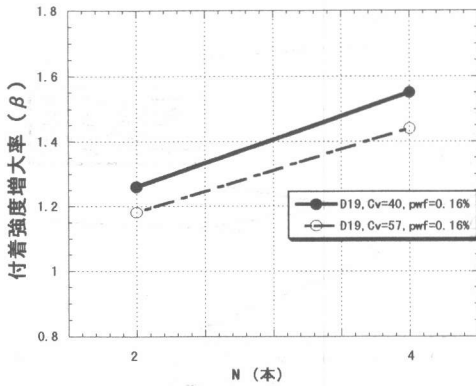


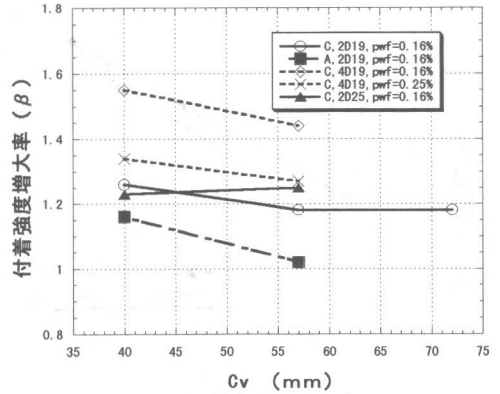
図-4 付着割裂ひびわれと破壊状況

$$\tau_{wf} = \frac{7.80 \alpha \cdot p_{wf} \cdot b}{db \cdot N} \times \sqrt{\sigma_b} \quad (7)$$

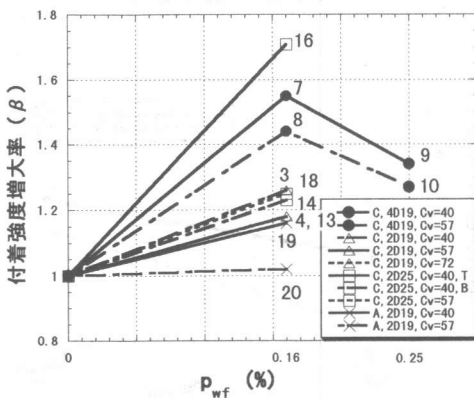
α はシートが横補強筋の何倍だけ付着応力を負担するかの概略を知るのに便利であり、これ



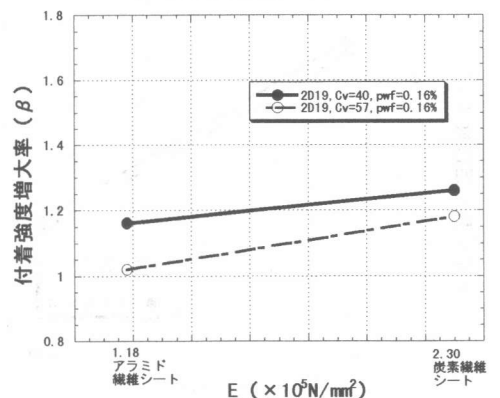
(a) 主筋本数の影響



(c) 打設位置の深さ



(b) シート補強量 pwf の影響



(d) シートの弾性率

図-5 連続繊維シートによる付着強度増大率

をシートの付着強度負担係数と呼ぶ。

3.4 α, βと実験変数の関係

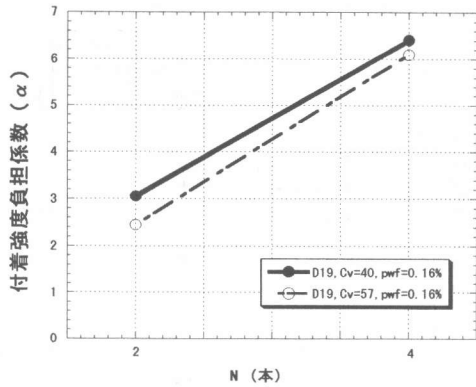
以上のようにして求めたβ, およびαが実験変数によってどのような範囲の値をとるかを示したのが図-5および、図-6である。両図の(a)は主筋本数の影響をみている。鉄筋2本よりも鉄筋4本を拘束した方が、増大率・負担係数とも大きな値となっているのが特徴である。

次に両図(b)はシート補強量の影響をみたものである。p = 0.168%の補強により、一体(No. 20)を除きいずれも強度は18%から70%の範囲で増大している。一方、まったく同じ条件で p = 0.168%から p = 0.25%へと補強量を増大させた試験体では増大率・負担係数とも減少するという意外な結果となった。これ等は同一試験体

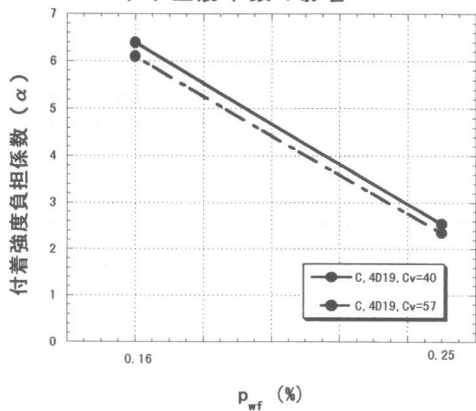
の上下筋である p = 0.168%の試験体のβ, αが大きすぎると解釈することもでき、今後の検討事項としておく。

両図(c)は試験筋の側面かぶり厚さは一定のまま (Cs = 40mm) 鉛直かぶり (Cv) を順次深くしたときの影響をみたものである。一部を除き Cv = Csのときが増大率・負担係数とも最大で、漸次減少している。このことは、断面の隅角部から45°の線上にある鉄筋がシートの拘束が最も効果的であり、これからはずれると拘束効果が順次低下するとの著者等の予測²⁾を追認する結果となった。

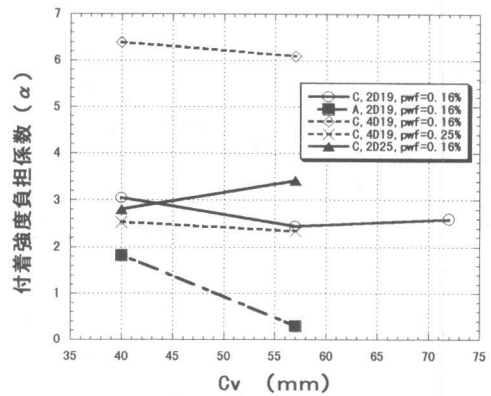
最後に両図(d)は弾性率Eの違いによる影響をみたものであり、弾性率の高い炭素繊維の方が増大率・負担係数とも大きいという結果になった。ただし、No. 20の試験体にあつてはシート貼付作業が万全であつたかという不安は残る。



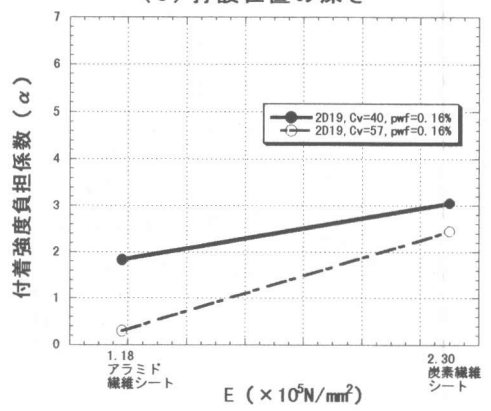
(a) 主筋本数の影響



(b) シート補強率 p_{wf} の影響



(c) 打設位置の深さ



(d) シートの弾性率

図-6 連続繊維シートによる付着強度負担係数

4. 結論

付着長さ一定 (300mm) としたキャンティレバー型付着試験体を用いて連続繊維シートの付着割裂破壊抑止効果の検証実験を行った。ひずみ測定結果の分析等が今後残されており、確定的な強度式の提案は早計と思われるが、最低限以下の点は指摘できよう。

(1) シート貼付技術が確実であれば補強率 (p_{wf})=0.168%のもとでシート補強による付着強度増大率は20%~40%の範囲となり、これを藤井・森田式の横補強筋の効果と比較すると2倍から6倍にも達する。

(2) 増大効果は試験筋2本の場合よりもむしろ4本の場合の方が顕著であり、直接主筋を取り囲む横補強筋による補強効果と大いに異なる点として注目に値する。

(3) 試験筋のかぶり深さによっても付着増大

効果は変動し、試験体断面隅角部に試験筋が位置しているときに最も大きく、この位置から離れるほど低下する。

謝辞：本研究の実施にあたっては、SR-CF工法研究会より連続繊維シート材料および研究助成を賜った。さらに京都大学藤井栄研究室からは実験資材を提供戴いた。ここに記して深甚の謝意を表する。

参考文献：

- 1) 片岡隆広・松崎育弘・福山洋・橋本一郎：シート状連続繊維によりせん断補強されたRC柱の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 2, pp. 1463-1468, 1996
- 2) 角徹三・河野進・松田啓・伊藤太平：炭素繊維で補強された鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 3, pp. 1189-1194, 1998
- 3) 藤井栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究，日本建築学会論文報告集，Vol. 319, pp. 47-55, 1982. 11