

論文 連続繊維シートを用いた RC 部材の付着割裂強度算定式の提案

松野一成*1・河野進*2・小幡有香*3・角徹三*4

要旨: 連続繊維シートを用いた RC 部材の付着設計法を確立するために、40 体のキャンティレバー型の付着試験の結果を検討することで付着割裂強度式の提案を行い、既往の付着割裂破壊試験の結果等と比較したところ、実部材への適応可能性が確認された。また、本研究での提案式中に考慮されていない影響因子の検証実験を、簡易型付着試験法を用いて行った。その結果、連続繊維シートを用いた場合の付着割裂強度の増分には、かぶり厚さの影響が少ないことが分かった。

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、昨年報告した 20 体³⁾の試験結果に加え、新たに 20 体の試験を実施し、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についての検討を行い、付着割裂強度式を提案し、その評価を行った。

さらに、簡易型付着試験法を用いて試験体総数 19 体の補足実験を行い、提案式中に考慮されていない影響因子の検証を行った。

2. キャンティレバー型付着試験

2.1 実験概要

2.1.1 試験体

図-1 にキャンティレバー型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 $2 - \phi 6 @ 200$ ($p_{ws} = 0.186\%$) 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⁴⁾に従え

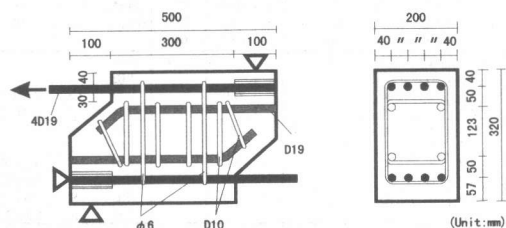


図-1 試験体図

*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)

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。

2.1.2 使用材料の性質

使用したコンクリートの力学的性質を表-1に示す。なお、配合は文献(3)の通りであり、3シリーズとも共通であるが打設時期が異なるため、表-1のような強度差が生じている。また、使用した鉄筋の力学的特性を表-2に示す。試験筋(試験体の主筋)はD19とD25の2種類としたが、両者とも付着割裂破壊前の引張降伏先行とならないよう高強度鉄筋($\sigma_y \geq 700\text{N/mm}^2$)を使用した。

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。これらの特性値も文献(3)に示す通りであり、巻き付け要領も文献(3)と同様である。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。

2.1.3 実験変数

表-3に試験体の詳細を実験結果と併せて示す。実験変数は、まずシート補強の有無およびその量($p_{vf} = 0.08\%, 0.16\%, 0.25\%, 0.32\%$)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

表-1 使用コンクリートの力学特性

	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
3シリーズ	27.0	2.43	2.01×10^4

表-2 使用鉄筋の力学特性

	降伏強度 (N/mm^2)	破断強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
D25(主筋)	703	889	1.92×10^5
D19(主筋)	720	840	2.00×10^5
$\phi 6$ (1シリーズ)	272	397	1.97×10^5
$\phi 6$ (2シリーズ)	277	414	1.73×10^5
$\phi 6$ (3シリーズ)	269	410	1.71×10^5

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。

付着長さはすべての試験体で共通の300mmであり、付着長さ(L)/主筋径(db)はD19のとき15.8, D25のとき12.0である。これらの値は文献(5)によると、付着長さの付着強度に与える影響力が小さくなり始める程度の値であるため、付着長さの影響はないものとする。

2.2 実験結果

表-3に試験体の詳細と併せて実験結果の概要を示す。なお、表中の付着強度は実験中に計測された最大荷重(Pmax)を鉄筋の表面積の総和で除した値で定義されている。算定式は次式

表-3 試験体一覧および実験結果

試験体 シリーズ	実験変数						コンクリート 強度 (N/mm^2)	実験結果			試験体 シリーズ	実験変数						コンクリート 強度 (N/mm^2)	実験結果		
	打設 位置 *1	鉛直 かぶり (mm)	公称径 db (mm)	本数	種類 *2	補強比 *3 pwf(%)		付着 強度*4 (N/mm^2)	破壊 モード *5	α *6		打設 位置 *1	鉛直 かぶり (mm)	公称径 db (mm)	本数	種類 *2	補強比 *3 pwf(%)		付着 強度*4 (N/mm^2)	破壊 モード *5	α *6
1	C1	T	40	19	2	C	29.4	5.08	C	-	3	C21	T	40	19	2	C	27.0	*7	*7	-
	C2	B	57	4	C	6.02		S	-	C22		B	57	4	4	2.47	Sh		-		
	C3	T	40			6.43		CS	3.12(C1)	C23		T	40	2	4	4.78	Sh		-		
	C4	B	57			7.11		S	2.49(C2)	C24		B	57	4	4	2.58	S		-		
	C5	T	40			2.54		S	-	C25		T	40	2	2	4.51	C		-		
	C6	B	57	3.00	S	-		C26	B	57		4	4	2.67	Sh	-					
	C7	T	40	3.90	S	6.32(C5)		C27	T	40		2	2	5.22	CS	2.77(*8)					
	C8	B	57	4.31	S	6.01(C3)		C28	B	57		4	4	3.03	S	4.30(*9)					
	C9	T	40	3.39	S	2.50(C5)		C29	T	40		2	2	5.32	CS	3.29(*9)					
	C10	B	57	3.78	S	2.29(C3)		C30	B	57		4	4	3.24	CS	6.39(*9)					
2	C11	T	72	19	2	C	24.5	5.67	S	-	C31	T	72	19	2	5.42	S	1.87(*9)			
	C12	B	57	25	C	4.31		S	-	C32	B	57	25	4	3.22	C	3.11(*9)				
	C13	T	72	19		6.71		S	2.65(C11)	C33	T	72	19	2	5.42	CS	1.20(*9)				
	C14	B	57	25		5.33		S	3.39(C12)	C34	B	57	25	4	3.75	S	3.61(*9)				
	C15	T	40	3.11		S		-	C35	T	40	2	2	6.20	S	1.87(*9)					
	C16	B	40	4.02	CS	-		C36	B	40	4	4	3.79	S*7	(2.92)*9)						
	C17	T	40	5.28	S	4.20(C15)		C37	T	40	2	A	5.62	C	4.23(*9)						
	C18	B	40	4.90	S	2.90(C16)		C38	B	40	4	4	2.89	S	3.02(*9)						
	C19	T	40	5.38	C	1.89(C1)		C39	T	40	2	2	5.05	C	0.99(*9)						
	C20	B	57	5.64	S	0.34(C2)		C40	B	57	4	4	3.00	S	2.05(*9)						

*1:T:上端筋, B:下端筋 *2:C:炭素繊維, A:アラミド繊維 *3:横補強筋と同様の算出方法 *4:(1)式で算出した値, 上端筋には1.22を乗じる *5:C:コーナースプリット, S:サイドスプリット, Sh:せん断破壊 *6:シート負担係数 *7:計測できず *8:C23とC25の平均付着強度 *9:C22, C24とC26の平均付着強度

のようになる。

$$\tau_{u.exp} = P_{max} / (L \cdot \phi \cdot N) \quad (1)$$

但し、L: 付着長さ(mm), ϕ : 鉄筋の周長(mm), N: 試験筋本数。

また、上端筋の付着強度は下端筋と直接比較できるように1.22を乗じている⁴⁾。

これを見ると、連続繊維シートで試験体を補強することで付着割裂強度は確実に上昇しているが、上昇の割合を比較すると補強比の小さいものほどその効果が大きいといえる。

藤井・森田式の計算上では、すべての試験体がサイドスプリット破壊(表中S)であるが、水平かぶりと鉛直かぶりの等しい試験体ではコーナースプリット(C)あるいはコーナーとサイドスプリットの複合破壊(CS)の様相を示した。

また、主筋が4本ならんだ場合はいずれもサイドスプリット破壊を呈し、強度増大効果は2本のときに比べ飛躍的に上昇する。この傾向は昨年度の実験結果³⁾と同様で、これが連続繊維シート補強の特色と考えられる。

3. 付着割裂強度式の提案

3.1 連続繊維シート負担係数 α の定義

周知の通り藤井・森田による付着割裂強度式(下端筋)は以下の通りである。

$$\tau_{u.cal} / \sqrt{\sigma_b} = (\tau_{co.cal} + \tau_{st.cal}) / \sqrt{\sigma_b} \quad (2)$$

$$\tau_{co.cal} / \sqrt{\sigma_b} = 0.117 \cdot bi + 0.163 \quad (3)$$

$$\tau_{st.cal} / \sqrt{\sigma_b} = 9.51 \cdot p_{ws} \cdot b / (N \cdot db) \quad (4)$$

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

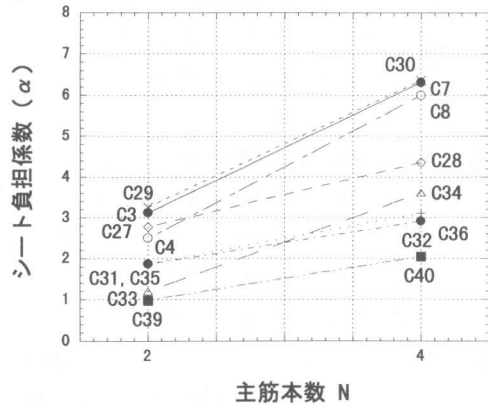
今、連続繊維シートによる付着強度増分機構を横補強筋のそれと同一であるとして、強度増分を次式のように仮定する。

$$\tau_{wf} = \left(9.51 \frac{\alpha \cdot p_{wf} \cdot b}{N \cdot db} \right) \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (5)$$

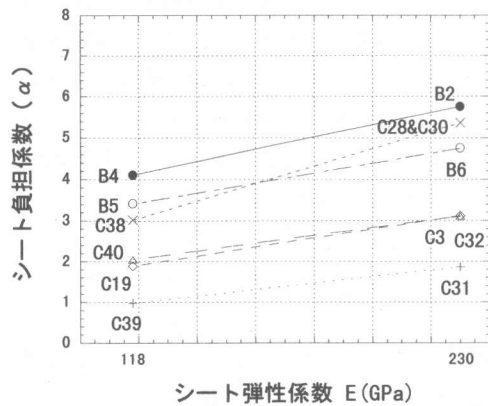
但し、 p_{wf} : シート補強比

α ³⁾はシートが横補強筋の何倍の付着強度を負担するかの概略を知るのに便利であり、表一

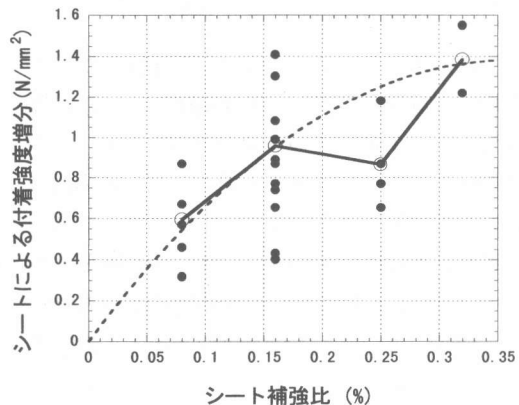
3中のシートによる増分から逆算して算出できる。こうして算定したシート負担係数 α を表一3に実験結果とあわせて示す。



図一 2 シート負担係数—主筋本数関係



図一 3 シート負担係数—弾性係数関係



図一 4 シートによる付着強度増分—シート補強比関係

3.2 付着割裂強度式の提案

図-2に主筋本数による α の増減を、図-3に連続繊維シートの弾性係数による α の増減を示す。また、図-4にシート補強比とシートによる付着割裂強度の増分との比較したものを示す。

図-2中の直線は、主筋本数以外の実験変数は同じ試験体を繋ぐ直線であり、主筋本数の増大の影響が直接読み取れる。これを見ると主筋本数が2本から4本になることで α がほぼ2倍になっていることが分かる。また、図-3をみると弾性係数以外の実験変数が同じ試験体を繋ぐ直線の勾配がほぼ等しく、炭素繊維シートの方がアラミド繊維より約1.5倍程度大きくなっている。つまり α は、アラミド繊維を用いた場合を1とすれば、炭素の場合は1.5倍となり、主筋本数に比例する関係にある。このような関係を用いて連続繊維シートの負担係数 α を式で表すと(6)式のようになる。

$$\alpha = \frac{N}{4} \cdot \left(4 \cdot \frac{E_{wf}}{E_0} + 2 \right) = N \cdot \left(\frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \quad (6)$$

(6)式を(5)式に代入すると、シートによる付着強度の増分は(7)式で表される。

$$\tau_{wf} = \left(\frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \cdot \left(9.51 \cdot \frac{P_{wf} \cdot b}{db} \right) \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (7)$$

また、図-4に示すように、各補強比ごとの平均値を直線で結ぶと、連続繊維シートによる増分とシート補強比の関係が直線⁶⁾よりむしろ放物線に近い関係であると考えられるため、 p_{wf} の2次式で表されたとした。この2次式は原点を通り、補強比が0.35%のときに最大値をとるという条件に、それぞれの補強比ごとの実験値の平均値に近づけるといった条件を加えた強度式が(8)式となる。

$$\tau_{wf} = \frac{1}{60} \cdot \left(\frac{E_{wf}}{E_0} + 0.5 \right) \cdot \left(\frac{b}{db} \right) \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P_{wf}}{0.0035} - 1 \right)^2 \right\} \cdot \sqrt{\sigma_b} \quad (8)$$

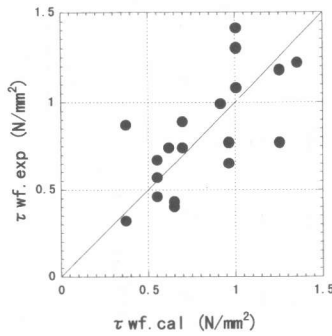


図-5 シート増分の評価

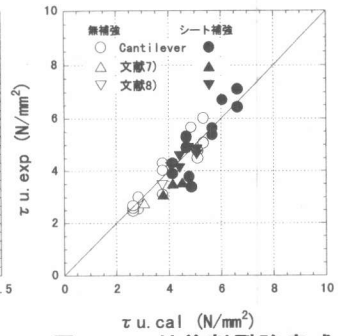


図-6 付着割裂強度式の評価

但し、 $E_0 = 2.30 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とする。この値は実験に使用した炭素繊維シートの弾性係数である。また、(8)式は2次式であるため最大値が存在する。そのため、適応範囲を $p_{wf} = 0.35\%$ までとしている。

3.3 提案式の評価

図-5に(8)式とキャンティレバー型試験体の実験値との関係を示す。この結果をみる限り、(8)式でシートによる付着強度の増分を評価することに問題はないと考えられる。また、図-6は(2)式で表される藤井・森田式に(8)式によるシート増分を加えた付着割裂強度式の評価である。

キャンティレバー型のシート無補強の試験体の付着割裂強度は、文献(3)の実験結果の傾向と同様に実験値が計算値を大きく上回っており、このままでは提案式を用いた場合の付着割裂強度の正確な評価ができないおそれがあるため、シート無補強試験体の藤井・森田式による計算値に1.3を乗じることで、より実験値に近い評価ができるように補正を加えている。また、比較のために2種類の文献からの試験結果も引用している⁷⁾⁸⁾。

全体的には実験値と計算値は適合しているといえる。これは無補強試験体の評価を改善することで修正できると思われる。このことを考慮するとこの提案式をRC部材に適用することに問題はなさそうである。

4. 簡易型付着試験による補足実験

4.1 実験目的

提案式を多角的に評価するために次の点に注目して補足実験を行った。

研究の初期の段階での付着強度式(文献(2)参照)では、断面の隅角部に配置された主筋に対して、連続繊維シートとの拘束力は、底面かぶりと側面かぶり厚さが等しいときに最大となり、両者の差が大きくなるほど低下するという仮説を立てた。本実験の目的はこの仮説の検証を行うことにある。

4.2 実験概要

4.2.1 試験体

図-7に試験体の側面図を示す。試験体の幅およびかぶり厚さについては各試験体ごとに異なるので注意されたい(図-8参照)。試験鉄筋にはネジ式鉄筋D25の高強度鉄筋を使用し、目標コンクリート強度を 30N/mm^2 とした。コンクリートはすべて一体打ちとし、図の上部から打設した。試験体には、非付着領域を設けるために、鋼管を用いてコンクリートとの付着を断ち、付着領域との境界にスリットを設け、付着領域に荷重反力による圧縮力が生じない配慮を行った。また、その反力により非付着領域つまり試験区間外でのコンクリート破壊を防止するために $\phi 6$ の普通強度鉄筋でスパイラル補強を施した。

4.2.2 荷重方法

図-9に荷重装置の概略を示す。荷重は手動オイルジャッキによって制御されるセンターホールジャッキのストロークにより行い、一方单向単調引張荷重とした。

センターホールジャッキのストロークが伸びると、鉄筋にはめ込まれたナットが押され鉄筋が引張られるようになっており、反力は鋼製支柱板を介して試験体の非付着領域に伝達され、抵抗される。

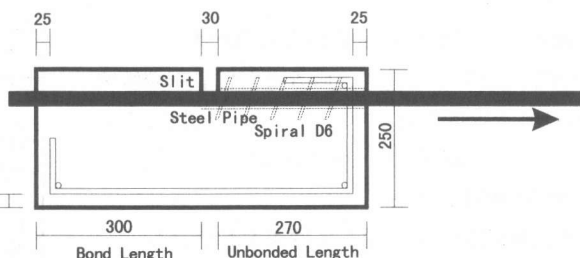


図-7 試験体図

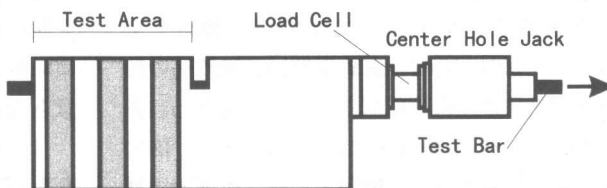
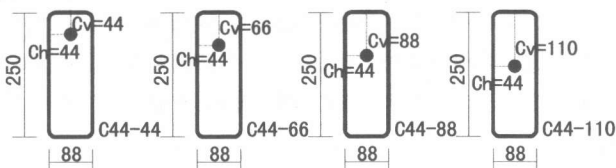


図-9 荷重装置

表-4 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	減水剤
70.0	49.0	263	184	883	941	0.526

(b) 力学的特性

	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	割線弾性係数 (N/mm^2)
シリーズ1	34.9	2.71	2.98×10^4
シリーズ2	31.3	3.05	2.89×10^4

表-5 鉄筋の力学的特性

	降伏強度 (N/mm^2)	破断強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
D25 (主筋)	980.0	1058.4	1.99×10^5
D10 (補強筋)	340.0	496.9	1.82×10^5

4.2.3 使用材料

(1) コンクリート

使用したコンクリートの特性を表-4に示す。粗骨材は最大粒径20mm、目標スランプ15cm、目標コンクリート強度 20N/mm^2 とした。その配合を同表(a)に示す。各シリーズのコンクリートの力学的特性を同表(b)に示す。

(2) 鉄筋

使用した鉄筋の力学的特性を表-5に示す。試験筋はD25としたが、両者とも付着割裂破壊前の引張降伏先行とならないよう高強度鉄筋 ($\sigma_y \geq 1,000\text{N/mm}^2$) を使用した。

(3) 連続繊維シート

連続繊維シートに関してはキャンティレバー型と同じ物を使用している (文献(3)参照)。また、貼付方法も文献(3)と同様であり、補強比もキャンティレバー型試験体と同様に、横補強筋比と同様の算出方法で定義し、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とした。

4.3 かぶり厚さが付着強度に与える影響

4.3.1 実験変数

表-6にシリーズ1の試験体の一覧表を実験結果を併せて示す。実験変数は試験鉄筋の鉛直方法位置、つまり鉛直かぶりのみである。鉛直かぶり44mmを規準に、1.5, 2, 2.5倍の66, 88, 110mmの合計4種類とした。連続繊維補強する試験体はそれぞれ3体ずつ作成したので、試験体総数は19体となっている。この影響を検討することで連続繊維シートの拘束力を評価することができる。

4.3.2 仮説の検証

表-6に実験結果と前節で定義した連続繊維シート負担係数 α を示す。表中の*印は試験区間外での破壊を示す。この結果を見ると鉛直かぶりの増加が連続繊維シートの主筋の拘束力、つまり、付着割裂強度の低下に必ずしもつながらないということ、鉛直かぶりが付着割裂強度に与える影響は少ないことがいえる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- ①キャンティレバー型試験体を用いて付着割裂試験を行い、その結果から連続繊維シートによる付着割裂強度式を提案することができた。
- ②簡易型付着試験法を用いた補足実験を行った結果、連続繊維シートを用いた場合の付着割裂

表-6 実験結果の概要

試験体名	付着長さ (mm)	側面かぶり (mm)	底面かぶり (mm)	FRPシート		付着強度 (N/mm ²)	平均値 (N/mm ²)	α			
				種類	補強比 (%)						
N44-44-1	300	44	44	C	0	3.28	—	—			
C44-44-1					0.190	4.81*	5.05	4.71			
C44-44-2						4.89					
C44-44-3					5.21						
N44-66-1				300	66	66	C	0	3.20	—	—
C44-66-1								0.190	5.91	5.41	5.33
C44-66-2									4.91		
C44-66-3								4.98*			
A44-66-1							A	0.190	4.99*	4.63	3.81
A44-66-2									4.73		
A44-66-3									4.52		
N44-88-1							300	88	88	C	0
C44-88-1	0.190	5.94	5.71								5.93
C44-88-2		5.68									
C44-88-3		5.52									
N44-110-1	300	110	110							C	0
C44-110-1				0.190	4.90	5.30					5.69
C44-110-2					5.62						
C44-110-3					5.39						

強度の増分には、かぶり厚さの影響が少ないことが分かった。

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)松野一成・河野進・小幡有香・角徹三：炭素繊維で補強されたRC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.21，No.3，pp.1483-1488，1999 4)藤井栄・森田一郎：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 5)藤井栄：鉄筋コンクリート部材の付着割裂破壊，コンクリート工学，Vol.36，No.2，pp.10-16，1998.26) Kono,S.,Matsuno,K., Kaku,T.:Experimental Study on Bond-Slip Behavior of Longitudinal Bars in RC Beams Confined with FRP Sheets,"Fourth International Symposium of Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structure", Baltimore,1999.10 7)萩尾浩也・勝俣秀雄・小島克朗：炭素繊維ストランドによる既存コンクリート柱の耐震補強，日本建築学会学術講演梗概集 (関東) C-2構造IV，pp.669-670，1997.9 8)勝俣秀雄・小島克朗・武田寿一：炭素繊維による既存コンクリート柱の耐震補強に関する研究 (その2) - 矩形断面柱の補強に関する実験一，大林組技術研究所報No.34，pp.114-118，1987