

# 論文 炭素繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する実験的研究

加藤博文\*1・児島孝之\*2・高木宣章\*3・足立幸郎\*4

要旨：既存コンクリート構造物の補強方法として、高強度繊維の1つである炭素繊維シートに着目し、その有効性について検討した。炭素繊維シートを巻付けることによりコンクリート部材の耐力は増加するものの、その耐力の算定には、シートのばらつきおよび接着による低減係数を十分検討する必要がある。また、炭素繊維シートを膨張で損傷したコンクリート部材に巻付けた場合、健全なコンクリートに巻付けた時と同様に、せん断補強材として有効に作用する。

キーワード：炭素繊維シート、せん断補強、曲げ補強、損傷コンクリート

## 1. はじめに

本研究では、炭素繊維シートの補強量、巻き付け方などを要因として鉄筋コンクリート(RC)はりを作製し、その曲げおよびせん断補強効果について検討した。また、アルカリ骨材反応膨張により損傷した橋脚などのコンクリート構造物を想定して、一部の供試体に膨張材を添加し健全なコンクリートとの比較検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験計画

供試体の名称および実験要因を表-1に示す。供試体は12体作製した。No.1~No.6の供試体は、曲げ補強筋量を一定にし、せん断スパンのスターラップ間隔と炭素繊維シートの巻付け量を組み合わせることにより、せん断補強筋量を変化させた。No.7とNo.8の供試体は、炭素繊維シートを曲げスパンの側面にも接着し、曲げに対しても補強を施した。No.9~No.12の供試体には、アルカリ骨材反応膨張による損傷コンクリートを想定して膨張材を添加しており、補強方法は健全なコンクリートと比較するため、No.1およびNo.3~No.5に対応させてある。

せん断補強筋量 ( $p_w \cdot \sigma_w$ ) は(1)式により算出した。

$$p_w \cdot \sigma_w = p_s \cdot \sigma_s + n \cdot p_{cf} \cdot \sigma_{cf} \quad (1)$$

$$n = E_{cf} / E_s, \quad \sigma'_{cf} = \lambda \cdot \sigma_{cf}, \quad p_s = A_s / b_w \cdot s, \quad p_{cf} = b_{cf} / b_w$$

ここに、 $\sigma_s$ ：スターラップの降伏強度、 $\sigma_{cf}$ ：炭素繊維シートの引張強度

$E_s$ ：スターラップの弾性係数、 $E_{cf}$ ：炭素繊維シートの弾性係数

$A_s$ ：スターラップの断面積、 $b_{cf}$ ：炭素繊維シートの厚さ

$s$ ：スターラップの間隔、 $b_w$ ：はりの断面積

$\lambda$ ：炭素繊維シートのばらつきおよび接着による低減係数で 2/3 とした[1]

\*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (正会員)

\*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博 (正会員)

\*3 立命館大学助教授 理工学部土木工学科、工博 (正会員)

\*4 阪神高速道路公団 保全施設部 (正会員)

表-1 供試体の名称および要因

No.	供試体名	コンクリートの種類	せん断補強筋			曲げ補強筋		
			スターラップ°	炭素繊維シート		引張鉄筋	炭素繊維シート 目付量(g/m <sup>2</sup> )	
				目付量(g/m <sup>2</sup> )	巻き方			$P_w \cdot \sigma_w^*$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	N15	普通	D6@15cm	—	—	D16x3本	—	
2	N15-100Z			100x1層	ゼブラ			19.00
3	N15-100				—			29.40
4	N15-200		200x1層	全面	48.95			
5	N-200				39.09			
6	N5		—	—	29.56			
7	N5-300x2-1	D6@ 5cm	300x2層	全面	146.84	300x1層**		
8	N5-300x2-3					300x3層**		
9	E15	膨張	D6@15cm	—	—	—		
10	E15-100			100x1層	全面		29.40	
11	E15-200		200x1層	全面			48.95	
12	E-200				—		39.09	

\* : せん断補強筋量で(1)式による

\*\* : 炭素繊維シートによる曲げ補強は供試体側面のみ実施

## 2.2 使用材料

実験に使用した炭素繊維シートは、繊維糸を1方向に配列したもので、繊維糸の交錯による屈曲がない構造になっている。表-2に炭素繊維シートの特性を示す。炭素繊維シートは補強筋量を変化させる目的で、目付量100、200、および300g/m<sup>2</sup>の3種類のものを使用した。

また、炭素繊維シートの接着にはエポキシ樹脂系接着剤を使用した。

普通および膨張コンクリートの示方配合を表-3に示す。膨張コンクリートの単位膨張材量は73kg/m<sup>3</sup>で、普通コンクリートの単位セメント質量に対して内割で25%添加した。コンクリートの力学的特性を表-4に、使用鉄筋の引張試験結果を表-5に示す。

## 2.3 供試体

供試体は寸法が15x24x200cmのRCはりで、全ての供試体に引張鉄筋としてD16を3本、圧縮鉄筋としてD10を2本配筋した。供試体のコーナー部には、巻付けによる炭素繊維シートの強度低下を緩和するために、半径1cmの面取りを設けた。炭素繊維シートの接着は材令28日以降に行い、

表面に樹脂を塗った後シートを貼付け、その上から樹脂を含浸させた。炭素繊維シートを多層貼付ける場合は、1層ごとに樹脂を含浸させた。代表的な供試体の補強状況および載荷条件を図-1

表-2 炭素繊維シートの特性

目付量(g/m <sup>2</sup> )	比重	設計厚さ(mm)	引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )
100	1.80	0.056	39500 (50000)	2.30x10 <sup>6</sup> (2.35x10 <sup>6</sup> )
200	1.80	0.111		
300	1.80	0.167		

( )内の数値は炭素繊維単体

表-3 コンクリートの示方配合

コンクリートの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (cc)	
			W	C	E*	S	G	AE減水剤	AE助剤
普通	60	46	174	290	—	824	1008	2900	1450
膨張	60	46	174	217	73	821	1006	2900	1450

\* : Eは膨張材

表-4 コンクリートの力学的特性

コンクリートの種類	スラップ°(cm)	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )		弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	
		材令28日	試験時	材令28日	試験時
普通	10	352	390	3.01x10 <sup>5</sup>	3.12x10 <sup>5</sup>
膨張	12	18	19	—	—

表-5 使用鉄筋の引張試験結果

使用箇所	種類	材質	降伏強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )
スターラップ°	D6	SD295	3500	5500	2.1x10 <sup>6</sup>
圧縮鉄筋	D10	SD345	4000	5900	2.1x10 <sup>6</sup>
引張鉄筋	D16	SD345	3900	5800	2.1x10 <sup>6</sup>

に示す。荷重条件は、支点間距離160cm、曲げスパン100cmの曲げ荷重とし、せん断スパン有効高さ比(a/d)は1.5とした。

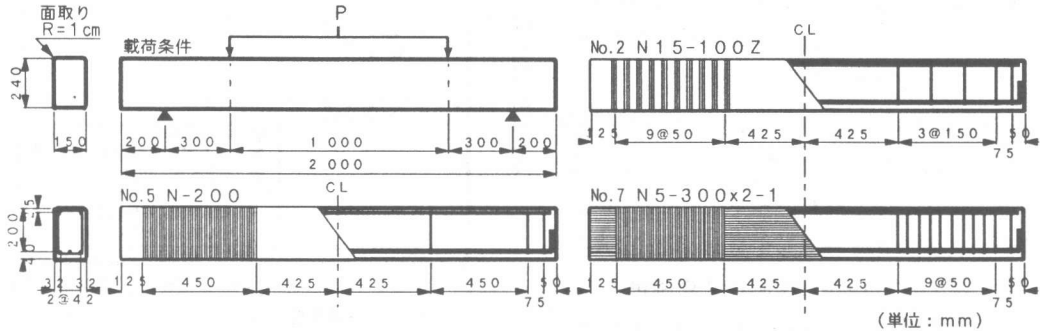


図-1 荷重条件および補強方法

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 せん断補強効果

表-6に曲げ破壊荷重およびせん断破壊荷重の計算値と、実験により得られた供試体の破壊荷重と破壊形式を示す。せん断耐力の算定には、(2)式を用いた。

$$V = \alpha \cdot V_o + V_w \quad (2)$$

ここに、

$V$  : せん断耐力

$\alpha$  : 残存アーチ機構による割増係数で 1.6 [2]

$V_o$  : コンクリートのせん断耐力で

$$0.94 \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot (f'_{co})^{1/3} \cdot \{0.75 + 1.4/(a/d)\} \cdot b_w \cdot d$$

$V_w$  : 補強筋のせん断耐力で

$$(p_w \cdot \sigma_w) \cdot b_w \cdot z$$

( $p_w \cdot \sigma_w$ ) は(1)式による

炭素繊維シートの破断で破壊した供試体は、全て脆性的な破壊性状を示した。せん断破壊した供試体の中で、代表的なものの破壊状況を図-2に示す。炭素繊維シートの破断は、ともにせん断スパンの斜めひびわれに沿って生じている。

表-6 実験結果および計算耐力

No.	供試体名	理論値(tf)		実験結果(tf)		実験値理論値	
		$P_{mu}$	$P_{vu}$	$P_y$	$P_u$		破壊形式
1	N15	32.92	24.00	—	26.50	SD	1.10
2	N15-100Z		28.77	—	30.40	SD*	1.06
3	N15-100		34.20	31.25	33.80	BSD*	0.99
4	N15-200		44.40	31.00	34.80	BD	1.06
5	N-200		39.26	32.80	36.20	BD	1.10
6	N5		34.28	31.50	33.00	BD	1.00
7	N5-300x2-1	38.92	95.47	32.50	41.80	BD*	1.07
8	N5-300x2-3	47.07		38.30	53.10	BD*	1.13
9	E15	32.92	24.00	—	28.90	SD	1.20
10	E15-100		34.20	31.00	32.40	BSD*	0.95
11	E15-200		44.40	30.50	31.70	BD	0.96
12	E-200		39.26	28.80	31.40	BD	0.95

$P_{mu}$  : 曲げ破壊荷重,  $P_{vu}$  : せん断破壊荷重

$P_y$  : 曲げ降伏荷重,  $P_u$  : 破壊荷重

SD : せん断破壊, BD : 曲げ破壊, BSD : 曲げ降伏後せん断破壊

\* : 炭素繊維シートの破断で破壊

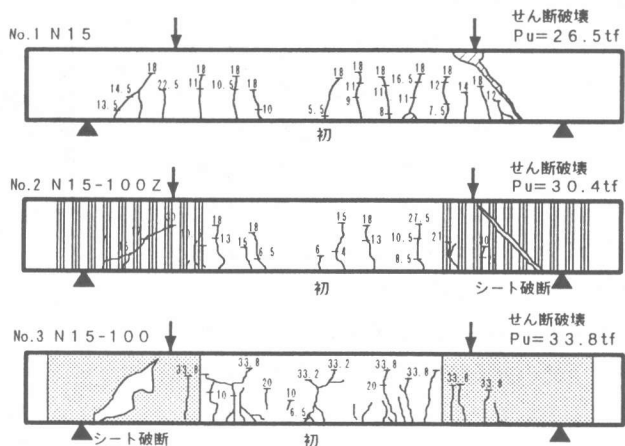


図-2 せん断破壊状況図

シートによるせん断補強筋量は異なるものの、ゼブラ状の補強と全面に補強をした供試体の破壊状況に大差は見受けられないことから、巻付け方の相違が破壊性状に及ぼす影響は少ないものと考えられる。

図-3にせん断破壊荷重とせん断補強筋量 ( $p_w \cdot \sigma_w$ ) の関係を示す。せん断破壊荷重の算定には、炭素繊維シートのはらつきと接着による影響を考慮して低減係数を2/3とした。せん断破壊した供試体は炭素繊維シートによる補強の増加にともない、実験値は危険側へと移行している。したがって、炭素繊維シートの低減係数の設定にはシートの巻付け量を考慮する必要がある。また、膨張材の添加によるはりの破壊荷重の低下はわずかであり、損傷による耐力の低下はあまり見受けられなかった。

図-4に、各荷重時におけるスターラップひずみとせん断補強筋量の関係を示す。せん断補強筋量の増加にともなって、スターラップのひずみが低下していることから、炭素繊維シートがせん断力に対して抵抗し、スターラップの負担を軽減していることがうかがえる。したがって、炭素繊維シートは、せん断力に対して効果的に作用していると考えられる。

図-5に、普通コンクリートを使用した供試体の荷重とスターラップひずみの関係を示す。スターラップのみで補強された供試体 (No.1およびNo.6) に着目すると、斜めひびわれ発生後、荷重の増加とともにほぼ一定の割合でスターラップひずみが増加している。それに対して、スターラップと炭素繊維シートの両方で補強された供試体 (No.2およびNo.3) では、斜めひびわれ発生後荷重が20tf付近に達するまでは、スターラップのみで補強された供試体と同様の挙動を示しているが、それ以上の荷重において単位荷重増加に対するスターラップひずみの増加率が小さくなっている。このことから、せん断補強筋としてスターラップと炭素繊維シートを併用した場合、せん断力に対して各々の補強材が分担する力の比率は一定ではなく、荷重の増加と

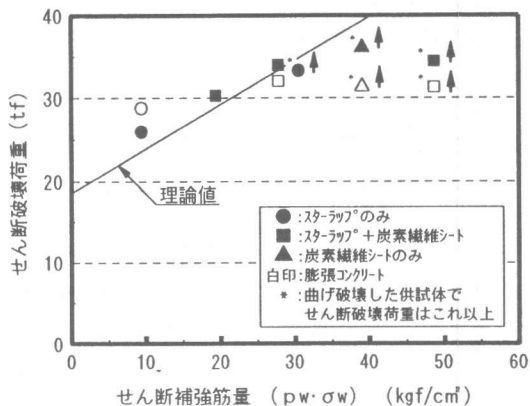


図-3 せん断破壊荷重とせん断補強筋量の関係

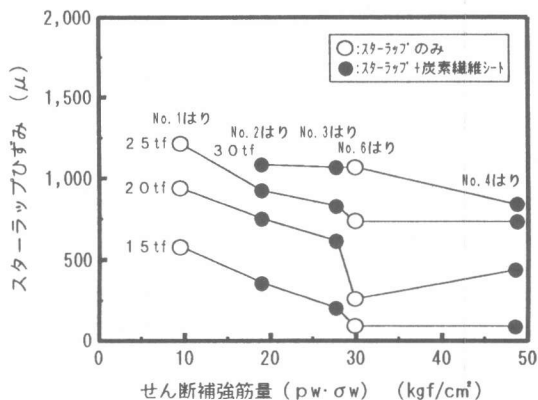


図-4 スターラップひずみとせん断補強筋量の関係

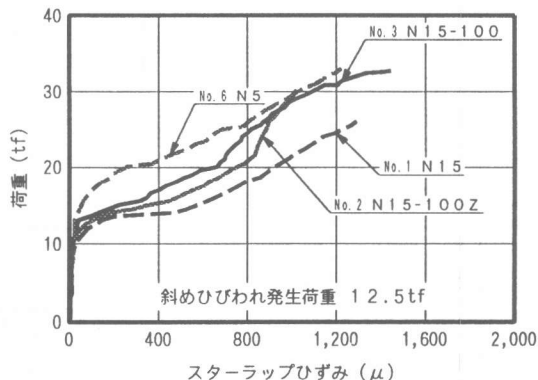


図-5 荷重とスターラップひずみの関係 (普通コンクリート)

ともに変化するといえる。炭素繊維シートは低荷重領域よりも、ある荷重を境とする高荷重領域においてせん断力に対して効果的に抵抗する傾向にある。

図-6に膨張材を添加した供試体の荷重とスターラップひずみの関係を示す。図-5と図-6を比較すると、斜めひびわれ発生荷重が普通コンクリートの供試体において12.5tfであるのに対し、膨張コンクリートの供試体において16.5tfとなっており、膨張材の添加による斜めひびわれ発生荷重の増加が見受けられる。これは、スターラップによる膨張拘束によりプレストレスが導入されたものと考えられる[3]。膨張材を添加した供試体でも、スターラップと炭素繊維シートの両方で補強したNo.10およびNo.11の供試体において、スターラップひずみの増加率が20tf付近を境に変化しており、普通コンクリートを用いた供試体と同様の挙動を示している。したがって、炭素繊維シートをアルカリ骨材反応などの膨張により損傷したコンクリート部材のせん断補強筋として使用した場合、健全なコンクリートに補強した時と同様の挙動を示すものと考えられる。

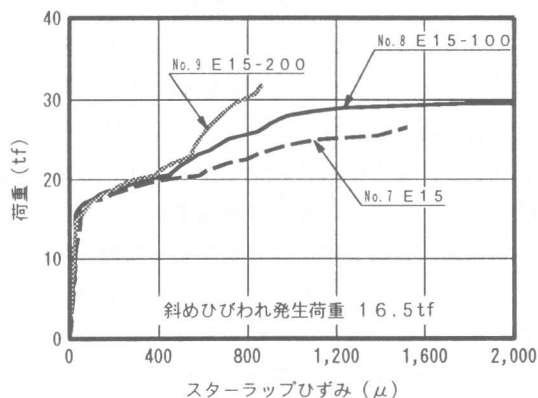


図-6 荷重とスターラップひずみの関係  
(膨張コンクリート)

3.2 曲げ補強効果

No.7およびNo.8の供試体には、側面に炭素繊維シートを貼付けることにより、曲げに対する補強を施した。したがって、これらの供試体に対する炭素繊維シートの曲げ補強は、巻付けでなく接着のみで補強してある。表-6においてNo.7とNo.8の供試体に着目すると、終局曲げ耐力の理論値に対する実験値の比は、1.07および1.13と安全側の値となっている。理論値の算定には、炭素繊維シートの低減係数を考慮しないで、従来の曲げ理論により算定した。

### 3.2 曲げ補強効果

No.7およびNo.8の供試体には、側面に炭素繊維シートを貼付けることにより、曲げに対する補強を施した。したがって、これらの供試体に対する炭素繊維シートの曲げ補強は、巻付けでなく接着のみで補強してある。表-6においてNo.7とNo.8の供試体に着目すると、終局曲げ耐力の理論値に対する実験値の比は、1.07および1.13と安全側の値となっている。理論値の算定には、炭素繊維シートの低減係数を考慮しないで、従来の曲げ理論により算定した。

図-7にNo.6、No.7およびNo.8の供試体の破壊状況を示す。No.7の供試体は引張鉄筋降伏、引張側炭素繊維シートの破断、圧縮側コンクリートの圧潰の順で、No.8の供試体は引張鉄筋降伏、圧縮側コンクリート圧潰、引張側炭素繊維シート破断の順により破壊しており、その破壊性状はどちらも極めて脆性的であった。No.8の供試体では、50.8tfにおいて炭素繊維シートがコンクリート表面から急激に剥離する現象が観察されたが、剥離は試験スパン外に留まっており直接はりの破壊には影響を及ぼさなかった。

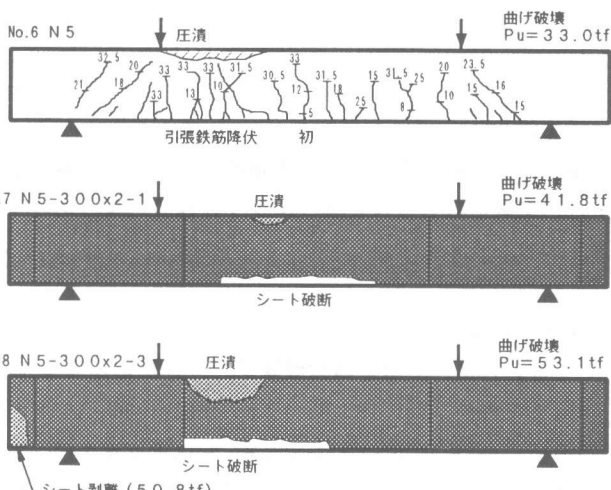


図-7 曲げ破壊状況図

No.6、No.7およびNo.8の供試体

の荷重とたわみの関係を図-8に示す。ひびわれ発生から引張鉄筋降伏までの荷重とたわみの関係は、曲げ補強筋量の増加に応じて勾配が若干急となっている。引張鉄筋降伏後においても同様の傾向が見受けられるが、炭素繊維シート1層による曲げ補強をしたNo.7の供試体と、3層による曲げ補強をしたNo.8の供試体とでは大きく異なっている。したがって、RC部材の側面のみ炭素繊維シートを接着した場合には、引張鉄筋降伏後の変形性状にシートが及ぼす影響が大きいものと考えられる。

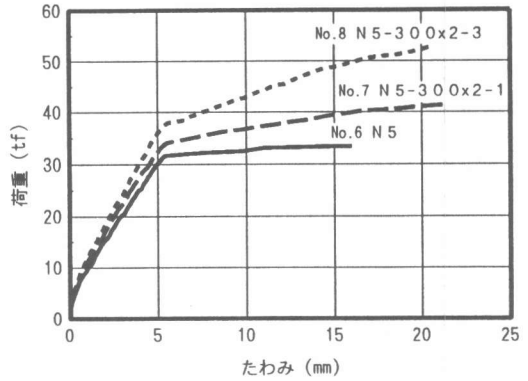


図-8 荷重とたわみの関係

#### 4. 結論

本研究により得られた結論は以下の通りである。

- (1) 炭素繊維シートをせん断補強筋として用いた場合、シートの巻付け量を増やすことによりせん断耐力は向上する。せん断耐力の算定には、炭素繊維シートの低減係数の設定を十分に検討する必要がある。
- (2) せん断補強筋として炭素繊維シートとスターラップを併用した場合、両者の分担するせん断力の割合は一定でなく、せん断応力の増加に応じて変化する。本研究では、せん断応力の大きい領域で炭素繊維シートがその効果を発揮する傾向にあった。
- (3) 膨張により損傷したコンクリート部材に炭素繊維シートを巻付けた場合、健全なコンクリート部材に巻付けたときと同様、炭素繊維シートはせん断力に対して有効に抵抗する。
- (4) 曲げ補強として炭素繊維シートをはり部材の側面のみ接着した場合、シートの補強量の増加により、曲げ耐力が増加する。

#### 【謝辞】

本研究において使用した炭素繊維シートは、ショーボンド建設(株)より提供して頂きました。また、実験に際しては、オリエンタル建設(株)の今川正之君の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- [1] 朝倉, 谷垣, 小田: 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.16, No.1, pp.1061-1066, 1994
- [2] 池田, 小柳, 角田: 土木学会編 新体系土木工学 32 鉄筋コンクリートの力学, 技報堂出版
- [3] 國府, 福澤: 最新コンクリート技術選書 8 膨張コンクリート・高強度コンクリート, 山海堂