

論文 連続繊維シートによるRCはりのせん断補強

東野幸史*¹・濱田 譲*²・高木宣章*³・児島孝之*⁴

要旨：膨張ペーストの注入により予め緊張した連続繊維シートがRCはりのせん断耐力に及ぼす影響について検討した。シートの種類と性能、シート緊張の有無がRCはりのせん断耐力と破壊形式に大きな影響を及ぼし、弾性係数の小さいシートを緊張すると、シートの樹脂接着時よりせん断耐力は大きく増大する。そして、スターラップと併用する場合、破壊形式は、せん断圧縮破壊から曲げ破壊に移行する傾向にあった。
キーワード：連続繊維シート、炭素繊維シート、アラミド繊維シート、せん断補強、せん断耐力

1. はじめに

連続繊維シートによる既存コンクリート構造物の補強は、通常、シートを樹脂で接着する工法が採用されている。本研究では、シート補強方法（従来のシートを樹脂接着する方法と膨張ペーストの注入によりシートを予め緊張する方法）およびシートの種類（炭素繊維、アラミド繊維）と性能（高弾性、高強度、標準）がRCはりのせん断耐力、せん断補強材の分担せん断力の割合に及ぼす影響について実験検討した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

供試体の名称および要因を表-1に示す。連続繊維シートの種類および補強方法がはりのせん断耐力に及ぼす影響を検討する。タイプA供試体は通常行われているシートを樹脂ではりに接着したものであり、タイプB供試体は樹脂で固めたシートとはり供試体の間に膨張ペーストを注入することによりシートを予め緊張したはりである。スターラップの有無、連続繊維シートの目付量および弾性係数を組合せて、せん断補強量を変化させた。表-1に示すせん断補強

比(p_w)とせん断補強量($p_w \cdot \sigma_w$)は、式(1)および式(2)より計算した。タイプB供試体については、断面の増大を考慮して計算している。

$$p_w = p_s + p_{frp} \\ = 2 \cdot A_s / (b_w \cdot s) + 2 \cdot b_{frp} / b_w \quad (1)$$

$$p_w \cdot \sigma_w = p_s \cdot \sigma_s + p_{frp} \cdot \sigma_{frp} \quad (2)$$

ここで、

- p_s : スターラップのせん断補強比
- p_{frp} : 連続繊維シートのせん断補強比
- A_s : スターラップ1本あたりの断面積
- s : スターラップ間隔
- b_w : はりの断面幅
- b_{frp} : 連続繊維シートの設計厚さ
- σ_s : スターラップの降伏強度
- σ_{frp} : 連続繊維シートの引張強度

2.2 使用材料

使用した連続繊維シートは、繊維系を1方向に配列したもので、繊維系の交錯による屈曲がない構造となっている。連続繊維シートの力学

*1: (株)きんでん 工修 (正会員)

*2: 立命館大学大学院 理工学研究科博士後期課程・総合理工学専攻、工修 (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: 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博 (正会員)

表-1 供試体の名称および要因

せん断補強材			タイプA			タイプB				
スタップ°	連続繊維シート		供試体名	D _w (%)	D _w ・σ _w (N/mm ²)	供試体名	D _w (%)	D _w ・σ _w (N/mm ²)		
	種類	目付量 (g/m ²)							性能	
なし	未使用		N	0.000	0.00	----	--	--		
	アラミド 繊維	100	高弾性	Na -AE100	0.092	1.89	Nb -AE100	0.086	1.77	
			標準	Na -AS100	0.093	1.90	Nb -AS100	0.087	1.79	
		200	高弾性	Na -AE200	0.184	3.78	Nb -AE200	0.172	3.55	
			標準	Na -AS200	0.185	3.81	Nb -AS200	0.174	3.57	
	炭素 繊維	100	高弾性	Na -CE100	0.072	1.82	Nb -CE100	0.069	2.02	
			高強度	Na -CS100	0.074	2.72	Nb -CS100	0.069	2.41	
		200	高弾性	Na -CE200	0.145	3.63	Nb -CE200	0.137	4.04	
			高強度	Na -CS200	0.148	5.44	Nb -CS200	0.139	4.83	
	D6@10cm	未使用		N 10	0.422	1.45	----	--	--	
		アラミド 繊維	100	高弾性	Na10-AE100	0.514	3.36	Nb10-AE100	0.482	3.13
				標準	Na10-AS100	0.515	3.34	Nb10-AS100	0.483	3.15
200			高弾性	Na10-AE200	0.606	5.23	Nb10-AE200	0.568	4.91	
			標準	Na10-AS200	0.607	5.26	Nb10-AS200	0.569	4.93	
炭素 繊維		100	高弾性	Na10-CE100	0.495	3.27	Nb10-CE100	0.464	3.38	
			高強度	Na10-CS100	0.496	4.17	Nb10-CS100	0.465	3.77	
		200	高弾性	Na10-CE200	0.567	5.08	Nb10-CE200	0.533	5.40	
			高強度	----	----	----	Nb10-CS200	0.535	6.19	

的特性を表-2に示す。炭素繊維シートは高弾性タイプと高強度タイプを、アラミド繊維シートは高弾性タイプと標準タイプを使用した。目付量は各シートとも 100 g/m²および200g/m²の2水準とした。シートの接着には、エポキシ樹脂系接着剤を使用した。

タイプB供試体に使用した膨張ペーストの水結合材比は60%、シリカフュームは結合材質量の内割で20%、膨張材(エトリンサイト系)は結合材質量の外割で55%を使用した。コンクリートの示方配合を表-3に、コンクリートの諸強度を表-4に示す。使用した鋼材の力学的特性を表-5に示す。異形PC鋼棒(ガビネスタブ[®], φ23)は、供試体をせん断破壊先行型とするために引張鋼材として使用し、緊張せず定着板により供試体端部に定着させた。

2.3 供試体および試験方法

供試体の補強状況および载荷条件を図-1(a)に示す。供試体寸法は15x24x200cmで、有効高さは20cmとした。引張鋼材として異径PC鋼棒を2本、圧縮鉄筋として異形鉄筋(SD345,D10)を2本配置した。シートを巻き付ける供試体は、

表-2 使用連続繊維シートの力学的特性

種類	性能	比重	目付量 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
炭素繊維 (タイプA)	高弾性	1.84	100	0.0543	2509	4.33x10 ⁵
			200	0.1086	(4214)	(4.36x10 ⁵)
	高強度	1.80	100	0.0555	3675	2.24x10 ⁵
			200	0.1111	(4900)	(2.30x10 ⁵)
炭素繊維 (タイプB)	高弾性	1.82	100	0.0549	2940	3.72x10 ⁵
			200	0.1098	(4224)	(3.84x10 ⁵)
	高強度	1.80	100	0.0555	3479	2.30x10 ⁵
			200	0.1111	(4900)	(2.31x10 ⁵)
アラミド繊維	高弾性	1.45	100	0.0689	2058	1.08x10 ⁵
			200	0.1379	(2945)	(1.11x10 ⁵)
	標準	1.44	100	0.0694	2058	0.72x10 ⁵
			200	0.1388	(3018)	(0.72x10 ⁵)

()内は、連続繊維単体

表-3 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 ^a (cc/m ³)	
		W	C	S	G	AE減水剤	AE助剤
60	46	174	290	824	1008	2900	1450~870

注)*: AE減水剤は25%溶液、AE助剤は1%溶液(2.5Aと1.5A)を使用

表-4 コンクリートの諸強度

スタップ°	タイプ	28日強度 (N/mm ²)		載荷時強度 (N/mm ²)	
		圧縮強度	弾性係数	圧縮強度	弾性係数
なし	A	28.5	2.91x10 ⁴	31.6	3.06x10 ⁴
	B	31.2	3.00x10 ⁴	33.9	3.18x10 ⁴
D6@10cm	A	29.0	2.94x10 ⁴	31.9	3.11x10 ⁴
	B	30.5	2.95x10 ⁴	32.8	3.13x10 ⁴

コーナー部に半径1cmの面取りを設けた。供試体はコンクリート打設翌日脱型し、約1週間散水養生を行い、その後載荷試験まで気中保管した。タイプA供試体のシート接着は、材齢28日から実施した。供試体表面処理後、表面に樹脂を塗布した後にシートを貼りつけ、その上から樹脂を含浸させた。シート接着後1週間室内で養生の後、載荷試験を実施した。膨張ペースト

によりシートを予め緊張したタイプB供試体は、材齢28日以降に図-1(b)に示すように予め樹脂で固めたシートを供試

表-5 使用鋼材の力学的特性

使用鋼材	使用箇所	材質および径	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
スターラップ	全ての供試体	SD295 D6	343	539	2.06x10 ⁵
圧縮鉄筋		SD345 D10	392	578	2.06x10 ⁵
引張鋼材	炭素(タイプA)	ケビソデスターフ φ23	1058	1176	1.96x10 ⁵
引張鋼材	炭素(タイプA)以外	ケビソデスターフ φ23	1005	1091	1.96x10 ⁵

体に取り付け、シートと供試体表面の隙間(約5mm)に膨張ペーストをグラウトポンプを使用して注入した。膨張ペースト注入後、約10日間の室内養生後、載荷試験を実施した。タイプB供試体は、膨張ペースト注入後から載荷試験時までシートひずみの経時変化を測定した。

膨張ペーストによるシートひずみの経時変化は、変動はあるものの載荷試験直前で、目付量100g/m²では、炭素繊維シートで各々約3000μ(高弾性)、約3500μ(高強度)、アラミド繊維シートで各々約3100μ(高弾性)、約3700μ(標準)であった。シートに導入されたプレストレス量は、はり軸方向単位長さあたりはり周方向に、炭素繊維シートは各々0.77N/mm²(高弾性)、0.55N/mm²(高強度)、アラミド繊維シートは各々0.29 N/mm²(高弾性)、0.23N/mm²(標準)程度であった。

載荷条件は、支点間距離160cm、曲げスパン80cmの2点集中単調載荷とした。せん断スパン有効高さ比(a/d)は2.0とした。

3. 実験結果および考察

既報告の実験結果¹⁾の一部も合わせて検討する。試験結果および計算耐力を表-6に示す。斜めひび割れ発生荷重およびスターラップ降伏荷重は、荷重と斜めひび割れ幅の関係、荷重とスターラップひずみの関係から推定した。せん断耐力の計算には式(3)を用いた。タイプB供試体は、断面の形状を考慮してはり幅を16cm、有効高さを20.5cmとして計算した。

$$V = V_c + V_w \quad (3)$$

ここで、

V: せん断耐力

V_c: せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力

$$V_c = 0.20 \beta_a \cdot \beta_p (f'_{co})^{1/3} \cdot$$

$$\{0.75 + 1.4/(a/d)\} \cdot b \cdot w \cdot d$$

$$\beta_a = (100/d)^{1/4} \quad (d: \text{cm})$$

$$\beta_p = (100 p_w)^{1/3}$$

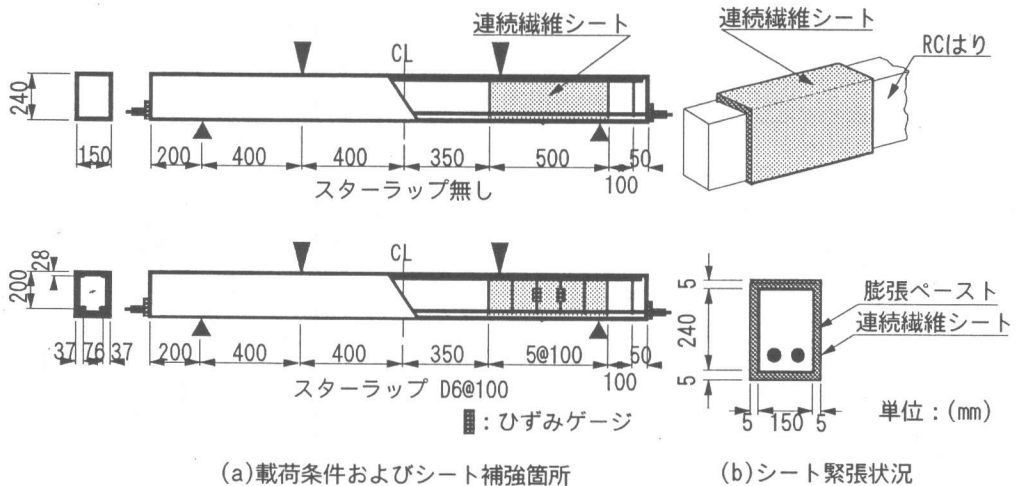


図-1 供試体の補強状況および載荷条件

表-6 載荷試験結果および計算耐力

スターラップ	タイプA								タイプB							
	供試体名	計算値(kN)		実験値(kN)				形式/実/計	供試体名	計算値(kN)		実験値(kN)				形式/実/計
		P _{mu}	P _{vu}	P _{ver}	P _{sy}	P _u				P _{mu}	P _{vu}	P _{ver}	P _{sy}	P _u		
なし	N	117	103	---	---	186	S	1.59	----	---	---	---	---	---	---	---
	Na -AE100	221	108	---	---	290	S*	1.31	Nb -AE100	224	118	---	---	317	S*	1.42
	Na -AS100	222	108	---	---	279	S*	1.26	Nb -AS100	228	117	---	---	304	S*	1.33
	Na -AE200	315	108	---	---	353	S*	1.12	Nb -AE200	328	131	---	---	397	S*	1.21
	Na -AS200	317	108	---	---	352	S*	1.11	Nb -AS200	329	130	---	---	397	S*	1.21
	Na -CE100	209	128	---	---	313	S*	1.50	Nb -CE100	239	137	---	---	258	S*	1.08
	Na -CS100	255	129	---	---	292	S*	1.15	Nb -CS100	262	135	---	---	329	S*	1.26
	Na -CE200	303	137	---	---	323	S*	1.07	Nb -CE200	356	145	---	---	293	S**	0.82
	Na -CS200	394	132	---	---	350	F	0.85#	Nb -CS200	401	141	---	---	448	F	1.08#
D6@10cm	N 10	192	113	191	251	S	1.31	----	---	---	---	---	---	---	---	
	Na10-AE100	288	123	245	358	S*	1.24	Nb10-AE100	301	127	294	405	F	0.97#		
	Na10-AS100	293	118	221	351	S*	1.20	Nb10-AS100	303	118	284	392	S*	1.29		
	Na10-AE200	387	123	284	405	S*	1.05	Nb10-AE200	403	132	314	410	F	0.99#		
	Na10-AS200	393	123	245	399	S*	1.02	Nb10-AS200	406	129	284	449	F	1.09#		
	Na10-CE100	284	132	265	331	S*	1.17	Nb10-CE100	315	142	274	317	S*	1.01		
	Na10-CS100	331	127	235	331	S*	1.00	Nb10-CS100	338	145	274	407	F	0.99#		
	Na10-CE200	378	137	274	403	S*	1.07	Nb10-CE200	433	145	265	335	S**	0.77		
		---	---	---	---	---	---	---	Nb10-CS200	476	139	304	417	F	1.01#	

注) : P_{mu} : 曲げ破壊荷重、P_{vu} : せん断破壊荷重、P_{ver} : 斜めひびわれ発生荷重、P_{sy} : 降伏荷重、P_u : 最大荷重
 S : せん断圧縮破壊、F : 曲げ破壊、* : シート破断により破壊、** : ペースト注入が不十分な供試体
 実/計 : 実験値/計算値、# : P_u/P_{mu}、

d : 有効高さ

$$p_w = A_s / (b_w \cdot d)$$

V_w : せん断補強材により受け持たれるせん断耐力

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

(p_w・σ_w)は式(2)による

$$z = d / 1.15$$

3.1 せん断耐力

せん断破壊荷重とせん断補強量の関係を図-2に、せん断破壊荷重の実験値と計算値の関係を図-3に示す。式(3)のV_wは斜め引張破壊時のせん断補強材を用いない棒部材のせん断耐力式である。本実験でせん断破壊したのはりの破壊

形式はせん断圧縮破壊であったので、耐力算定式として式(3)を使用するとやや過小な計算値を与えることになる。RCはりを連続繊維シートで補強した場合、既報告^{1)~3)}同様、スターラップの有無およびシート補強方法に関わらず、せん断補強量の増加に伴いせん断耐力は向上した。膨張ペーストの注入が不十分なために、シート破断後早期にせん断圧縮破壊した2つの供試体(Nb-CE200、Nb10-CE200)と、曲げ破壊した供試体を除くと、実験値は計算値を上回った。しかし、シートの種類と性能によっては、耐力増加の程度と破壊形式へのシート補強方法の影響が観察された。高弾性炭素繊維シートでは、シート緊張すると実験値は計算値を上回るもの

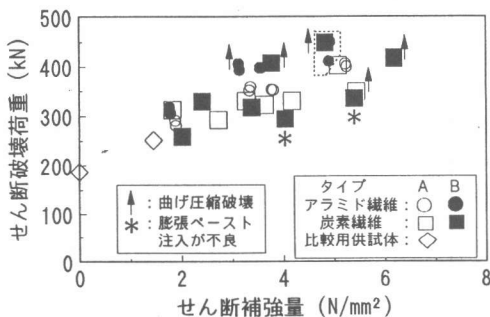


図-2 せん断破壊荷重とせん断補強量の関係

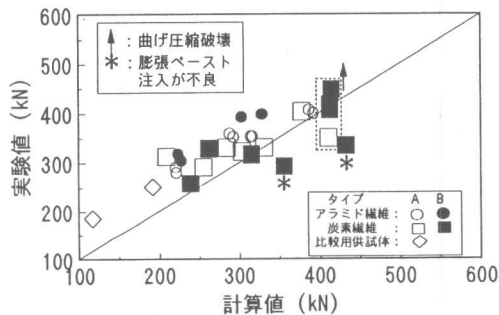


図-3 せん断破壊荷重の実験値と計算値の関係

の、シート接着時よりせん断耐力が低下する傾向にあった。一方、高強度炭素繊維シートあるいはアラミド繊維シートで補強した供試体は、シート接着時よりシート緊張した供試体の方が最大荷重が大きくなった。シート緊張による最大荷重の増加は、幾分の変動はあるものの、スターラップ未使用時には25~30kN、スターラップ併用時で約50kN程度であった。これらの供試体では、スターラップ併用時にシート緊張によりせん断耐力が大きく増加し、破壊形式はせん断圧縮破壊から曲げ破壊に移行する供試体が多く観察された。これは、高弾性炭素繊維シートに比較して、弾性係数が小さいことが影響を及ぼしているものと考えられる。

3.2 せん断力の分担状況

せん断補強材を有する部材の終局せん断耐力は、修正トラス理論により求めることができる。せん断破壊面近傍のせん断補強材の実ひずみをを用いて、式(4)と式(5)からせん断補強材の分担せん断力とトラス作用以外で抵抗するせん断耐力(V_{o1})を求める。

$$V_{w1} = V_{s1} + V_{frp1}$$

$$= (p_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s) b_w \cdot d / 1.15 + (p_{frp} \cdot E_{frp} \cdot \varepsilon_{frp}) b_w \cdot d / 1.15 \quad (4)$$

$$V_{o1} = \text{作用せん断力} - V_{w1} \quad (5)$$

ここで、 E_s : スターラップの弾性係数
 E_{frp} : 連続繊維シートの弾性係数
 ε_s : スターラップひずみ
 ε_{frp} : 連続繊維シートのひずみ

最大荷重時のシートひずみと分担せん断力を、各々図-4と図-5に示す。シート接着した高弾性炭素繊維シート(タイプA: CE100、CE200)は、最大荷重時にほぼ破断ひずみに達しており、せん断耐力の実験値は計算値を上回り、せん断圧縮破壊した。しかし、シート接着した高弾性炭素繊維シート以外のシートは、最大荷重時に破断ひずみに達していない。これらの供試体のうち、シートのみで補強した供試体あるいは接着したシートとスターラップで補強した供試体では、最大荷重以降の供試体の変形の増大に伴いシートひずみが増加し、シート破断後にせん断圧縮破壊した。また、緊張したシートとスターラップで補強した供試体では、曲げ破壊するものが多く観察された。

シートは破断ひずみに達していなくても、これらのRCはりのせん断耐力の実験値は計算値を上回っている。これは、シート補強することにより、はり周方向が拘束され、トラス作用以外で抵抗するせん断耐力(V_{o1})が増大するためと考えられる。シートによるこの拘束効果は、シートを緊張することにより高まる場合がある。比較的弾性係数の低いシート、つまり、高強度

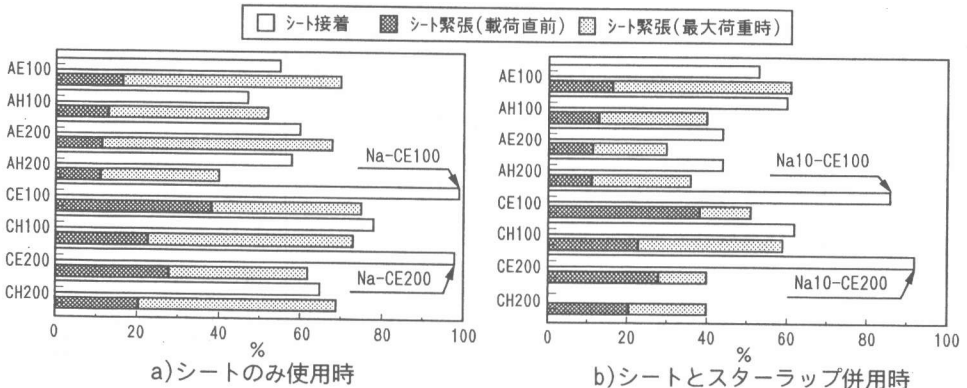
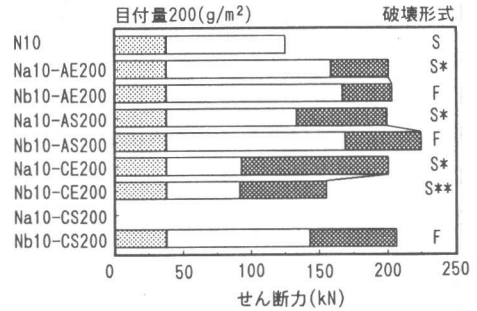
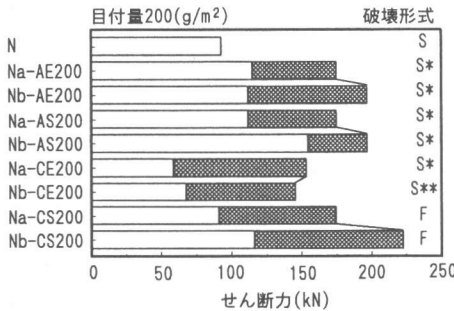
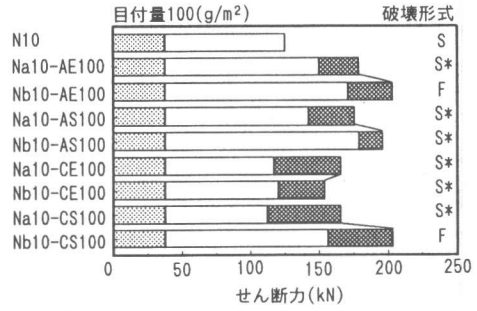
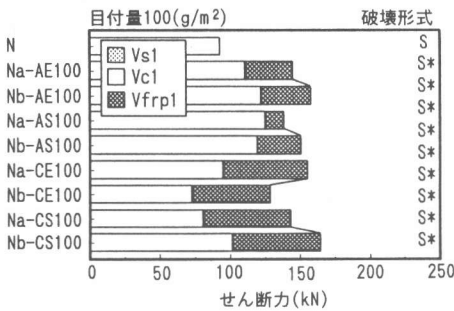


図-4 シート破断ひずみに対する最大荷重時のシートひずみの割合



a) シートのみ使用時

b) シートとスターラップ併用時

図-5 最大荷重時の分担せん断力

炭素繊維シートあるいはアラミド繊維シートとスターラップで補強した供試体では、シートによる拘束効果が大きく、せん断耐力が増大した結果、曲げ破壊したものと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた結論は、次のとおりである。

- (1) シート補強の施工が十分であれば、シートの種類、性能、補強方法に関わらず、満足のいくせん断補強効果を得ることができる。施工の難易および得られる効果から、炭素繊維シートはシート接着法が、アラミド繊維シートはシート緊張する方法が適している。
- (2) シートによるせん断補強は、シート自身によるせん断抵抗力ばかりでなく、シートの拘束効果により、トラス作用以外で抵抗するせん断耐力を増大させる効果がある。
- (3) シートによるこの拘束効果は、弾性係数が比較的小さいシートを緊張した時に著しい傾向にある。

【謝辞】本研究で使用した連続繊維シートは、東燃(株)より提供して頂きました。また、実験では立命館大学大学院の井上真澄氏、阪上徳行氏、奥村組(株)の平塚文敬氏、吉村建設工業(株)の山田浩二氏の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- (1) 加藤、児島、高木、濱田, "炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートはりのせん断補強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.101-106, 1996
- (2) 東野、児島、高木、濱田, "炭素繊維シートによるRCはりのせん断補強に及ぼすケミカルプレストレスの影響", コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19 No.2, pp.183-188, 1997
- (3) 児島、高木、濱田、東野, "連続繊維シートによる損傷RCはりのせん断補強", EAST ASIA ALKALI-AGGREGATE REACTION SEMINAR, SUPPLEMENTARY PAPERS, pp.A73-A83, 1997