

## [2097] FRP をせん断補強に用いた RC はりの破壊性状について

正会員 寺田年夫 (鉄道総合技術研究所)

正会員○鳥取誠一 (鉄道総合技術研究所)

正会員 涌井 一 (鉄道総合技術研究所)

正会員 宮田尚彦 (鉄道総合技術研究所)

## 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用の構造物に鋼材を多量に用いた場合、磁気吸引力による浮上力の減少、誘導電流による磁気抗力の増大といった現象が生じ、車両の乗心地、電力設備等に影響を与えることが懸念される。こうした問題の対策の一つとして、近年、海洋構造物の補強材として開発された非磁性で電気抵抗の大きいFRP (Fiber Reinforced Plastics) 筋の利用が考えられる。

FRP筋は一般に鉄筋よりも弾性係数が小さく、破断ひずみも小さいが、強度は鉄筋と同等以上である。また、アラミド、炭素、ガラス繊維などの長繊維をハイブリッドとすることによって、ある程度の応力-ひずみ関係の制御、破断ひずみの増大が可能である。また、FRP筋自体の付着強度は小さいが、これを格子状に成形することによって交差部で定着を確保することができる。このFRP筋を利用したコンクリートはりの曲げ性状に関しては、小沢らによって検討され、その挙動は通常のRCの曲げ理論に適合するとされている。〔1〕

しかし、FRP筋を利用したはりのせん断性状に関しては、まだ研究が進められておらず、実際の構造物にFRP筋を利用するには、その性状を明らかにし、設計法を確立する必要がある。そこで本論では、まずスターラップと主筋の交差部を模擬した簡易なモデル試験により交差部の耐力を把握し、その補強方法を検討した。次いで、上記のモデル試験で検討した補強方法を用いてFRP筋を以下の2通りの方法に配置したコンクリートはりの載荷試験を行い、せん断性状を把握することとした。

- ・主筋、スターラップともすべてFRP筋とする方法
- ・引張側の主筋を鉄筋とし、他はFRP筋とする方法

## 2. 試験の概要

## 2.1 使用材料

本試験で用いたFRP筋はビニルエステル樹脂を含浸させた炭素繊維とガラス繊維からなる連続繊維束に一定の張力を与えながら、これを立体的に編組し、成形したものである。

(図1参照) このため、FRP筋の交差部により、コンクリートへの定着が確保され、重ね継手も可能になる。

しかし、FRP筋を用いたコンクリートはりがスターラップの破断によって、せん断破壊する場合には、通常のRCはりに比べて耐力が低下するとされている。この原因の一つとして、スターラップが主筋との交差部でほぼ直角に曲げられているため、スターラップ下端に局部的な曲げ応力が生じ、交差部が弱点になることが挙げられている。〔1〕

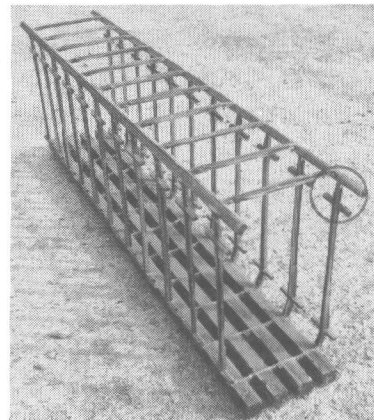


図1 使用したFRP筋

そこで本試験では、図1中の○印内に示すようにスターラップに直角方向の補強筋（以下、横筋という）を設けて、交差部での破断を可能な限り避けようと思図した。

代表的なFRP筋の特性および荷重-ひずみ曲線を表1、図2に示す。炭素繊維とガラス繊維を用いたFRP筋には、鉄筋の降伏に似た現象が認められた。

鉄筋にはSD35(降伏強度は4000Kgf/cm<sup>2</sup>程度)を用いた。コンクリートは目標強度を270Kgf/cm<sup>2</sup>とし、骨材の最大寸法は13mmとした。

## 2.2 供試体の形状、寸法

スターラップと主筋の交差部の耐力試験は、交差部を図3のようにモデル化して行った。試験では、横筋の有無および取付け位置、スターラップの付着の有無、主筋の材質(FRP筋、鉄筋)を考慮して、供試体を7体製作した。

コンクリートはりのせん断試験では、主筋の材質、スターラップの材質(FRP筋に用いる繊維を変えて弾性係数を変化させた)、スターラップの配置間隔、せん断スパン比を考慮して図4、表2に示す24体の供試体を製作した。なお、NO.1の供試体では、4本の主筋を7.5cmの間隔で横方向に繋いだ平面格子状のFRP筋を用いている。

## 2.3 載荷方法および測定項目

スターラップと主筋の交差部の耐力試験は、付着強度試験の引抜き試験に準じた方法で行い、FRP筋破断時の最大荷重を測定し、破断状況を観察した。

コンクリートはりのせん断試験では、破壊時の最大荷重およびスパン中央のたわみを測定し、ひびわれ発生状況を観察した。

## 3. FRP筋の交差部の耐力試験

試験結果を表3に示す。結果から、スターラップに横筋を設けない供試体(NO.1,2,5)では、スターラップは、いずれも主筋との交差部あるいは鉄筋と接する曲げ部から破断した。スターラップをアンボンド処理したNO.1の供試体の破断荷重と表1

表1 FRP筋の特性

FRP筋	繊維束の本数			繊維体積含有率			断面積 AF(cm <sup>2</sup> )	初期破壊荷重 TFI(ton)	破壊荷重 TFU(ton)	破壊歪み ε <sub>FU</sub> (%)	弾性係数 EF×10 <sup>5</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )
	ガラス繊維束	高強度炭素繊維束	高弾性炭素繊維束	ガラス繊維束 GC(%)	炭素繊維束 CFC(%)	合計					
H 2 2	180	45	—	42.6	5.6	48.2	3.693	27.15	29.50	2.24	4.72
H 1 3	60	15	—	0.8	5.3	6.1	1.285	9.11	9.63	2.37	4.51
H 1 0	36	9	—	36.8	4.8	41.6	0.855	5.53	5.79	2.29	4.20
H 6	16	4	—	40.8	5.3	46.1	0.343	2.44	2.46	2.18	4.43
H' 6	16	—	8	35.5	9.9	45.4	0.394	2.05	2.64	2.25	6.19
G 6	16	—	—	42.3	—	42.3	0.331	—	2.46	2.38	3.32

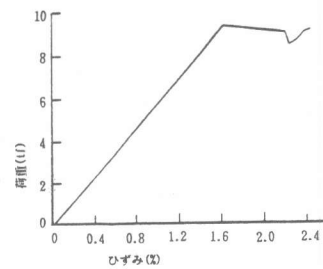


図2 FRP筋の荷重-ひずみ曲線(H 13)

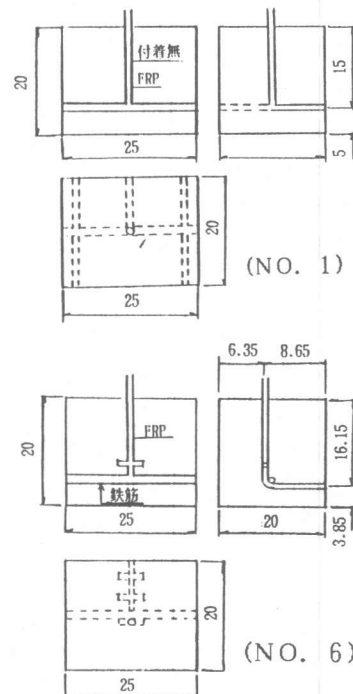


図3 FRP交差部耐力試験用供試体

のFRP筋の破断荷重を比較すると交差部の耐力は、FRP筋自体の耐力の5割以下であることがわかる。

一方、スターラップに横筋を設けた供試体 (NO.3,4,6,7) はスターラップが母材で破断し、横筋の定着効果の大きいことが判明した。また、横筋の設置位置および主筋の材質 (FRP筋、鉄筋) が耐力に及ぼす影響は認められなかった。FRP筋の破断状況を図5に示す。

#### 4. コンクリートはりのせん断試験

##### 4.1 ひびわれ性状

###### (1) 主筋の材質の影響

前述のようにFRP筋と鉄筋では、弾性係数、付着性状等が異なるため、ひびわれ性状は大きく異なる。

曲げひびわれに関しては、主筋に鉄筋を用いた場合、最大ひびわれ間隔は、かぶりの約5倍の10cm程度であった。一方、主筋にFRP筋を用い、スターラップを配置しない場合には最大ひびわれ間隔が約20cm程度となった。また、スターラップの配置間隔を7.5cm (=d/4)として主筋と一体化して成形した場合には配置間隔の約2倍の15cm程度となるようであった。さらに主筋をFRP筋としている場合は、通常のRCはりとは比べて荷重の小さい段階からひびわれが圧縮側に向かって伸びる。

せん断ひびわれも曲げひびわれと同様に主筋の材質の影響を受ける。載荷時に発生したせん

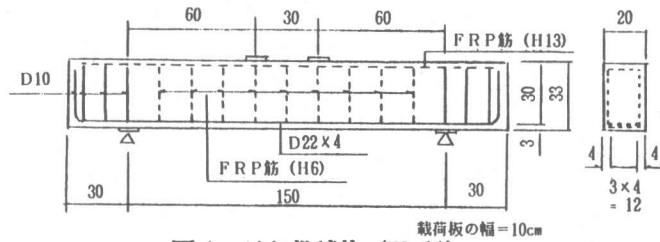


図4 はり供試体 (NO.11)

表2 供試体一覧

No	仕 様	主 筋	スターラップ (材質、径)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	耐 力 P (tf)				備 考
					実験値	計算値		実/計	
						Pc	Ps		
1	2.0-f	D22×4	—	273	21.0	28.4	0.0	0.74	
2	2.0-f-H-150	"	H 6	"	26.6	"	17.0	0.58	
3	2.0-f-H-75	"	"	275	29.6	"	34.0	0.47	
4	2.0-f-C-150	"	"	"	27.0	"	17.0	0.59	中間筋あり
5	2.0-f-C-75	"	"	273	29.0	"	34.0	0.47	"
6	1.5-s	D22×4	—	268	46.2	42.8	0.0	1.08	
7	1.5-s-H-150	"	H 6	"	51.0	42.8	17.0	0.85	
8	1.5-s-H-75	D29×3	"	270	58.0	46.2	34.0	0.72	
9	2.0-s	D22×4	—	290	30.0	29.0	0.0	1.04	
10	2.0-s-H-300	"	H 10	288	34.0	"	19.2	0.72	
11	2.0-s-H-150	"	H 6	290	45.4	"	17.0	0.99	
12	2.0-s-H-75	D29×3	"	264	51.2	30.2	34.0	0.80	
13	2.0-s-H'-300	D22×4	H'10	264	46.0	28.0	19.2	0.97	
14	2.0-s-H'-150	"	H'6	266	46.4	28.2	14.2	1.09	
15	2.0-s-H'-75	D29×3	"	264	49.6	30.2	28.6	0.85	
16	2.0-s-C-300	D22×4	H 10	290	39.4	29.0	19.2	0.82	中間筋あり
17	2.0-s-C-150	"	H 6	293	47.0	"	17.0	1.02	"
18	2.0-s-C-75	D29×3	"	268	52.4	30.4	34.0	0.82	"
19	2.0-s-C-300	D22×4	C 10	293	42.0	29.0	20.2	0.85	
20	2.0-s-C-150	"	C 6	"	39.6	"	17.2	0.86	
21	2.0-s-C-75	D29×3	"	"	52.8	31.2	34.2	0.81	
22	3.0-s	D22×4	—	258	15.0	17.0	0.0	0.88	
23	3.0-s-H-150	"	H 6	"	24.8	"	17.0	0.73	
24	3.0-s-H-75	D29×3	"	"	34.2	18.4	34.0	0.65	

\*せん断スパン比— 主筋 — スターラップ — スターラップ間隔 (mm)  
 1.5 s:鉄筋 H:弾性係数 小 300  
 2.0 f:FRP筋 H:弾性係数 大 150  
 3.0 G:ガラス繊維 75

表3 FRP筋交差部耐力試験結果

No	スターラップ		主筋径	横 筋		破断荷重 (tf)	破 断 状 況		
	径	付 着		有無	位置 <sup>1)</sup>				
1	H10	無	H13	無	—	2.17	接合部で破断		
2					—	3.58	接合部で破断		
3					3	5.07	母材で破断		
4		有		有	H13	6	5.29	母材で破断	
5						—	3.26	鉄筋と接した曲げ部で破断	
6						D13 <sup>1)</sup>	3	5.14	母材で破断
7							6	5.13	母材で破断

1) D13...SD35

2) 主筋から横筋までの距離 (cm)

断ひびわれの中で卓越していると認められたせん断ひびわれについて、ひびわれ幅をはりの高さの中央付近で測定した。図7にせん断応力度 ( $=V/bd$ ) とひびわれ幅の関係を示す。これから、ひびわれの発生、進展状況は主筋の材質によって異なることが認められる。主筋にFRP筋を用いた場合には、鉄筋の場合に比べてせん断応力度の小さい段階でひびわれが生じている。また、NO.1と3、NO.9と12のひびわれ発生後の挙動を比較するとNO.3あるいは12の方が引張鉄筋比が大きく、スターラップの間隔が小さいため、ひびわれ幅の進展が抑制されているようであった。

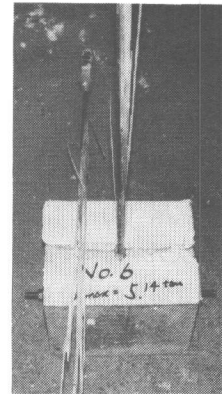


図5 FRP筋の破断状況

(2) スターラップの配置間隔および弾性係数、 $a/d$  がせん断ひびわれ幅に与える影響 (主筋; 鉄筋)

図8~10にスターラップの配置間隔および弾性係数、 $a/d$  をパラメータとした場合のせん断応力度とひびわれ幅の関係を示す。

図8には、 $a/d$  が2の場合にスターラップの配置間隔がせん断ひびわれ幅に与える影響を示す。せん断ひびわれの発生荷重はいずれの供試体でもほぼ等しく、ひびわれ発生後に除荷しても、ひびわれは完全に閉じず、残留ひびわれ幅はスターラップの配置間隔が大きいほど大きい。また、スターラップの間隔を7.5cmとした場合には、引張鉄筋比が大きいこともあり、ひびわれ幅の進展が抑制されるようであった。

図9には $a/d$  を2として、スターラップの弾性係数を変化させた場合のせん断ひびわれ幅を示すが、上記の物性の変化の範囲では、ひびわれ幅に大きな影響を与えないようであった。また、 $a/d$  が1.5あるいは3の場合についても同様の整理を行ったが、明確な傾向は認められなかった。

図10はスターラップを配置しない場合と配置間隔を7.5cmとした場合について $a/d$  がせん断ひびわれ幅に与える影響を示したものである。通常のRCはりの場合と同様に、本試験結果でも $a/d$  の大きい方がせん断ひびわれ発生時の荷重が小

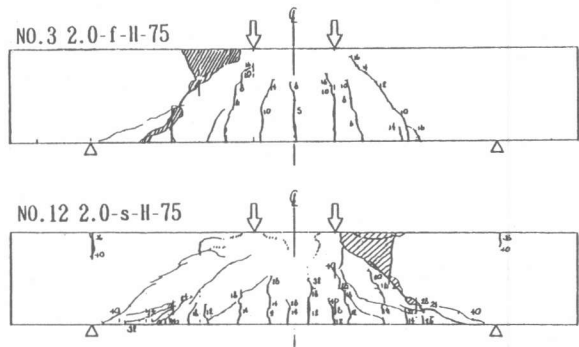


図6 ひびわれ状況

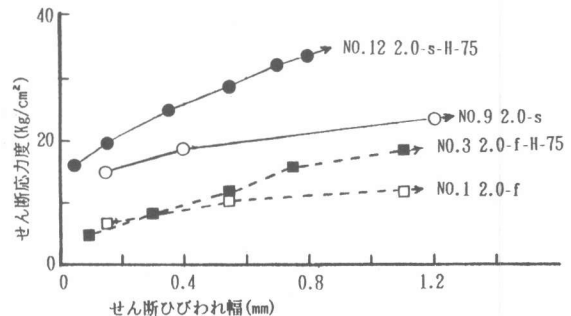


図7 主筋の材質の影響

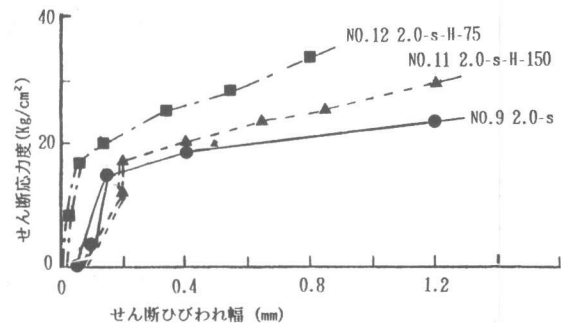


図8 スターラップの配置間隔の影響

さく、また、ひびわれ発生後のせん断ひびわれ幅の進展は大きかった。

#### 4.2 荷重とたわみ

図11に供試体NO.3 (主筋; FRP筋) とNO.12(主筋; 鉄筋) のスパン中央のたわみと荷重の関係を示す。いずれの供試体も、曲げひびわれ発生前は全断面有効と仮定した計算値にほぼ等しく、曲げひびわれ発生後は引張側コンクリートを無視した計算値に近づく。さらに荷重が増加し、せん断スパン内に斜めひびわれが発生するとせん断変形の影響も加わり、たわみは増大する。

また、本試験で使用したFRP筋の弾性係数は鉄筋の約1/4であるため、NO.3の供試体では、通常のRCはりに比べて曲げひびわれ発生後の剛性低下が大きくなっている。

#### 4.3 破壊性状

主筋にFRP筋を用いると曲げひびわれが急激に進展する。その後、せん断スパン内の曲げひびわれから生じた斜めひびわれにより、せん断破壊に至ることが認められた。また、スターラップを配置していない供試体では、定着部の主筋に沿ってひびわれの発生が見られた。

一方、主筋を鉄筋とした場合には、最終的に載荷点と支点とを結ぶ方向の斜めひびわれが支配的となり、スターラップが破断し、破壊に至った。スターラップの破断箇所は、はりの①腹部中央付近、②引張縁付近 (主筋を鉄筋とした場合にはFRP筋の曲げ加工部、主筋をFRP筋とした場合には主筋とスターラップの交差部) および③圧縮縁付近 (圧縮筋とスターラップの交差部) で破断していたが、主に②、③での破断が多かった。これより、主筋とスターラップの交差部 (主筋を鉄筋とした場合にはFRP筋の曲げ加工部) の補強としての横筋はある程度の効果は期待できるが、ひびわれが交差部付近を横切るような場合には十分な補強効果が得られていないと考えられた。

#### 4.4 せん断耐力

##### (1) せん断耐力の算定方法

せん断耐力の算定方法は石橋らが提案した方法に従い、次式により算定した。

$$V = V_c + V_s \quad (1)$$

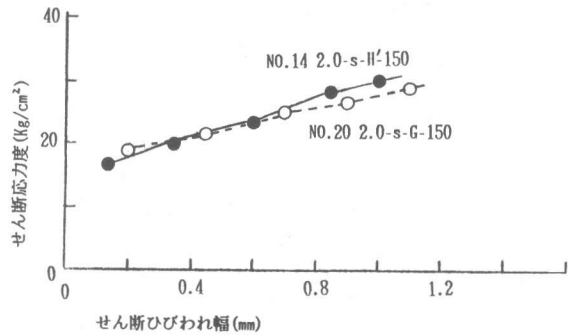


図9 スターラップの弾性係数の影響

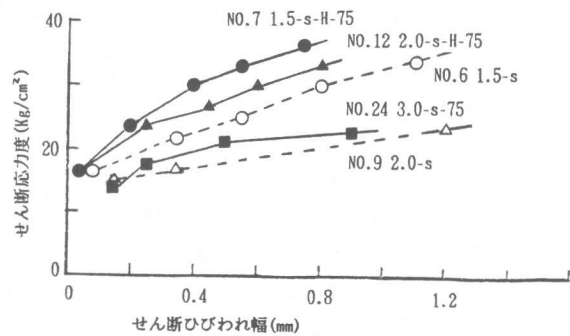


図10 a/dの影響

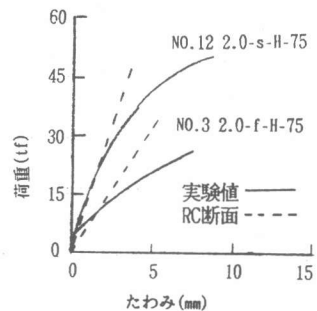


図11 荷重-たわみ曲線

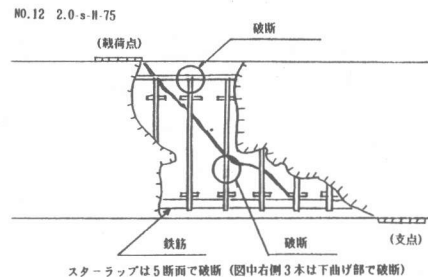


図12 FRP筋の破断状況

$V_c$  : せん断補強鉄筋以外が受持つせん断耐力

$$V_c = \alpha \cdot f_c^{1/3} \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot b h \quad (2)$$

ここに  $\alpha = 3.17 (a_l / h)^{-1.166}$  ただし  $0.9 \leq a_l / h \leq 2.25$

$$= 0.94 (0.75 + 1.26 h / a_l) \quad a_l > 2.25$$

$$\beta_p = (100 P_w)^{1/3} \quad \beta_d = (100/h)^{1/4} \quad P_w = A_s / b h$$

$V_s$  : スターラップの受持つせん断耐力

$$V_s = A_v \cdot \sigma_{sy} \cdot d / 1.15 s = 2 F \cdot d / 1.15 s \quad (3)$$

ここに  $F$  : スターラップとして使用したFRP筋1本当たりの初期破壊荷重 (表1参照)

せん断補強筋以外の受持つせん断耐力 $V_c$ を算定する(2)式は、主筋が鉄筋の場合には比較的精度のよい耐力を与えることが認められている。(2)また、主筋をFRP筋とした場合についても鉄筋を用いた場合と比較するため(2)式によって計算した。

また、スターラップ(FRP筋)の受持つせん断耐力 $V_s$ は、一応トラス理論に基づく耐力算定式により求めた。

## (2) せん断耐力

(1)の方法で求めた耐力の算定結果および試験結果をまとめて表2に示す。

主筋にFRP筋を用いた場合には、実験値は計算値(= $P_c + P_s$  ここで  $P_c = 2V_c, P_s = 2V_s$ )に比べ小さくなっている。これは、中立軸位置が高くなり、ひびわれ幅も大きくなるので、コンクリートの負担するせん断力、骨材のかみ合わせ、主筋のほぞ作用が小さくなるためである。

主筋に鉄筋を用いた場合はFRP筋の場合より耐力が増加する。スターラップを配置しない供試体(N0.6, 9, 22)の耐力は、(2)式で求めた計算値にほぼ一致している。スターラップの補強効果を把握するため、N0.7~24の供試体について(実験値- $P_c$ )/ $P_s$ を求めると0.26~1.28(Ave.0.67)となり、値が相当にばらついている。これは、スターラップと主筋の交差部の補強が必ずしも十分でないことが一つの原因として考えられる。

## 5. 結論

FRP筋を用いたはりのせん断性状に関して実験的に検討して得られた結果を以下に示す。

(1) スターラップと主筋の交差部を模擬して行った引抜き試験の結果、交差部の耐力はFRP筋の引張耐力の5割以下であった。この点を改良するため、スターラップに横筋を設けると引張耐力は母材強度程度まで改善される。

(2) はりの曲げせん断性状およびたわみ性状は主筋の材質によって大きく異なる。FRP筋は、鉄筋に比べ弾性係数が小さいので、主筋としてFRP筋を用いると曲げ、せん断ひびわれ幅とも大きくなり、曲げ剛性の低下も大きくなる。

(3) スターラップに設けた横筋は、せん断耐力の向上にある程度有効であったが、せん断ひびわれが主筋とスターラップの交差部付近を横切る場合には、交差部でスターラップが破断した。このため、スターラップの受持つせん断耐力は、トラス理論によって求めた値を下回り、交差部の補強法に関し、なお検討の余地があると考えられた。

### <謝辞>

本試験を実施するにあたり、御協力を頂いたネフコム株式会社の方々に感謝致します。

### [参考文献]

- (1) 小沢、関島、岡村：FRPで補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状 第9回JCI年講
- (2) 石橋、斉藤、寺田：せん断スパン比の小さいRCはりのせん断補強効果 第9回JCI年講