

論文 繊維シートの剛性が RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響

古田 智基*1・河内 洋平*2・金久保 利之*3・福山 洋*4

要旨: 本研究は, RC 構造物の耐震補強に多く用いられている連続繊維シートの剛性に着目し, 各種シートの剛性を同一に補強した RC 梁部材のせん断実験を行い, シートの剛性がせん断耐力に及ぼす影響を検討した。その結果, ①シートの補強量を弾性係数(E) \times シート厚(t)で同一にした場合, 部材角(R)=1/60rad 時までのせん断力-相対変位(Q - δ)関係ならびにシートの応力負担はおおむね同じである, ②シートの破断はコンクリートによる局所的な応力または繊維が切断される(傷付く)ことにより発生する, ③各種繊維種類特有の耐力評価におけるシートの有効係数($c_f \nu$)の設定が必要である, ことを確認した。

キーワード: 繊維シート, 剛性, RC 梁, せん断耐力

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物を対象とした耐震補強として、カーボン、アラミド、ガラス等の連続繊維シート(以下シート)を用いた補強工法が近年盛んに行われており、現在までに土木・建築両分野で部材レベルでの実験が数多く行われ、一応の研究成果が挙げられてきている。しかし、補強部材の耐力および変形性能は、シートを鉄筋(せん断補強筋)に強度置換することによる既往式により評価することを基本としており¹⁾、詳細な破壊メカニズムに基づいた評価式はこれまで提案されていない。鉄筋コンクリート部材の既往式の多くは、鉄筋が降伏するという現象のもとに成り立っており、シートのような完全弾性材料にこれらの式を適用させることは、力学的に不具合がある。また、シートの破壊は“破断”であり、現行の評価で行われた繊維補強部材の脆性的な破壊も危惧される。

本研究では、カーボン、アラミド等の RC 構造物の耐震補強に使用される連続繊維シートを対象に、破壊メカニズムに基づいた補強部材の耐力および変形性能評価手法の構築を主目的と

し、各種シート(カーボン、アラミド、ガラス、ポリアセタール)の剛性、すなわちシートの弾性係数(E) \times シート厚(t)を同一に補強した RC 梁部材のせん断実験を行い、シートの剛性が補強梁部材のせん断耐力に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

表-1 に試験体一覧、図-1 に試験体形状、表-2, 3 に鉄筋、コンクリートの力学的特性を示す(シートの特性は表-1 に含む)。

試験体は共通因子として、断面 $b \times D = 16.0 \times 25.0$ cm(面取り $R = 20$ mm)、部材長 75.0cm、せん断スパン比 1.5、コンクリート強度 30.3~44.2 MPa、主筋 8 - D13($p_f = 1.27\%$, 降伏強度 SD800 クラス)、せん断補強筋 D4 - @9.0($p_w = 0.17\%$, SD295 相当)である。主な変動因子はシート種類で、表-1 に示した通常使用されている弾性係数(E)=240GPa のカーボン(以下 NCF)、高弾性($E = 390$ GPa)カーボン(以下 HCF)、アラミド(以下 ARF)、ガラス(以下 GLF)、ポリアセタール(以下 PAF)の 5 種類である。各試験体のシート補強量は、シートの弾性係数(E) \times シート厚(t)

*1 明石工業高等専門学校助手	建築学科	工博(工学)	(正会員)
*2 明石工業高等専門学校卒業生	建築学科	現在(株)フジタ	
*3 筑波大学講師	機能工学系	工博(工学)	(正会員)
*4 建設省建築研究所主任研究員	国際地震工学部	工学博士	(正会員)

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	シート補強												
		既存RC部 ρ_w (%)	種類	使用シート 目付量 (g/m^2)	使用シート厚 (mm)	貼付 目付量 (g/m^2)	f_t (mm)	補強貼付量 (層・ピッチ)	$f_t E$ (GPa)	$f_t \sigma_{wy}$ (MPa)	$f_t \gamma E$ (kN/mm)	ρ_w (%)	$f_t \rho_w$ (MPa)	$f_t \sigma_{wy} \rho_w$ (MPa)
2	NCF-150-1	0.17 (2-D4@90)	カーボン	150	0.084	150	0.084	1	240	3400	200	0.104	250.5	3.55
3	HCF-93-1		高弾性カーボン	300	0.165	93	0.051	62.5@162.5	390	2900	200	0.056	250.3	1.61
4	ARF-242-1		アラミド	280	0.193	242	0.167	150@173*	120	2100	200	0.209	250.5	4.38
5	GLF-698-1		ガラス	300	0.118	698	0.275	2+61.3@162	73	1470	200	0.344	250.9	5.05
6	PAF-727-1		ポリアセタール	528(265)	0.364(0.183)	727	0.501	1+(50@58.3)	40	1300	200	0.626	250.5	8.14

f_t : 必要シート厚, $f_t E$: シートの弾性係数, $f_t \sigma_{wy}$: シートの引張強度, ρ_w : シートのせん断補強筋比

*繊維量 269本/30cmを232本/30cmに間引く

シートに関する各値はメーカーカタログ値

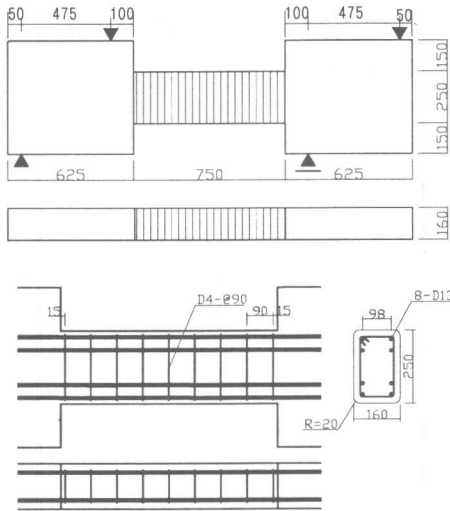


図-1 試験体形状

表-2 鉄筋の特性

鉄筋種別	引張強度 σ_{su} (MPa)	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	伸び率 (%)	備考
D13	1055.2	865.4	173.0	0.1	主筋
D4	429.9	341.5	170.1	0.3	せん断補強筋

D13: 降伏強度 SD800 クラス

D4: SD295 相当

表-3 コンクリートの特性

No.	試験体名	圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ_{SP} (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
1	N-0-1	41.2	3.40	24.3
2	NCF-150-1	30.3	3.22	23.6
3	HCF-93-1	42.8	5.46	23.0
4	ARF-242-1	44.2	5.53	24.0
5	GLF-698-1	39.4	5.56	24.8
6	PAF-727-1	39.7	4.98	22.8

コンクリート: 普通コンクリート

=20.0 となるように統一した。No.1 は $\rho_w=0.17\%$ の無補強(純 RC) 基準試験体, No.2 は NCF を $150g/m^2$, No.3 は HCF を $93g/m^2$, No.4 は ARF を $242g/m^2$, No.5 は GLF を $698g/m^2$, No.6 は PAF を $727g/m^2$ 各々貼付した試験体で, 試験体総数は 6 体である。各試験体の曲げ終局強度の計算値(caQ_{mu})= $167kN^2$ (シートの拘束効果は考慮せず。)で, 全ての試験体はせん断破壊先行型となるように計画した。すなわち, シート補強試験体は, シート破断によるせん断破壊を計画した。

2.2 加力方法および測定

図-2 に加力装置, 図-3 に変位計位置, 図-4 に歪ゲージ貼付位置を示す。加力は, 大野式逆対称モーメント形式による単調載荷とした。試験体の相対変位は, 試験体両端部の加力スタブにセットした計測治具先端部の 2 箇所の変位計により求めた。シートならびに鉄筋の歪測定位置は, 図中に示したとおりである。

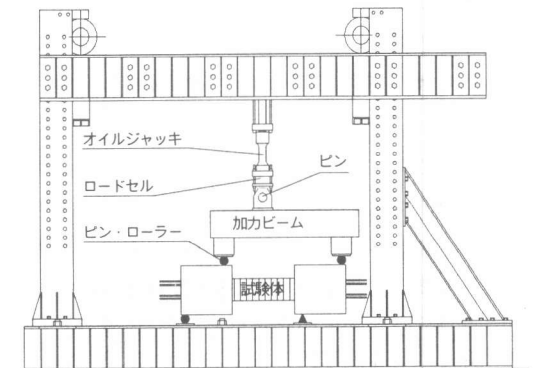


図-2 加力装置

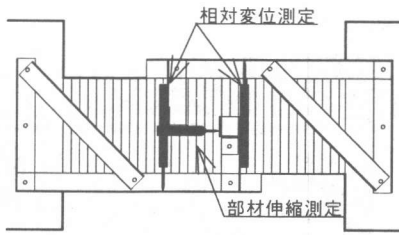


図-3 変位計位置

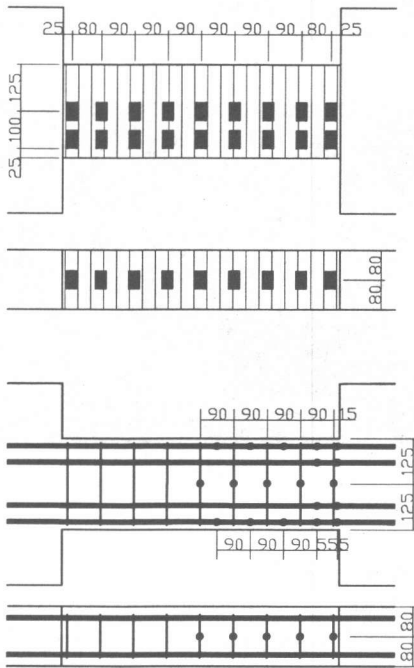


図-4 歪ゲージ貼付位置

3. 実験結果

3.1 破壊・変形状

図-5 にせん断力(Q)-相対変位(δ)関係を、写真-1 に代表的な最終破壊状況を、表-4 に部材変形角(R)-せん断力(Q)関係を示す。 $No.1$ (無補強)は、部材変形角(R)= $1/125$ rad で両端部のせん断(斜め)ひび割れが進展するとともにせん断補強筋が降伏し、 $R=1/111$ rad で最大耐力(Q_{max})= 61.9 kN を示し、せん断ひび割れが口開くと同時に急激に耐力が低下する典型的なせん断破壊となった。 $No.2$ (NCF)、 $No.4$ (ARF)、 $No.5$ (GLF)は、コンクリート表面にシートが貼付してあるためひび割れは観測されていないが、

それぞれ $Q_{max}=127.4$ kN($R=1/30$ rad)、 $Q_{max}=124.0$ kN($R=1/24$ rad)、 $Q_{max}=127.1$ kN($R=1/22$ rad)を発揮した後、せん断ひび割れが大きく進展したと予想される位置においてシートが破断するとともに急激に耐力が低下した。 $No.3$ (HCF)は、 $R=1/60$ rad で $Q_{max}=127.4$ kN を発揮した後、せん断ひび割れが大きく進展した位置においてシートが破断するとともに急激に耐力が低下した。 $No.6$ (PAF)は、 $R=1/30$ rad で $Q_{max}=112.6$ kN を発揮した後、最終変形時($R=1/12$)においてもシートは破断せず、耐力を維持した。シート破断した試験体の破断位置は全て同じで、破断はシート内部のコンクリートのせん断ひび割れが口開き、コンクリートが面外に押し出されることにより、局所的な応力またはシートの繊維が切断される(傷つく)ことにより発生した。 $No.4$ 、 $No.5$ 、 $No.6$ の3体で、最大耐力以降に主筋の降伏を確認した。

図-5 および表-4 から、 $No.1$ のせん断ひび割れが発生した $R=1/280$ rad 近傍までは、全ての試験体の $Q-\delta$ 関係はおおむね一致している。 $No.3$ の最大耐力近傍($R=1/60$ rad)までは、シート補強した全ての試験体における $Q-\delta$ 関係はおおむね一致している。 $R=1/60$ rad 以降は、 $No.2$ 、 $No.4$ 、 $No.5$ の3体における $Q-\delta$ 関係はおおむね一致して変形とともに耐力が上昇しているが、 $No.6$ は耐力を維持して変形のみが進行した。

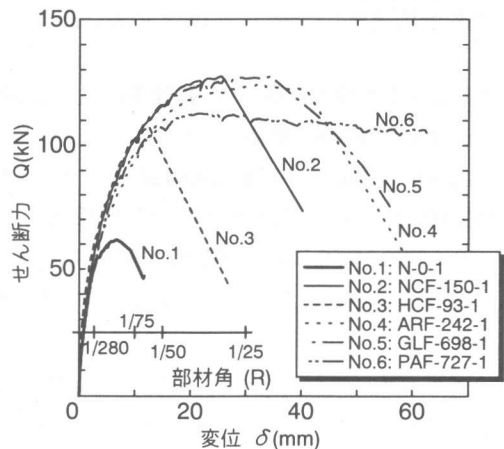
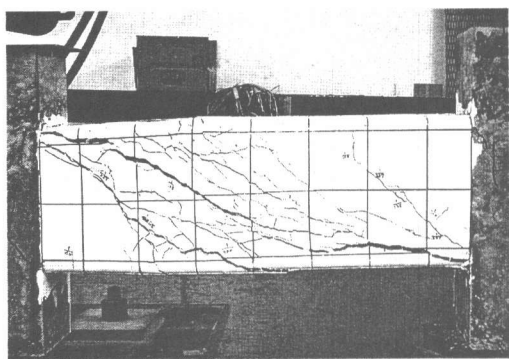
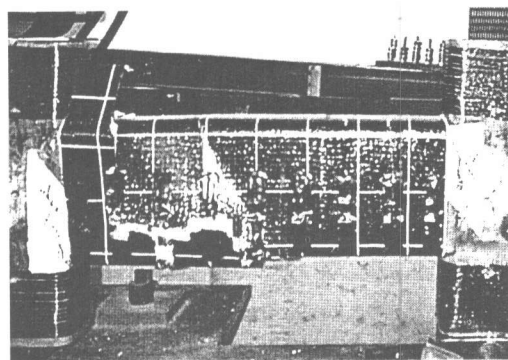


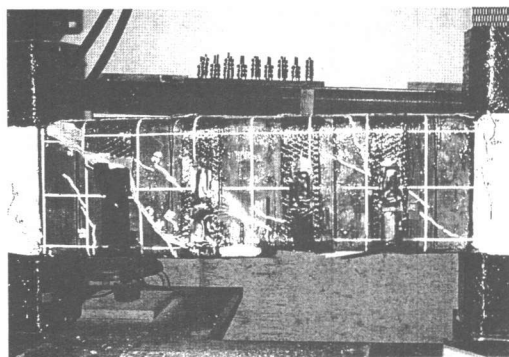
図-5 せん断力(Q)-相対変位(δ)関係



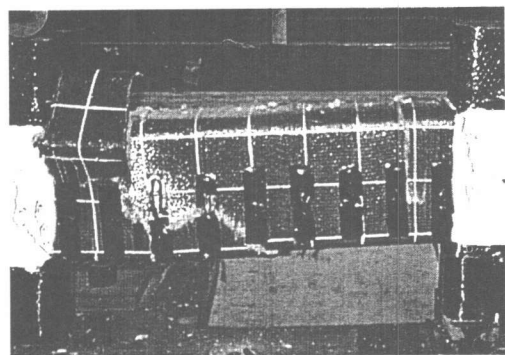
No.1 N-0-1



No.2 NCF-150-1



No.3 HCF-93-1



No.4 ARF-242-1

写真-1 代表的な最終破壊状

表-4 部材変形角(R)—せん断力(Q)関係

No.	試験体名	Q_{max} (kN)	最大耐力時 部材変形角 (rad)	主筋降伏時 部材変形角 (rad)	せん断補強筋降 伏時部材変形角 (rad)	各部材角時のせん断力 (kN)						
						1/280	1/200	1/150	1/100	1/75	1/60	1/30
1	N-0-1	61.9	1/111	—	1/111	50.5	54.6	59.6	—	—	—	—
2	NCF-150-1	127.4	1/30	—	1/63	55.9	66.9	76.7	91.5	102.5	116.0	126.9
3	HCF-93-1	107.6	1/60	—	1/103	60.2	60.8	78.0	93.7	103.0	107.5	—
4	ARF-242-1	124.0	1/24	1/22	1/97	50.7	61.4	69.2	83.4	94.3	110.0	123.2
5	GLF-698-1	127.1	1/22	1/17	1/76	56.1	66.2	77.3	91.6	102.9	115.6	126.6
6	PAF-727-1	112.6	1/30	1/20	1/55	50.6	62.0	72.6	87.7	96.5	106.9	111.5

3.2 シートの弾性係数(fE)・補強量($f\sigma_{wy} \cdot p_w$)とせん断力(Q)の関係

図-6 に各試験体の $R=1/200\text{rad}$, $R=1/100\text{rad}$, $R=1/60\text{rad}$, および最大耐力時の弾性係数 (fE)—せん断力(Q)の関係を, 図-7 に同変形時における補強量($f\sigma_{wy} \cdot p_w$)—せん断力(Q)の関係を示す。

各変形時における $fE-Q$ 関係, $f\sigma_{wy} \cdot p_w-Q$ 関係はともにおおむね同じ傾向を示しており, ARF, PAF のせん断力(Q)は他の試験体と比較

して低い。特に PAF の Q は, 変形が進むに連れて他の試験体と比較して低くなる傾向があり, HCF は $R=1/60\text{rad}$ 時で最大耐力となり, 最大耐力は他の試験体と比較して最も低い。

補強量を $fE \cdot p_w$ で同一にした場合, NCF, GLF, ARF の Q_{max} はおおむね同じで, 低弾性の PAF と高弾性の HCF の Q_{max} はこれらと比較して低いこと, 補強量を $f\sigma_{wy} \cdot p_w$ で評価して補強量が増加しても, $fE \cdot p_w$ が同一であればそれにとまった Q_{max} の上昇はないこと, を確認した。

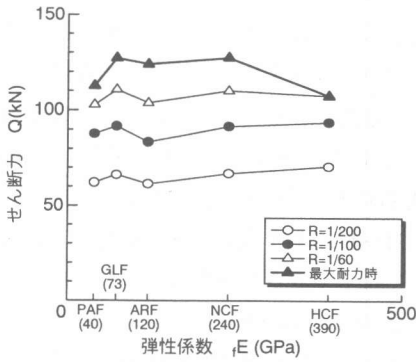


図-6 弾性係数 (E) - せん断力 (Q) の関係

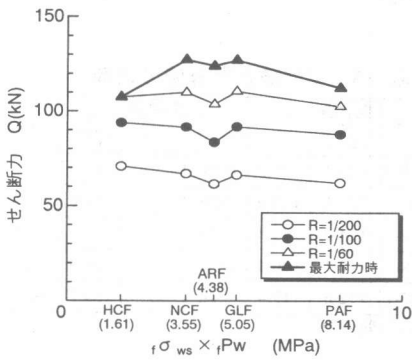


図-7 補強量 (σ_{ws} / ρ_w) - せん断力 (Q) の関係

3.3 シートの歪分布

図-8 に各試験体の $R=1/200\text{rad}$, $R=1/100\text{rad}$, $R=1/60\text{rad}$, および最大耐力時におけるシートの歪分布を示す。歪分布のデータは、図-4 に示した試験体側面の繊維方向に同位置における 2 箇所の歪ゲージの平均値を使用した。

$R=1/200\text{rad}$ 時は全体的に歪は少なく平均して約 220μ である。 $R=1/100\text{rad}$ 時は各試験体でばらつきはあるものの、端部から 20cm 近傍位置における歪が大きく、平均して約 2700μ である。シート全体の平均歪は約 1100μ である。 $No.3(HCF)$ がシート破断した $R=1/60\text{rad}$ 時はシート種類による顕著な差はなく、全ての試験体がおおむね同じような歪分布を示しており、端部から 20cm 近傍位置における歪は平均して約 4800μ である。シート全体の平均歪は約 2500μ である。最大耐力時は $No.5(GLF)$ の歪が最も大きく、次いで $No.4(ARF)$, $No.2(NCF)$, $No.3$

(HCF), $No.6(PAF)$ の順に歪が小さくなり、各試験体の最大耐力の順にほぼ一致している。端部から 20cm 近傍位置における歪は平均して約 8200μ , シート全体の平均歪は約 6000μ である。

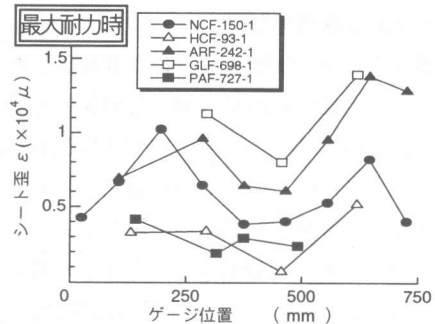
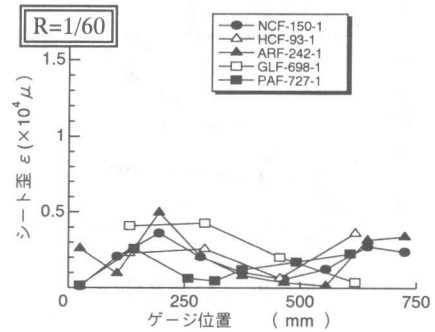
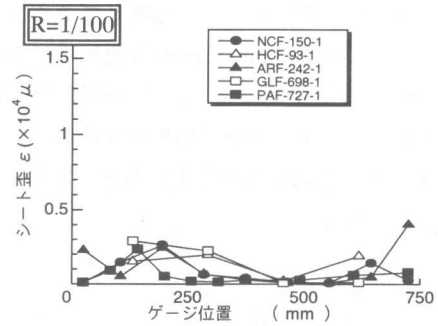
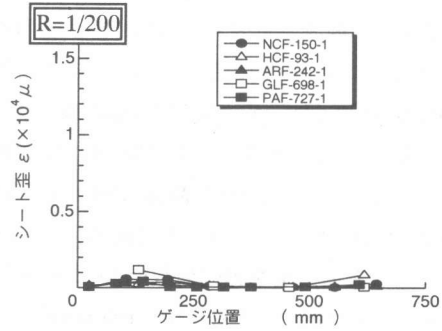


図-8 シートの歪分布

3.4 シートの応力負担 (実応力度)

図-9 に各補強試験体の実応力度($f\sigma_{ws}$: $\varepsilon \times E \times \rho_w$)と部材角($R=1/200rad, 1/100rad, 1/60rad, 1/30rad$)の関係を示す。 $f\sigma_{ws}$ は、図-8の歪分布に示した歪の最大値を使用した。 $R=1/60rad$ 時までは各試験体ともおおむね同じ応力を負担していることが確認できる。最大耐力近傍の $R=1/30rad$ 時では、No.5(GLF)の応力負担が大きく、次いでNo.4(ARF), No.2(NCF), No.6(PAF)の順となっている。特にNo.6の応力負担は、No.2, No.4, No.5の半分以下である。

シートの補強量を弾性係数(E) \times シート厚(t)で同一にした場合、部材角($R=1/60rad$ 時までのシートの応力負担はおおむね同じであることが分かった。 $R=1/30rad$ 近傍の大変形時においては、各シートの特徴が表れたように推測される。これは、シートの弾性係数のみではなく、繊維自体の太さやせん断強度等が大きく影響していると思われる。

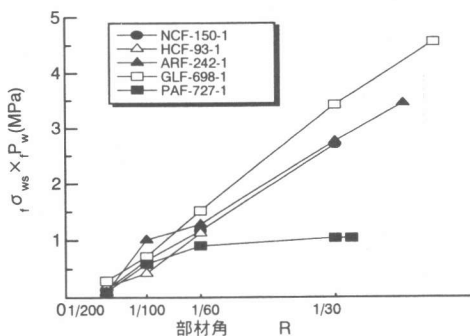


図-9 $f\sigma_{ws}-R$ 関係

4. 耐力評価の検討

表-5 に RC 指針 A 法³⁾により評価したせん断耐力と各試験体の最大耐力との比較を示す。A 法による評価は、シートの引張強度($f\sigma_{wy}$)に実応力度 ($f\sigma_{ws}$: 図-8 の歪分布に示した歪の最大値により算出) を用いた場合と、 $f\sigma_{wy}$ におけるシートの有効係数 $c_f \nu=0.3$ とした場合の両者で行った。 $f\sigma_{wy}$ に $f\sigma_{ws}$ を用いた場合、 $expQ_{max} / calQ_{f\sigma}=0.67 \sim 0.98$ と非常にばらつき、低弾性の No.6(PAF)以外は計算値が実験値と比較して

高い値を示した。これは、シート破断位置近傍の歪ゲージが、コンクリートのひび割れ等による局所的な応力による影響を受けたためと推測される。 $f\sigma_{wy}$ におけるシートの有効係数 $c_f \nu=0.3$ とした場合の耐力評価においても、 $expQ_{max} / calQ_{max}=0.71 \sim 1.20$ と非常にばらついた。これは、各シートによって異なる引張強度($f\sigma_{wy}$)に、同一の有効係数($c_f \nu=0.3$)を乗しているためである。したがって、各種繊維特有のシート強度を低減する有効係数($c_f \nu$)の設定が必要であることが分かる。

表-5 実験値と計算値の比較

No.	試験体名	計算値					
		$expQ_{max}$ (kN)	$calQ_{f\sigma}$	$expQ_{max} / calQ_{f\sigma}$	$c_f \nu$	$calQ_{max}$ (kN)	$expQ_{max} / calQ_{max}$
2	NCF-150-1	127.4	136.2	0.94	0.3	106.6	1.20
3	HCF-93-1	107.6	120.9	0.89		101.6	1.06
4	ARF-242-1	124.0	194.4	0.64		128.0	0.97
5	GLF-698-1	127.1	190.4	0.67		130.9	0.97
6	PAF-727-1	112.6	115.4	0.98		159.1	0.71

$c_f \nu$: シートの有効係数

5. まとめ

本研究実験により、①各種シートの補強量を剛性、すなわち弾性係数(E) \times シート厚(t)で同一にした場合、部材角($R=1/60rad$ 時までのせん断力-相対変位($Q-\delta$)関係ならびにシートの応力負担はおおむね同じである、②シートの破断はコンクリートによる局所的な応力または繊維が切断される(傷つく)ことにより発生する、③各種繊維種類特有の耐力評価におけるシートの有効係数($c_f \nu$)の設定が必要であることを確認した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(II), 1998
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート建造物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990

謝辞

本研究は、筑波大学学内プロジェクト研究によっている。試験体製作に際しては、東日本旭化成建材(株):飯星力氏、三菱化学(株):高橋啓介氏、(株)三井建設:谷柿正治氏のご協力を得た。