

論文 連続繊維シート補強コンクリートパネルの二軸性状

古田智基^{*1}・金久保利之^{*2}・植村政彦^{*3}・吉澤弘之^{*3}

要旨：本研究では各種（カーボン，アラミド，ガラス）の繊維シートで補強したコンクリートパネルを用いた平板二軸加力実験と Modified Compression-Field Theory による解析によって，繊維とコンクリートの相互作用を把握検討した。実験および解析の結果，①補強パネルの純せん断，純引張強度は繊維の引張強度に比例する，②Modified Compression-Field Theory による解析は実験結果をよく表現できる，③弾性係数が小さい繊維の場合，局所的なせん断歪と平均歪は大きく異なる，ことを確認した。さらに，シートの弾性係数と目付量を変動因子とした解析を行った。

キーワード：連続繊維シート，コンクリートパネル，相互作用，二軸性状

1. はじめに

シート状の連続繊維（以下シート）を用いて耐震補強された鉄筋コンクリート部材の耐力および変形性能は，現在，繊維を鉄筋（せん断補強筋）に強度置換し，鉄筋コンクリート部材の既往式により評価されることが多い。しかし，実部材中では引張応力のみではなく，部材内のコンクリートと同様複雑な複合応力が作用していると考えられる。さらに，鉄筋コンクリート部材の場合は，部材の変形とともに鉄筋が降伏するため，鉄筋の降伏強度を用いることによる耐力評価が可能であるが，連続繊維で補強した場合は繊維が完全弾性体のため，部材変形にともなう繊維歪量の増加により繊維応力が増加する。そのため，連続繊維による補強部材では，部材の変形量（繊維の歪量）を考慮した詳細な破壊メカニズムに基づいた耐力評価が必要である。

本研究は，コンクリート系構造物の耐震補強に使用されるカーボン・アラミド・ガラス等の繊維シートを対象に，破壊メカニズムに基づいた耐力および変形性能評価手法を構築するために，シートとコンクリートの相互作用，すな

わち多方向応力に対する接着・せん断・引張強度等の基本的性状を，モルタルパネルによる平板の二軸加力実験ならびに Modified Compression-Field Theory による解析により把握し，評価方法構築の際の基本データを得ることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は図-1に示す $300 \times 300 \times 15\text{mm}$ の繊維シート補強モルタルパネルで，加力装置固定用穴を 24 カ所，変位計固定用ボルトを 4 カ所設けた。シートは以下に示す 4 種類のシートを使用し，モルタルパネルの表面両面に各々 2 層貼付した。変動因子は主としてシートの種類，貼付方向および目付量とし，モルタルパネルに与える応力は純せん断と純引張の 2 種類とした。各変動因子と試験体の対応を表-1に，各試験体の概要を図-2に示す。

使用したシートは，通常使用されている $E=230\text{GPa}$ のカーボン繊維シート（以下 SCF），高弾性（ $E=500\text{GPa}$ ）カーボン繊維シート（以下 HCF），アラミド繊維シート（以下 ARF），

*1 明石工業高等専門学校助手 建築学科 工博（正会員）

*2 筑波大学講師 構造工学系 工博（正会員）

*3 日鉄コンポジット(株) トウシート事業部

ガラス繊維シート（以下 GLF）の 4 種類とし、各々の目付量は 75g/m^2 とした。SCF については、さらに目付量小(55g/m^2)および大(150g/m^2)を準備した。なお、シートの目付量の都合からプリプレグシートを使用した。シートの貼付方向は、純せん断加力の試験体では SCF を対象に、パネル辺方向に対して 45° と 135° 方向の 2 層(以下 $45^\circ + 135^\circ$)、 $0^\circ + 90^\circ$ 、 $25^\circ + 115^\circ$ 貼付、その他のシートを対象に $45^\circ + 135^\circ$ 、 $0^\circ + 90^\circ$ 貼付、純引張加力試験体では $0^\circ + 90^\circ$ 貼付とした。試験体は、各変動因子に対して各 3 体、合計 45 体である。

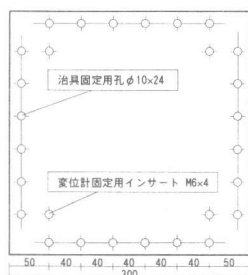


図-1 試験体形状

表-1 試験体の変動因子

試験体名	シート貼付方向 (辺方向に対し)	加力方法	備考	ロット No.
SCF-0/90-CT	$0^\circ + 90^\circ$	純せん断		6/10-2
SCF-45/135-CT	$45^\circ + 135^\circ$	純せん断		6/23-1
SCF-25/115-CT	$25^\circ + 115^\circ$	純せん断	主応力 37.7°	6/10-1
SCF-0/90-T	$0^\circ + 90^\circ$	純引張		6/10-3
SCFL-0/90-CT	$0^\circ + 90^\circ$	純せん断	目付 55-2 層	6/10-2
SCFH-0/90-CT	$0^\circ + 90^\circ$	純せん断	目付 150-2 層	6/10-2
HCF-45/135-CT	$45^\circ + 135^\circ$	純せん断	高弾性	7/13-1
HCF-0/90-CT	$0^\circ + 90^\circ$	純せん断	//	7/13-1
HCF-0/90-T	$0^\circ + 90^\circ$	純引張	//	7/13-2
ARF-45/135-CT	$45^\circ + 135^\circ$	純せん断		6/23-1
ARF-0/90-CT	$0^\circ + 90^\circ$	純せん断		6/23-2
ARF-0/90-T	$0^\circ + 90^\circ$	純引張		7/1-1
GLF-45/135-CT	$45^\circ + 135^\circ$	純せん断		6/23-3
GLF-0/90-CT	$0^\circ + 90^\circ$	純せん断		6/23-2
GLF-0/90-T	$0^\circ + 90^\circ$	純引張		7/1-2

SCF : 通常炭素繊維シート (目付 75g/m^2)
 SCFL : 目付 55g/m^2
 SCFH : 目付 150g/m^2
 HCF : 高弾性炭素繊維シート (目付 75g/m^2)
 ARF : アラミド繊維シート (目付 75g/m^2)
 GLF : ガラス繊維シート (目付 75g/m^2)
 CT : 純せん断応力
 T : 純引張応力
 45/135, 0/90, 25/115 : シート貼付方向

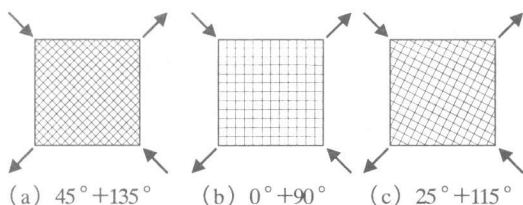


図-2 各試験体の概要

2.2 使用材料

モルタルは目標圧縮強度を 50MPa とし、プレミックスモルタルを使用した。モルタルならびに繊維シートの力学特性を表-2 および表-3 に示す。

表-2 繊維シートの性質

材 料	強 度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	繊維目付量 (g/m^2)	破断伸度 (%)
SCF	4,145	228.3	55 75 150	1.8
HCF	2,500 以上	500.0	75	0.5 以上
ARF	3,500 以上	140.0	75	2.5 以上
GLF	2,224	83.3	75	2.7

表-3 モルタルの性質

No.	強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	歪度 (%)	備 考
5/28-1	46.6	22.2	0.364	SCF-0/90-CT SCF-45/135-CT SCFL-0/90-CT SCFH-0/90-CT
6/10-1	59.7	30.1	0.296	SCF-25/115-CT
6/10-2	63.4	30.2	0.294	SCF-0/90-CT SCFL-0/90-CT SCFH-0/90-CT
6/10-3	69.0	30.7	0.316	SCF-0/90-T
6/23-1	60.5	29.4	0.278	SCF-45/135-CT ARF-45/135-CT
6/23-2	57.9	28.2	0.272	ARF-0/90-CT GLF-0/90-CT
6/23-3	61.3	28.6	0.286	GLF-45/135-CT
7/01-1	55.5	25.2	0.329	ARF-0/90-T
7/01-2	55.6	26.5	0.319	GLF-0/90-T
7/13-1	56.9	25.6	0.321	HCF-45/135-CT HCF-0/90-CT
7/13-2	58.2	26.6	0.297	HCF-0/90-T

2.3 試験体製作方法

今回使用したシートは、目付量の都合から全てプリプレグシートとし、シート貼付後の養生にはオートクレーブ養生を使用した。以下に試験体製作状況の概要を示す。

- モルタル表面のダイヤモンド刃によるけれん下地処理後、平滑度を出すためにパテ状エポキシ樹脂（以下パテ材）を全面に薄めに塗る（写真-1）。
- パテ材の室温乾燥後、プリプレグ繊維シートを貼付する（写真-2）。
- シート貼付後の試験体にフィルムを取り付ける（写真-3）。
- フィルム内の空気を吸引し、真空状態とする（写真-4）。
- オートクレーブ養生用の炉に試験体を設置する（写真-5）。
- チューブを吸引機に接続し、空気を吸引しながら加熱硬化させる（写真-6）。

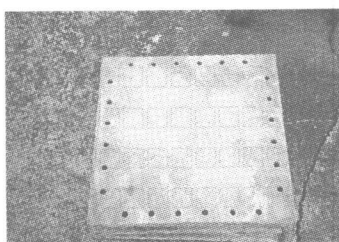


写真-1 下地・パテ処理後の試験体

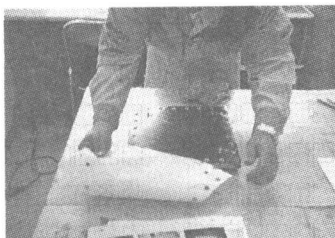


写真-2 繊維シート貼付

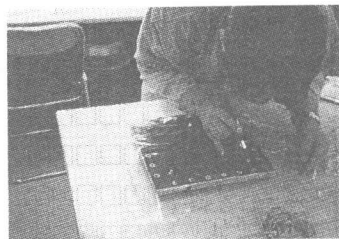


写真-3 フィルム取り付け

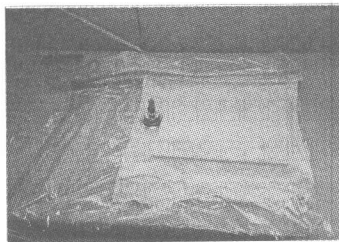


写真-4 バッキング処理

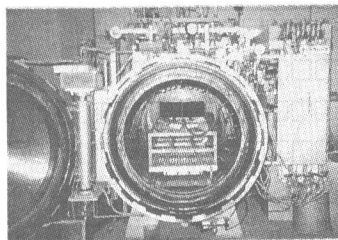


写真-5 オートクレープ処理

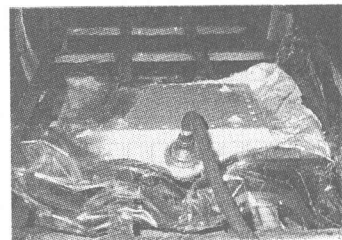


写真-6 オートクレープ処理

2.4 加力方法・測定

純せん断加力では、各辺 6 本ずつ計 24 本のオイルジャッキを使用し、試験体の対角方向にそれぞれ同じ大きさの引張力（南北方向）と圧縮力（東西方向）を加えた。純引張加力では、北西・南東位置の計 12 本のオイルジャッキに同じ大きさの引張力を加えた。また、試験体表面 5 方向には変位計を設置、パネル両面中央部のシートには 3 方向歪ゲージを貼付した。加力方法の概略を図-3 に、変位計設置位置および歪ゲージ貼付位置を図-4 に示す。

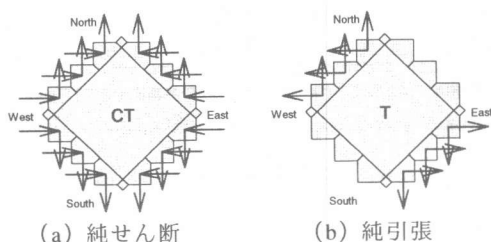


図-3 加力方向

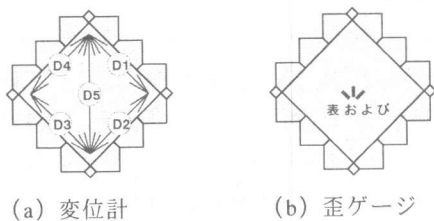


図-4 変位計・歪ゲージ位置

3. 実験結果

3.1 破壊経過

実験結果一覧を表-4 に、各試験体のせん断応力と歪ゲージによるせん断歪 ($\tau_{xy} - \gamma_{xy}$) 関係を図-5 に各々示す。なお、せん断応力は次式により、せん断歪は三軸ゲージのロゼット解析による主せん断歪により求めている。

$$\tau_{xy} = 3\sqrt{2}P/t \cdot b \quad (\text{純せん断加力}) \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{3\sqrt{2}P/t \cdot b}{2} \quad (\text{純引張加力}) \quad (2)$$

ここで、

P : ジャッキ一本あたりの荷重

t : 試験体厚

b : 試験体幅

純せん断加力試験体では、シートの破断およびパネルのチャック部で破壊する端部破壊の 2 種類の破壊がみられ、モルタルの圧壊はみられなかった。端部破壊にいたった試験体は、カーボン目付量の多い SCFH シリーズとパネルチャックの締付け方が緩かった試験体である。加力中のひび割れ状況は観測されていないが、すべての試験体の $\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係はひび割れ発生と思われる時点までは直線的で、高弾性の HCF を除く試験体はひび割れ発生と同時にせん断

歪が急激に増加した。HCF は、ひび割れ発生と同時にシートが破断し破壊にいたった。

表-4 実験結果一覧

試験体名	シート種類	加力方法	最大応力 (MPa) 平均	破壊形式	モルタル圧縮強度 (MPa)
SCF-090-CT	-1	純せん断	5.55	破断	46.6
〃	-2		5.86	破断	63.4
〃	-3		5.52	破断	
SCF-45/135-CT	-1		4.36	破断	46.6
〃	-2		6.14	破断	60.5
〃	-3		5.52	端部	
SCF-25/115-CT	-1		5.48	破断	59.7
〃	-2		6.11	破断	
〃	-3		4.25	破断	
SCF-090-T	-1	純引張	8.68	破断	69.0
〃	-2		9.11	破断	
〃	-3		10.32	破断	
SCFL-090-CT	-1	純せん断	4.11	破断	46.6
〃	-2		2.42	端部	63.4
〃	-3		4.14	破断	
SCFH-090-CT	-1	純せん断	9.36	端部	46.6
〃	-2		6.07	端部	63.4
〃	-3		8.34	端部	
HCF-090-CT	-1	純せん断	2.77	破断	56.9
〃	-2		2.45	端部	
〃	-3		2.00	破断	
HCF-45/135-CT	-1	純せん断	3.15	破断	56.9
〃	-2		2.71	破断	
〃	-3		2.01	端部	
HCF-090-T	-1	純引張	3.05	破断	58.2
〃	-2		3.41	破断	
〃	-3		3.37	破断	
ARF-090-CT	-1	純せん断	5.98	破断	57.9
〃	-2		5.49	破断	60.5
〃	-3		5.75	破断	
ARF-45/135-CT	-1	純せん断	5.98	破断	57.9
〃	-2		4.99	破断	61.3
〃	-3		5.47	破断	
ARF-090-T	-1	純引張	7.11	破断	55.5
〃	-2		7.74	破断	
〃	-3		7.83	破断	
GLF-090-CT	-1	純せん断	2.86	破断	57.9
〃	-2		3.35	破断	61.3
〃	-3		2.88	破断	
GLF-45/135-CT	-1	純せん断	3.37	破断	55.6
〃	-2		3.27	破断	
〃	-3		3.02	破断	
GLF-090-T	-1	純引張	2.34	破断	
〃	-2		2.23	破断	
〃	-3		2.14	破断	

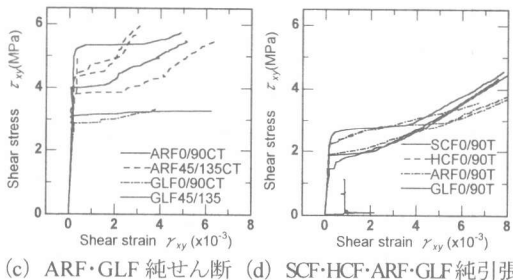
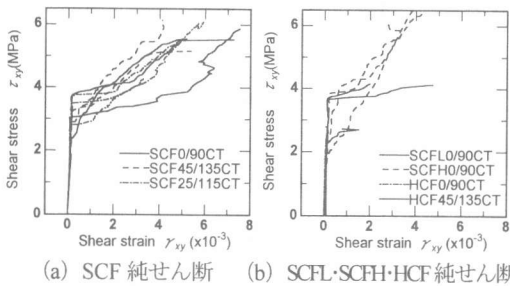


図-5 せん断応力-せん断歪関係

3.2 最大応力に対する検討

試験体の各変動因子-最大応力関係を図-6に示す。同目付量の各種シートと最大せん断応力の関係を (a) に、同じく最大引張応力の関係を (b) に、SCF 同目付量のシート貼付方向と最大せん断応力の関係を (c) に、SCF 各目付量と最大せん断応力の関係を (d) に各々示す。(a) からシートの引張強度が高くなるに連れて最大せん断応力も高くなることが確認できる。(b) でも同様な傾向がみられる。(c) から、シートの貼付方向による最大せん断応力の変化は顕著に確認できなかった。(d) から繊維量が多くなるに連れて最大せん断応力が高くなる傾向が顕著に確認された。

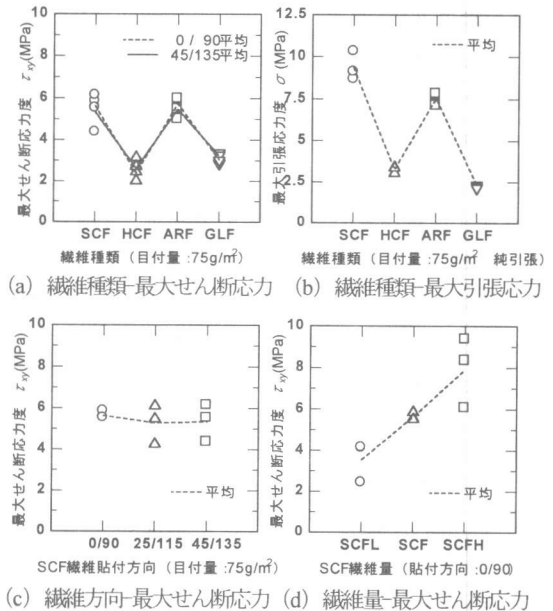


図-6 各変動因子-最大応力関係

4. Modified Compression-Field Theory による解析

純せん断加力試験体を対象に、Modified Compression Field Theory^[1]に多軸化および繊維の付着を考慮した解析手法^[2]を用いて、各変動因子が最大せん断応力におよぼす影響を解析結果と比較しながら検討する(解析手法に関しては文献[2]を参照)。

4.1 解析上の数値

解析に用いた各性状の数値を表-5に示す。モルタルの性状は50φ×100mmテストピースの一軸圧縮試験による値を、シートの降伏付着力・降伏付着力時すべり量は文献[3]による値を、シートの破断強度はパネルの純引張加力試験体による値を、シートの弾性係数は繊維の引張試験による値（一部公称値）を各々用いた。

表-5 解析上の数値

試験体名	σ_B (MPa)	E_c (GPa)	ε_c (%)	S_m (mm)	τ_{bv} (N/mm)	S_{bv} $\times 10^{-3}$ (mm)	f_{tu} (MPa)	E_t (GPa)
SCF-090-CT	63.4	30.2	0.294	113	4.56	1.97	1,686	228.3
SCF-45/135-CT	60.5	29.4	0.278	162	4.56	1.97	1,686	228.3
SCF-25/115-CT	59.7	30.1	0.296	162	4.56	1.97	1,686	228.3
SCFL-090-CT	63.4	30.2	0.294	94	4.56	1.97	1,686	228.3
SCFH-090-CT	63.4	30.2	0.294	162	4.56	1.97	1,686	228.3
HCF-090-CT	56.9	25.6	0.321	283	4.56	1.97	591	500.0
HCF-45/135-CT	56.9	25.6	0.321	70	4.56	1.97	591	500.0
ARF-090-CT	57.9	28.2	0.272	162	2.03	0.88	1,100	140.0
ARF-45/135-CT	60.5	29.4	0.278	226	2.03	0.88	1,100	140.0
GLF-090-CT	57.9	28.2	0.272	70	0.91	0.39	574	83.3
GLF-45/135-CT	61.3	28.6	0.286	94	0.91	0.39	574	83.3

σ_B :モルタルの圧縮強度 E_c :モルタルの弾性係数
 ε_c :モルタル圧縮強度時の歪 S_m :平均ひび割間隔(45°方向)
 τ_{bv} :シートの降伏付着力(単位長さあたり)
 S_{bv} :シートの降伏付着力時のすべり量
 f_{tu} :シートの破断強度 E_t :シートの弾性係数

4.2 解析結果

全試験体の実験結果と解析結果の比較を表-6に示す。破壊形式の実験結果と解析結果は、端部破壊にいたった試験体を除いてすべて一致している。端部破壊にいたった試験体は、SCFHを除いてパネルチャックの締付け不足が原因であったが、SCFHはパネルチャックの締付け容量が十分なものであれば、圧壊にいたったと予測される。せん断応力の最大値の解析結果に対する実験結果の比は全体で0.99~1.05の範囲にあり、本解析は実験結果をよく表している。解析方法および表-5に示した解析上の数値は妥当であると言えよう。

代表的な試験体のせん断歪-せん断応力関係の解析結果を図-7に示す。なお、実験結果は図-4(a)に示した変位計によるデータが乱れていたため、同図(b)に示した歪ゲージによるデータを使用した。図-7より、各試験体の実験結果と解析結果はおおむね対応している。ここで、図中グラフの第一折点における実験値と解析値の差は、せん断歪の実験値は試験

体中央部に貼付した歪ゲージによるものであり、解析値は平均歪を表しているためである。この差は、ARF試験体で特に顕著にみられ、弾性係数の小さい繊維ほど、平均歪と局所歪の差が大きいことによる。

表-6 解析結果と実験結果の比較

試験体名		実験結果		解析結果		実験値 / 解析値
		最大 せん断応力 (MPa)	破壊 形式	最大せん断 応力 (MPa)	破壊 形式	
SCF-090-CT	-1	5.55	破壊	5.61	破壊	0.99
"	-2	5.86	破壊	5.61	破壊	1.04
"	-3	5.52	破壊	5.61	破壊	0.98
SCF-45/135-CT	-1	4.36	破壊	5.18	破壊	0.84
"	-2	6.14	破壊	5.18	破壊	1.18
"	-3	5.52	破壊	5.18	破壊	1.05
SCF-25/115-CT	-1	5.48	破壊	5.17	破壊	1.05
"	-2	6.11	破壊	5.17	破壊	1.18
"	-3	4.25	破壊	5.17	破壊	0.82
SCFL-090-CT	-1	4.11	破壊	4.11	破壊	1.00
"	-2	2.42	破壊	4.11	破壊	1.00
"	-3	4.14	破壊	4.11	破壊	1.00
SCFH-090-CT	-1	9.36	端部	8.81	圧壊	—
"	-2	6.07	端部	8.81	圧壊	—
"	-3	8.34	端部	8.81	圧壊	—
HCF-090-CT	-1	2.77	破壊	2.39	破壊	1.15
"	-2	2.45	破壊	2.39	破壊	1.03
"	-3	2.00	破壊	2.39	破壊	0.83
HCF-45/135-CT	-1	3.15	破壊	2.79	破壊	1.12
"	-2	2.71	破壊	2.79	破壊	0.97
"	-3	2.01	破壊	2.79	破壊	0.72
ARF-090-CT	-1	5.98	破壊	5.55	破壊	1.08
"	-2	5.49	破壊	5.55	破壊	0.99
"	-3	5.75	破壊	5.55	破壊	1.04
ARF-45/135-CT	-1	5.98	破壊	5.28	破壊	1.13
"	-2	4.99	破壊	5.28	破壊	0.95
"	-3	5.47	破壊	5.28	破壊	1.04
GLF-090-CT	-1	2.86	破壊	3.01	破壊	0.95
"	-2	3.35	破壊	3.01	破壊	1.11
"	-3	2.88	破壊	3.01	破壊	0.96
GLF-45/135-CT	-1	3.37	破壊	3.24	破壊	1.04
"	-2	3.27	破壊	3.24	破壊	1.01
"	-3	3.02	破壊	3.24	破壊	0.93

* : 破壊形式が端部破壊の試験体は除く

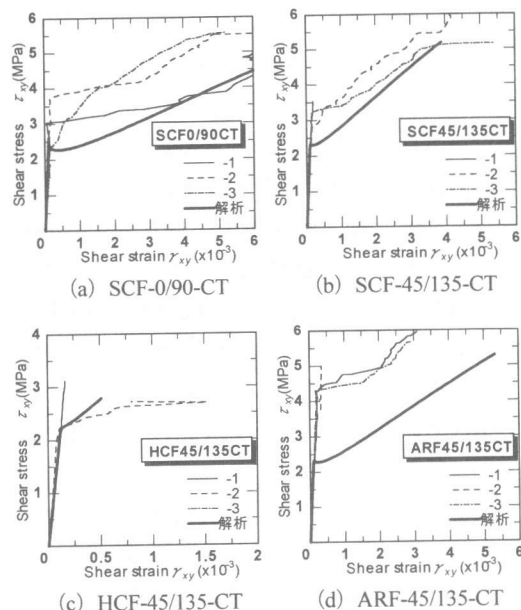


図-7 せん断応力-せん断歪関係

4.3 各変動因子が最大せん断応力におよぼす影響

今回の実験においては、シートの弾性係数の影響は顕著に見られなかったが、コンクリートが圧壊する場合、シートの引張強度とともに弾性係数も最大せん断応力に大きく影響すると考えられる。本節では、ARF, GLF の目付量 (SCF 相当量) を SCF の弾性係数を基準にした弾性係数比倍にして解析を行い、純せん断力下におけるシート補強部材の性状を検討する。

解析結果を表-7 および図-8 に示す。表-7 より、目付量を SCF の弾性係数比倍にした ARF, GLF とともに破壊形式は圧壊となった。最大せん断応力は両者ともに基準とした SCF を上回り、特に繊維貼付方向を 45/135°にしたものは大幅に上回る予想が得られた。

表-7 弾性係数比目付量の解析結果

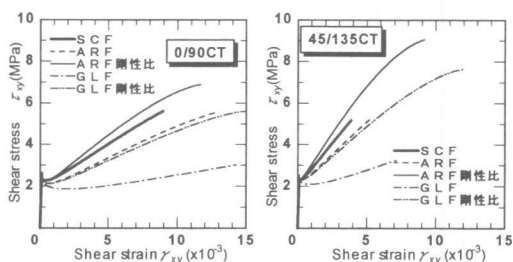
繊維種類 (試験体名)	弾 性 係数比	目付量 (g/m ²)	解析結果		τ_{mx} /SCF τ_{mx}
			最大せん 断応力 (MPa)	破壊 形式	
SCF-0/90-CT	—	75	5.61	破断	—
ARF-0/90-CT	1.63	75	5.55	破断	0.99
ARF 剛性比	1.63	122.3	6.90	圧壊	1.23
GLF-0/90-CT	2.94	75	3.01	破断	0.53
GLF 剛性比	2.94	220.5	5.63	圧壊	1.00
SCF-45/135-CT	—	75	5.18	破断	—
ARF-45/135-CT	1.63	75	5.28	破断	1.02
ARF 剛性比	1.63	122.3	9.05	圧壊	1.74
GLF-45/135-CT	2.94	75	3.24	破断	0.63
GLF 剛性比	2.94	220.5	7.65	圧壊	1.48

ARF 剛性比 : 目付量を SCF の弾性係数比倍したもの
GLF 剛性比 : 目付量を SCF の弾性係数比倍したもの

また、図-8 よりパネルの初期ひび割れ発生時期 (図中の第 1 折れ点) は、シート量ならびに貼付方向による影響をほとんど受けないが、ひび割れ後の挙動には大きな差がみられる。例えば、ARF に関しては SCF と同目付量であれば最大せん断応力は同等であるが、そのときのせん断歪は大きくなる。目付量を SCF の弾性係数比倍したものは、同せん断歪時期におけるせん断応力は高くなり、貼付方向を 45/135°にした場合の最大せん断応力は SCF の 1.74 倍である。

以上のことから、コンクリート系構造部材の補強にシートを使用する場合は、部材の変形にともなうせん断歪とせん断応力の関係を十分に考慮する必要があることが分かる。予想され

る部材変形にともなうせん断歪を考慮して繊維種と目付量を選択しなければ、部材の耐力評価が危険側になる可能性がある。



(a) 0/90-CT

(b) 45/135-CT

図-8 せん断力-せん断歪関係 (解析)

5. まとめ

各種 (カーボン, アラミド, ガラス) の繊維シートで補強したモルタルパネルを用いた平板の二軸加力実験と Modified Compression-Field Theory による解析によって、繊維とコンクリートの相互作用を検討した結果、①シート破断する場合、補強パネルの純せん断、純引張強度は繊維の引張強度に比例する、②Modified Compression-Field Theory による解析は実験結果をよく表現できる、③弾性係数が小さい繊維の場合、局所的なせん断歪と平均歪は大きく異なる、ことが得られた。さらに、シートの弾性係数と目付量を変動因子とした解析を行い、コンクリート部材の変形にともなうせん断歪とせん断応力の関係の考慮の必要性を述べた。

【参考文献】

- [1] Michael P. Collins et al. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal / March-April, 1986, pp.219-231
- [2] 金久保利之 : 多軸化を考慮した Modified Compression-Field Theory による解析, 日本建築学会大会梗概集 C-2 構造IV, pp.511-512, 1998.9
- [3] 佐藤裕一他 : CFRP シートとコンクリートの付着挙動 (その 2), 日本建築学会構造系論文集第 509 号, pp.127-134, 1998.7