

論文 補修用ガラス繊維材による鉄筋コンクリート部材の耐荷性能向上効果

角永 敏章*1・下村 匠*2・田村 隆弘*3

要旨：コンクリート構造物の補修方法としてガラス短繊維とアクリル系樹脂を用いた工法が開発されている。本稿では、本来補修目的で用いるガラス繊維を、RC部材の力学性能を改善する補強材としても利用する可能性の検討を行った。繊維の積層数、異種繊維との組み合わせをパラメータとし、要素実験と部材レベルでの試験を実施した。その結果、ガラス連続繊維をRCはりに巻き付けて接着することにより部材耐力および靱性を向上させることが可能であること、繊維を積層化することでその効果は大きくなることが確認された。

キーワード：ガラス短繊維, ガラス連続繊維, ハイブリッド化, 部材耐力

1. はじめに

構造物からのコンクリートの剥落防止、ひび割れ対策として、ガラス短繊維とアクリル系樹脂を用いる補修工法が開発されている。この工法は、ひび割れ追従性や耐候性など利点を有するもので、建築の分野で採用されている。

著者らは、この工法を補修だけでなく補強効果の観点から検討した研究を行った。RCはりにガラス短繊維を積層化して巻き付けて接着することにより部材耐力を僅かながら向上させ、最大耐力後の靱性を向上させることが可能であることを明らかにした¹⁾。しかし、補強効果を積極利用し実構造物に適用するにはまだ知見が十分であるとはいえない。

そこで本研究では、ガラス繊維巻付けによるRC部材の補強効果を向上させることを目的とし、耐力向上効果が大きいと考えられるガラス連続繊維と靱性向上効果を期待するガラス短繊維とをハイブリッド化して使用し、供試体による実験的検討を行った。要素試験としてコンクリートに貼り付けた繊維シートの一軸引張付着試験と、部材レベルの試験としてRCはりの曲げ載荷試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートに接着した繊維シートの一軸引張付着試験

(1) 繊維シートの一軸引張付着試験

繊維シートの一軸引張付着試験はJSCE-E543²⁾を参考にして試験を行った。

(2) 使用繊維および樹脂

使用したガラス繊維を図-1に示す。ガラス短繊維シートは、一本約50mmのガラス繊維をランダムに吹き付けシート状にしたものである。ガラス連続繊維シートはガラス連続繊維を4方向に編んだものである。連続繊維シート単体の単位幅あたりの引張強さは、縦47N/mm、横55N/mm、斜め35N/mmである。

プライマーはエポキシ系の樹脂（弾性係数3.5GPa、引張強度49MPa）を使用した。含浸樹脂としてアクリル系の樹脂を使用した。

ガラス短繊維シートとアクリル系樹脂をあわせて補修に用いられている。アクリル系樹脂を含浸させたガラス短繊維シート1層の単位幅あたりの引張強さは約5N/mmである。

(3) 試験体

繊維シートを接着する前のコンクリートプロ

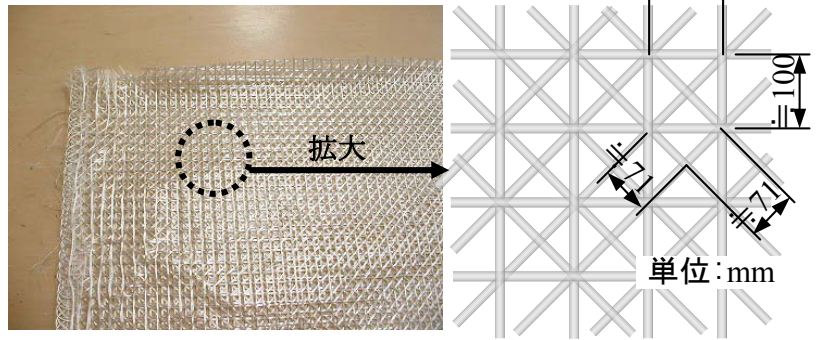
*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系助教授 工博 (正会員)

*3 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科助教授 工博 (正会員)



(a) ガラス短繊維シート



(b) ガラス連続繊維シート

図-1 使用したガラス繊維

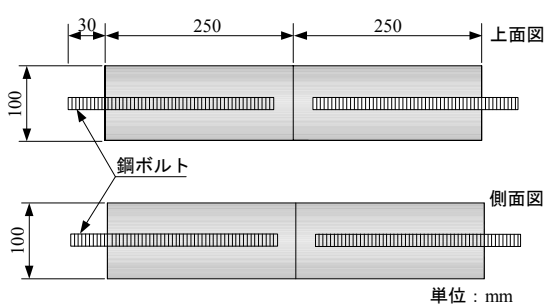


図-2 コンクリートブロック

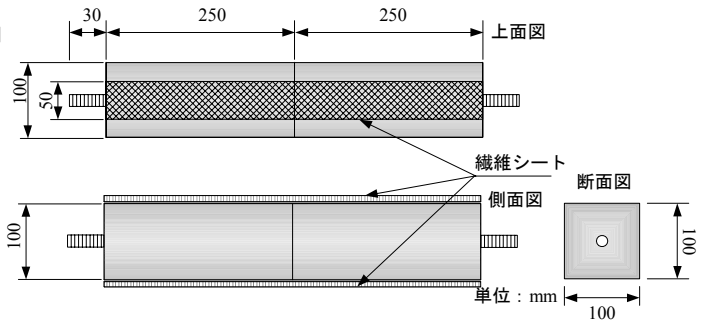


図-3 繊維シートを張り付けた供試体

表-1 試験パラメータ

供試体	積層構成		
	1層	2層	3層
S1	短繊維		
S3	短繊維	短繊維	短繊維
L1	連続繊維	-	-
L2	連続繊維	連続繊維	-
L1S1	連続繊維	短繊維	-
L1S2	連続繊維	短繊維	短繊維

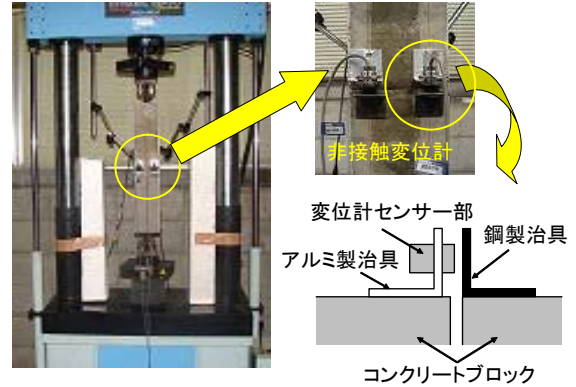


図-4 荷重状況

ックを図-2に示す。コンクリートブロックの寸法は断面 $100 \times 100 \text{mm}$ 、長さ 250mm であり、これをふたつ中央で合わせた。引張伝達材には径 16mm の鋼ボルトを使用し、断面中央位置に偏心しないよう留意しながら配置した。シート接着前にはコンクリート表面のレイタンス層を除去した。繊維シートを貼り付けた状態を図-3に示す。繊維シートは、コンクリート打設面に直交する2面に、幅 50mm で試験体の全長にわたって、

含浸樹脂、ガラス繊維、含浸樹脂の順に貼り付けた。プライマーと含浸樹脂の目付量は 0.30m^2 とした。貼り付ける繊維の積層構成を表-1に示す。短繊維のみのS1,S3、連続繊維のみのL1,L2、短繊維と連続繊維をハイブリッド化したL1S1,L1S2の計6体の試験体を作製した。積層化する場合、規定の層数まで1層ずつ1日おきにシートの貼り付けを行った。貼り付け後は、 20°C 以上の屋内で1週間以上の養生を行った。

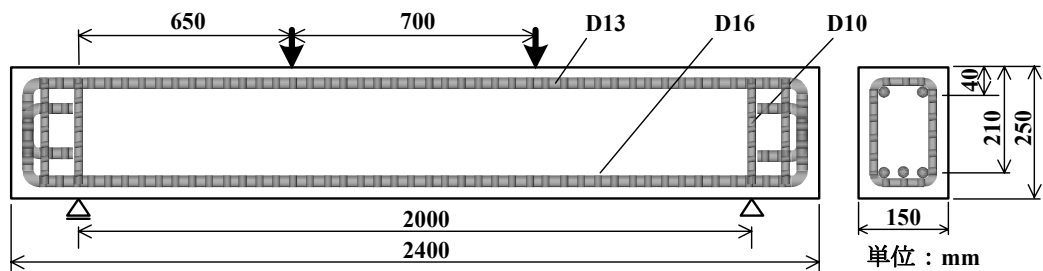


図-5 RCはり供試体

(4) 載荷方法

引張力の導入は図-4 に示す変位制御型試験機（最大荷重 50kN）により行い、載荷速度を 0.005mm/s とした。載荷の過程で荷重およびコンクリートブロック接合部に設置した 2 つの非接触変位計により開口変位を測定した。

2. 2 繊維シートで補強した RC はりの載荷試験

(1) 供試体概要

RC はり供試体の概要を図-5 に示す。供試体は全長 2400mm、高さ 250mm、幅 150mm、せん断スパン 650mm とし、引張側の軸方向鉄筋に D16 異形鉄筋を 3 本、圧縮側の軸方向鉄筋に D13 異形鉄筋を 2 本配置し、それぞれかぶりを 40mm とした。せん断破壊を生じさせるため、せん断補強筋は試験区間内には配置していない。表-2 に鉄筋およびコンクリートの材料特性を示す。試験体は繊維シート接着前にコンクリート表面をハンドグラインダーで下地処理をした。また、ガラス繊維が隅角部において折り曲がらないよう曲率半径 10mm の面取りを施した。

図-6 に RC はり供試体に繊維シートを巻き付けた状態を示す。シートは両支点からおおよそ 50mm 外側に延長したところまで巻き付け、巻き付けの際にはシートの縞れや気泡が入らないように留意した。積層化する場合、規定の層数まで 1 層ずつ 1 日おきにシートの貼り付けを行った。施工と養生は常温の室内で行った。養生は 1 週間以上行った。

(2) 試験パラメータ

試験パラメータを表-3 に示す。繊維シートの種類と組み合わせを試験パラメータとした。前記した一軸引張付着試験の連続繊維シートのみ

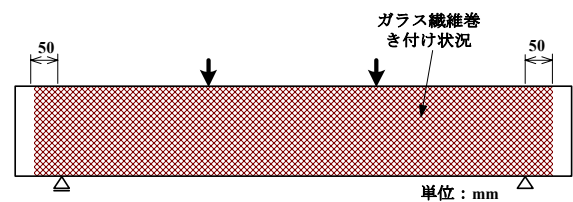


図-6 繊維巻き付け状況

表-2 材料特性

鉄筋		
種別	SD345	
呼び径	D16	D13
降伏強度(N/mm ²)	377	376
弾性係数(kN/mm ²)	193.5	185.0
コンクリート		
圧縮強度(N/mm ²)	42.8	

表-3 試験パラメータ

供試体	積層構成		
	1層	2層	3層
Plain	-	-	-
L1	連続繊維	-	-
L2	連続繊維	連続繊維	-
L1S1	連続繊維	短繊維	-
L1S2	連続繊維	短繊維	短繊維

のケースおよび短繊維シートと連続繊維シートをハイブリッド化したケースを RC はりに適用した。また、比較のために繊維を巻かない Plain 供試体についても試験を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 一軸引張付着試験

図-8 にコンクリートブロックに貼り付けた繊維シートの単位引張荷重-開口変位の関係を示す。ここで、縦軸は繊維シート貼り付け幅、

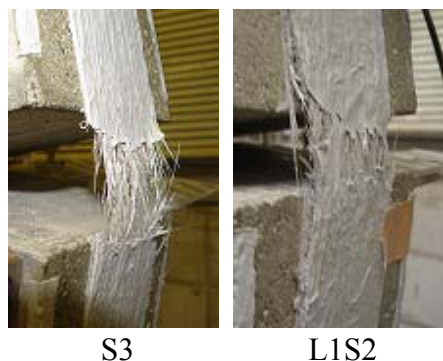


図-7 終局時の状況

表-4 最大引張荷重

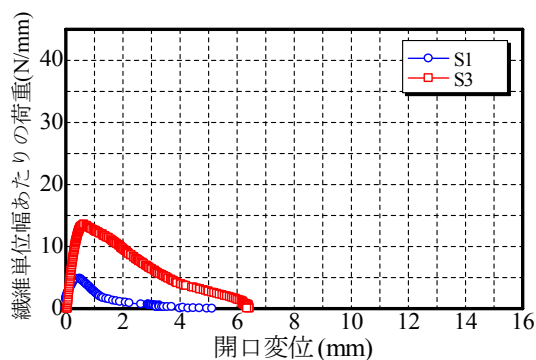
試験体	最大引張荷重(N/mm)
S1	4.9
S3	13.6
L1	23.1
L2	38.7
LIS1	25.9
LIS2	29.5

つまりコンクリートブロックの両面に貼り付けられた総繊維幅 100mm で引張荷重を除いた値である。コンクリートブロック接合部に設置した 2 つの非接触変位計の値は、最大荷重まではほぼ同じ値を示したが、最大荷重後は貼り付けた繊維シートの片側だけに大きな変形が生じたため、変形が生じた側の変位を採用した。

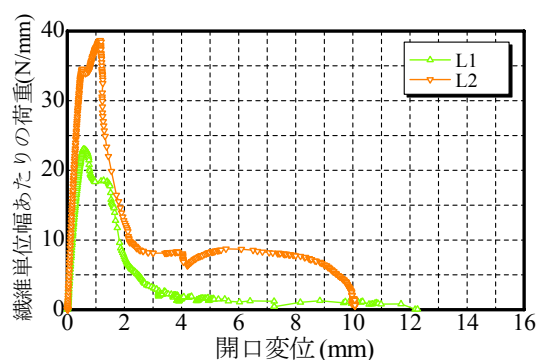
表-4 に各試験の繊維シート単位幅あたりの最大引張荷重を示す。試験時のコンクリートの圧縮強度は 33.5N/mm^2 であった。

終局時における破壊状態は、1 層目にガラス連続繊維シートを貼り付けた試験体では接合部付近で樹脂とコンクリートの剥離が少し観察されたが、全ての試験体において、繊維の樹脂からの引き抜けおよび一部繊維の破断により終局となった。終局時の状況を図-7 に示す。

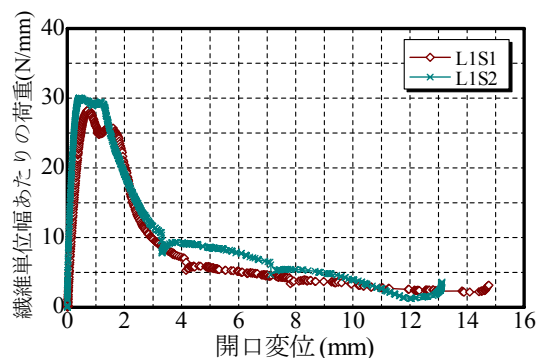
ガラス短繊維シリーズにおいて、最大引張荷重は、おおよそ繊維の層数倍となっていることが確認できる。既往¹⁾の研究で、積層数をパラメータとした繊維シートの引張試験でも同様の傾向を示している。



(a) ガラス短繊維シリーズ



(b) ガラス連続繊維シリーズ



(c) ハイブリッドシリーズ

図-8 単位引張荷重—開口変位曲線

ガラス連続繊維シリーズにおいては、L2 の最大引張荷重は、L1 の約 1.68 倍と層数倍とはならなかったが、積層化することで引張荷重を向上できることが確認された。また、連続繊維は 1 層あたりの補強効果が短繊維よりも大きいことがわかる。

ガラス短繊維シリーズとガラス連続繊維シリーズの結果から、RC 部材に対する力学的補強はガラス連続繊維シートを用いることが有効であるといえる。

表-5 RC はりの載荷試験結果

供試体	コンクリート強度 $f'_c(\text{N/mm}^2)$	終局荷重 の実験値 $P_u(\text{kN})$	曲げ耐力の 計算値 $P_{m,cal}(\text{kN})$	せん断耐力 の計算値 $P_{v,cal}(\text{kN})$	繊維の受け持つせん断力	
					実験値 $V_{f,exp}$	計算値 $V_{f,cal}$
Plane	41.6	101.8	128.24	96.15	-	-
L1	40.2	109.5	128.64	120.19	3.85	12.02
L2	40.2	148.8	128.93	136.49	23.50	20.17
L1S1	40.2	134.2	128.69	123.11	16.20	13.48
L1S2	42.8	128.4	128.76	126.92	13.30	15.39

ガラス短繊維シートとガラス連続繊維シートをハイブリッド化した L1S1, L1S2 の最大引張荷重は、短繊維シートの寄与により連続繊維シートのみ L1 よりも幾分向上している。またポストピークの挙動は、急激な軟化を示した L1 と比べると、幾分靱性が向上していることが確認できる。しかし、短繊維を 2 層重ねる効果は認められなかった。

3. 2 RC はりの載荷試験

(1) 実験結果

図-9 は、載荷試験に供した全ての RC はり供試体の荷重-変位関係である。破壊モードは、無補強の Plain 供試体は斜めせん断ひび割れの発生と同時に耐力を失うせん断破壊であった。シート補強を行った供試体では、連続繊維シート 2 層で補強した供試体 L2 のみ曲げ降伏後のせん断破壊であった。それ以外のシート補強供試体は、荷重 100kN 前後でせん断ひび割れが発生し、その後少し荷重増加と変形増大を示した後に破壊した。L2, L1S1, L1S2 は、最終的な破壊前に斜めせん断ひび割れ上の繊維シートが伸びる穏やかな破壊形態となった。

最大荷重は、ガラス連続繊維シート 2 層で補強した L2 が最も大きかった。短繊維と連続繊維をハイブリッド化したはり供試体 L1S1, L1S2 は、連続繊維シート 1 層のみで補強した L1 よりも、若干最大耐力と終局変位が増加しており、短繊維が寄与していることがわかる。しかし、一軸引張付着試験の結果と同様、短繊維を 2 層

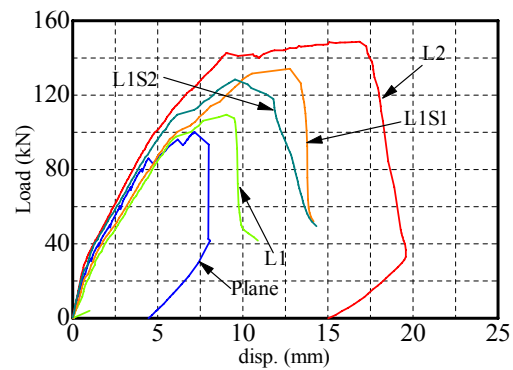


図-9 荷重-変位曲線

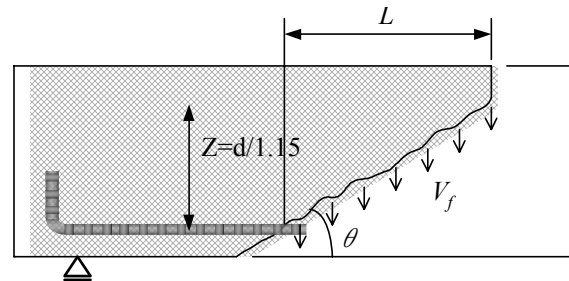


図-10 トラス理論による繊維のせん断耐力

重ねる効果は認められなかった。

(2) 耐力算定法に関する検討

載荷試験より得られた結果ならびに曲げ耐力およびせん断耐力の計算値を表-5 に示す。表中の $P_{m,cal}$ は、はり底面の繊維シートのみが曲げに抵抗すると仮定して求めた曲げ耐力の計算値である。繊維シートの巻き付けによる曲げ耐力への影響は繊維シートの種類、すなわち各繊維シートの引張強度の大小に関わらず小さい計算結果となった。これは、底面の繊維のみが曲げに有効と仮定したことによる。

$P_{v,cal}$ は、せん断補強筋のないRCはりのせん断耐力算定値³⁾に繊維の受け持つせん断耐力を加算し算出したものである。

$$P_{v,cal} = 2(V_c + V_{f,cal}) \quad (1)$$

ここに、

$$V_c = 0.2f'_c{}^{1/3} p_w{}^{1/3} d^{-1/4} \left(0.75 + \frac{1.4d}{a} \right) b_w d \quad (2)$$

ここに、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度(MPa)、 p_w ：軸方向鉄筋比(%), d ：有効高さ(mm), a ：せん断スパン(mm), b_w ：幅(mm)

$V_{f,cal}$ は図-10に示すように、発生したひび割れ面において繊維シートがせん断力に抵抗すると仮定し、トラス理論により求めたものである。

$$V_{f,cal} = 2 \cdot P_{f/b} \cdot L \quad (3)$$

ここに、 $P_{f/b}$ ：繊維シートの単位幅当たりの引張強度(N/mm), L ：ひび割れ面で繊維シートがせん断力を受け持つ長さ(mm)である。 $P_{f/b}$ は一軸引張付着試験より求めた値を用いる。

計算に用いる斜めひび割れ角度は、既報⁴⁾の連続繊維補強材をRCはりに巻き付けた載荷試験の結果を参考に $\theta = 35^\circ$ と仮定した。

繊維の受け持つせん断耐力の実験値 $V_{f,exp}$ は、繊維補強を施したRCはりの終局荷重から無補強のPlain供試体の終局荷重を差し引いた値である。

はりの耐力の実験値をせん断耐力算定式で算出した計算値と比較すると、その違いは最大で1割程度であった。これより、繊維シートが受持つせん断力をトラス理論で算定することにより、シート補強部材のせん断耐力を概ね推定することが可能であるといえる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 繊維シートの一軸引張付着試験により、シートによる補強効果は積層化したガラス短繊維よりもガラス連続繊維の方が高いことを確認した。また、短繊維と連続繊維のハイブリッド化により僅かながら耐力と靱性を

向上させることが可能となった。

- 2) ガラス連続繊維をRCはりに巻き付けることで、部材耐力と靱性を向上させることができる。また、その効果は連続繊維の積層化あるいは連続繊維と短繊維ハイブリッド使用することで向上することができる。
- 3) せん断ひび割れが生じるはり部材中で繊維シートが受け持つせん断耐力は、せん断ひび割れ面で繊維がせん断力を受け持つと仮定したトラス理論によって、概ね評価できる。

謝辞

本研究の実施にあたり、新光産業社ならびにエムビーエス社からガラス繊維および樹脂の提供を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Tamura, T. et al : Study on the effect of reinforcement of the R/C beam by combination of an acrylic resin coating and random glass fiber matting, 3rd International Conference on Fiber Reinforced Materials, pp.187-192, 2006
- 2) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート委員会報告書(II), pp.7-13, 1998.5
- 3) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 4) 趙 唯堅, 丸山久一：連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐荷機構とせん断耐力評価, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.1-17, 1997.11