

ガラス繊維を用いた鉄筋コンクリート部材の補修補強工法の開発

コンクリート研究室 角永 敏章

指導教員 下村 匠

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により補修する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。ガラス短繊維とアクリル系樹脂を用いた補修工法は、住宅用に開発されたもので、土木構造物の補強工法として適用できれば利用拡大が期待される。

一方、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も行われている。RC はりにガラス短繊維を積層化し巻き付けることで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との報告がされている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、補修用ガラス繊維とアクリル樹脂を用いた建築用補修工法を、土木構造物の補強工法としても利用する可能性の検討を行うことを目的とした。力学的強度を高めるため補強効果の高いガラス連続繊維を採用し、さらに積層化およびガラス短繊維とのハイブリッド化をパ

ラメータとした試験を行う。また本研究では、樹脂の違いによる影響を把握するため、エポキシ樹脂を用いた試験についても同様に行った。実験は、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試験

(1) 繊維シートの一軸引張試験

繊維シートの一軸引張試験は JSCE-E 543²⁾を参考にして試験を行った。

(2) 使用繊維

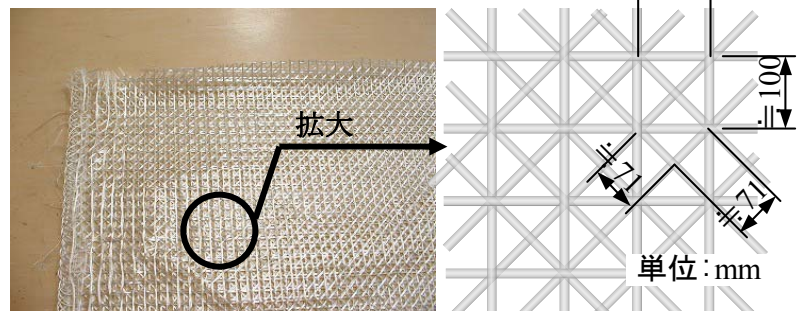
使用したガラス繊維を図-1に示す。ガラス短繊維は、一本当たり約50mmのガラス繊維をランダムに吹きつけシート状にしたものを、連続繊維は繊維糸が4軸方向(0°, ±45°, 90°)に縫われた繊維を使用した。プライマーはエポキシ系の樹脂を、含浸樹脂としてL社製のアクリル系の樹脂およびエポキシ樹脂を使用した。

(3) 試験体

繊維シートを接着する前のコンクリートブロッ



(a) ガラス短繊維



(b) ガラス連続繊維

図-1 使用繊維

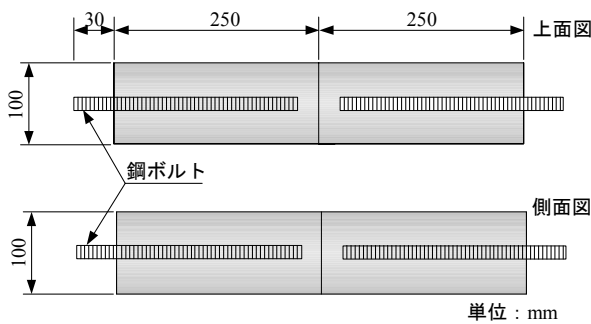


図-2 コンクリートブロック

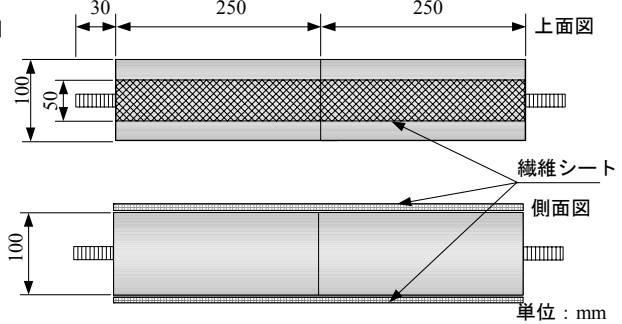


図-3 繊維シートを張り付けた供試体

表-1

供試体	樹脂	積層構成		
		1層	2層	3層
A-S1	アクリル	短繊維		
A-S3		短繊維	短繊維	短繊維
A-L1		連続繊維	-	-
A-L2		連続繊維	連続繊維	-
A-L1S1		連続繊維	短繊維	-
A-L1L2		連続繊維	短繊維	短繊維
E-S1	エポキシ	短繊維	-	-

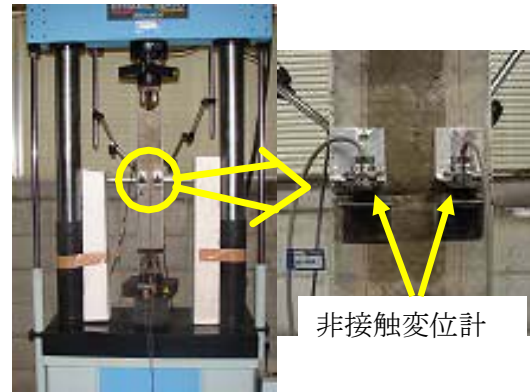


図-4 荷重状況

クを図-2に示す。コンクリートブロックの寸法は断面100×100mm、長さ250mmであり、これを中央で重ね合わせることで全長500mmの試験体とした。試験体は予めコンクリート表面のレイタンス層を除去するために下地処理を施した。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。繊維シートを貼り付けた状態を図-3に示す。プライマーおよび含浸樹脂の目付量は $0.30/m^2$ とした。繊維シートは、幅50mmで貼付け長さは試験体の全長にわたって貼り付けるものとし、コンクリート打設面に直行する2面に含浸樹脂、ガラス繊維、含浸樹脂の順で貼り付けた。貼り付ける繊維の積層構成を表-1に示す。ガラス短繊維のみのケース(1層, 3層), ガラス連続繊維のみのケース(1層, 2層), ガラス短繊維とガラス連続繊維をハイブリッド化したケース(1層目にガラス連続繊維, 2層目以降ガラス短繊維), ガラス短繊維をエポキシ樹脂で含浸させたケースとし、計7体の試験体を作

製した。積層化における繊維シートの貼り付けは、規定の層数まで1日おきに貼り付けを行い、規定の層数を貼り付けた後に、20℃以上の屋内で1週間以上の養生を行った。

(4) 荷重方法

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、荷重速度を0.005mm/sとした。荷重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はりの荷重試験

(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せず定着部のみに配置し

た。表-2に鉄筋およびコンクリートの材料特性

断が生じ、 $\pm 45^\circ$ に配列された繊維が引き抜ける

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ため曲率半径10mmの面取りを施した。

図-6にRCはり試験体に繊維を巻き付けた状態を示す。繊維は1層を1枚とし両支点からおおよそ50mm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。繊維の貼り付けは規定の層数まで1層ずつ1日おきに行い、規定の層数に達したときから1週間以上を養生期間とした。また、施工と養生は常温の室内で行った。

(2) 試験パラメータ

試験パラメータを表-3に示す。繊維シートの積層とし、前記した一軸引張試験のガラス連続繊維のみのケース、ガラス短繊維とガラス連続繊維をハイブリッド化したケースおよびガラス短繊維をエポキシ樹脂で含浸させたケースを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 繊維シートの一軸引張強度特性

終局時における破壊挙動は、短繊維シリーズでは、一部の短繊維が破断したがほとんどの短繊維が上下で含浸している樹脂から引き抜ける形で終局となった。連続繊維シリーズおよびハイブリッドシリーズにおいては、1層目に貼り付けたガラス連続繊維で、 90° 方向に配列された繊維に破

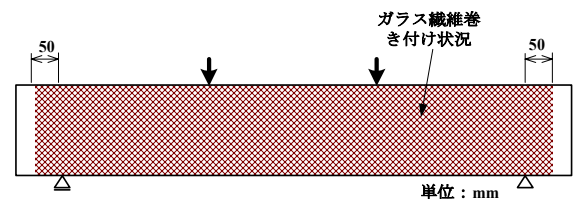


図-6 繊維巻き付け状況

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

表-3 試験パラメータ

供試体	樹脂	積層構成		
		1層	2層	3層
Plain	アクリル	-	-	-
A-L1		連続繊維	-	-
A-L2		連続繊維	連続繊維	-
A-L1S1		連続繊維	短繊維	-
A-L1L2		連続繊維	短繊維	短繊維
E-S1	エポキシ	短繊維	-	-

形で終局を迎えた。ガラス短繊維とエポキシ樹脂を使用した試験体は、ひび割れが開口すると共に、剥離が生じ最終的に破断した。図-7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、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。また、コンクリートブロック接合部に設置した2つの非接触変計の値

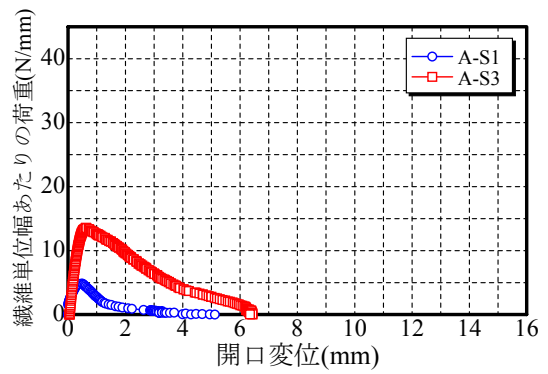
は、最大荷重までほぼ同等の値を示したが、最大荷重後は貼り付けた繊維シートの片側だけに大きな変形が生じたため出力データとして変形が生じた側の変位を採用した。試験時のコンクリートの圧縮強度は 33.5N/mm^2 であった。

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

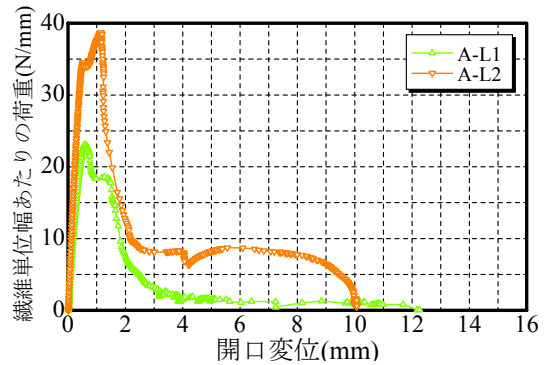
ガラス連続繊維シリーズにおいては、L2の最大引張荷重は、L1の約1.68倍と層数倍とはならなかったが、積層化することで引張荷重を向上させることができることが確認された。さらに、両試験のポストピーク後の挙動は、L1において開口変位の軟化が急激に進行しているのに対し、L2では 10N/mm 辺りまで軟化し、そこからさらに 8mm 付近まで荷重を受持っている。ガラス短繊維とガラス連続繊維の結果から、RC部材に対する力学的補強はガラス連続繊維を用いることが有効であるといえる。

ガラス短繊維とガラス連続繊維をハイブリッド化したシリーズにおいて、ハイブリッド化によりガラス連続繊維の引張耐力はガラス短繊維の耐力が付加され幾分向上している。またピークに達した後の挙動は急激な軟化を示したL1と比べると、急激に軟化することなくさらに荷重を受け持ち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層重ねる効果は見られなかった。

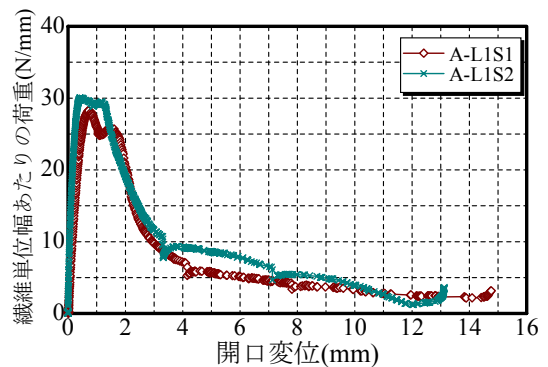
ガラス短繊維をエポキシ樹脂で含浸させたケースでは、力学的強度の低いガラス短繊維を使用したにも加かわらず、最大引張耐力が全てのシリーズにおいて最大となった。破壊形態は、アクリル樹脂を使用したケースのものとは異なり、 20N/mm 辺りから剥離が生じ、ある程度剥離が進展したところで繊維および樹脂共に完全に破断した。これは、エポキシ樹脂自体が有する引張強度、弾性係数などの物性値がアクリル樹脂のそれ



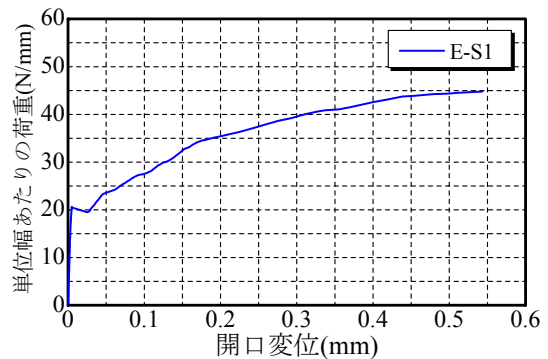
(a) 短繊維シリーズ



(b) 連続繊維シリーズ



(c) ハイブリッドシリーズ



(d) E-S1

図-7 単位引張荷重-開口変位

よりも明らかに大きいことに起因しているためだと考えられる。つまり、繊維補強に使用する結

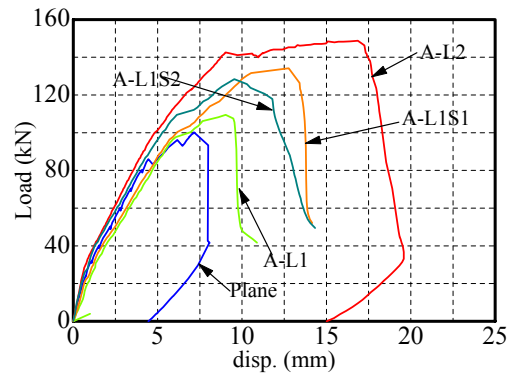
合樹脂には、ある程度の物理的強度を有する必要があるといえる。

3. 2 RC はりの力学的特性

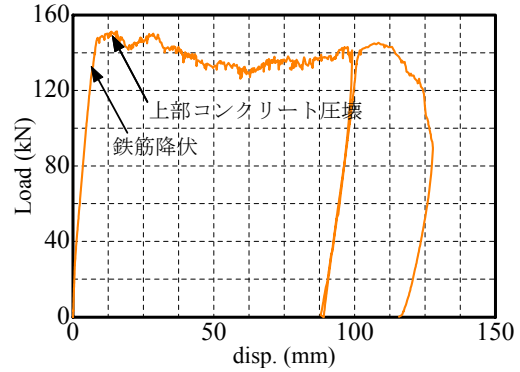
(1) 実験結果

図-8は、載荷試験に供した全ての試験体における荷重-変位曲線である。この図から、最大荷重はガラス長繊維を2層巻き付けたL2においてPlain供試体と比較すると約46%の増加となっているが、ガラス長繊維を1層巻き付けたA-L1では、約8%とA-L2と比べると耐力の増加量は小さなものとなった。ガラス短繊維とガラス長繊維をハイブリッド化した場合には、A-L1S1、A-L1S2とも32%、26%とそれぞれ耐力の向上がみられ、またA-L1と比べて靱性もやや向上した。ガラス短繊維を2層巻き付けたA-L1S2は、A-L1S1よりもガラス短繊維による補強量が多いにもかかわらず耐力が減少した。また、ガラス長繊維を2層巻き付けたA-L2は、荷重がピークに達した後に緩やかな挙動を示す範囲が存在する。ここから、A-L2の破壊モードがせん断先行型のせん断破壊から曲げ降伏後のせん断破壊へと移行したことを示す。A-L1S1、A-L1S2においても、荷重の増加と共に急激に耐力を失うのではなく、緩やかな曲線を描いている様に見て取れるため、L2と同様に曲げ降伏後のせん断破壊へ移行した可能性がある。しかし、荷重-たわみ関係では、A-L1S1、A-L1S2の降伏は明確ではない。

E-S1の最大荷重は、Plain供試体と比較して48%の増加となり、破壊モードが完全に曲げ破壊に移行している。これは、斜めひび割れの開口を繊維シートで受け持てなくなったL2供試体とは異なり、E-S1は斜めひび割れ面で繊維シートが受け持つ力が大きく、結果としてせん断耐力が向上した



(a) アクリル樹脂を用いた供試体



(b) エポキシ樹脂を用いた供試体(E-S1)

図-8 荷重-たわみ曲線

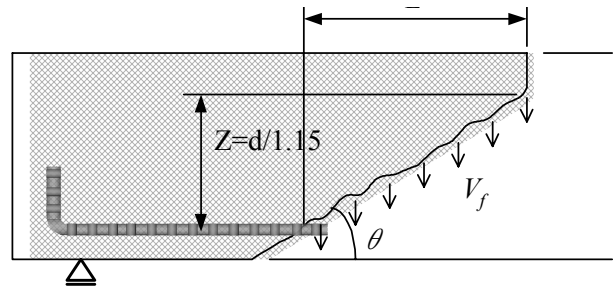


図-9 トラス理論による繊維シートのせん断

からだと考えられる。そのため、繊維による補強効果を発揮するためには、繊維の抜け出しがなく繊維に引張力を伝える能力の高い樹脂を使用することが有効であることが示唆される。

(2) 耐力算定法に関する検討

表-4に、トラス理論により算出した繊維シートの受け持つせん断耐力の計算結果を示す。理論値より求めたせん断耐力 $V_{u,cal}$ 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。

表-4 RCはりの載荷試験結果

供試体	圧縮強度 $f'_c(\text{N/mm}^2)$	実験値(kN)			理論値(kN)		$V_{u,exp} / V_{u,cal}^*$
		$V_{c,exp}$	$V_{u,exp}$	$V_{f,exp}$	$V_{c,cal}$	$V_{f,cal}$	
A-L1	40.2	50.9	54.75	3.85	47.4	12.02	0.92
(A-L2)	42.8	50.9	74.4	23.5	48.4	20.17	(1.09)
A-L1S1	40.2	50.9	67.1	16.2	47.4	13.48	1.10
A-L1S2	40.2	50.9	64.2	13.3	47.4	15.39	1.02
(E-S1)	44.6	50.9	75.55	24.65	49.0	23.35	(1.04)

* : $V_{u,cal} = V_{c,cal} + V_{f,cal}$

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

ここに、

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

ここで、 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 : セン断スパン(mm), b_w : 幅(mm)

$V_{f,cal}$ は図-9に示すように、発生したひび割れ面に対し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。

$$V_f = 2 \cdot P_{fb} \cdot L \quad (3)$$

ここで、 P_{fb} : 繊維シートの単位幅当たりの最引張強度(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。

仮定の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 $V_{f,exp}$ は、繊維補強を施したRCはりの終局荷重からPlain供試体の終局荷はりの耐力の実験値をせん断耐力算定式で算重を差し引いた値である。

実験値と理論値を比較すると、最大で1割程度の違いがあるものの、いずれにおいても概ね一致している。これより、トラス理論により算出したせん断ひび割れ面で繊維シートが受持つせん断力 $V_{f,cal}$ が、実験値から求めたせん断耐力 $V_{f,exp}$ を、多少の誤差があるものの妥当な精度で評価でき

るといえる。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) ガラス連続繊維はガラス短繊維を積層化したものよりも効果的に補強できることを確認した。
- 2) 短繊維と連続繊維のハイブリッド化による補強効果には大きな改善は確認できなかった
- 3) 繊維シートの受け持つせん断耐力は、せん断ひび割れ面で繊維シートが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。
- 4) 繊維による部材補強には、繊維に引張力を伝達させる能力の高い結合樹脂を使用することが有効であることを示した。

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) 二羽淳一郎ほか : 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) 趙唯堅ほか : 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