

論文 GFRP シートの付着性状と可視性に関する基礎研究

後藤 慶次^{*1,2}・山上 大智^{*2}・佐藤 靖彦^{*3}

要旨：施工後もコンクリート表面を目視で確認できる補強材料として、ガラス繊維（GFRP）シートに予め樹脂を含浸して硬化させた GFRP シートを開発し、その付着性状を評価した。付着強度試験における GFRP シートの界面はく離破壊エネルギーおよび最大付着応力は約 3 倍の剛性を有する炭素繊維シートと同程度であった。GFRP シートは、载荷前は透明性を有し、コンクリート表面が透けて見えるが、はく離が進行すると白濁化し、シートの状態を可視化することができた。引張試験の結果、载荷による GFRP シートの白濁化は、引張ひずみが増加することで発現し、白濁化の度合いは樹脂の種類に依存することが明らかとなった。

キーワード：GFRP シート、付着強度、界面はく離破壊エネルギー、可視性、白濁化

1. はじめに

連続繊維シート接着工法とは、炭素繊維シートやアラミド繊維シートなどを補強材料とし、構造物の表面に接着して薄い補強層を形成することで、構造物を補強する工法である。連続繊維シート接着工法は、高強度、高耐久性、軽量、簡便な施工性といった特徴から、阪神淡路大震災以降、既存コンクリート構造物などの補強技術として注目を集め、近年最も普及が図られている補強工法である。

従来の連続繊維シート接着工法には、その補強効果を最大限に発揮するため、部材耐力の補強効果を重視した高強度、高弾性率の炭素繊維シートやアラミド繊維シートが用いられてきた。しかしながら、不透明である炭素繊維シートやアラミド繊維シートは、施工後は下地のコンクリートを目視で確認できず、インフラ構造物の維持管理において、経時的にコンクリート表面の変状やシートの接着・はく離状態を追跡しにくいという課題がある。

筆者らは、上述のような課題を解決するために、ガラス繊維シートに予め樹脂を含浸して硬化させたガラス FRP シート（以下、GFRP シート）（図-1）と、透明な接着樹脂を組み合わせることで、施工後もコンクリート表面が目視で確認できる可視化補強材料を開発した。本研究では、この GFRP シートの付着性状と可視性の基本特性を把握するために実験的に検討した。

2. GFRP シートと可視化補強材料について

GFRP シートは、2 方向平織の耐アルカリガラス繊維シートにアクリル系樹脂（以下、含浸樹脂）を含浸し、硬化させて製作した。含浸樹脂は透明かつガラスと近い屈折率（ $n_D = 1.56$ ）を有するため、フィラメント間の空隙を含浸樹脂で埋められた GFRP シートは、フィラメン

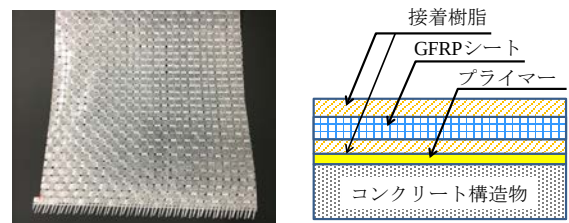


図-1 GFRP シート

図-2 可視化補強材料

ト界面での光散乱が減少して透明性が向上する。

コンクリート構造物に GFRP シートを接着するためのプライマーおよび接着樹脂には、主剤成分であるビスフェノール A 型変性エポキシ樹脂と、硬化剤成分である末端にアミノ基を有する変性ポリアミドアミンの 2 液からなる常温硬化型の透明なエポキシ樹脂を用いた。コンクリート表面にプライマーを塗布し、接着樹脂で GFRP シートを接着することで、施工後もコンクリート表面が目視で確認できる可視化補強材料が完成する（図-2）。

GFRP シートは、施工現場でフィラメント間に接着樹脂を含浸させる必要がなく、接着樹脂は GFRP シートの開口部から空気が容易に排出されるので、連続繊維シートや FRP 板を貼り付ける場合に比べて接着界面に気泡を巻き込む恐れが少ない。また、含浸のために金属ローラーなどで繊維シートをしごく必要がないため、フィラメントを傷つけにくいといった利点もある。

3. GFRP シートの付着性状

3.1 二面接着両引付着試験の供試体

付着強度試験は、既往の研究^{1),2),3),4)}に従い、二面接着両引付着試験を実施した。「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)」(JSCE-E543-2013)に準拠し、

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 デンカ (株) エラストマー・インフラソリューション部門インフラソリューション研究部

*3 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学) (正会員)

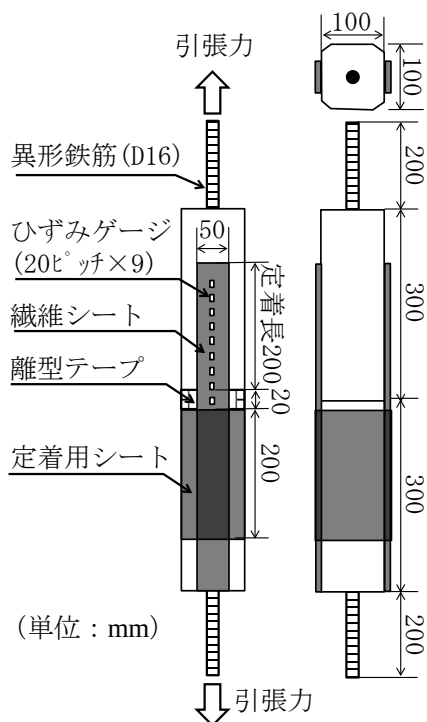


図-3 二面接着両引付着試験の供試体

図-3 に示す供試体 (A 型供試体) を作製して炭素繊維シートおよび GFRP シートとコンクリートの付着試験を行い、付着性状の相互比較を行った。

本試験に使用したシートと樹脂の材料特性を表-1 と表-2 に示す。なお、GFRP シートの材料特性は、基材として用いた耐アルカリガラス繊維シートのメーカー公称値 (カタログ値) である。

供試体は、引張加力用の異形鉄筋 (D16) を挿入したコンクリートブロック 2 体を突き当てて、その表裏面に、シートを接着して作製した。コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度は 52.3 N/mm^2 であった。コンクリートの接着面は、ディスクサンダーで下地処理した後、プライマーを塗布 (0.15 kg/m^2) した。炭素繊維シートは、接着樹脂 (0.6 kg/m^2) を塗布してシートを貼り付けた後に金属ローラーで接着樹脂を含浸、脱泡しながら一体化した。GFRP シートは接着樹脂 (0.5 kg/m^2) をゴムベラで塗布してシートを貼り付けることで一体化した。なお、1 方向の炭素繊維シートは繊維方向が載荷方向と一致するように貼り付け、2 方向である GFRP シートの縦糸 (長さ方向) と横糸 (幅方向) は同じであるが、本試験では縦糸が載荷方向と一致するように貼り付けた。

各シートの幅は 50 mm とし、定着長は 200 mm とした。ブロックの連結部には幅 20 mm の離型テープ (テフロンテープ) を貼り付けて非接着部を設けた。

載荷は、250 kN 万能試験機を用いて供試体両端の鉄筋を把持し、クロスヘッドの変位制御 (炭素繊維シートの

表-1 シートの材料特性 (カタログ値)

シート	GFRP シート	炭素繊維 シート
繊維の種類	耐アルカリ ガラス繊維 2方向平織	高強度 炭素繊維 1方向
目付量 g/m^2	650	200
比重	2.8	1.8
厚さ (mm)は1方向	0.232 (0.116)	0.111
引張強度 N/mm^2	1,500	3,400
ヤング係数 kN/mm^2	74	230
引張剛性 tE kN/mm	8.6	25.5

表-2 樹脂材料の材料特性 (実測値)

種類	材質	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
プライマー	エポキシ	45	-
接着樹脂	エポキシ	50	2.8
含浸樹脂*1	アクリル	46	2.2

*1 GFRPのみに使用

載荷速度: 3.0 および 0.3 mm/min で各 1 体ずつ、GFRP シートの載荷速度: 0.3 mm/min $\times$ 2 体) により単調載荷した。荷重は試験機内蔵のロードセルにより計測した。シート上にひずみゲージ (ゲージ長 5 mm) をブロックの連結部から 20 mm ピッチで貼り付けてひずみを計測した。

3.2 はく離性状と界面はく離破壊エネルギー

付着試験結果を表-3 に示す。全ての試験体が片面の試験面のみはく離して破壊した。図-4 に各試験体のはく離面の状態の一例を示す。炭素繊維シートの破壊性状はコンクリート表層はく離したのに対して、GFRP シートの破壊性状は、主に GFRP シートと接着樹脂の界面破壊であった。

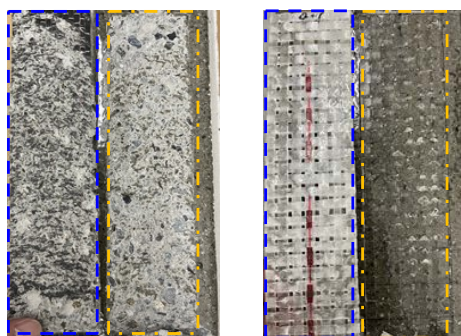
界面はく離破壊エネルギー G_f (N/mm) は、JSCE-E543-2013 に準じて式(1)を用いて算定した³⁾。

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{8b^2 \cdot E_f \cdot t_f} \quad (1)$$

ここに $P_{\max}$ は最大荷重 (N), b , E_f および t_f はそれぞれシートの幅 (mm), ヤング係数 (N/mm^2), 厚さ (mm) である。

表-3 二面接着両引付着試験の結果

シート	供試体	載荷速度 (mm/min)	$P_{\max}$	G_f
			実験値 (kN)	実験値 (N/mm)
GFRP シート	G-1	0.3	12.9	0.96
	G-2		11.9	0.81
炭素繊維 シート	C-1	3.0	23.7	1.10
	C-2	0.3	22.0	0.95



(a)炭素繊維シート(C-2) (b)GFRPシート(G-1)
 [---]シートはく離面 [---]コンクリートはく離面

図-4 供試体のはく離面の状態

GFRP シートを用いた試験体の最大荷重の平均値は 12.3 kN であり、炭素繊維シートと比較して小さかったが、界面はく離破壊エネルギーは同程度であった。

金久保らは、連続繊維シートの種類（炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維）を変えた二面接着両引付着試験（シート幅 50 mm、定着長 300 mm、載荷速度 1.0mm/min）を実施し、繊維の種類に関わらずシート剛性が増すと最大荷重は増大することを報告している⁴⁾。金久保らの試験におけるガラス繊維シートの最大荷重は 8.1 kN であり、GFRP シートを用いた本試験結果は、この値より約 1.5 倍の高い値を示した。なお、金久保らの試験体のシート剛性は 3.5 kN/mm であり、本試験で用いた GFRP シートの剛性はその約 2.5 倍の大きさである。

3.3 GFRP シートのひずみ分布と付着応力分布

図-5 に各供試体の各荷重ステップにおける軸方向のひずみ分布の一例を示す。炭素繊維シートのひずみ分布（図-5(a)）は、接着端部（＝ブロック連結部）からひずみ分布が水平となるはく離領域に続いて、軸方向にひずみが減少する付着伝達区間が認められ、最大荷重時の有効付着長は C-1 が 80mm、C-2 が 60 mm 程度であった。これに対して、GFRP シートの最大荷重時のひずみ分布（図-5(b)）は、接着端部よりもひずみが大きくなる箇所が複数あり、はく離領域のひずみ分布が一定にならなかった。有効付着長は G-1、G-2 とともに 40 mm 程度であった。

金久保らは、等価付着ストレスブロックによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式として式(2)を提案している⁵⁾。

$$L_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot s_e}{k_e}} \quad (2)$$

ここに L_e は有効付着長(mm)、 λ_f はシート付着指標(mm) $\lambda_f = t_f \cdot E_f / \tau_{b,max}$ である。また、 s_e は有効付着域の局所すべり量 0.354 mm、 k_e は有効付着長の EBSD（等価付着ス

トレスブロック）応力係数で 0.428 である。 $\tau_{b,max}$ は局所最大付着応力(N/mm²)であり式(3)で表される。

$$\tau_{b,max} = 3.5 \cdot \sigma_b^{0.19} \quad (3)$$

ここに σ_b はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)である。

式(2)より炭素繊維シートと CFRP シートの有効付着長 L_e を算定するとそれぞれ 75 mm、44 mm となり、実験値と概ね近い値となった。

次に各供試体の各荷重ステップにおけるひずみから算定した付着応力の軸方向分布の一例を図-6 に示す。付着応力は隣接する 2 点のひずみゲージの測定値を用いて、式(4)から算定した³⁾。

$$\tau_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

$$P_i = E_f \cdot \varepsilon_i \cdot t_f \cdot n_f$$

ここで、 τ_i は区間 i の付着応力(N/mm²)、 P_i は FRP シート端部から i 番目のひずみゲージの値より算出した FRP シートの分担荷重(N)、 x_i は FRP シート端部から i 番目のひずみゲージまでの距離(mm)、 ε_i は FRP シート端部から i 番目のひずみゲージのひずみである。

炭素繊維シートの付着応力分布（図-6(a)）は、はく離発生後、はく離先端位置から供試体の終端側に 60 mm 程度の範囲で山形の応力分布を示し、はく離領域が終端側に広がるのに従って、山形の応力分布及び応力のピークが終端側に移動している。最大付着応力は、C-1 が 6.0 N/mm²、C-2 が 4.3 N/mm² であった。これに対して、GFRP シートの付着応力分布（図-6(b)）は、ひずみ分布（図-5(b)）に対応して、応力のピークが複数ある分布を示した。最大付着応力は、G-1 が 4.3 N/mm²、G-2 が 3.8 N/mm² であり、同じ載荷速度で比較すると、炭素繊維シート（C-2）の値と同程度であった。

金久保らの報告⁴⁾によれば、最大付着応力は、繊維シートの剛性に依らず、3～10 N/mm² の範囲になるとされており、本試験結果もその範囲に入っている。また、最大付着応力はコンクリートの圧縮強度に依存し、上述の式(3)で計算されるとしている。本試験に用いた供試体の圧縮強度から式(3)によって計算した最大付着応力は 7.4 N/mm² であり、本試験結果はこの値より小さい。この差異が生じた理由を現時点では明らかにできないが、試験条件（付着長や載荷速度）の違いや、破壊性状の違いによる影響などが考えられる。

3.4 付着強度試験における GFRP シートの外観変化

図-7 に各荷重ステップにおける GFRP シートを用いた供試体の外観写真を示す。載荷前は、GFRP シートは透明であり、コンクリート表面および鉛筆で描いた黒線（幅 0.5 mm）を目視で確認することができる。

載荷後は、はく離の進行に伴って、GFRP シートの縦糸部と横糸部が白濁化し、不透明に変化していく様子が

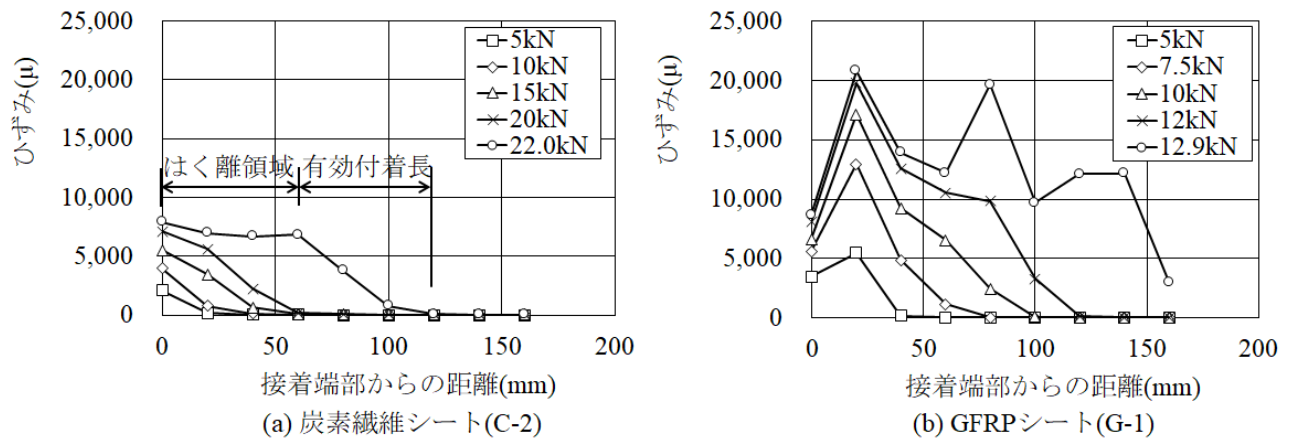


図-5 各供試体の軸方向のひずみ分布

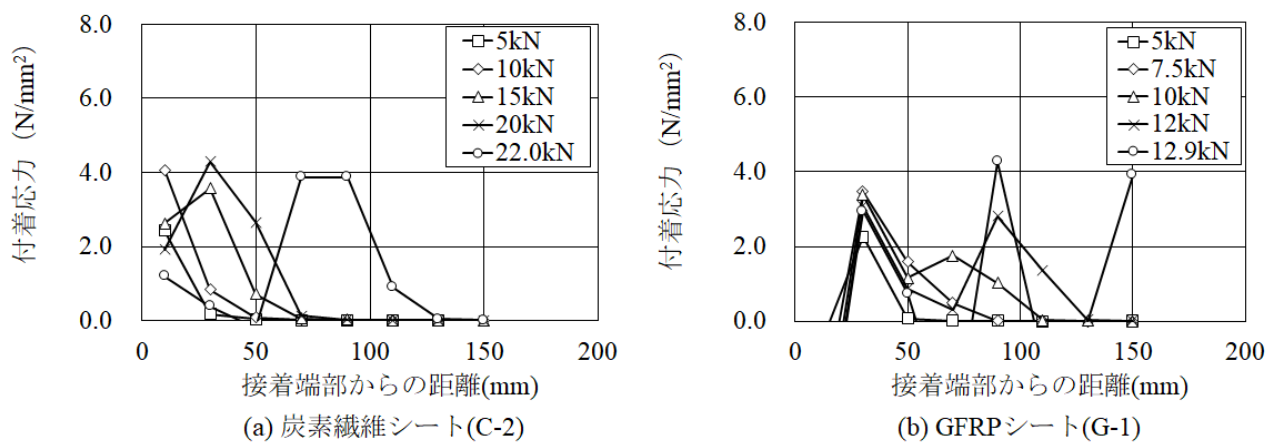


図-6 各供試体の軸方向の付着応力分布

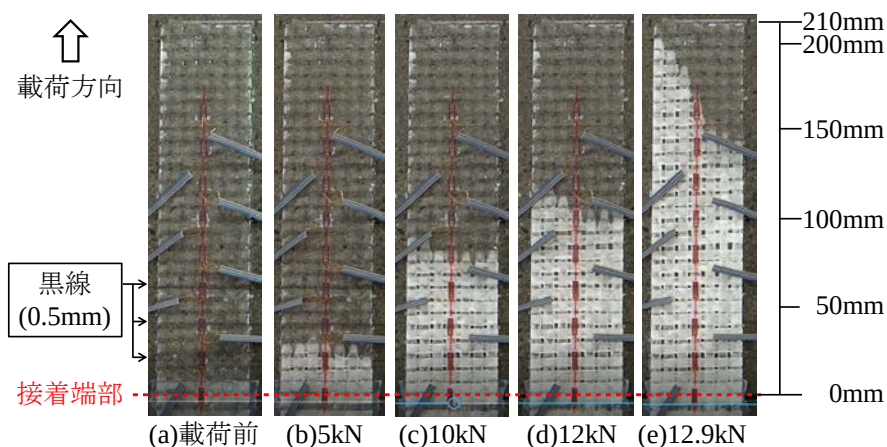
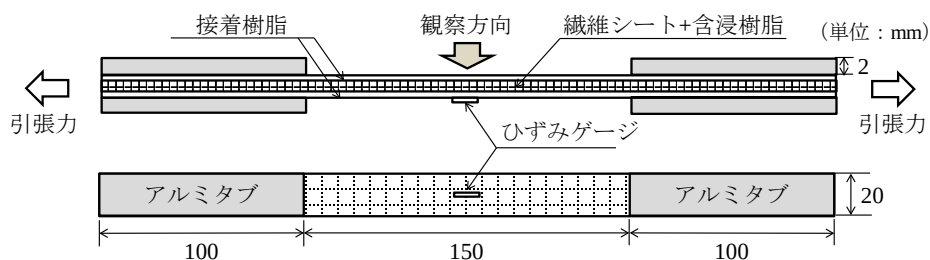


図-7 各荷重ステップにおける GFRP シートの外観 (G-1)

確認された。上述の GFRP シートのひずみ分布 (図-5(b)) において、平坦部を示した 5, 12 kN のひずみ分布から推定されるはく離領域は、それぞれ 20, 80 mm であり、図-7 における白濁化区間と概ね一致した。また、荷重 10kN (図-7(c)) 辺りまでは、GFRP シートのはく離が横一線で進行したが、荷重 12 kN (図-7(d)) を越えたあたりから、はく離の進行に偏りが発生し、最大荷重時に、

最もはく離が進行した縦糸部のはく離がシート末端に到達している様子 (図-7(e)) が確認された。GFRP シートのひずみ分布 (図-5(b)) に照らし合わせると、最大荷重時にひずみ分布が一定にならなかったのは、このはく離の進行の偏りに因る可能性が考えられた。出雲ら⁹⁾は、2 方向の炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートを用いた二面接着両引付着試験においてもひずみ分布が一定に



図－8 引張試験の試験片

ならない結果を報告し、この結果は、シートがはく離するとき、局部的なばらつきによりシートが部分的にはく離し、シートがはく離していない部分に応力集中があったのではないかと考察している。今回の付着強度試験における GFRP シートの外観変化は、この考察を裏付ける結果であり、GFRP シートを用いた可視化補強材料が、補強後のコンクリート表面およびシートの接着・はく離状態の観察（可視化）に有用であることを示している。

また、付着伝達区間においてもシートが白濁化していることが確認された。これは、白濁化がシートのはく離以外の原因によって起きていることを示唆する結果であり、この要因を検証するために GFRP シートの引張強度試験を実施した。その結果を次章で説明する。

4. GFRP シートの引張特性

4.1 GFRP シートの引張強度と破壊性状

引張強度試験は、JIS A1191 (B 法) を参考に、図－8 に示す試験体を作製して炭素繊維シートおよび樹脂構成別の GFRP シートの引張試験を行った。荷重は 300 kN 万能試験機を用いて試験片の両端を把持し、クロスヘッド

の変位制御（載荷速度：3.0 mm/min）により単調載荷した。荷重は、試験機内蔵のロードセルにより計測した。試験片の中央部に、ひずみゲージ（ゲージ長 5 mm）を貼り付けてひずみを計測した。

表－4 に本試験における試験体の材料構成と試験結果を示す。試験片数は各 3 本とし、引張強度、ヤング係数、破断ひずみについて平均値を記載した。本試験に使用したシート材料と樹脂材料の材料特性は前述の付着強度試験のときと同じである。ここで各シートの力学特性は、繊維の目付量と比重から樹脂を含まない連続繊維のみの断面積から算定した。各シートの応力-ひずみ関係は、原点から終局時までほぼ直線で降伏現象を示さず脆性的に破断した。

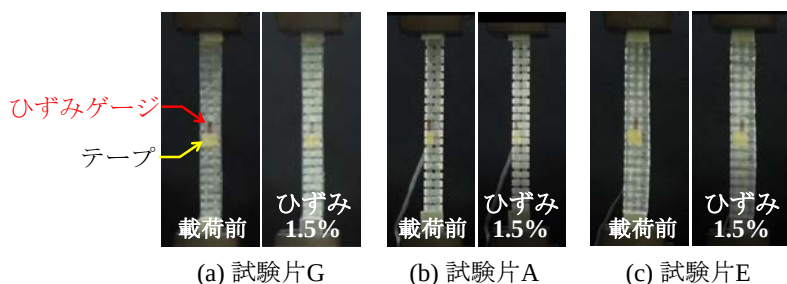
図－9 に破断後の試験片の写真を示す。炭素繊維シート (C) は、シート全体が破断した。GFRP シートの樹脂構成別で比較すると、GFRP シートをエポキシ系接着樹脂で固めた試験片 (G) と含浸樹脂を介さずにガラス繊維シートを直接エポキシ系接着樹脂で含浸して板状に固めた試験片 (E) は、タブ付近でシートが破断した。一方で含浸樹脂のみの GFRP シート単体の試験片 (A) はシー

表－4 引張試験の結果

供試体	樹脂構成			試験結果		
	繊維シート	含浸樹脂	接着樹脂	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	破断ひずみ (%)
C	炭素	-	エポキシ	4,348	266.7	1.6
G	ガラス	アクリル	エポキシ	1,744	89.8	1.9
A	ガラス	アクリル	-	1,632	84.7	1.8
E	ガラス	-	エポキシ	1,643	90.6	1.8



図－9 引張試験後の試験片



図－10 引張試験時の GFRP シート外観

ト全体が破断した。

4.2 引張強度試験における GFRP シートの外観変化

図-10 に GFRP シートの引張強度試験における試験片の外観写真を示す。GFRP シートをエポキシ系接着樹脂で固めた試験片 (G) は、載荷前は半透明であり、試験片の裏面に貼り付けられたひずみゲージ (赤色) とテープ (黄色) を目視で確認することができる。載荷後は、荷重とひずみの増加に伴って、付着強度試験のときと同様にガラス繊維の縦糸部と横糸部が白濁化し、不透明に変化する様子が確認された。

また、樹脂構成別に比較すると、含浸樹脂のみの GFRP シート単体の試験片 (A) (図-10(b)) は、荷重とひずみの増加に伴って、ガラス繊維の縦糸と横糸が白濁化し、不透明に変化した。ガラス繊維シートを直接エポキシ接着樹脂で含浸した試験片 (E) (図-10(c)) は、載荷前後でシートの外観はほぼ変化しないという違いがあった。以上の結果から、載荷による GFRP シートの白濁化は、シートに引張ひずみが発生することで発現し、その白濁の度合いは樹脂の種類に依存することが明らかとなった。すなわち、シートへの載荷によって、ガラス繊維と樹脂との界面での付着破壊がおき、微小な空隙が発生したり、ガラス繊維や樹脂が微視的な破壊 (マイクロクラック) が発生したりすることで、光散乱が起きている可能性が考えられる。このメカニズムの解明は今後の課題である。

5. まとめ

GFRP シートの付着性状と可視性について実験的に検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 付着強度試験における GFRP シートの最大荷重は、炭素繊維シートと比較して小さいが、界面はく離破壊エネルギーは同等であった。GFRP シートの破壊性状は、GFRP シートと接着樹脂の界面破壊であり、炭素繊維シートの破壊性状 (コンクリートの表層破壊) とは異なる破壊性状を示した。
- (2) GFRP シートのひずみ分布は、はく離領域のひずみが一定にならない。GFRP シートの最大付着応力は、約 3 倍の剛性を有する炭素繊維シートと同程度であった。
- (3) 載荷前の GFRP シートは透明性を有し、コンクリート表面が透けて見えるが、載荷によってはく離が進行すると、横糸部と縦糸部とが白濁化し、不透明に変化した。

(4) GFRP シートのはく離の進行は、ある荷重までは、横一線で進行したが、途中から、はく離の進行に偏りが発生し、最終的に、最もはく離が進行した縦糸のはく離がシート末端に到達した直後に、シート全体のはく離に至った。

(5) GFRP シートの引張試験においても、載荷前はシートの裏面が透けて見えるが、載荷すると、付着強度試験と同様に横糸部と縦糸部が白濁化し、不透明に変化した。載荷による GFRP シートの白濁化は、シートに引張ひずみが発生することで発現し、その白濁の度合いは樹脂の種類に依存する。

謝辞

本研究の遂行にあたり、耐アルカリガラス繊維シートを提供いただいた日本電気硝子株式会社に謝意を表す。また、付着試験を行うにあたり、早稲田大学佐藤研究室の尾崎允彦氏、守尾昂紘氏、渡辺涼太氏に尽力いただいた。厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 佐藤靖彦, 浅野靖幸, 上田多門: 炭素繊維シートの付着機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.71-87, 2000.5
- 2) 小林朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋: FRP ストランドシートの材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.3, pp.1561-1666, 2008.7
- 3) 小林朗, 尾崎允彦, 佐藤靖彦, 荒添正棋, 立石晶洋, 小森篤也: 高伸度弾性樹脂を用いて接着した FRP シートとコンクリートの付着挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.855-867, 2020.3
- 4) 金久保利之, 中場和正, 吉田智基, 吉澤弘之: 連続繊維シートとコンクリートの局所付着応力-すべり量関係の提案, コンクリート工学論文集, 第 12 巻第 1 号, pp.33-42, 2001.1
- 5) 金久保利之, 古田智基, 福山洋: 等価付着ストレスブロックによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式, コンクリート工学論文集, 第 12 巻第 3 号, pp.27-37, 2001.9
- 6) 出雲健司, 佐伯昇, 大沼博志: 連続繊維シートとコンクリート付着強さの算定, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.167-178, 2000.2