

論文 透明な GFRP シートのはく離性状と白濁化に関する基礎研究

後藤 慶次*1*2・李 権哲*2・山上 大智*3・佐藤 靖彦*4

要旨:本研究では、開発した GFRP シートをコンクリート表面に接着した付着試験を実施し、繊維束の方向や、はく離前後におけるシートの白濁状態に着目した評価を行うことで、GFRP シートのはく離と白濁化の関係について考察した。最大付着応力前（はく離前）は、荷重の増加に応じて経糸のみが白濁化し、最大付着応力以降（はく離後）は、緯糸が白濁化することが明らかとなった。接着部と非接着部を意図的に設けたモデル供試体による付着試験を実施し、GFRP シートは、はく離前後で繊維束に作用する応力の方向が変わり、その結果、白濁化する繊維束の方向も変わることが推定された。

キーワード: GFRP シート, 付着試験, はく離性状, 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、アラミド繊維シート、ガラス繊維シートなどの連続繊維シートを補強材料とし、構造物の表面に接着して補強層を形成することで、構造物を補強・補修する工法である。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、1995年の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普及し、実績を積み重ねてきた。一方で、阪神淡路大震災から約 30 年が経った近年においては、補強されたコンクリート構造物の維持管理の必要性が高まっている。

コンクリート構造物の維持管理においては、補修・補強などの対策後も継続的な点検・診断により構造物の健全度を評価し、必要に応じて対策を行うメンテナンスサイクルが必要である。補強用の連続繊維シートとして最も普及している炭素繊維シートやアラミド繊維シートは、不透明であるため、施工後に繊維シートで覆われたコンクリート面を視覚的に確認することはできない。

そのため、打音検査が一般的に行われている¹⁾が、今後、コンクリート構造物の維持管理のためには、新しい点検方法やモニタリング方法の開発が重要な課題となっている²⁾。

光透過性を有するガラス繊維シートは、施工後もコンクリート表面の状態を視覚的に確認できることから、点検しやすく維持管理に適した材料である。実際に、トンネル覆工コンクリートのはく離防止対策として、ガラス繊維シートを用いたはく離防止工法が盛んに実施されている。しかしながら、ガラス繊維シートは、弾性係数が小さく、補強効率が劣るとして補強材料としての実績は少ない。既往の研究にて、構造物の補強に必要な剛性を

得るために、ガラス繊維シートの積層化、炭素繊維シートとの複合化などが検討^{3),4)}されているが、これらの手法においてはガラス繊維シートの長所である透明性が犠牲となる。

筆者らは、上述のような課題解決の一つの手段として、ガラス繊維シートに予め透明な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）を開発した。開発した GFRP シートは、透明な接着樹脂と組み合わせることで、高い透明性を有し、施工後もコンクリート表面が目視で確認できる。先行研究にて、GFRP シートをコンクリートに接着した付着試験を実施し、はく離によって GFRP シートが白濁化すること、また、GFRP シート単体の FRP 引張試験を実施し、引張応力に応答して、引張軸に直交するシートの緯糸が徐々に白濁化することを報告した^{5),6)}。

この引張応力やはく離に応じてシートが白濁化するという特性を利用して、GFRP シートの応力状態やはく離状態を可視化することができれば、補強・補修後もコンクリート構造物の健全度を簡易に把握する手法として活用できるものと考えられる。

本研究では、開発した GFRP シートをコンクリート表面に接着した付着試験を実施し、繊維束の方向やはく離の前後におけるシートの白濁状態に着目した評価を行うことで、GFRP シートのはく離性状と白濁化の関係について考察した。

2. GFRP シートについて

GFRP シートは、2 方向平織の耐アルカリガラス（以下、AR ガラス）繊維シート（目付量 650g/m²）に予めアクリル系樹脂（以下、含浸樹脂）を含浸し、硬化させて

*1 デンカ（株）エラストマー・インフラソリューション部門特殊混和部（正会員）

*2 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻

*3 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

*4 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)

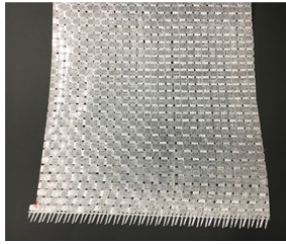


写真-1 GFRP シートの外観

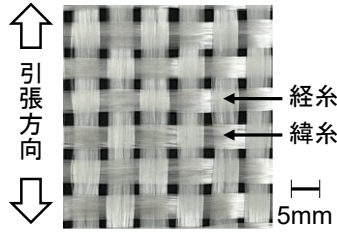


写真-2 AR ガラス繊維シート

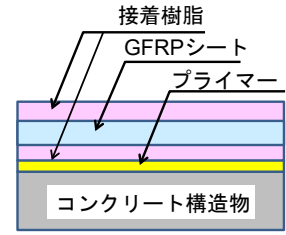


図-1 可視化補強材料の構成

表-1 ガラス繊維シートの材料特性（メーカー公称値）

繊維の種類	2方向平織 耐アルカリ ガラス繊維	
目付量	g/m ²	650
密度	kg/m ³	2,800
厚さ ()は1方向	mm	0.232 (0.116)
引張強度	N/mm ²	1,500
弾性係数	kN/mm ²	74

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)	弾性係数 (kN/mm ²)
接着樹脂	エポキシ	50	2.8
含浸樹脂	アクリル	46	2.2

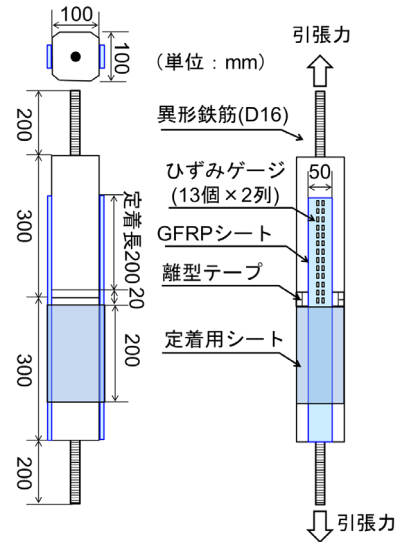


図-2 二面接着両引付着試験の供試体の模式図

作製した。GFRP シートの外観写真を写真-1 に示す。AR ガラス繊維シートの経糸と緯糸はともに約 1,000 本のフィラメント（直径約 19 μ m）の束（以下、繊維束）である。本稿では便宜上、引張軸方向の繊維束を「経糸」、引張軸に対して直角方向の緯繊維束を「緯糸」という。経糸と緯糸は幅が約 5mm であり、交互に浮き沈みさせて織られている。また、隣り合う糸の間隔は 1~2mm 程度の隙間がある（写真-2）。

含浸樹脂は透明かつガラスと近い屈折率 (=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。

コンクリート構造体に 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（以下、接着樹脂）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補強層（図-1）が完成する。本試験に使用したガラス繊維シートの材料特性（メーカー公称値）と樹脂材料の材料特性（実測値）を表-1 および表-2 に示す。

3. GFRP シートの付着性状

3.1 付着試験

付着試験は「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）に準拠して二面接着両引付着試験を行った。図-2 に作製した供試体の模式図を示す。供試体は、GFRP シートを全面接着した供試体（以下、供試体 A）と、意図的に接着部と非接着部を設けたモデル供試体（以下、供試体 P）の 2 種類について各 2 体ずつ作製した。供試体の作製は、コンクリートの接着面を、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/m²）し、接着樹脂（0.5 kg/m²）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、供試体 P の非接着部には、コンクリート表面に予め片面粘着層付離型フィルム（厚さ 200 μ m）を貼り付け、その上から接着樹脂を塗布して GFRP シートを貼り付けた。

図-3 に作製した各供試体における GFRP シートおよびひずみゲージの貼り付け位置の模式図を示す。供試体 P の表面側には 14mm 毎に 14 領域（S1~S14）、裏面側には 50mm 毎に 4 領域（R1~R4）に区分し、非接着部と接着部が交互になるように GFRP シートを貼り付けた。ひずみゲージは、経糸と緯糸の交差部に等間隔（緯糸 2 本

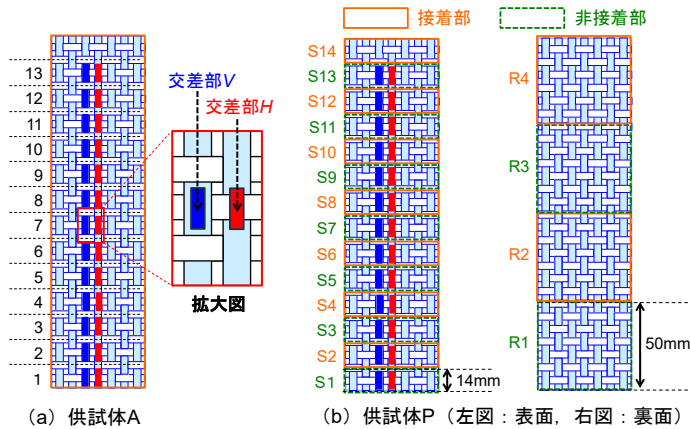


図-3 GFRPシートとひずみゲージの貼り付け位置の模式図

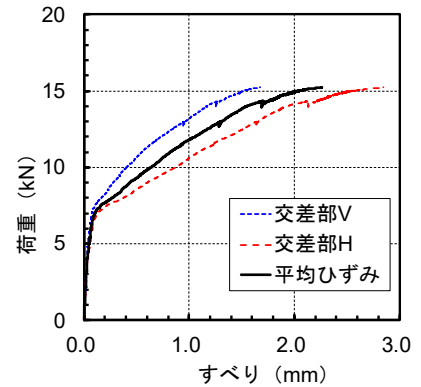


図-4 荷重-すべり関係

表-3 付着試験結果

供試体		最大荷重 (kN)
全面接着	A1	15.2
	A2	16.4
部分接着	P1	12.6
	P2	12.8

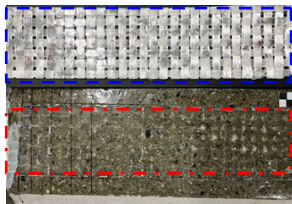


写真-3 付着試験後のはく離状態

毎)でひずみゲージ(ゲージ長5mm)を13箇所×2列に貼り付けた。経糸と緯糸の交差部のうち経糸が表面側になる交差部(以下、交差部V)と、緯糸が表面側になる交差部(交差部H)のひずみを計測し、隣り合う2つのひずみの平均値を算出した。

荷重は、250kN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(荷重速度:0.3mm/min)により単調荷重した。荷重は試験機内蔵のロードセルにより計測した。

3.2 荷重-すべり関係と破壊性状

図-4に供試体Aの荷重-すべり(接着端部)の関係の一例(供試体A1)を、表-3に付着試験結果を示す。なお、すべりは、既往の研究に従い、GFRPシートにおけるひずみ(交差部V、交差部H、平均ひずみ)をそれぞれ積分して算出した⁷⁾。交差部Vと比較して交差部Hの方がすべり(ひずみ)は大きく、これは先行研究で実施した引張試験の結果と同様であった⁶⁾。写真-3に試験後のGFRPシートのはく離面の状態の一例(供試体A1)

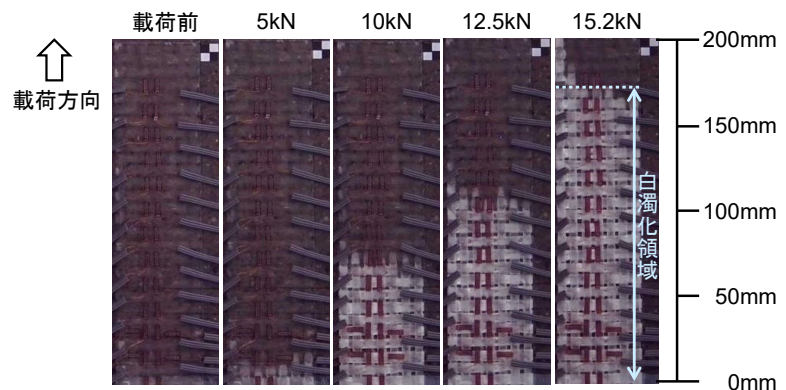


写真-4 各荷重ステップにおけるGFRPシートの外観写真

を示す。GFRPシートの破壊性状は、全てGFRPシートと接着樹脂の界面で破壊しており、GFRPシートの経糸や緯糸の破断は確認されなかった。

3.3 ひずみ分布と白濁化の関係

写真-4に各荷重ステップにおけるGFRPシートの外観変化の一例(供試体A1)を示す。荷重前のGFRPシートは透明であり、コンクリートの表面を目視で確認することができる。荷重後は接着端部からGFRPシートが徐々に白濁化し、荷重の増加に伴って白濁化が進行した。図-5に最大荷重時におけるGFRPシートの軸方向のひずみ分布(交差部V、交差部H、平均ひずみ)の一例(供試体A1)を示す。ひずみ分布は、接着端部(=ブロック連結部)からひずみ分布が凡そ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領域が認められた。写真-4と図-5を照らし合わせると、ひずみ分布におけるはく離領域および付着伝達領域と、GFRPシートの白濁化領域は概ね一致した。

3.4 付着応力分布と白濁化の関係

ここで、GFRPシートのはく離状態と白濁化の関係を明らかにするために、GFRPシートの特定領域(領域4)に着目して、付着応力分布と、経糸および緯糸の外観変

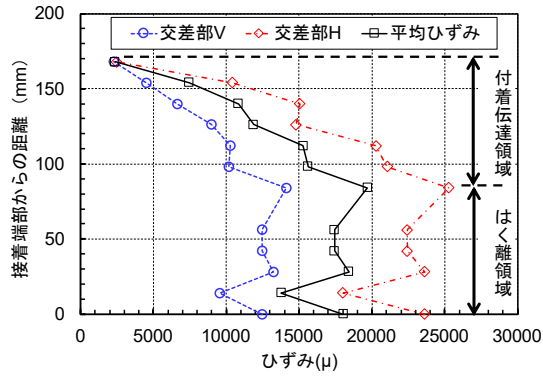


図-5 GFRP シートのひずみ分布 (供試体 A1)

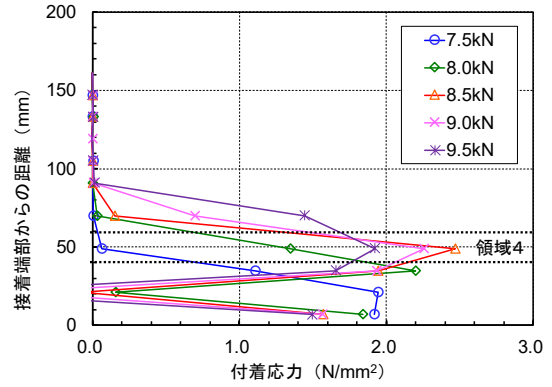


図-6 GFRP シートの付着応力分布 (供試体 A1)

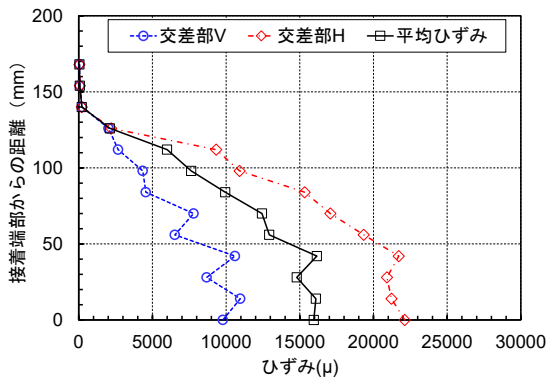


図-7 GFRP シートのひずみ分布 (供試体 P2)

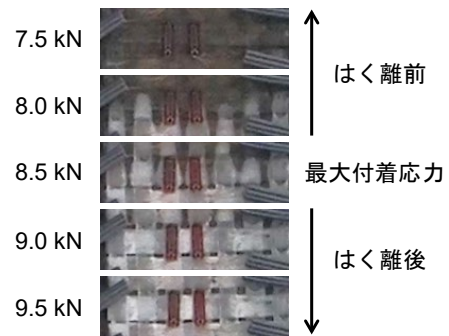


写真-5 各荷重ステップにおける外観写真 (領域 4)

化 (白濁化) について評価した。図-6 に各荷重ステップ (7.5~9.5 kN) における付着応力分布の一例 (供試体 A1) を示す。なお、付着応力は既往の研究に従い、隣接する 2 点のひずみゲージの測定値 (平均ひずみ) を用いて式(1)から算定した⁷⁾。

$$\tau = t_f \cdot E_f \cdot \frac{d\epsilon_f}{dx} \quad (1)$$

ここで、 τ は付着応力(N/mm²)、 E_f は GFRP シートの弾性係数(N/mm²)、 t_f は GFRP シートの厚さ(mm)、 $d\epsilon_f/dx$ はひずみ分布曲線の傾きである。

図-6 の付着応力分布から、領域 4 においては荷重 8.5 kN のときに付着応力が最大となり、はく離が開始することわかる。つまり、8.5 kN より前は、はく離前であり、8.5 kN 以降ははく離後となる。写真-5 に 7.5~9.5 kN におけるシートの拡大写真 (領域 4) の一例 (供試体 A1) を示す。7.5 kN までは透明であるが、8.0 kN から経糸の白濁化が始まり、8.5 kN までは経糸のみが白濁化しているのがわかる。その後、9.0 kN 以降は緯糸も白濁化しているように見える。すなわち、付着試験における GFRP シートは、はく離前は経糸のみが白濁化し、はく離後に緯糸が白濁化することが明らかとなった。

ここで、はく離前は経糸のみが白濁化し、はく離後に緯糸が白濁化するのかについて明らかにするため、GFRP

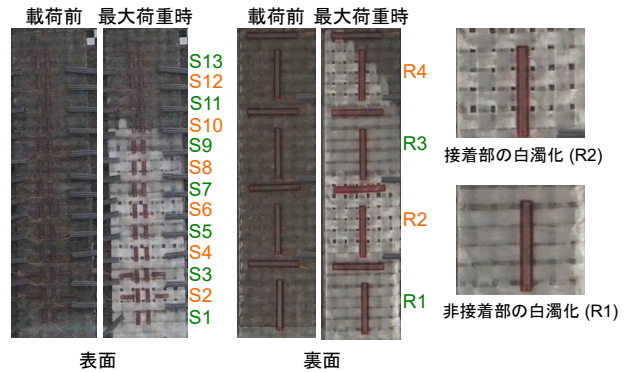


写真-6 GFRP シートの外観写真 (供試体 P2)

シートに意図的に接着部と非接着部を設けたモデル供試体 P の付着試験結果について考察する。

3.5 モデル供試体による白濁化メカニズムの推定

図-7 に供試体 P における最大荷重時のひずみ分布 (交差部 V, 交差部 H, 平均ひずみ) の一例 (供試体 P2) を示す。隣り合う接着部と非接着部のひずみを比較すると、緯糸は接着部と非接着部が同等であったのに対して、経糸は接着部のひずみが 10~20%程度高くなる傾向を示したが、経糸、緯糸ともに引張応力が作用していることがわかる。写真-6 に GFRP シートの外観写真 (表面および裏面) の一例を示す (供試体 P2)。載荷前は非接着部、

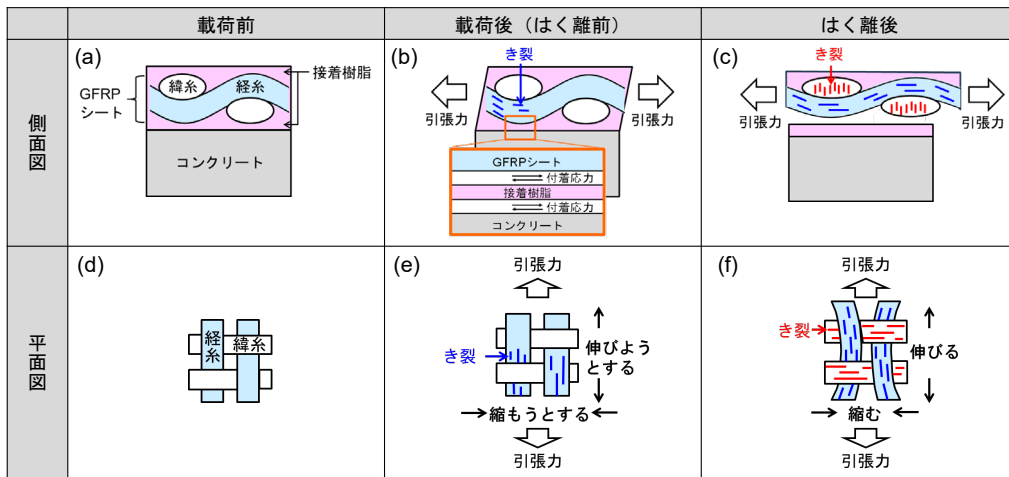


図-8 付着試験における白濁化のイメージ図

接着部ともにシートは透明であるが、荷重後は接着部 (S2, S4,S6,S8,R2,R4) の経糸と緯糸が白濁化した一方で、非接着部 (S1,S3,S5,S7,S9,R1,R3) は緯糸のみが白濁化し、接着部と非接着部の白濁化には明らかな違いが認められた。先行研究⁹⁾にて、引張試験では引張応力にตอบสนองして引張軸方向に直交する緯糸が白濁化することを確認しており、上述の非接着部の白濁化の結果と一致する。すなわち、付着試験の供試体であっても GFRP シートが接着 (拘束) されていない場合は、GFRP シートは引張方向と直交する緯糸が白濁化する。言いかえると、経糸の白濁化は、GFRP シートが背面コンクリートに接着 (拘束) されることで発現する現象であると考えられる。

以上の検証試験の結果を踏まえ、図-8 に付着試験における GFRP シートの白濁化のイメージ図を示す。GFRP シートの白濁化の推定メカニズムは以下の通りである。

- 1) まず、経糸に着目する。荷重により GFRP シートに引張力が負荷されると、経糸は引張軸方向に伸びようとし、引張軸と直交する方向に縮もうとする (図-8(e))。しかしながら、はく離前は経糸が背面コンクリートに接着 (拘束) されているため、経糸は直交方向に縮むことができず、経糸と直交する方向に引張応力が作用する。この引張応力によって経糸内に内部損傷 (き裂) が生じて白濁化する。
- 2) 次に緯糸に着目する。緯糸も経糸と同様に、はく離前は背面コンクリートに接着 (拘束) されているため、引張軸方向と直交する方向、つまり緯糸方向に引張応力が作用する。そのため、内部損傷 (き裂) は生じにくく白濁しない。経糸がはく離した後は、緯糸は経糸に追従するように伸びるようになり、緯糸の繊維と直交する方向に引張応力が作用して緯糸内に内部損傷 (き裂) が生じて白濁化する (図-8(f))。

すなわち、コンクリートに接着された GFRP シートは、

表-4 モデル試験体の引張試験結果

試験体	構成	引張強度 (N/mm ²)	破断ひずみ (μ)
試験体(a)	含浸樹脂	33	21,300
試験体(b)	含浸樹脂+経糸	1,240	12,400
試験体(c)	含浸樹脂+緯糸	1.4	420

どの方向の繊維が白濁化しているかで、シートのはく離状態を判定することができる。ここで、GFRP シートの繊維方向と直交する方向に作用する引張応力に対する白濁化について考察するために、モデル試験体による引張試験を実施した。

4. モデル引張試験による白濁化の検証

モデル試験体として、含浸樹脂のみを硬化した試験体 (a)、緯糸を全て引き抜いて経糸 1 本のみを含有するように含浸樹脂で硬化した試験体 (b) (緯糸なし)、経糸を引き抜いて緯糸のみを含有するように含浸樹脂で硬化した試験体 (c) (経糸なし) を作製 (試験体幅: 20mm, 厚さ: 0.5mm) した。なお、試験体の掴み部の両面に、アルミタブを 2 液型エポキシ接着剤で貼り付けた。作製した試験体は、250 kN 万能試験機 (ロードセル 100kN) を用いて試験体の両端を把持し、クロスヘッドの変位制御 (荷重速度 3.0 mm/min) により単調荷重した。荷重は、試験機内蔵のロードセルにより計測した。ひずみは、試験体の中央部にひずみゲージ (ゲージ長 5 mm) を貼り付けて計測した。

表-4 に試験結果を示す。含浸樹脂のみの試験体 (a) の引張強度は 33 N/mm² であり、破断前後に関わらず透明であり白濁化しなかった。経糸 1 本のみの試験体 (b) の引張強度は 1,240 N/mm² であり、荷重初期から繊維が破断する直前までは殆ど変化せず、破断直前から破断時にかけて一気に白濁化した。なお、GFRP シートの引張強度よりも低強度であったのは、経糸の繊維束を纏める緯糸

を全て引き抜いたため、樹脂を含浸する際に繊維束を広げてしまい、応力を均一に分散できなかったためと考えている。緯糸のみの試験体(c)は、1.4 N/mm² という非常に低い応力で、緯糸に沿ってき裂が生じた直後に破断した。写真-7 に載荷前と破断後の各試験体の外観写真を示すが、試験体(c)はき裂部のみが白濁化した。

藤原らは、ガラス繊維シートの種類、織り方を変えた不飽和ポリエステル GFRP シートの引張試験における試験体の観察を行い、引張初期に緯糸内にき裂が生じることを報告している。緯糸内に低い応力あるいはひずみの時点でき裂が生じるのは、緯糸の繊維束組織の強度が非常に小さいからで、これは応力に直交するガラス繊維の含有による応力集中が原因と考察している。また、緯糸が FRP 試験体内でクロスの一部として存在するときは、強度の大きい経糸の拘束をうけるために、き裂を生じても試験片の破断につながらないため第 2、第 3 のき裂が発生すると報告している⁸⁾。

すなわち、GFRP シートは、繊維方向と直交する方向に引張応力が作用する場合、非常に低い応力で繊維組織内にき裂が生じる。その結果として応力方向に直交する繊維束が白濁化することが明らかになった。

5. まとめ

開発した GFRP シートをコンクリート表面に接着した付着試験を実施し、繊維束の方向やはく離の前後におけるシートの白濁状態に着目した評価を行うことで、GFRP シートのはく離性状と白濁化の関係について考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) GFRP シートの付着試験において、荷重の増加に伴い、GFRP シートは白濁化面積が増加し、GFRP シートのひずみ分布から推定されるはく離領域および付着伝達領域と、GFRP シートの白濁化領域は概ね一致した。
- 2) 付着試験において、最大付着応力以前（はく離前）は、経糸のみが白濁化した一方で、最大付着応力以降（はく離後）は緯糸が白濁化した。これは、GFRP シートの繊維束は背面コンクリートに接着（拘束）されているため、はく離前後で繊維束に作用する応力の方向が変わることによって、はく離前後で白濁化する繊維束の方向も変わったと推察された。
- 3) モデル試験体の引張試験を行い、GFRP シートは、繊維束と直交する方向に引張応力が作用する場合、非常に低い応力でき裂を生じ、その結果として応力方向に直交する繊維束が白濁化することが明らかになった。

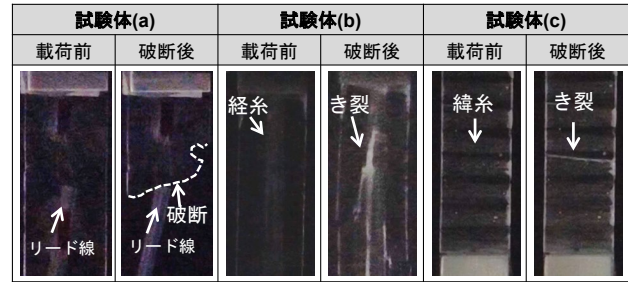


写真-7 モデル試験体の外観写真

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に助言いただいた。厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 野々村佳哲, 内藤勲, 島多昭典, 川村浩二, 村中智幸, 渡辺淳: 連続繊維シート接着による橋脚耐震補強工の変状調査, 寒地土木研究所月報, No736, pp.2-12, 2014.9
- 2) 小林朗: 既設コンクリート部材に対する接着型 FRP 補強材の研究開発動向, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.77, No.5, pp. II_9-II_24, 2021.5
- 3) 小林憲治, 日野伸一, Basem Abdullah, 佐々部宏: ガラス繊維シートの片面貼付による RC はりの曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1483-1488, 2007.7
- 4) G. J. Xiong, J. Z. Yang, Z. B. Ji: Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Hybrid Carbon Fiber-Glass Fiber Sheets, Journal of Composites for Construction, Volume 8, Issue 3, pp.275-278, May. 2004
- 5) 後藤慶次, 山上大智, 佐藤靖彦: GFRP シートの付着性状と可視性に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.859-864, 2023.7
- 6) 後藤慶次, 李権哲, 山上大智, 佐藤靖彦: GFRP シートの引張性状と可視性に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1969-1974, 2024.6
- 7) 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
- 8) 藤原庄一, 平井恒夫, 大槻茂寿: FRP の曲り(knee)現象について, 日本機械学会論文集(第1部), 39巻, 325号, pp.2667-2676, 1973.9