

熱可塑性樹脂を用いてアラミド繊維シートを接着した木材の静載荷実験

Static loading tests on flexural strengthened timber beam with Aramid fiber reinforced thermoplastic sheet

室蘭工業大学
室蘭工業大学大学院
東レ・デュボン（株）
東レ・デュボン（株）
東レ・デュボン（株）
室蘭工業大学大学院

○ 学生員
正 員
非会員
非会員
非会員
正 員

佐々木 佑 (Yu Sasaki)
栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
坂井 秀敏 (Hidetoshi Sakai)
岡田 泰一 (Okada Taiichi)
斎藤 智久 (Tomohisa Saito)
小室 雅人 (Masato Komuro)

1. はじめに

連続繊維シートを含浸硬化樹脂を用いて接着する FRP シート接着工法は、近年、コンクリート、鋼材および木材の補修補強工法として広く用いられている¹⁾。一方、最近では、施工時間の短縮や材料ロスの低減を目的に、紫外線硬化型樹脂を用いた接着工法が開発され、一部で実用化されている²⁾。また、熱可塑性樹脂を用いて接着する工法も提案され、種々の材料試験による検討が進められている³⁾。

紫外線硬化型樹脂を用いる接着工法は 20 分程度の紫外線照射が必要であるのに対し、熱可塑性樹脂を用いる工法の場合には、200℃程度で数分間加熱することで接着できることから、施工時間がさらなる短縮が期待できるものと考えられる。

従って、熱可塑性樹脂を用いた連続繊維シートの接着工法（以後、FRTP シート接着工法）を構造物の補修補強や材料の耐力付与に利用することで、省力化施工や材料ロスの軽減などを推進できるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、FRTP シート接着工法による建設材料の補修補強効果を検討することを目的に、FRTP シートを加熱圧着した木材の静的載荷実験を行った。ここで、母材への補強効果を比較検討するために、エポキシ樹脂を用いてシート接着した試験体と無補強の試験体についても静的載荷試験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数はシート補強の有無や接着樹脂の種類、落下高さを変化させた計 11 体である。試験体名の第 1 項目は接着

表-2 アラミド繊維の力学的特性値 (公称値)

繊維 目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
280	392	0.193	2.06	118	1.75

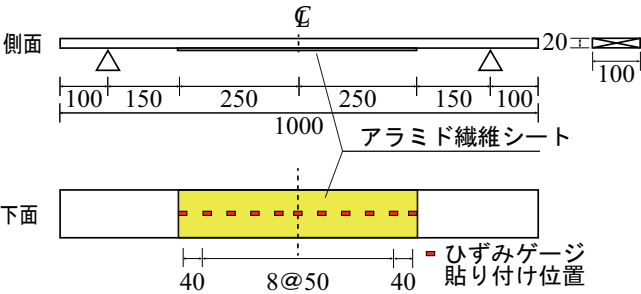


図-1 試験体図

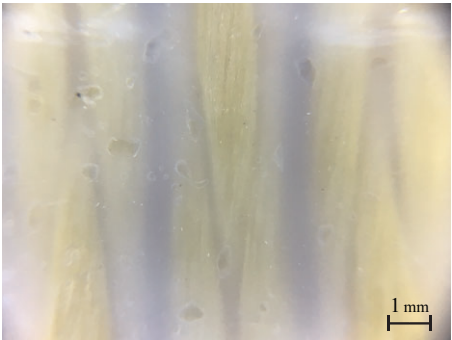


写真-1 AF RTP シートの顕微鏡写真

表-1 試験体一覧

試験体名	使用樹脂	施工・養生期間
N-1	—	—
N-2		
N-3		
E-1	エポキシ樹脂	約 8 日
E-2		
E-3		
T-1	熱可塑性樹脂	約 0.5 日
T-2		
T-3		
T-4		
T-5		

樹脂の種類（N：無補強試験体，T：熱可塑性樹脂，E：エポキシ樹脂），第 2 項目は同種条件の番号を示している。なお，シート接着に要する施工・養生期間は，熱可塑性樹脂およびエポキシ樹脂を用いる場合で，それぞれ約 0.5 および 8 日間である。従って，熱可塑性樹脂を用いる場合の施工・養生期間はエポキシ樹脂を用いる場合の 1/16 であることが分かる。表-2 には，アラミド連続繊維シートの材料特性値を示している。

表－3 熱可塑性樹脂の物性値

熱的性質		機械的性質		
融点 (°C)	結晶化温度 (°C)	破断強さ (MPa)	破断伸び (%)	10% 引張強さ (MPa)
146	86	22	600	4

表－4 エポキシ樹脂の力学的特性値 (公称値)

圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	引張せん断強さ (MPa)
40 以上	35 以上	10 以上

図－1には、本実験で用いられた試験体の形状寸法及び補強概要を示している。試験体寸法は $100 \times 20 \times 1000$ mm である。ここで、熱可塑性樹脂には常温ではゴムのような弾性体であり、 200°C 程度に加熱すると流動化する高性能エンジニアリングエラストマーを用いた。エポキシ樹脂を用いて接着する場合のシートはアラミド繊維シートを使用し、熱可塑性樹脂で接着する場合には予めアラミド繊維シートに熱可塑性樹脂を溶融合浸させた AF RTP シートを使用した。写真－1には、AF RTP シートの顕微鏡写真を示している。写真より、アラミド繊維シートが熱可塑性樹脂に含浸されていることが分かる。なお、母材による強度のばらつきを抑えるために母材は強度のばらつきが少ないヒノキの集成材を使用した。

2.2 熱可塑性樹脂の接着方法

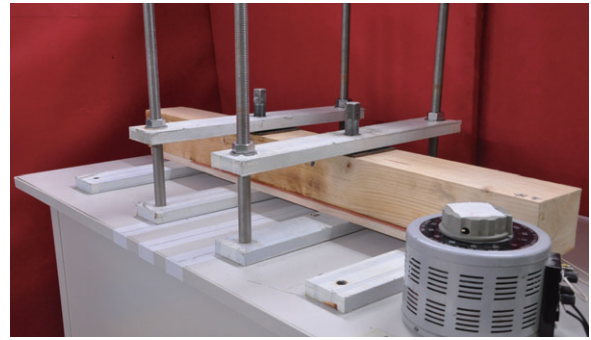
本実験に用いた熱可塑性樹脂の仕様は表－3に示している。本実験の熱可塑性樹脂を用いたシート接着補強における施工手順は以下のとおりである。また、加熱圧着に使用した器具は写真－2である。

- 1) 紙やすりを用いてシート接着範囲を目荒しし、アセトンを含んだウェスで不純物の除去及び脱脂を行う。
- 2) 表面処理後、研磨した範囲に熱可塑性樹脂の微粒子が含まれている液体（以後、エマルジョン）を塗布する。
- 3) エマルジョンを約1時間程度自然乾燥させ、指触乾燥状態であることを確認した後、使用温度が 200°C であるシリコンラバーヒーターを用いて母材表面を2分間加熱を行う。
- 4) 母材表面の加熱後、所定の寸法である AF RTP シートを補強範囲に接着し、先ほどと同様にラバーヒーター（写真－3）を用いてコンポジットシートを5分間加熱圧着を行う。
- 5) 加熱圧着後、試験体が室温程度になるまでの冷却期間を要する。

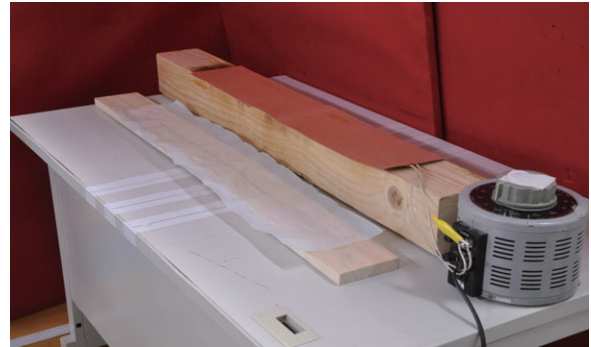
2.3 エポキシ樹脂の接着方法

用いた含浸接着樹脂であるエポキシ樹脂の仕様は表－4に示している。エポキシ樹脂を用いたアラミド繊維シート接着補強における施工手順は以下の通りである。

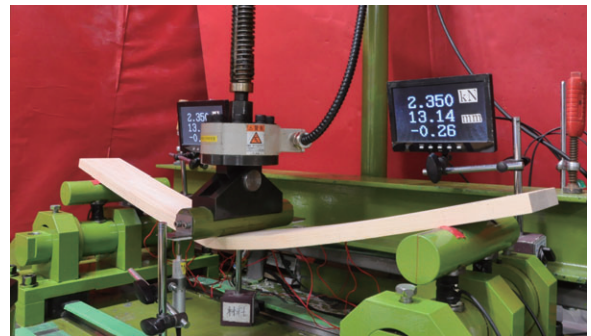
- 1) 紙やすりを用いてシート接着範囲を目荒しし、アセトンを含んだウェスで不純物の除去及び脱脂を行う。



写真－2 加熱圧着器具



写真－3 ラバーヒーターと AF RTP シート



写真－4 静载荷実験状況

- 2) シート接着範囲にプライマー用の2種混合型のエポキシ樹脂を塗布する。なお、養生期間は1日を要する。
- 3) 指触乾燥状態であることを確認した後、シートを補強範囲に設置し、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて接着する。なお、養生期間は7日を要する。

2.4 実験方法

本実験は、写真－4の実験装置を用いて静荷重載荷実験を行った。载荷速度は 3.14 mm/分とし、三点載荷法に基づき試験体のスパン中央部に変位制御で鉛直荷重を作用させて行った。測定項目は荷重 P 、載荷点変位 δ （以後、変位）および軸方向の AF RP シートのひずみである。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図－2には、各試験体の荷重－変位関係を示している。図より、無補強のうち N-2/3 試験体は、荷重が 1.2 kN 程

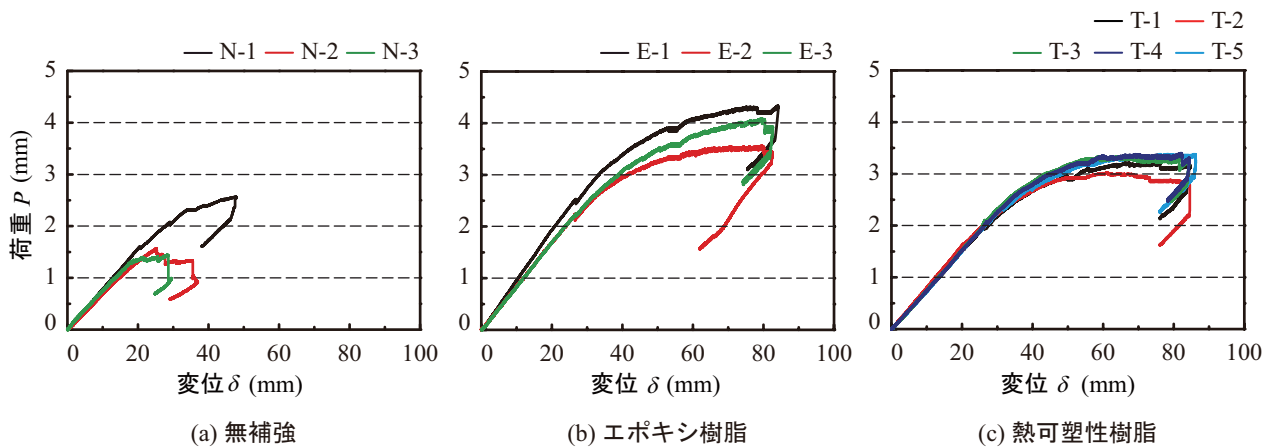


図-2 各試験体の荷重-変位関係

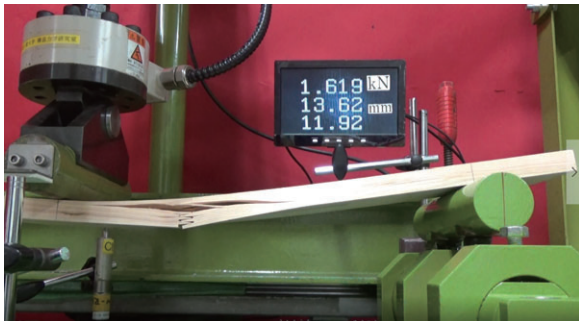


写真-5 N-1 試験体の破壊状況

度に到達するまで、変位に比例して大きくなり、一定値を示した後、変位 30～40 mm で梁が角折れして終局に至っている。一方、N-1 試験体は、荷重が 3.5 kN 程度まで増大した後、急激に低下している。これは、写真-5 に示しているように、集成材の継ぎ目が開口し、見かけ上偏心荷重のような状態になったためである。

一方、シート補強した E および T 試験体の場合には、初期の曲げ剛性は無補強とほぼ同様であるものの、最大耐力は大きくなっていることが分かる。また、実験結果のばらつきは、無補強の場合ほど大きくない。これは、シート補強により、集成材の継ぎ目での破壊が抑制されたことによるものと考えられる。

また、熱可塑性樹脂で加熱圧着した T 試験体の場合には、エポキシ樹脂で含浸接着した E 試験体よりも実験結果のばらつきは少ないものの、最大荷重は全般的に小さい。特に、変位 50 mm 以降においては、荷重 3 kN 程度で一定値を示している。これは、後述するように、アラミド繊維-熱可塑性樹脂間にすべりが生じている可能性があるものと推察される。

3.2 シートの軸方向ひずみ分布

図-3 には、荷重点変位が 20, 40, 60, 80 mm になった時点における E および T 試験体のシートの軸方向ひずみ分布を示している。図より、変位 20 mm の場合には、両試験体ともに、荷重点近傍で 0.2～0.4 % 程度のひずみが発生して

いることが分かる。また、E 試験体の場合に多少試験体間のばらつきが見られる。

変位 40 mm の場合には、E 試験体では最大ひずみが 0.8 % 程度であるのに対し、T 試験体の場合には 1.2 % 程度と大きくなっている。また、T 試験体の場合が E 試験体の場合に比べてひずみが荷重点近傍で局所的に大きくなっており、この傾向は変位 60 mm の場合においてより強く現れる。変位 80 mm では、ほぼ同様の傾向を示している。なお、これらのひずみ分布において、ひずみが均等化されている領域は見られず、また実験終了後の打音検査においても浮きなどの変状は見られていないことから、シートと木材の付着は実験終了後においても十分に確保されていたものと判断される。

ここで、前述の荷重-変位関係（図-2）を見ると、T 試験体の場合には変位 40～60 mm において、剛性勾配が徐々に低下していることが分かる。これは、図-3に見られたように、荷重点近傍でひずみが局所化していることを考慮すると、木材の曲げ剛性の低下に伴って、シートの引張応力が增大する過程において、荷重点近傍部でアラミド繊維-熱可塑性樹脂間にすべりが生じていることによるものと推察される。ただし、現状においては未だ実験ケース数が十分ではないため、今後さらに詳細な検討を行い、上記の挙動を解明する必要があるものと考えられる。

なお、T 試験体の荷重-変位関係において、変位 50 mm 以降の荷重はばらつきが少なく安定した耐荷挙動を示していることから、アラミド繊維-熱可塑性樹脂間のすべりメカニズムを解明することにより、すべりによるエネルギー吸収性能を活用することが可能であるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、熱可塑性樹脂を用いたアラミドシート接着工法による建設材料の曲げ補強効果を検討することを目的に、AFRP シートを接着した木材の静荷重実験を行った。本実験で得られた知見をまとめると以下のとおりである、

- 1) 熱可塑性樹脂を溶融合浸したアラミド繊維シート (AFRTP シート) を加熱圧着することにより木材の曲げ耐力を向上可能である。ただし、その曲げ耐力はエポ

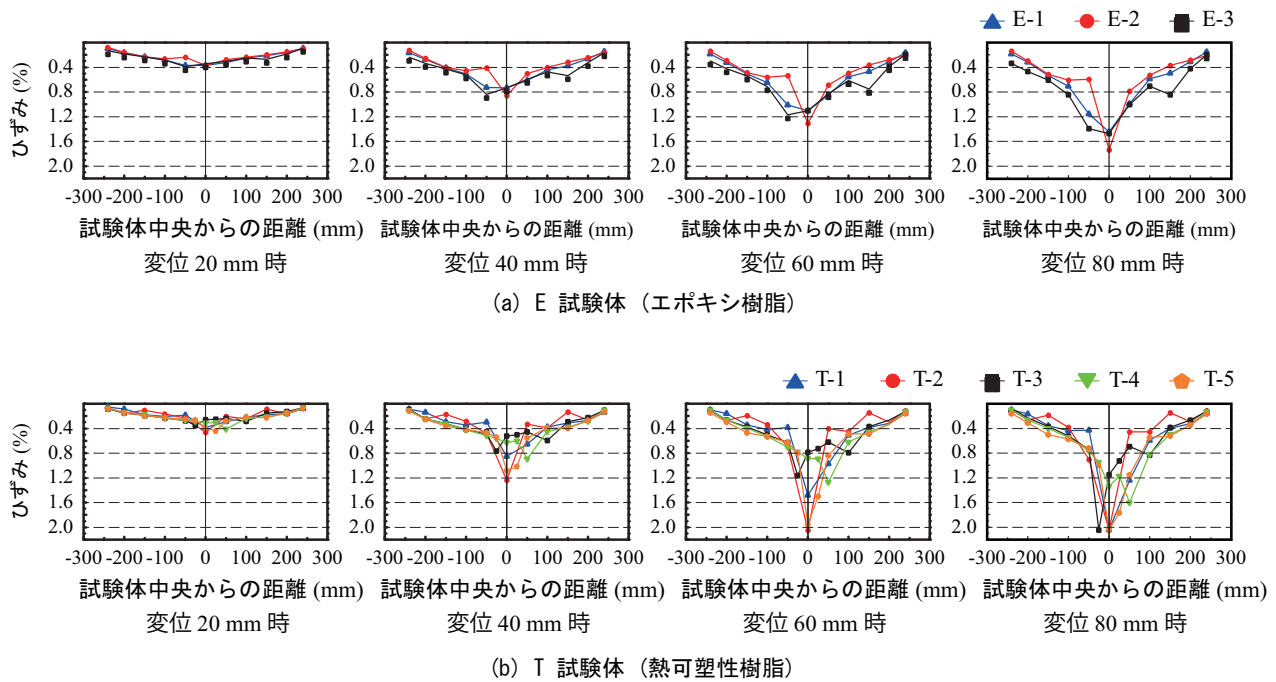


図-3 シートの軸方向ひずみ分布性状

キシ樹脂で接着した場合よりも多少小さい。

- 2) 载荷荷重の増大に伴って、AFRTP シートの引張応力が増大する過程において、载荷点近傍部でアラミド繊維-熱可塑性樹脂間にすべりが生じている可能性がある。
- 3) 熱可塑性樹脂を用いて加熱圧着する場合には大変形時において、荷重はばらつきが少なく安定した耐荷挙動を示す。従って、アラミド繊維-熱可塑性樹脂間のすべりメカニズムを解明することにより、すべりによるエネルギー吸収性能を活用することも可能であるものと考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤栄徳, 山村康夫: タフシート工法「紫外線硬化型

FRP シート」による水路の内面被覆工施工例, ARIC 情報, No. 88, pp.40-45, 2008

- 2) 田中和人, 前畑俊輔, 片山傳生: 連続繊維炭素繊維強化熱可塑性樹脂基複合材料の機械的特性に及ぼす樹脂供給形態の影響, 材料, Vol. 65, No. 8, pp.592-597, 2016.8
- 3) 田中和人, 田中裕大, 片山傳生: CFRTP 直接通電抵抗加熱溶着の接合強度に及ぼす炭素繊維表面への CNT 析出の影響, 材料, Vol. 65, No. 10, pp.727-732, 2016.10
- 4) 福島敏夫, 坂山和久, 橋本壮一郎: 熱可塑性樹脂による連続繊維強化プラスチック (FRTTP) のリサイクル可能なコンクリート用補強材への応用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No.2, pp.277-282, 1998.7