

アラミド繊維シート接着による木材の耐衝撃性向上効果

Improvement on impact resistant capacity of timber beam due to Aramid fiber sheet bonding method

栗橋祐介[†], 坂井秀敏*, 岡田泰一**, 斎藤智久*, 小室雅人***

Yusuke Kurihashi, Hidetoshi Sakai, Taiichi Okada, Tomohisa Saito, Masato Komuro

[†]博(工), 室蘭工業大学講師, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)
 *東レ・デュポン(株) ハイトレル・テクニカルセンター (〒455-0025 名古屋市港区本星崎町字北 3804-19)
 **東レ・デュポン(株) ケブラー技術開発部 用途開発課 (〒476-8567 東海市新宝町 31-6)
 ***博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In this study, in order to investigate impact resistant behavior of timber beam strengthened with Aramid fiber bonding method using epoxy and/or thermoplastic adhesive, weight-falling impact loading tests were conducted taking the kind of adhesive and weight falling height as variables. Here, newly proposed bonding method using thermoplastic resin could be able to reduce the work time for bonding the sheet. Also, appropriate bonding method by using thermoplastic resin was proposed based on bonding capacity tests. From this study, it could be revealed that static and impact resistant capacities can be drastically improved due to Aramid fiber sheet bonding method, irrespective of the kind of adhesive resin.

Key Words: Aramid fiber sheet, timber beam, thermoplastic resin, bending capacity, impact resistant capacity

キーワード: アラミド繊維シート, 木材はり, 熱可塑性樹脂, 耐衝撃性

1. はじめに

アラミド繊維は、軽量、高強度で、かつしなやかな特性を有し、耐衝撃性および耐切削性に優れるため、防弾チョッキや自動車のタイヤコードなど、衝撃的外力や動的荷重が作用する部位に広く適用されている。土木分野においては、既設鉄筋コンクリート (RC) 橋脚の耐震補強¹⁾のほか、落石防護覆工頂版の下面接着補強²⁾に用いる事例等が報告されている。

また、著者らは、これまで、RC 構造物の耐衝撃性向上法の確立を目的に、アラミド繊維シートで曲げ補強した RC はりの重錘落下衝撃実験を行い、本補強工法の耐衝撃性向上効果を確認している^{3),4)}。このような効果は、木材に対しても有効に作用するものと考えられる。特に木材は、繊維方向の引張強度はコンクリートの場合よりも高く、また多孔質であるため接着樹脂の浸透性が高い。そのため、木材-シート間では高い付着強度を期待できるもの⁵⁾と考えられる。実務的な用途としては、木製防護柵の耐衝撃性向上やそれに伴う軽量化、および木造構造物の耐震性、耐衝撃性向上などが考えられる。

また、近年では、熱可塑性樹脂を用いた連続繊維

材料の成形技術に関する研究が推進されている⁶⁾⁻⁸⁾。この種の技術を応用し、熱可塑性樹脂を用いたアラミド繊維シート接着法を確立することにより、材料ロスの低減、施工時間の短縮など、生産性の向上を実現できるものと考えられる。しかしながら、アラミド繊維シート接着による木材の耐衝撃性向上効果や熱可塑性樹脂の接着材としての適用性については検討されていないのが現状である。

このような背景より、本研究では、アラミド繊維シート接着による木材の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、アラミド繊維シートで曲げ補強した木材の静的および衝撃載荷実験を行った。また、エポキシ樹脂を用いて接着する場合の他、熱可塑性樹脂を用いる場合についてもその適切な接着方法および補強効果を検討した。なお、熱可塑性樹脂を用いる接着法については、表面処理方法を種々変化させてシート接着したケースについて接着強度を比較検討して決定した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および一覧

図-1には、静的および衝撃載荷実験に用いた試験体の形状寸法及び補強概要を示している。試験体は、防護柵および建築物の屋根や壁などに適用すること

[†] 連絡著者 / Corresponding author
 E-mail: kuri@mmm.muroran-it.ac.jp

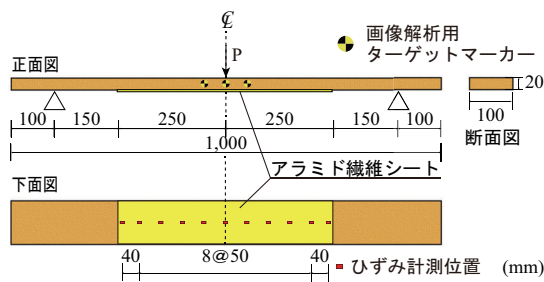


図-1 試験体の形状寸法と補強概要

表-1 試験体一覧

試験体名	補強の有無	接着樹脂	荷重方法	重錘落下高さ H (mm)
N-S-1	無し	(無補強)	静荷重	-
N-S-2				
N-S-3				
E-S-1	有り	エポキシ樹脂	静荷重	-
E-S-2				
E-S-3				
T-S-1	有り	熱可塑性樹脂	静荷重	-
T-S-2				
T-S-3				
T-S-4				
T-S-5				
N-I4-1	無し	(無補強)	衝撃荷重	400
N-I4-2				
E-I4-1	有り	エポキシ樹脂	衝撃荷重	400
E-I4-2				800
E-I8-1				800
E-I8-2				800
T-I4-1	有り	熱可塑性樹脂	衝撃荷重	400
T-I4-2				800
T-I8-1				800
T-I8-2				800

を想定し、扁平断面を有するはり部材（以後、木材はり）とした。試験体寸法（幅×高さ×長さ）は100×20×1000 mmである。また、本研究では、材料のばらつきを極力抑えるため、ヒノキ集成材を用いることとした。

実験は、純スパン長800 mmとしてスパン中央部に荷重を作用させる形で行った。また、アラミド繊維シートを接着する場合には、その範囲をスパン中央部500 mmとした。シート上には検長10 mmのひずみゲージを50 mm間隔で貼付し、梁側面には、高速度カメラの画像計測により変位量を求めるためのターゲットマーカーを貼り付けている。

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示して

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

表-3 熱可塑性樹脂の物性値(公称値)

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

いる。試験体は、接着樹脂の種類、荷重方法および重錘落下高さ H を変化させた全21体である。試験体の第1項は、無補強の場合には英文字Nを示し、補強試験体の場合には使用した接着樹脂の種類(T:熱可塑性樹脂, E:エポキシ樹脂)を示している。第2項には、実験方法の種類(S:静荷重実験, I:衝撃荷重実験)と重錘落下高さ(4:400 mm, 8:800 mm)の組み合わせとして示している。また、本実験では、実験結果の再現性を確認するために、各試験体において数体ずつ実験を行っている。第3項には、これらの通し番号(1, 2, 3, 4, 5)を示している。

2.2 補強材料

連続繊維シートには、前述の通りアラミド繊維を用いている。これは、アラミド繊維は、しなやかで耐衝撃性に優れ、合成繊維においては最高レベルの弾性係数および引張強度を有するためである。表-2には、本実験で用いたアラミド繊維シートの材料特性値を示している。なお、補強量は、木造建築の耐震補強等における適用実績を参考⁹⁾にして設定した。

表-3および表-4には、それぞれ熱可塑性樹脂およびエポキシ樹脂の材料特性値を示している。熱可塑性樹脂には常温下では弾性的な力学特性を示し、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。熱可塑性樹脂を用いて接着する場合には、後述するように、表面処理としてエマルジョン化した熱可塑性樹脂を用いている。

なお、熱可塑性樹脂のシートへの含浸や接着工程を効率化するために、予め2枚の熱可塑性樹脂シート間にアラミド繊維シートを配置し、200°Cで熱圧着して複合化したシート(以後、コンポジットシート)を用い

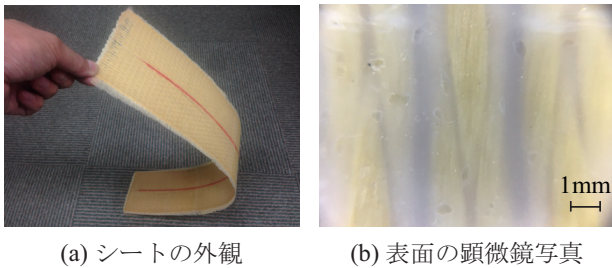


写真-1 コンジットシートの外観と表面の顕微鏡写真

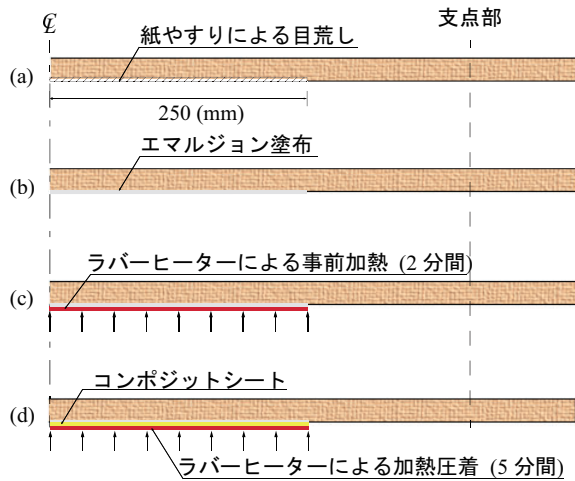


図-2 熱可塑性樹脂の接着手順

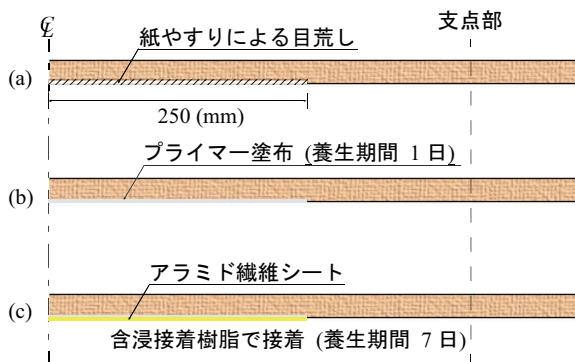


図-3 エポキシ樹脂の接着手順

て接着することとした。写真-1には、シートの外観と表面の顕微鏡写真を示している。写真-1(a)よりコンジットシートは柔軟であり、写真-1(b)からはシートに熱可塑性樹脂が十分に含浸されていることが分かる。一方、エポキシ樹脂を用いて接着する場合には、汎用の2液混合タイプのものを用いた。

2.3 接着方法

図-2には、熱可塑性樹脂を用いる場合におけるシート接着手順を示している。以下に、接着の手順を箇条書きにして示す。

- 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(図-2(a))。
- 2) 表面処理として熱可塑性樹脂の微粒子を分散させ乳化した液体(以後、エマルジョン)を塗布し、1時間程度自然乾燥させる(図-2(b))。
- 3) 接着工程の効率化のため、母材表面をシリコンラバーヒーターを用い200℃程度で2分間の事前加熱を行う(図-2(c))。
- 4) その後、コンジットシートを所定の位置に設置し、ラバーヒーターを用いて200℃程度で5分間の加熱圧着を行う(図-2(d))。
- 5) 加熱圧着後、試験体が室温程度になるまで自然冷却する。

図-3には、エポキシ樹脂を用いる場合に関するシート接着手順を示している。以下に、接着の手順を箇条書きにして示す。

- 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(図-3(a))。
- 2) シート接着範囲に2液混合型のエポキシ系プライマーを塗布する。なお、養生期間は1日とする(図-3(b))。
- 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、2液混合型の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日とする(図-3(c))。

本実験においては、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日間程度である。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程度であることが分かる。

2.4 接着強度試験

本研究では、熱可塑性樹脂を用いる場合の適切な施工方法を検討するために、接着試験を実施し、前述のシート接着手順を決定した。表-5には、熱可塑性樹脂を用い種々の条件下でアラミド繊維シート接着した場合の接着強度試験結果をエポキシ樹脂を用いた場合の結果と併せて示す。また、表には接着強度試験終了後の破壊形式(A:母材-シートの剥離, B:シート-端子の剥離, C:木材の引張破壊)についても示している。

接着強度試験は、写真-2のような接着範囲が40×40mmの建研式接着強度試験法により行った。これらの試験は、常温(20℃前後)で行っており、また常温では熱可塑性樹脂の力学特性値の変動はわずかであることを別途技術資料等で確認している。

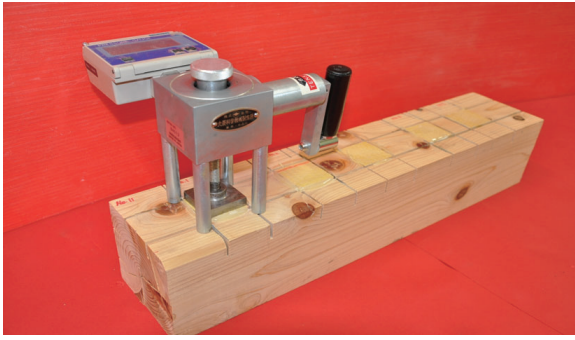


写真-2 建研式接着強度試験状況

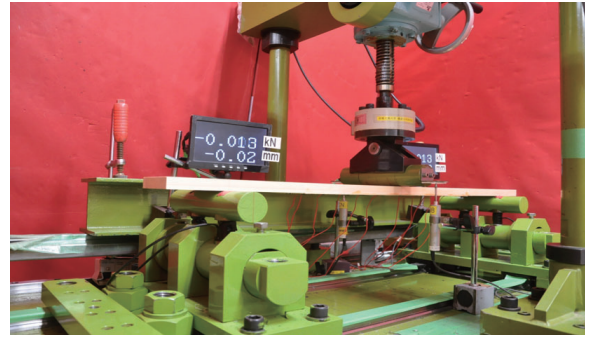


写真-3 静載荷実験状況

表-5 アラミド繊維シート接着強度試験結果

接着樹脂	表面処理	接着強度 (MPa)	破壊形式*
熱可塑性樹脂	無処理	1.46	A
		0.84	
		1.20	B
		1.03	
		1.63	
平均		1.23	—
熱可塑性樹脂	エマルジョン塗布	1.83	A
		1.86	
		1.89	
		1.83	
		1.90	
平均		1.86	—
熱可塑性樹脂	やすり掛け + エマルジョン塗布	2.26	A
		2.34	
		2.15	
		2.67	
		2.84	
平均		2.45	—
エポキシ樹脂	プライマー塗布	5.39	A
		4.63	C
		2.59	
		3.71	
		4.13	B
平均		4.09	—

* A: 母材-シートの剥離, B: シート-端子の剥離
C: 木材の引張破壊

表-5より、熱可塑性樹脂を用いる場合の接着強度は、木材表面をやすり掛けした後、エマルジョンを塗布する場合が最も大きく、2.5 MPa程度となっていることが分かる。ただし、エポキシ樹脂を用いる場合よりも小さい。これは、両接着樹脂の粘度が大きく異なることによるものと推察される。すなわち、熱圧着時の温度 200℃程度における熱可塑性樹脂の粘度は、1,000 Pa·s程度であるのに対し、エポキシ系プライ

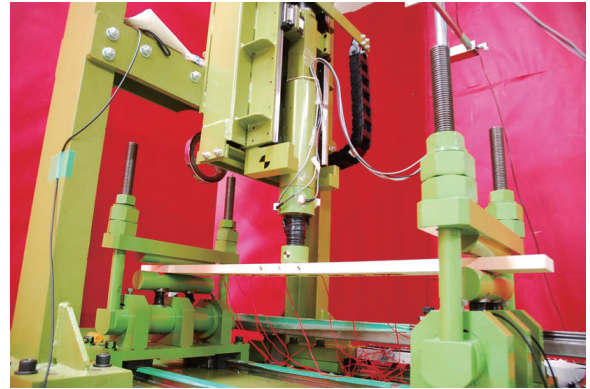


写真-4 衝撃実験状況

マーの粘度は常温下で主剤が 50 Pa·s、硬化剤が 1 Pa·s程度である。このように、熱可塑性樹脂は高温下で流動化しても、その粘度はエポキシ系プライマーより少なくとも 20 倍以上大きく、このことが木材の空隙に浸透しない要因であるものと考えられる。従って、熱可塑性樹脂の含浸深さを大きくする対策を施すことにより、接着強度を改善できる可能性があるものと考えられる。

2.5 載荷実験方法と測定項目

(1) 静載荷実験

静載荷実験は、写真-3の実験装置を用いて静荷重載荷実験を行った。載荷速度は 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) およびシートの軸方向ひずみである。

(2) 衝撃載荷実験

衝撃載荷実験は、質量 20 kg、先端直径 60 mm の鋼製重錘を所定の高さから 1 度だけ自由落下させる単一載荷法により行った。なお、重錘落下高さは自由落下 400 mm、800 mm で行った。なお、衝突速度は、重錘落下試験装置の摩擦抵抗により低下する傾向にある。従って、事前に重錘落下のキャリブレーション試験を行い、実落下高さを 476 mm、976 mm と設定した。試験体の両支点部は回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。重錘の衝突速度

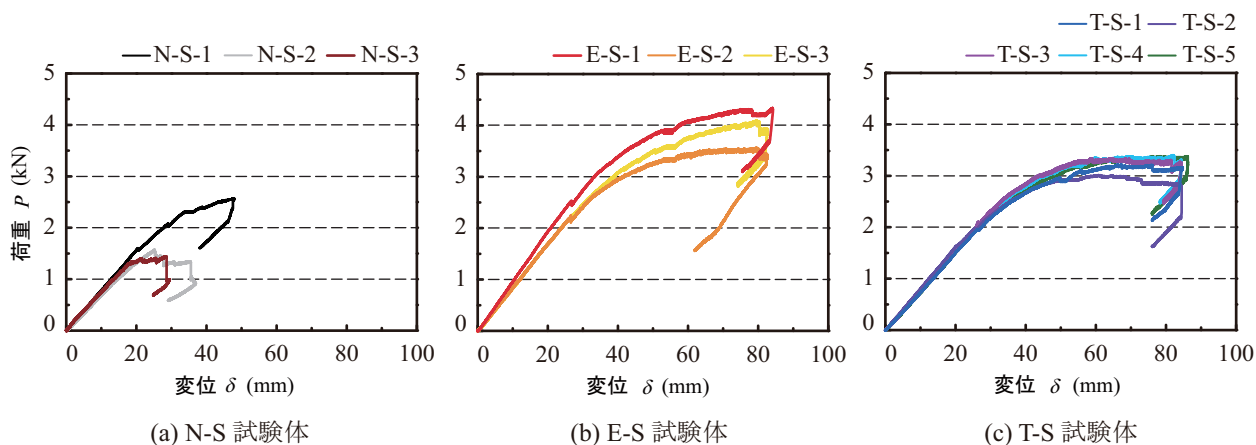


図-4 各試験体の荷重-変位関係

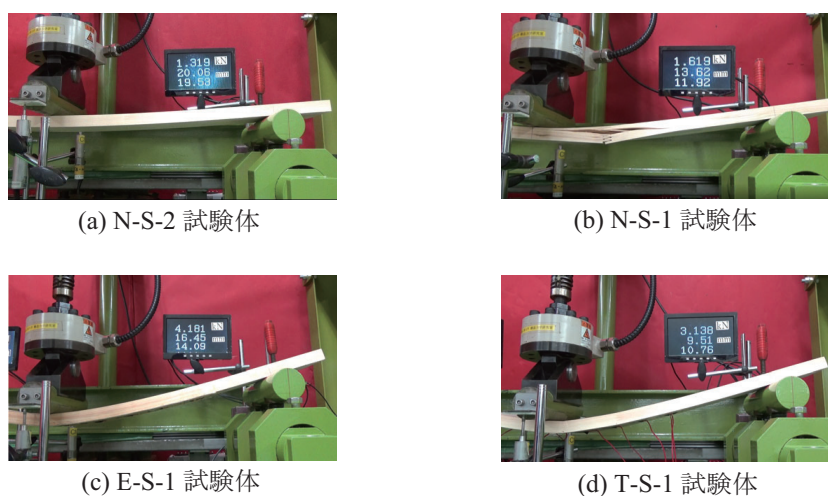


写真-5 各試験体の最大変位時における変形状況

は、レーザー式センサーを用いて測定した。写真-4には、実験装置の概要を示している。

測定項目のうち、重錘衝撃力および支点反力およびシートのひずみ分布は、サンプリングタイムを0.2 msとしてデジタルデータレコーダにて一括収録している。なお、支点反力は両支点部の合算値である。変位は、高速度カメラによって撮影された画像を用い、試験体に貼付したターゲットマーカーの移動量から算出した。フレームレートは2,000枚/秒である。実験終了後には試験体の破壊性状を観察し記録した。

3. 静載荷実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-4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-S-2/3試験体は、荷重が1.2 kN程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で終局に至っている。N-S-1試験体は、N-S-2/3試験体よりも



写真-6 無補強試験体の破壊例

最大荷重や最大荷重時変位が大きい。これは、後述するように、左右対称の曲げ変形を呈していないことから、集成材の曲げ耐力のばらつきによるものと考えられる。

一方、シート補強したE/T-S試験体の場合には、無補強の場合と同様に荷重が変位に比例して大きくなる性状を示しているものの、その最大荷重および最大荷重時変位はN-S-2/3試験体よりも2~3倍程度大きい。これは、シートの曲げ補強効果が発揮されている

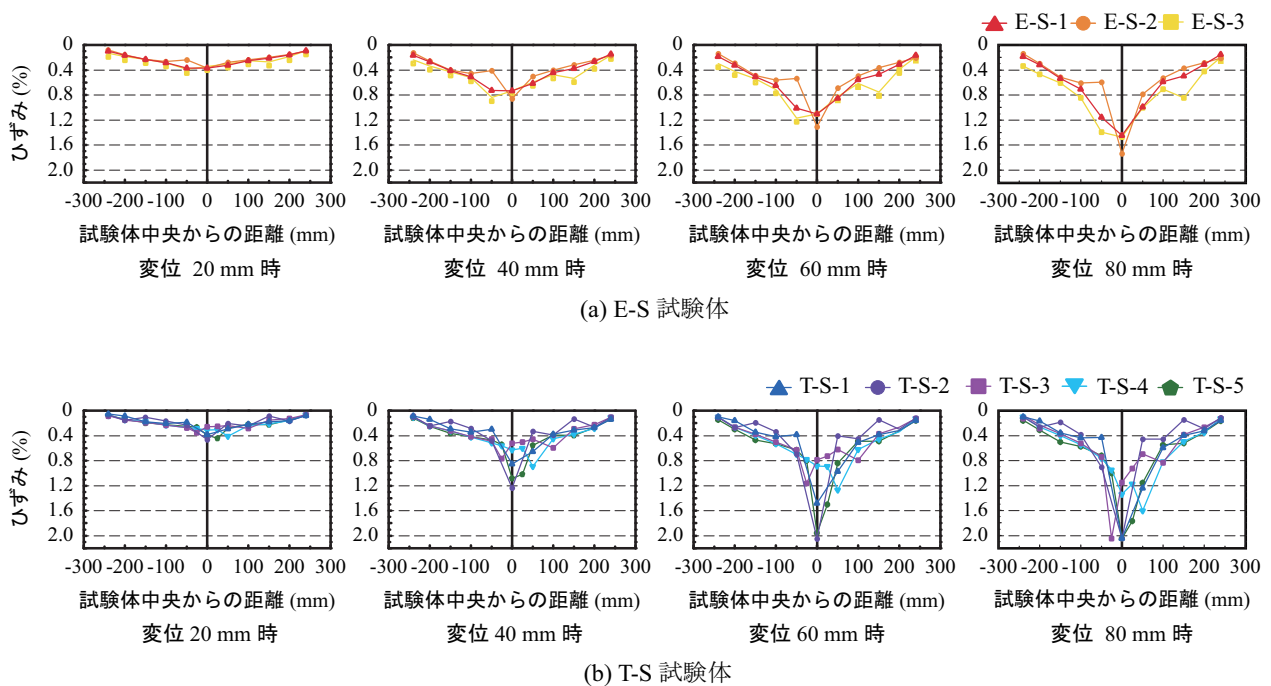


図-5 アラミド繊維シートの軸方向ひずみ分布の推移状況

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-S 試験体の場合には、エポキシ樹脂で含浸接着した E-S 試験体よりもその最大荷重が全般的に小さい。特に、変位 50 mm 以降においては、荷重 3.0 kN 程度で一定値を示している。これは、後述するように、アラミド繊維シートと熱可塑性樹脂シート間において層内変位を生じている可能性があるものと推察される。

3.2 変形性状

写真-5 には、無補強の N-S-1/2 試験体、エポキシ樹脂および熱可塑性樹脂を用いてシート接着した E/T-S-1 試験体の最大変位時の変形状況を示している。写真より、シート補強の場合には、無補強の場合よりも曲げ変形量が大きく、左右対称に変形していることが分かる。このことから、シート補強により集成材の曲げ変形性能を向上可能であるものと考えられる。

なお、無補強の場合には、写真-6 に示すように、集成材の継ぎ目が面内および面外方向に開口する場合があるため、N-S-1/2 試験体のように破壊性状や曲げ耐力にばらつきが生じる傾向にあるものと考えられる。これに対し、シート補強した場合には、無補強試験体に見られた継ぎ目の開口は見られなかった。

このことから、接着樹脂の種類によらず、アラミド繊維シートを木材はりの下面に接着することにより、集成材の継ぎ目の面内および面外方向の開口を抑制し、曲げ耐力および変形性能を向上可能であることが明らかになった。

3.3 シートの軸方向ひずみ分布

図-5 には、変位 20, 40, 60 および 80 mm 時における E-S および T-S 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、載荷点近傍で 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-S 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 では、E-S 試験体では最大ひずみが 0.8 % 程度であるのに対し、T-S 試験体の場合には 1.2 % 程度と大きくなっている。また、T-S 試験体の場合が E-S 試験体の場合に比べてひずみが載荷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、変位 60 mm と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-4(c)) を見ると、T-S-1/5 試験体の場合には変位 40 ~ 60 mm において、剛性が徐々に低下している。一方、図-5(b) のひずみ分布を見ると、載荷点近傍でひずみが局所的に大きくなっている。これは、2.2 節で述べたように T-S 試験体に用いたコンジットシートは、2 枚の厚さ 0.1 mm の熱可塑性樹脂シート間にアラミド繊維シートを配置し、200 °C で熱圧着して複合化して作製していることや、ひずみゲージは熱可塑性樹脂シート上に

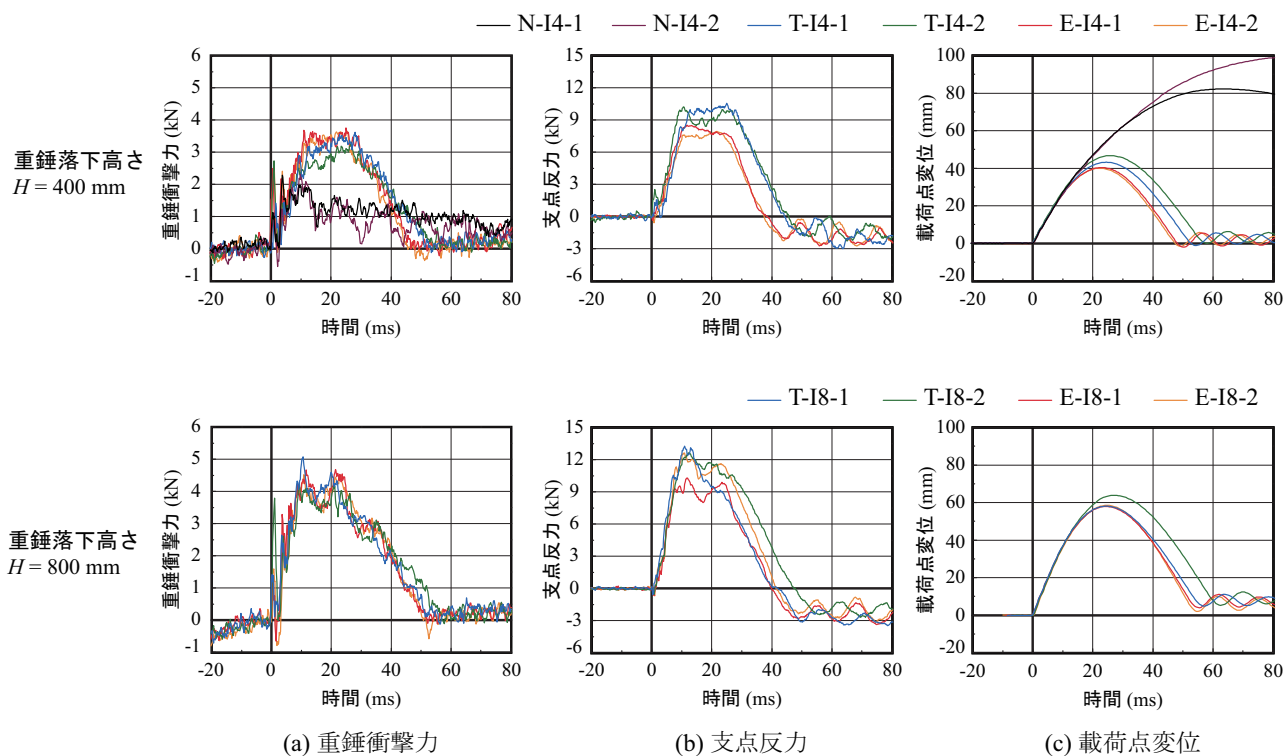


図-6 時刻歴応答波形

接着されていることを考慮すると、ひずみ分布の局所化の要因は以下の理由によるものと考えられる。すなわち、1) 木材はりの曲げ変形時に、アラミド繊維シートとその両面の熱可塑性樹脂シート間に層内変位が生じ、2) アラミド繊維シートに引張応力が十分に伝わらず、3) 熱可塑性樹脂は木材はり下縁の引張ひずみに追従して変形しているためと考えられる。これは、熱可塑性樹脂の低弾性高伸び特性が発揮されたことによるものと考えられる。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-S 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-熱可塑性樹脂間の付着特性を解明することにより、層内変位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. 衝撃載荷実験結果

4.1 時刻歴応答波形

図-6には、各試験体の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位波形を落下高さごとに示している。なお、無補強の N-I4-1/2 試験体の場合には、後述するように梁が著しく損傷して角折れしたため、支点反力が適切に測定されていない。そのため、検討から除外すること

とした。

図-6(a)より、重錘落下高さ $H = 400$ mm において、無補強の N-I4-1/2 試験体の重錘衝撃力波形は、最大振幅が 2.0 kN 程度で、継続時間が 70 ms 程度の波形性状を示している。これに対し、シート補強した E/T-I4-1/2 試験体の場合には、最大振幅が 3.5 kN 程度で、継続時間が 50 ms 程度の波形性状を示している。このことから、シート補強により梁の曲げ耐力が向上したことが分かる。また、重錘落下高さ $H = 800$ mm では、シート補強した E/T-I8-1/2 試験体の重錘衝撃力波形の最大振幅は 4.5 kN 程度であり、 $H = 400$ mm の場合よりも大きくなっているものの、継続時間はほぼ同等である。

図-6(b)より、補強試験体の支点反力波形は、重錘衝撃力波形の場合と同様の性状を示していることが分かる。ただし、最大振幅は重錘衝撃力の場合よりも大きい。また、図-6(c)より、無補強の N-I4 試験体の載荷点変位波形は、重錘衝突後 80 mm 程度以上に増大している。これは、後述するように、木材が著しく崩壊して角折れしていることによるものである。補強した E/T-I4-1/2 試験体の載荷点変位波形は、使用樹脂および重錘落下高さによらず主波動継続時間が 50 ms 程度の正弦半波となっている。また、補強試験体の重錘衝撃力波形、支点反力波形、および載荷点変位波形の継続時間はほぼ同様である。このことは、重錘衝突後、重錘と梁が一体となって挙動していることを示している。さらに、最大変位到達後、変形が零まで復元

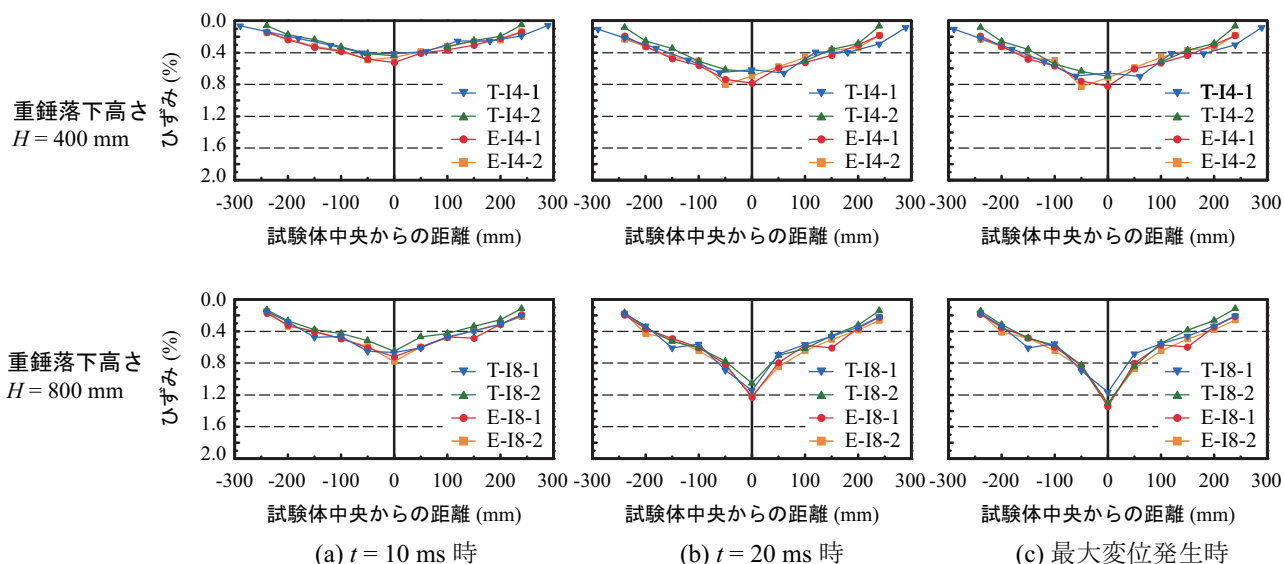


図-7 アラミド繊維シートの軸方向ひずみ分布の時間的な推移状況

していることから木材の損傷は軽微であり、シートの付着も未だ十分に確保されているものと考えられる。

これらの結果より、アラミド繊維シートを木材に接着することにより、耐衝撃性能が向上することが明らかになった。また、熱可塑性樹脂を用いて接着する場合においても梁の変形量や崩壊を制御可能であり、その効果は汎用のエポキシ樹脂を用いる場合と概ね同等であることが明らかになった。

4.2 シートの軸方向ひずみ分布の時間的な推移状況

図-7には、経過時間 $t = 10, 20$ ms 時、および最大変位発生時におけるアラミド繊維シートの軸方向ひずみ分布の時間的な推移状況を示している。図より、使用樹脂や重錘落下高さによらず、 $t = 10$ ms 時から最大変位発生時まで概ね載荷点を頂点とする三角形分布を示していることが分かる。また、重錘落下高さ $H = 800$ mm の場合には、最大変位時において、載荷点中央部のひずみが大きくなる傾向を示しているものの、ひずみ分布に大きな乱れは見られない。このことから、いずれの試験体においてもシートの剥離などは発生していないものと考えられる。

なお、静載荷時には、熱可塑性樹脂とアラミド繊維シート間に層内変位が生じる傾向が見られたのに対し、衝撃載荷時にはそのような傾向は見られず、エポキシ樹脂を用いる場合と同様のひずみ分布性状を示している。これは、熱可塑性樹脂が粘弾性的な性状を有しているため、材料の速度依存性が大きく、ひずみ速度が大きい場合において弾性係数や引張強度が大きくなることによるものと推察される。熱可塑性樹脂のひずみ速度効果等については、今後引き続き検討する必要があるものと考えている。

4.3 変形・損傷の時間的な推移状況

写真-7には、経過時間 $t = 10, 20$ ms 時、および最大変位発生時における木材の変形・損傷の時間的な推移状況を示すとともに各ケースの変位量を示している。

写真より、重錘落下高さ $H = 400$ mm において、無補強の N-I4 試験体の場合には、経過時間 $t = 20$ ms でスパン中央部の角折れが発生し、最大変位発生時には木材が著しく損傷し完全に角折れに至っていることが分かる。これに対し、シート補強した E/T-I4-1/2 試験体の場合には、時間経過とともに梁がたわむものの、破壊には至らない。また、重錘落下高さ $H = 800$ mm の場合には、シート補強した E/T-I8-1/2 試験体はさらに大きく変形するものの、明瞭な損傷はなく前述の載荷点変位波形(図-6(c))に示したように、ほぼ載荷前と同程度まで変位が復元する。

このように、無補強試験体の場合には、 $H = 400$ mm において破壊しているのに対し、補強試験体の場合には $H = 800$ mm においてもほとんど損傷がないことより、入力エネルギーの観点で耐衝撃性を評価すると、シート補強により耐衝撃性が2倍以上向上していると言える。また、熱可塑性樹脂を用いてアラミド繊維シートを接着した場合の耐衝撃性向上効果は、本実験の条件下においては、従来のエポキシ樹脂を用いる場合と同等であることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、アラミド繊維シート接着による木材の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、アラミド繊維シートで曲げ補強した木材の静的および衝撃載荷実験を行った。また、エポキシ樹脂を用いて接着する

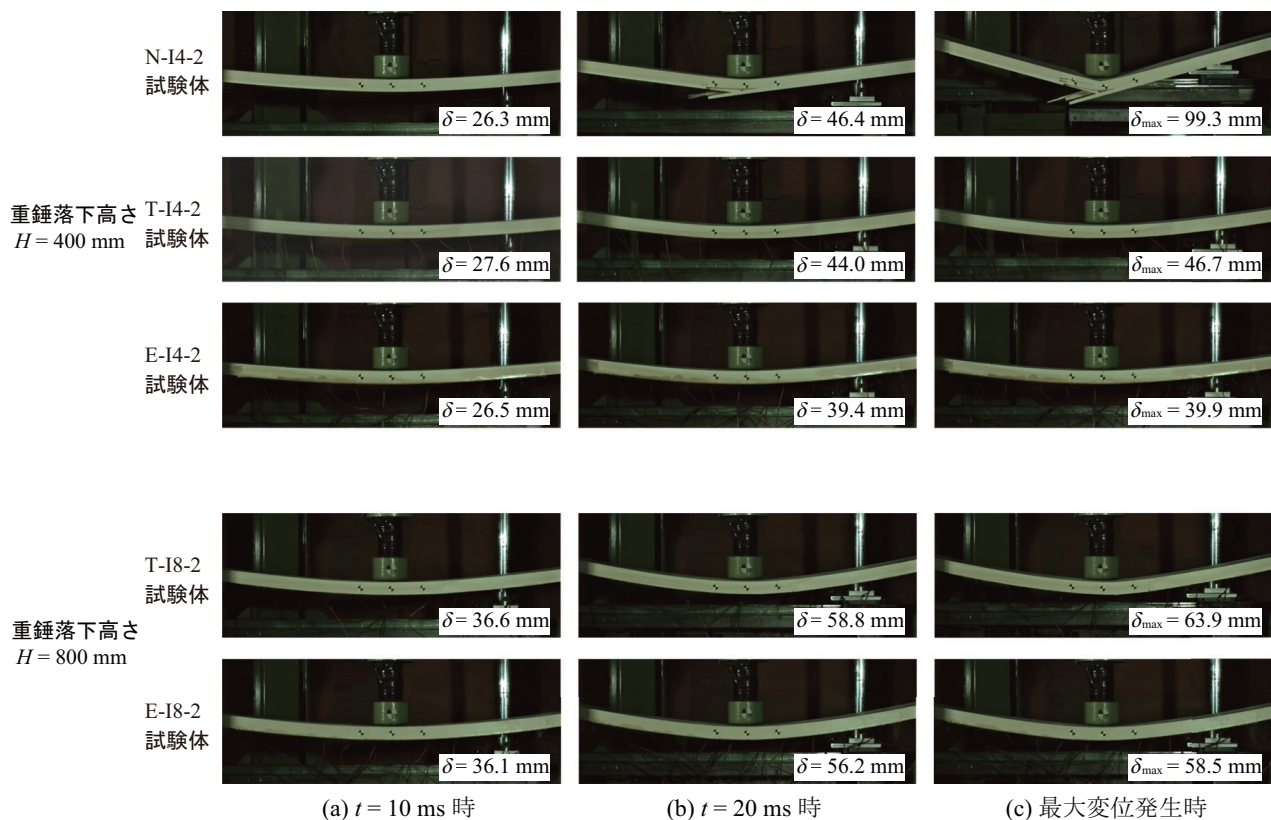


写真-7 各試験体の変形・損傷の時間的な推移状況

場合の他、熱可塑性樹脂を用いる場合についてもその適切な接着方法および補強効果を検討した。本研究の範囲で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

静載荷実験の結果より：

- 1) アラミド繊維シートを接着することにより、木材の曲げ耐力を向上可能である。また、その効果は、熱可塑性樹脂を用いて接着する場合が汎用のエポキシ樹脂を用いる場合よりも20%程度小さい。
- 2) 熱可塑性樹脂を用いる場合には、載荷荷重の増大に伴って、アラミド繊維シートの引張応力が増大する過程において、載荷点近傍部でアラミド繊維-熱可塑性樹脂間に層内変位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-熱可塑性樹脂間の付着特性を解明する必要があるものと考えられる。

衝撃載荷実験の結果より：

- 1) アラミド繊維シートを木材に接着することにより、木材の耐衝撃性能が向上する。また、その効果は、樹脂の種類によらずほぼ同様である。
- 2) 本実験の条件下においては、衝撃実験終了後においてもアラミド繊維シートの剥離・破断は全

く見られず、木材もほとんど損傷していない。また、アラミド繊維シートの復元性能が効率的に発揮され、残留変位も微小であることが明らかになった。

- 3) 静載荷時には、熱可塑性樹脂とアラミド繊維シート間にすべりが生じる傾向が見られたのに対し、衝撃載荷時にはそのような傾向は見られない。これは、熱可塑性樹脂が粘弾性的な力学特性を有しているため、材料の速度依存性が強く現れ、ひずみ速度が大きい場合において弾性係数や引張強度が大きくなることによるものと推察される。

今後は、より入力エネルギーが大きい場合における、アラミド繊維シートの剥離もしくは破断性状や熱可塑性樹脂の接着性能に及ぼす載荷速度の影響などについて検討する必要があるものと考えている。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、船木隆史君、小島雄登君をはじめとする室蘭工業大学構造力学研究室の大学院生および学部生に多大なるご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 竹田俊明, 栗橋祐介, 澤田純之: AFRPシートで曲げ補強した段落し部を有するRC柱の定変位繰り返し載荷実験, 応用力学

論文集, Vol.5, pp. 911-918, 2002.

- 2) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩, 川瀬良司, 栗橋祐介: 実規模 PC スノーシェットの耐衝撃性向上に関する重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1875-1884, 2000.
- 3) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性能に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 953-962, 2014.3
- 4) 栗橋祐介, 西 弘明, 三上 浩, 小室雅人, 岸 徳光: AFRP シートで曲げ補強した T 型 PC 梁の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 980-989, 2015.3
- 5) 土木学会 木材工学委員会: 土木技術者のための木材工学入門, 丸善出版株式会社, 2017.
- 6) 鶴澤 潔, 齊藤義弘, 保倉 篤: 土木・建築分野への複合材料利用—先進材料と革新製造技術による新たな取り組み—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 5, pp.II(1)-II(9), 2017.
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 手塚純一: アラミド繊維シートを用いた木質接合部および耐震開口フレームに関する研究, 東京大学大学院博士論文, 2008.3
(2017年9月25日受付)
(2018年2月1日受理)