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衝撃載荷実験

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

室蘭工業大学大学院	\bigcirc	学生員	池田	和隆 (Kazutaka Ikeda)
室蘭工業大学大学院		正 員	栗橋	祐介 (Yusuke Kurihashi)
東レ・デュポン (株)		非会員	坂井	秀敏 (Hidetoshi Sakai)
東レ・デュポン (株)		非会員	岡田	泰一 (Taiichi Okada)
東レ・デュポン (株)		非会員	斎藤	智久 (Tomohisa Saito)
室蘭工業大学大学院		正 員	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.

我々の研究グループでは,これまで耐衝撃用途 RC 構造 物の耐衝撃向上法として FRP シート接着工法を提案してお り,FRP シートには耐衝撃性に優れるアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを推進してきた¹⁾.

アラミド繊維製 FRP シート補強による RC 梁の耐衝撃性向 上を明らかにしてきたが入力エネルギーが大きい場合には, シートが破断して終局に至る傾向にあることも確認してい る.これは,従来の FRP シート接着工法の場合には,含侵 接着樹脂を用いて施工するため,接着後においてはアラミ ド繊維のしなやかさが低減されることによるものだと推察 される.

ここで、本研究で着目した熱可塑性樹脂には、以下の特 性に期待できる.1)熱可塑性樹脂は柔軟性に優れているこ とから耐衝撃性が高く、文献²⁾においてエポキシ系含侵接 着樹種よりも、高いエネルギー吸収性を有していることが 確認された事からアラミド繊維のしなやかさを生かす可能 性があると考えられる、2)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、施工時間の大幅な短縮に関して期待できるものと 考えられる、3) そして、著者らは、連続繊維補強熱可塑性 樹脂 (FRTP)シートを予め製作することを想定しているた め、FRTPシートと熱源のみで補修補強作業を完了するこ とが可能となる.以上より、FRTPシート加熱圧着工法は、 耐衝撃性向上効果のみならず、施工の簡易化・短縮などが 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衝撃載荷実験を行った. なお,連続繊維シートには,しなやかで耐衝撃性に優れる アラミド繊維を用いた.また,木材には比較的製品のばら つきの少ないヒノキ集成材を用いることとした.

2. 実験概要

2.1 試験体概要および一覧

図-1には、本実験に用いた試験体の概要を示している. 試験体は、断面寸法(幅×厚さ)が100×20mmで全長が 1,000mmのヒノキ集成材の板である.純スパン長は800 mmとしてスパン中央部に衝撃荷重を作用させる形で実験 を行った.また、アラミド製 FRP (AFRP) シートもしくは



図-1 試験体図

アラミド製 FRTP (AFRTP) シート補強する場合には、その 補強範囲をスパン中央部 500 mm とした. なお, シート上 には検長 10 mm のひずみゲージを 50 mm 間隔で貼付して いる. 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いる. 試験体は、補強の有無、使用樹脂、重錘落下高さHを変化 させた全10体である.試験体の第1項は、無補強の場合 には英文字Nと重錘落下高さ(4:400 mm)の組み合わせで 示し、補強試験体の場合には使用樹脂の種類(T:熱可塑性 樹脂, E:エポキシ樹脂)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2 体ずつ実験を行っている.第2項には、これらの通し番号 (1,2)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 および **表**-3 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.また,**表**-4 には,本実験で用いたアラミド連続繊維シートの材料特性 値を示している.

2.2 FRTP シートの成形方法

FRTP シートは、ホットプレスを用いて連続繊維シート に熱可塑性樹脂を溶融含浸させることで成形した.また、 成形圧力を 0.5 MPa、成形温度を 200 °C、成形温度保持時 間を 90 sec とし、その後圧力を除荷することで、厚さが 0.8 ~ 1.0 mmt となった.

2.3 アラミド連続繊維シートの接着手順

本実験では、アラミド連続繊維シートの接着方法として、

平成28年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第73号



図-2 各種時刻歴応答波形

試験体名	使用樹脂	施工・養生期間	重錘落下高さ <i>H</i> (mm)	
N4-1			400	
N4-2				
T4-1		約 0.5 日	400	
T4-2	熱可塑性樹脂			
T8-1			800	
T8-2				
E4-1	エポキシ樹脂		400	
E4-2		約8日		
E8-1			800	
E8-2				

表-1 試験体一覧

表-2 熱可塑性樹脂の物性値

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

表-3 エポキシ樹脂の力学的特性値 (公称値)

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

熱可塑性樹脂を用いて加熱圧着する場合とエポキシ樹脂を 用いて含浸接着する場合に着目している.以下に,両接着 方法の手順を示す.

表-4 アラミド繊維の力学的特性値 (公称値)

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



写真-1 衝撃実験装置

(1) 熱可塑性樹脂を用いて加熱圧着する場合

- 紙ヤスリ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および脱脂を行う.
- シート接着範囲に熱可塑性樹種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に、使用温度が200°Cで あるシリコンラーバーヒーターを用いてシート接着範 囲を2分間、加熱を行う。
- 4) シート接着範囲の加熱後,FRTPシートを補強範囲に 設置し,先程と同様にラバーヒーターを用いてFRTP シートを5分間,加熱圧着を行う.
- 5) 加熱圧着後, 試験体が室温まで冷却するまで数時間を



平成28年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第73号

図-3 AFRTP/AFRP シートの軸方向ひずみ分布の時間的な推移状況

要する.

(2) エポキシ樹脂で含浸接着する場合

- 紙ヤスリ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および脱脂を行う。
- 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、アラミド連続 繊維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日間を要 する。

2.4 載荷実験方法と測定項目

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 に相 当するよう事前にキャリブレーションを行い,落下高さ 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. 重錘の衝突速度は、レーザー式センサーを用いて 測定した.**写真-1**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.載荷点変位は、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. 実験結果

3.1 時刻歴応答波形

図-2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-H400 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-2(a) より,重錘落下高さH = 400 mmにおいて,無 補強の N4-1/2 試験体の重錘衝撃力波形は,最大振幅が2kN 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 T/E4 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剛 性が向上したことが分かる.また,重錘落下高さH = 800mmでは,シート補強した T/E8 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-2(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-2(c)より,無補強のN4 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 T/E4 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.前述の補 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.また,最大変位到達後,変形が零まで復元して いることから,シートの付着は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、AFRTPシートを加熱圧着する場合に 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 従来のAFRPシート接着の場合と概ね同等であることが明 らかになった.

3.2 シートの軸方向ひずみ分布の時間的な推移状況

図-3には、経過時間 t = 10 および 20 ms 時,および最大変位発生時における AFRTP/AFRP 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。ま



写真-2 各試験体の変形・損傷の時間的な推移状況

た,ひずみ分布に大きな乱れは見られないことより,シートの剥離などは発生していないことが明らかになった.

ただし,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.このことから,今後は更に入力エネルギーを 増加した場合の検証を行う必要があるものと考えられる. 3.3 変形・損傷の時間的な推移状況

写真-2には、経過時間t = 10および 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 N4 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 T/E4 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 T/E8 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-2(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、提案 のAFRTP シートを加熱圧着する工法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AFRP シート接着 工法と同程度であることが明らかになった。

4. まとめ

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 圧着した木材の衝撃載荷実験を行った.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.

- AFRTP シートを加熱圧着する補強工法は、従来の AFRP シート接着工法と同程度の耐衝撃性向上効果を有して いる。
- 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 AFRTP 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。

本実験の条件下においては、AFRTP および AFRP シート 接着工法における耐衝撃性向上効果は同程度であることが 確認できる.今後は、本実験で用いた試験体の繰り返し衝 撃載荷実験および入力エネルギーを大きくしたケースを実 施することで、各接着樹脂による耐衝撃性向上効果の差異 の検証を行う必要がある.

参考文献

- 今野久志,西弘明,栗橋祐介,岸徳光::AFRPシート 接着補強による損傷 RC 梁の耐衝撃挙動,コンクリー ト工学年次論文集,No. 35, pp.721-726, 2013.7
- 2) 邊吾一,坂田憲,片山傳生:同じ強化繊維を用いた HFRTPとHFRPの力学特性評価,日本複合材料学会 誌, Vol. 41, No. 4, pp.112-121, 2015.4