

## (46) 木材・CFRTP ケーブル複合はりの耐荷性能に関する実験的研究

高橋 然<sup>1</sup>・栗橋 祐介<sup>2</sup>・中山 武俊<sup>3</sup>・瀧能 功介<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科地球社会基盤学専攻（〒920-1192 石川県金沢市角間町）  
E-mail: takahashi7272@stu.kanazawa-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 金沢大学教授 理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）  
E-mail: kuri@se.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup> 非会員 小松マテール株式会社 技術開発本部 環境・バイオ技術開発部 先端材料 G  
（〒929-0124 石川県能美市浜町ヌ 167）  
E-mail: t\_nakayama@komatsumatere.co.jp

<sup>4</sup> 非会員 小松マテール株式会社 技術開発本部 環境・バイオ技術開発部 先端材料 G  
（〒929-0124 石川県能美市浜町ヌ 167）  
E-mail: ko\_takino@komatsumatere.co.jp

本研究では、熱可塑性炭素繊維補強（CFRTP）ケーブルおよび木材はりを用いた軽量でかつ強靱な応急組立橋の開発を目的として、木材・CFRTP ケーブル複合はりの静的載荷実験を行った。比較のため、木材はりの載荷実験も行った。木材・CFRTP ケーブル複合はりには、木材はりの中央下部に鉛直材を取り付け CFRTP ケーブルを斜材として機能させることにより、耐荷性能の向上を図った。その結果、CFRTP ケーブルで木材はりを補強することで、はりの曲げ剛性が約 3.5 倍向上することに加え、耐荷性能のばらつきが小さくなり、弾性理論に基づく計算結果と概ね対応することが明らかとなった。また、木材・CFRTP ケーブル複合はりには、ほぼ等価な剛性を有する RC はりおよび角形鋼管はりよりも重量比性能に優れることが明らかとなった。

**Key Words:** timber-CFRTP cable hybrid beam, static loading test, load-carrying performance per weight

### 1. はじめに

我が国は世界有数の地震大国であり、全国各地において大規模地震のリスクに直面している。大規模地震の発生により橋梁の崩落や道路の陥没が発生すると、緊急車両の通行が困難となり人命救助や災害復旧の大きな妨げとなる。このようなことを回避するため近年では、災害時においても迅速に供用可能な応急組立橋の開発が推進されている<sup>1,2)</sup>。この種の構造物には軽量かつ強靱であることが求められることから、木材などの軽量な材料を用いることが有効であるものと考えられる。しかしながら、木材はコンクリートや鋼材と比較して強度や弾性率が小さく、かつ部材ごとのばらつきが大きいいため軽量な補強材料と組み合わせる必要があり、剛性や耐力を向上させる必要があるものと考えられる。

建築分野においては軽量で高強度かつ耐久性に優れる

連続繊維材料が歴史的建築物に用いられている<sup>3,4)</sup>。例として、歴史的木造建築物である富岡製糸場では、熱可塑性炭素繊維補強ケーブル（CFRTP ケーブル）が耐震補強材として用いられている。したがって、土木分野においても木材と CFRTP ケーブルを組み合わせることで、災害時における軽量でかつ強靱な応急組立橋を開発できるものと考えられる。しかしながら、CFRTP ケーブルを橋梁の基本部材となるはり部材へ適用することに着目した検討は少ないのが現状である。

このような背景から本研究では、CFRTP ケーブルおよび木材はりを用いた軽量でかつ強靱な応急組立橋の開発を目的として、木材・CFRTP ケーブル複合はりの静的載荷実験を行った。比較のため、木材はりの載荷実験も行った。木材・CFRTP ケーブル複合はりには、木材はりの中央下部に鉛直材を取り付け CFRTP ケーブルを斜材として機能させることにより、耐荷性能の向上を図っ

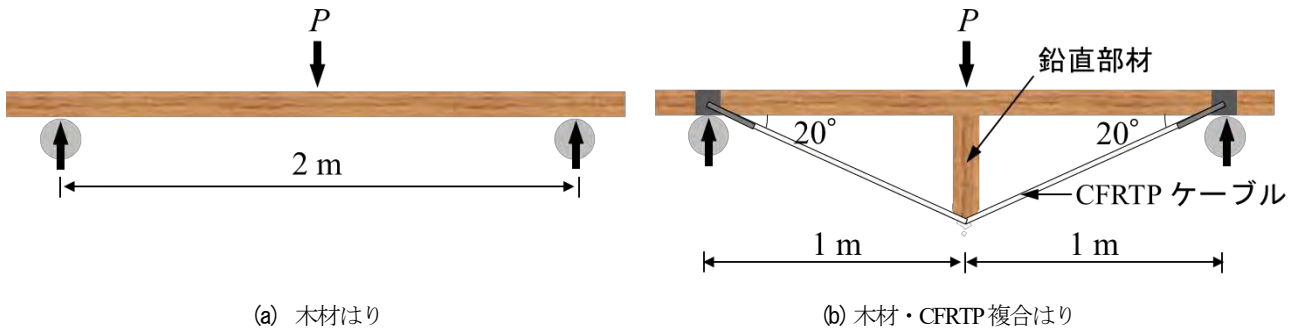


図-1 試験体概要



図-2 鉛直部材先端部

図-3 支点部におけるケーブル結合部の状況

表-1 CFRTP ケーブルの仕様および材料特性

呼び径 (mm)	有効断面積※1 (mm <sup>2</sup> )	単位質量 (g/m)	破壊耐力 (kN)	引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> )
9.3	27.5	88	80 以上	160

※1 有効断面積：主に力を負担する炭素繊維と複合材料用樹脂の総断面積

た。また、一般的な構造部材である RC はりや、鋼材を素材とする角形鋼管はりとの重量比性能を比較し、木材・CFRTP ケーブル複合はりの有効性について検証を行った。

## 2. 試験体概要および実験方法

### (1) 試験体

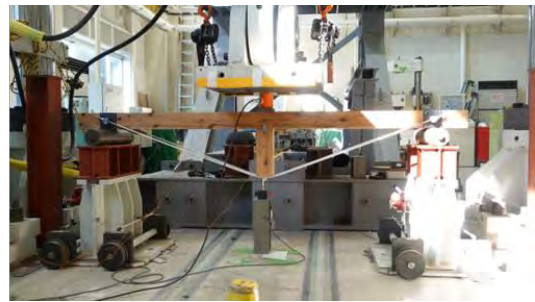
図-1 に、実験に使用した試験体の概要を示した。本実験に用いた木材はりは断面高さ、および断面幅が 105 mm、スパン長が 2,000 mm であり、国産のスギ角材を素材としている。スギ角材を用いた理由は、一般的な木材であり、かつ多く市場に流通しているためである。寸法については、実験作業のしやすさや試験装置の寸法などを考慮して決定した。なお、木材・CFRTP 複合はりについては図-1(b)に示すようにスパン中央部の下部に長さ 364 mm の鉛直部材を取り付けたうえで両支点部を鉛直

部材の先端部を介して 2 本の CFRTP ケーブルで結び付けることで補強している。鉛直部材の長さは、CFRTP ケーブルと木材の角度が 20° になるように設定した。これは、CFRTP ケーブルが 20° 程度の角度がついていても直線状の場合と同程度の引張性能が期待できることを別途実施した材料試験の実績から確認しているためである。鉛直部材の先端部は図-2 に示すように金物不要とし CFRTP ケーブル側面における応力集中を避けるため、曲面状に成形した。

また両支点部における CFRTP ケーブルと木材はりは、図-3 に示すようにケーブル貫通用丸鋼と補強用鋼板を介する方式により結合した。これは、CFRTP ケーブルと木材はりをピン結合し、かつ木材はりの破損を抑制することを目的として考案したものである。実験時には、CFRTP ケーブルの補強効果を確実に発揮させるため、ケーブル端部のナットを締め付けることにより初期張力を与えた。なおナットの締め付けは、木材はりがわずかに上反りする程度を目安に調整した。表-1 に木材はり



(a) 木材はり



(b) 木材・CFRTP複合はり

図-4 実験状況

表-2 計測項目および使用機器

計測項目名および単位	使用機器	機器の主なスペック
載荷荷重 (kN)	起歪柱型ロードセル	計測容量：1,200 kN 応答周波数：4.0 kHz
載荷点変位 (mm)	接触式変位計	計測容量：100 mm
CFRTP ケーブルのひずみ ( $\mu$ )	ひずみゲージ	ゲージ長：40 mm



(a) 木材はり (はり下面)



(b) 木材・CFRTP複合はり (鉛直部材先端部)

図-5 実験後の試験体の損傷状況

を補強する際に用いた CFRTP ケーブルの仕様および材料特性値の一覧を示した。試験体数は、無補強試験体を2体、補強試験体を3体とした。

## (2) 実験方法

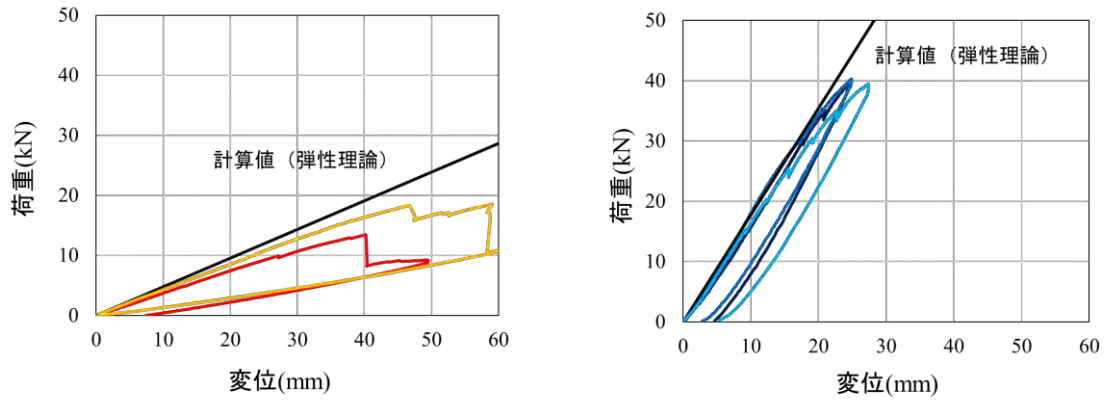
図-4 に静的載荷実験の実験状況を示した。荷重を載荷する際には、木材はり、木材・CFRTP 複合はりともにスパン中央部を載荷位置とした3点曲げ載荷により実施した。表-2 に、実験時の計測項目を使用した計測機器とともに示した。なお、今回の実験で木材はりに載荷を行う際には、安全性を考慮して CFRTP ケーブルのひずみが 5,000  $\mu$  程度に達するまで載荷した。

## 3. 実験結果

図-5 に、実験終了後の試験体の損傷の状況を示した。また、図-6 には各試験体の荷重-変位関係を計算値と

ともに示した。図-6 中の計算値は無補強試験体の場合には曲げのみを考慮し、補強試験体についてはトラスを仮定し、軸力による弾性理論に基づいたひずみエネルギー法により算出した。

図-6 より無補強試験体については、荷重がおよそ 15 kN に達した段階で急激に低下していることがわかる。なお、荷重が急激に低下した段階で図-5(a)に示すように試験体下縁部が破断し部材軸方向に割裂したことを実験時に確認している。また、実験値と計算値を比較すると、載荷初期の段階では両者が概ね対応しているものの、変位が 10mm 以上になると、実測耐力が計算耐力を下回っていることがわかる。これは、実験時に木材はりに徐々に亀裂や繊維破断が発生したことに起因していると考えられる。さらに、2 体の木材はりの実験結果を比較すると、変位が 20mm を超えた段階で徐々にばらつきが大きくなっていることがわかる。これは、各試験体における木目や枝節等の位置が異なることにより発生しているものと推察される。



(a) 木材はり

(b) 木材・CFRTP 複合はり

図-6 各試験体ごとの荷重-変位関係および弾性理論による計算結果

表-3 各部材の材料特性値

部材名	材料特性値名	単位	値
木材・CFRTP ケーブル複合はり	木材圧縮強度	MPa	34.3
	木材の弾性係数	GPa	7.85
	木材の比重	—	0.38
	CFRTP ケーブルの破壊耐力	kN	80 以上
	CFRTP ケーブルの引張弾性率	kN/mm <sup>2</sup>	160
	CFRTP ケーブルの単位質量	g/m	88
RC はり	コンクリート圧縮強度	MPa	30
	鉄筋降伏強度		345
	コンクリートの弾性係数	GPa	28
	鉄筋の弾性係数		200
	RC の比重	—	2.45
角形鋼管はり	鋼材降伏強度	MPa	245
	鋼材引張強度		400
	鋼材の弾性係数	GPa	200
	鋼材の比重	—	7.85

表-4 各部材の仕様

部材名	断面高さ (mm)	断面幅 (mm)	スパン長 (mm)	曲げ剛性 (N/mm)
木材・CFRTP ケーブル複合はり	105	105	2,000	1,770
RC はり	160	150		1,850
角形鋼管はり	100	100		1,680

一方、木材・CFRTP 複合はりについては図-5(b)に示すように鉛直部材の先端部にケーブルの干渉痕が確認できたものの、木材はりやケーブルに目立った損傷は見受けられなかった。また、荷重を除荷後変位が概ね 0 mm まで復元していることから CFRTP ケーブルのひずみが 5,000 μ に達するまでの段階において各構成部材はほとんど損傷していないと考えられる。実験時においても木材はりおよび CFRTP ケーブルに目立った損傷がないこと

を確認している。これは、木材および CFRTP ケーブルがそれぞれ圧縮および引張材として外力に抵抗し、ともに弾性範囲内であったことによるものと考えられる。図-6 の実験値と計算値を比較すると、最大載荷荷重である 40 kN 程度に達するまで概ね対応していることが確認できる。このことから木材を CFRTP ケーブルで補強することにより、ケーブルのひずみが 5,000 μ 程度に達するまでは、部材が損傷することなく弾性理論通りに荷

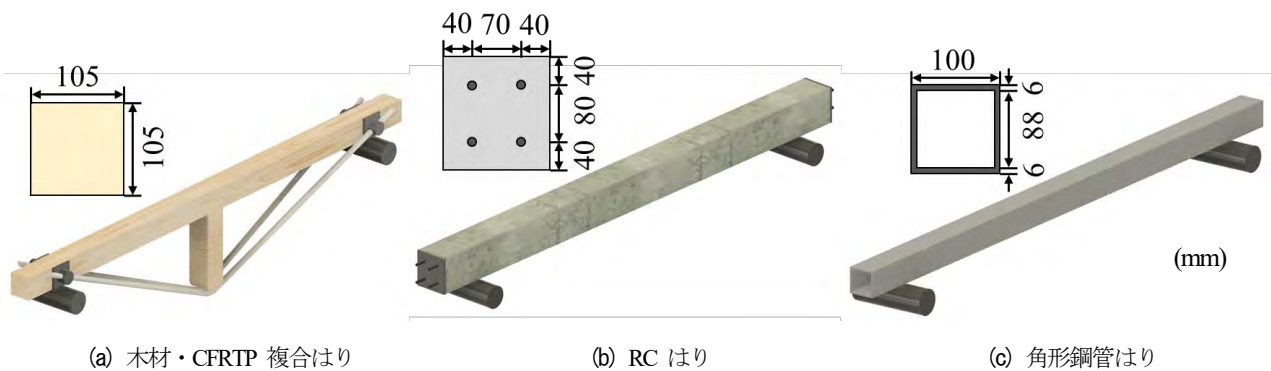


図-7 各試験体の概要

表-5 各部材の重量比性能の結果

部材名	部材の総重量 (N)	曲げ剛性 (N/mm)	計算曲げ耐力 (kN)	重量比曲げ剛性 ((N/mm)/N)	重量比曲げ耐力 (N/N)
木材・CFRTP 複合はり	101	1,770	54.7	17.6	543
RC はり	1,153	1,850	18.1	1.60	15.7
角形鋼管はり	136	1,680	13.7	12.3	101

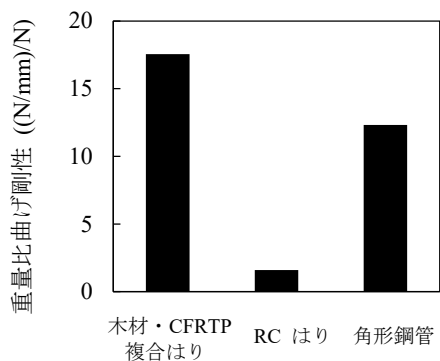


図-8 各部材の重量比曲げ剛性

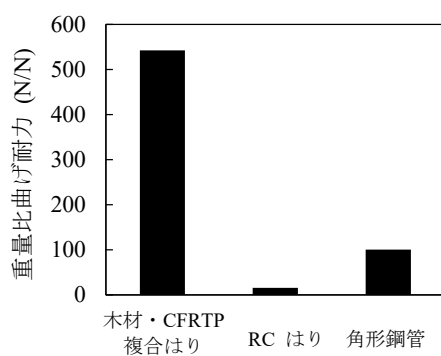


図-9 各部材の重量比曲げ耐力

重に抵抗できるといえる。

さらに、これらの実験結果より本実験の範囲内においては木材はりに鉛直部材を取り付けたうえで CFRTP ケーブルを用いて補強することにより、3.5 倍以上の曲げ剛性の向上効果を期待できることが明らかとなった。

#### 4. 異なるはり部材との重量比性能の比較

本章では、図-1 (b) に示した木材・CFRTP ケーブル複合はりの重量比性能について検証する。検証方法として、一般的な構造部材である鉄筋コンクリート (RC) はりや鋼材を素材とした角形鋼管はりの重量比性能と比較を行う。なお、比較に用いる RC はりや角形鋼管はりの設計条件は、スパン長は木材・CFRTP ケーブル複合はりと同様とし、断面幅を 100~150 mm 程度、かつほぼ等価な曲げ剛性を有するものとする。

表-3 および表-4 には、それぞれ検討対象とする各部材の材料特性と仕様を示した。また、図-7 には各部材の概要を示した。図-7 中には断面図も併せて示した。スパン長はいずれの試験体も 2,000 mm である。RC はりの断面寸法 (高さ×幅) は 160×150 mm であり異形鉄筋 D13 を上下 2 本ずつ配筋している。また、かぶり厚は 40 mm とした。角形鋼管はりの断面寸法は 100×100 mm であり、厚さは 2.3 mm である。これは、JIS G 3466:2015 を参考にして選定した。

表-5 に、各部材の重量比性能の一覧を示した。ここで、木材・CFRTP 複合はりの曲げ耐力は、木材・CFRTP 複合はりには CFRTP ケーブルの部材力が破壊耐力に到達した際の荷重、RC はりは断面分割法による曲げ耐力、角形鋼管はりは载荷点部下縁の応力が鋼材の引張強度に達した際の荷重としており、表-3、表-4 に示された値を基に算出した。また、図-8 および図-9 にはそれぞれ各部材の重量比曲げ剛性と重量比曲げ耐力を示した。図-8

から、比較対象とした3つの部材のうち木材・CFRTP複合はりの重量比曲げ剛性が最も大きくなっていることが分かる。また図-9 から、重量比曲げ耐力についても木材・CFRTP複合はりが最も大きくなっていることがわかる。したがって、本研究における木材・CFRTP複合はりは同スパンかつ概ね同一の曲げ剛性を有するRCはりおよび角形鋼管はりと比較して、重量比曲げ剛性並びに重量比曲げ耐力に優れていることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本研究では、木材はりおよび熱可塑性炭素繊維補強(CFRTP)ケーブルを用いた軽量かつ強靱な応急組立橋の開発を目的に、木材はりおよび木材・CFRTPケーブル複合はりを対象として静的荷重載荷実験を合計5ケース実施した。また、木材・CFRTPケーブル複合はりと概ね等価な曲げ剛性を有するRCはりおよび角形鋼管はりと重量比性能の比較を行い、その有効性を検証した。その結果以下のことが明らかとなった。

- 1) 木材はりの場合は、終局時は下縁部が破断し部材軸方向の割裂が生じる。また、試験体ごとの耐荷性能のばらつきが大きく、はりの変位が大きくなるにつれて曲げのみを考慮したひずみエネルギー法による算出結果との間に差が生じる。
- 2) CFRTPケーブルを用いて木材はりを補強することにより、はりの曲げ剛性がおよそ3.5倍向上する。また、

耐荷性能によるばらつきが小さく、トラスを仮定した弾性理論に基づく計算結果と概ね対応する。

- 3) 本研究での木材・CFRTPケーブル複合はりは、同一の剛性を有するRCはりや角形鋼管はりと比較して、重量比性能がより優れている。

## 参考文献

- 1) 中沢 正利, 小野 秀一, 近広 雄希, 木下 幸治: 応急組立橋の使用状況調査及び緊急仮設橋の基準整備に向けた提言, 構造工学論文集 Vol. 69A, 委員会報告, pp.1208-1218, 2023
- 2) 平沢秀之, 小野秀一, 中村繁央, 岩丸弘, 大久保宣寿, 青柳有輝: 軽量材料の緊急仮設橋への適用性, 構造工学論文集 Vol. 69A, 委員会報告, pp.1198-1207, 2023
- 3) 文化庁文化財部参事官: 重要文化財(建造物)耐震診断・耐震補強の手引, 2013
- 4) 文化庁文化資源活用課: 伝統的建造物群の耐震対策の手引, 2020
- 5) 高岩 裕也, 松本 大輝, 鶴澤 潔: CFRP ストランドの用途拡大に向けた端部定着構造の開発研究, 日本建築学会技術報告集 Vol.28, No.68, pp.36-41, 2022
- 6) 金沢工業大学: 革新材料による次世代インフラシステムの構築 ~安全・安心で地域と共存できる数世紀社会の実現~, 金沢工業大学 COI 成果報告書, 2022
- 7) 日本工業規格: JIS G 3466:2015 一般構造用角形鋼管, 2015

(Received August 25, 2023)

## EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD CARRYING CAPACITY OF TIMBER-CFRTP CABLE HYBRID BEAM

Zen TAKAHASHI, Yusuke KURIHASHI, Taketoshi NAKAYAMA  
and Kosuke TAKINO

In this study, static loading tests of timber-CFRTP cable hybrid beams were conducted to develop a lightweight and strong emergency assembly bridge using CFRTP cables and timber beams. Loading tests of timber beams were also conducted for comparison. The load-carrying capacity of the timber-CFRTP cable hybrid beam was improved by attaching a vertical member to the center bottom of the timber beam and allowing the CFRTP cable to function as a diagonal member. The results showed that reinforcing the timber beams with CFRTP cables increased the bending stiffness of the beams by a factor of about 3.5 and reduced the variation in load carrying capacity, which was in good agreement with the calculation results based on elastic theory. In addition, the timber-CFRTP cable hybrid beams showed better performance-to-weight ratio than RC beams and square steel pipe beams, which have almost equivalent stiffness.