

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 19 日現在

機関番号：32422

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560645

研究課題名（和文） 炭素繊維材を用いた伝統的建築物の保存補修法に関する研究

研究課題名（英文） Study on preservation repair method of traditional building using carbon fiber material

研究代表者

北條 哲男（HOJO TETSUO）

ものづくり大学 技能工芸学部 教授

研究者番号：30 348346

研究成果の概要（和文）：本研究では、炭素繊維材を用いた木造建造物の補修・補強対策の実施例として日光の神橋を取り上げ、その補修内容と現地の環境条件を調査分析し、次いで屋外暴露や促進試験により環境条件が炭素繊維補強材の付着強度および曲げ強度等の耐久性に及ぼす影響を検討した。本試験の結果、付着強度や曲げ強度が低下する傾向が認められ、降雨や乾湿の繰り返しの影響を把握することができた。劣化のメカニズムとして、付着強度の低減が曲げ強度の低下に影響を及ぼすことが明らかになり、長期耐久性の評価は付着特性に着目することで一定の判定ができる可能性があることを示した。また漆塗装の炭素繊維材表面の耐候性試験の結果、維持管理面では従来の木材と同様の取り扱いが可能であることを把握した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to examine a durability evaluation method for wooden members reinforced by carbon fiber material. It is required to evaluate the durability of a carbon fiber reinforcement part from a viewpoint of maintenance management. Environmental conditions such as temperature and humidity around member of the wooden bridge were measured for four months to grasp conditions of the construction site. These are used as experimental conditions for a carbon reinforced wooden member, and natural exposure test and heat cycle test were carried out. Using these tested members, bending performance and adhesion characteristics were analyzed. Finally, a mechanism of deterioration was considered from the correlativity of the adhesion and the bend characteristic. As a result of the weather resistant test on the surface of the carbon fiber material of the lacquer painting, it was indicated that the deterioration characteristic on the surface was similar to wood.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築史・意匠

キーワード：保存・再生

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

(1) 日光の神橋は約 370 年前に建立され、我が国の重要文化財に指定される貴重な木造橋であり、定期的に修理工事が行われている。保存修理工事は伝統的技法を継承した方針で行われるが、平成の修理工事では、軽量で高強度な炭素繊維材を用いた補修法が新たに採用された。現存する構造部材を再生利用して修復を図る場合には、高機能な炭素繊維材を用いる方法は有力な対応である。しかし、炭素繊維材による補強は、これまで鋼構造物やコンクリート構造物の耐震補強等に使用される例が殆どであり、木造構造物にあっては最適な補強法や長期耐久性の評価に関してのデータは極めて少ない。

(2) 木造構造物を補強する場合には、木質内部の腐朽や湿度による接着面の付着性能の低下が強度特性に影響を及ぼすことを考慮することが必要となる。本研究はこのような背景から、木質材料の特性を踏まえた炭素繊維材の補強・補修法やその耐久性の評価を行い、炭素繊維材を用いた歴史的建造物の最適な補強・補修法の確立へ向けた研究を行うものである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、世界に誇る我国の重要な伝統的木造建造物を、炭素繊維材の高機能性を利用して補強・補修する方法を確立し、新たな保存修復法を構築することが目的である。そのための研究方法として、温度・湿度等の環境条件が木質材料の補強部劣化に及ぼす影響に関して、環境試験・促進耐候性試験にて分析を行なう。

(2) その結果を踏まえ、耐久性に優れた補強材料や補強方法を考案し、重要文化財等の解体修理の際に当初材再利用率を高める新たな手法を開発し、最終的には保存補修法の設計・施工指針や維持管理の基礎データとする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、温度・湿度の環境条件が炭素繊維複合材に及ぼす影響を調査するため、恒温室・湿熱室を用いた環境実験を行ない、長期的な環境履歴を試験室にて再現する実験を行う。そのために、事前に建築物の外装材の長期特性の評価に用いられる各種試験法・基準類の調査を実施する。

(2) 環境試験後の炭素繊維複合材の付着・

曲げ強度を測定し、その強度低減状況から強度特性の変化等の基礎的特性を把握し、複合材としての耐久性の評価を行なう。また、漆塗面の変質状況に関しては、2年程度の短期間で耐候性が評価可能な屋外促進暴露試験を用いて、表面状態を調査して長期的な特性を評価する。

4. 研究成果

(1) 炭素繊維補強材の付着特性

環境試験後、建研式引張試験機にて炭素繊維補強材の木材との付着強度を測定した。

自然暴露試験後の試験体の引張試験結果、初期値と比較すると1年後は16%、2年後には23%の付着強度の低下が見られた(図1)。この強度の低下の原因のひとつとして、降雨による乾湿の繰り返しにより木材との接着部付近の劣化が進行したことが考えられる。

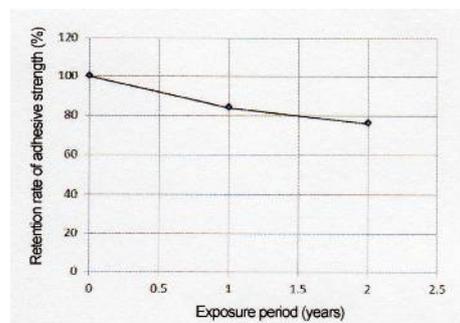


図1 付着強度の変化（暴露試験後）

ヒートサイクル試験で処理を行った試験体の引張試験結果を図2に示す。試験体の平均付着強度は1.66N/mm²であり、100サイクル750時間の処理を与えた試験後の付着強度は1.68N/mm²となった。各処理時間で多少のばらつきは見られるが、付着強度はほとんど変化していないと見なすことができる。本試験のほか、80°C・95%RHで600時間の恒温室試験も実施したが、同様の結果であった。

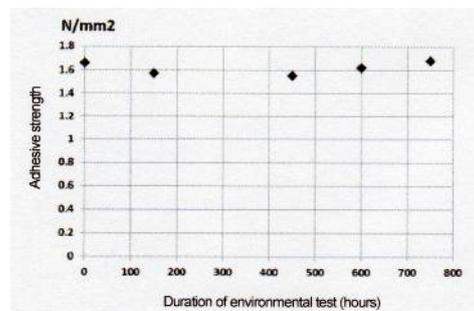


図2 付着強度の変化（ヒートサイクル試験後）

(2) 炭素繊維補強材の曲げ特性

各試験体を用いて曲げ試験を行った。試験には万能材料試験機を用い、支点間長 450mm とした。

まず曲げ試験は木材のみについて行い、試験に用いた木材の曲げ剛性を把握した。その後、各試験体の曲げ剛性を計測して補強効果を確認した。最後に、環境試験後の試験体について曲げ試験を行い、環境要因が曲げ特性に及ぼす影響について把握した。実験から曲げ剛性を求める方法として、中央点のたわみと荷重の関係を示す式を用いた。

無補強材の曲げ剛性 (EI_0) は $1.57 \times 10^9 \text{ N/mm}^2$ であった。補強材の曲げ剛性 (EI_1) については平均値で $2.90 \times 10^9 \text{ N/mm}^2$ であった。剛性を比較すると、補強により試験体は 1.85 倍向上していることが確認できた。試験体の補強効果の計算値は 1.87 倍であり、ほぼ計算通りの補強効果であった。なお、本実験に用いた米松の弾性係数は $11,700 \text{ N/mm}^2$ であった。

ヒートサイクル試験後の試験体を用いた曲げ試験結果を表 1 に示す。補強後の初期の曲げ剛性と試験後の曲げ剛性を比較 (EI_2/EI_1) したものを剛性比として示した。今回実施した環境条件では、炭素繊維補強材の曲げ剛性に大きな変化は見られなかった。従って、今回の実験条件の範囲では本ヒートサイクルの環境要因が曲げ特性に与える影響は少ないと判断できる。

表 1 曲げ試験結果 (ヒートサイクル試験後)

Specimen	Displacement	Load	Rigidity EI_1	Rigidity Ratio	Rigidity Ratio
	mm	N	N·mm	EI_1/EI_0	Average
HCa-1	3.18	5.840	3.49×10^9	1.20	1.05
	3.07	4.177	2.58×10^9	0.89	
HCa-2	3.30	5.760	3.31×10^9	1.14	
	3.79	6.206	3.11×10^9	1.07	
	3.63	4.605	2.41×10^9	0.83	
HCa-3	3.44	3.632	2.00×10^9	0.69	0.97
	3.35	6.158	3.49×10^9	1.20	
	3.51	6.057	3.28×10^9	1.13	
	3.37	4.387	2.47×10^9	0.85	
	3.37	5.622	3.17×10^9	1.09	
HCa-4	3.48	6.353	3.47×10^9	1.20	1.10
	3.70	6.999	3.59×10^9	1.24	
	3.38	4.443	2.50×10^9	0.86	

2 年間屋外暴露した試験体についても同様な曲げ試験を行い、曲げ剛性を比較した。自然暴露した試験体の 1 年後は強度の変化はないと見なすことができるが、2 年後の剛性比は低下し 0.87 となった (図 3)。屋外暴露後の試験体は付着強度も次第に低下していることから、付着強度の低下に伴い曲げ剛性の補強効果が低減し、曲げ剛性の低下につながるメカニズムが示されたと考えられる。

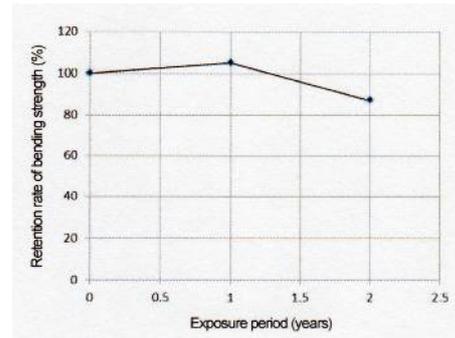


図 3 曲げ強度の変化 (暴露試験後)

本結果から、付着特性に着目することで付着強度と曲げ強度の相関性が判断できる可能性があることが示された。ただし、曲げ剛性の低下の程度に関しては、本試験の気象条件などの影響を受けるため、さらなる検討が必要であろう。

(3) 漆塗装の炭素繊維材表面の耐候性

漆塗装された炭素繊維材の表面の耐候性を調査するために、表 2 に示す試験体を使用した。漆塗装された炭素繊維材の耐久性の評価は、同じ材料によって塗装された木質材料の表面と比較することによって調べた。また本試験においては、数種の漆の種類や色についても比較した。試験体は幅 25 mm、長さ 130 mm である。

表 2 漆塗装の試験体

Specimen	Base Material	Surface	Color
A1	Carbon fiber	Lacquer	Black
A2	Carbon fiber	Lacquer	Vermilion
A3	Carbon fiber	Lacquer(MR)	Black
B1	Wood	Lacquer	Black
B2	Wood	Lacquer	Vermilion
B3	Wood	Lacquer(MR)	Black

耐候性は促進屋外暴露試験 (Q-Trac Sunlight Concentrator Testing: ASTM-D90) によって評価した。本試験は 10 枚の鏡で試験体に自然光を集光することにより、短期間で試験体の耐候劣化特性を評価することができる。試験期間の紫外線の総エネルギー量は、 468 MJ/m^2 であった。日本では、波長 300 ~ 400nm の範囲の年間の紫外線量は地域により $180 \sim 240 \text{ MJ/m}^2$ 程度であり、年間の紫外線を 240 MJ/m^2 とすると、促進屋外暴露試験の結果は日本の約 2 年間の紫外線量に相当すると考えられる。

試験後の色差 ΔE の変化を図 4 および図 5 に示す。両試験体とも色差の変化は比較的早く始まり、色差の変化の状況もほぼ同様の傾

向を示した。色相に関しては、朱色の色差の変化は他の色と比較するとやや小さかった。光沢の変化に関してもほぼ同様の結果となった。これらの結果から、炭素繊維材への漆塗装の表面特性は、木材への漆塗装と大差のないことが示された。

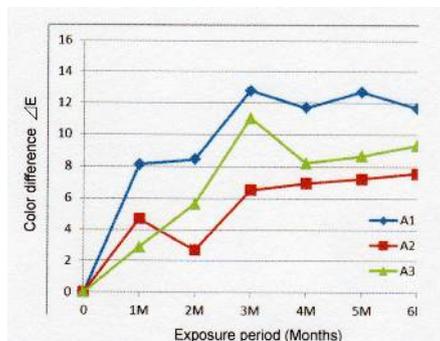


図4 色差の変化（炭素繊維材表面）

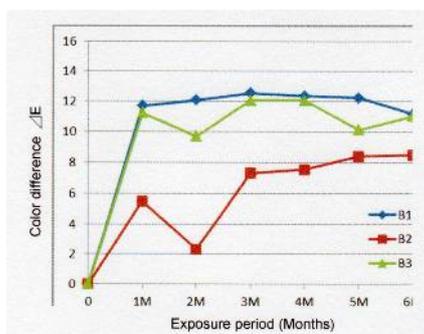


図5 色差の変化（木材表面）

炭素繊維材に漆塗装を施した場合、色差や光沢の変化は木材表面と同様な傾向を示し、これらの結果から判断すると炭素繊維材への漆塗装された炭素繊維材の維持管理や補修法については従来の木材と同様の取り扱いが可能であることが把握できた。

(4) 結語

本研究では、日射・降雨や温度・湿度などの環境要因が強度特性に及ぼす影響を分析し、接着部の強度劣化の観点から耐久性の評価に関する考察を行った。本試験の結果、炭素繊維複合材は今回実施した室内環境試験では付着強度・曲げ強度ともに大きな変化は見られず、本条件の範囲では環境要因が強度特性に与える影響を分析するには至らなかった。本条件は従来の室内促進試験方法と比較すると、試験時間は10倍以上とかなり過酷な条件設定であり、本試験方法による評価では十分な耐久性を有していると言える。

一方屋外暴露試験結果からは、付着強度や曲げ強度が低下する傾向が認められ、降雨や乾湿の繰り返しの影響の大きさを示す結果となった。劣化のメカニズムとして、付着強度の低減が曲げ強度の低下に影響を及ぼすことが明らかになり、長期耐久性の評価は付着特性に着目することで一定の判定ができる可能性があることを示した。付着強度と曲げ強度の相関性に関しては長期的な計測により検証する必要があるが、今後の検討課題である。

また、炭素繊維材に漆塗装を施した場合、色差や光沢の変化は木材表面と同様な傾向を示し、これらの結果から判断すると炭素繊維材への漆塗装された炭素繊維材の維持管理や補修法については従来の木材と同様の取り扱いが可能であることが把握できた。

本研究では、保存修理における表面特性に着目した試験結果を報告したが、歴史的建造物に炭素繊維材等の新たな材料を適用する場合、木質複合材料としての構造的な長期耐久性についても検討を行い、幅広いデータを蓄積することが必要と考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① Tetsuo Hojo : Durability of a Carbon Fiber Reinforced Wooden Member, 2nd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATIS' 13), 査読有, Trento, Italy, 2013. (投稿中)
- ② Tetsuo Hojo, Shinichi Yokoyama and Hajime Iwamoto : Evaluation on Durability of Carbon Fiber Reinforced Member, 9th International Symposium on Weatherability (9 th ISW), Material Life Society, 査読有, Tokyo, Japan, pp. 35-40, 2013.
- ③ 北條哲男・横山晋一・浅尾和年 : 炭素繊維で補強された木質複合材の耐久性評価に関する研究, マテリアルライフ学会誌, 査読有, Vol. 24, No. 2, pp. 69-76, 2012.

〔学会発表〕（計3件）

- ① 北條哲男 : 歴史的建造物の表面修復技術に関する基礎的研究, マテリアルライフ学会第24回研究発表会, 京都, 2013. (投稿中)
- ② 北條哲男 : 炭素繊維補強木質材料の耐久性評価に関する基礎的研究, 土木学会第65回次学術講演会, CS5-008, pp. 15-16, 札幌, 2010.

- ③ 北條哲男：炭素繊維補強材の耐久性評価に関する実験的研究（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，F-2，富山，pp. 133-134，2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北條 哲男 (HOJO TETSUO)
ものづくり大学・技能工芸学部・建設学
科・教授
研究者番号：30348346

(2) 研究分担者

横山 晋一 (YOKOYAMA SHINICHI)
ものづくり大学・技能工芸学部・建設学
科・准教授
研究者番号：20406614

(3) 連携研究者

()

研究者番号：