

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18762

研究課題名（和文）不整齊木造架構を対象とした三次元計測およびAM技術を用いた構造補強方法の開発

研究課題名（英文）Development of Structural Reinforcement Method for Irregular Timber Frame Structure Using 3D Measurement and AM Technologies

研究代表者

福島 佳浩（Fukushima, Yoshihiro）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：60883105

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：曲がり梁のように整えられていない（不整齊な）形状を有する伝統木造建築物の構造補強を行うための設計手法として、フォトグラメトリ技術による三次元形状技術と3Dプリント技術を組み合わせ、既存架構にフィットした補強部材を製作する方法を開発し、門形架構を用いた施工性・構造性能の検証を行った。また、ジャイロイド構造を用いて補強部材の性能を制御することで、修復性と靱性に優れた既存建築物の構造補強が可能になることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存建築物の耐震性能向上は、災害対策と持続可能な社会の実現の双方において重要な課題である。本研究では、既存建築物の中でも曲がり梁のように不整齊な形状を有する架構を対象として、三次元計測技術と付加製造技術を組み合わせることで意匠性・施工性・構造性能に優れた構造補強方法を開発・検証した。また、ジャイロイド構造を用いて補強部材の構造性能を変化させることで、修復性や靱性に優れた構造補強が可能になることを示し、付加製造技術によりもたらされた高い造形自由度を活かす方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：A method for structural reinforcement of traditional timber buildings with irregular shapes, such as curved beams, was developed by combining photogrammetry technology for three-dimensional measurement with 3D printing technology to produce reinforcement members fitted to the existing timber frame. The workability and structural performance of the proposed method was verified using a portal frame. By controlling the structural characteristics of reinforcing members using a gyroid structure, it was shown that it is possible to reinforce existing buildings with high repairability and toughness.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：伝統木造建築物 構造補強 三次元計測技術 付加製造技術 フォトグラメトリ ジャイロイド構造 モニタリング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

伝統木造建築物の耐震性能の向上は、災害対策と持続可能な社会の実現の双方において重要な課題となっており、これまでに様々な構造補強方法が提案されてきている。中でも、鉄骨部材を用いた構造補強は、壁を新設する補強方法に比べて、日本の伝統木造建築物が有している空間の開放性を活かすことができる利点があるため、広く利用されている^[1]。しかし、前近代に建てられた伝統木造建築物では、曲がり梁のように形状が整えられていない(不整齊な)部材で構成されていることが多いのに対し、補強に用いられる鉄骨部材は直線材や平面材のように整った(整齊な)形状を有していることが多く、両者の間には形状の齟齬がみられる。従来の鉄骨部材を用いた補強では、この形状の齟齬が解消しないままボルトやプレートを用いて接合する方式を採ることが一般的であったが、この方法には不均等な応力伝達、意匠上の不調和、ボルト孔をあけることによる既存部材の棄損などの不具合が生じるという課題が残る。

一方、近年では三次元計測技術や付加製造技術をはじめとするデジタルファブリケーションのための技術開発が盛んであり、製造過程における造形自由度が飛躍的に増大し始めている。建築分野でも付加製造技術の一種である 3D プリントを用いて建物全体^[2]や接合部材^[3]を製造する事例が登場しているが、自由な造形を要することの説明は十分にされているとは言い難く、造形自由度の高さを活かすことが自己目的化したマニエリスムに陥らないようにするためには注意が必要である。

上記二つの文脈を踏まえると、前近代の伝統木造建築物を構造補強にデジタルファブリケーション技術を用いることで、造形自由度の高さを活かして既存架構にフィットした構造補強が可能になると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、不整齊形状を有する伝統木造建築物の架構を三次元計測技術により計測し、三次元形状データを用いて造形した補強部材を付加製造技術で製造することで、既存木造架構にフィットした構造補強を行う方法を開発・検証することを目的とする。

三次元計測技術にはフォトグラメトリ技術を採用する。フォトグラメトリは多数の画像から立体形状を再構成する手法であり、必要機材がカメラのみであることからレーザースキャンに比べて導入が容易であるという利点がある。付加製造技術には 3D プリント技術を採用する。一般ユーザ向けの製品でも剛性や強度の高い炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を出力できる機種が登場するなど、ここ数年の低価格化・高性能化が著しく、将来的には設計者あるいは建物利用者が自ら補強部材の製造を行えるようになることも期待できる。

3. 研究の方法

山形県に建つ築 140 年程度の伝統木造建築物を対象として、建物の 2 階部分にある門形架構をワイヤロープによりブレース補強することを想定する。まず、3D プリント材料として用いる CFRP とアルミ合金について、材料特性を確認するための実験を行う。本研究では、ジャイロイド構造と呼ばれる三次元周期極小曲面形状を採用し、その幾何学的パラメタを変化させることで補強部材の剛性や強度を制御することを試みるため、小試験体を用いた圧縮試験により検証を行う。次に、補強対象とする門形架構を模した試験体を作成し、フォトグラメトリによる三次元計測、プーリアン演算によるモデリング、3D プリントによる製造までの一連の流れを実施し、施工性と構造性能を確認する。構造性能については、無補強試験体と補強試験体の水平加力実験を行い、剛性や最大耐力、破壊性状を比較することで補強効果を定量的に評価する。

4. 研究成果

(1) ジャイロイド構造による剛性・強度の制御

ジャイロイド構造は三次元の周期極小曲面の一種であり、3D プリント時の充填構造としても用いられることから、近年盛んに研究が行われている。ジャイロイド構造の圧縮試験を行った先行研究^{[4][5][6]}では、3D プリントの積層方向と加力方向が同一方向であるが、補強部材にジャイロイド構造を採用した場合、必ずしも積層方向に圧縮力が作用するとは限らないため、積層直交方向を加力方向とする静的圧縮試験を行った。

ジャイロイド試験体を Figure 1 に示す。試験体の外形は 50mm × 50mm × 100mm で、セル数(50mm あたりの半波数) N を 3、6、12 の 3 通りに設定した。ジャイロイド部の板厚は充填率が 20% となるように調整し、試験体の上下には圧縮力を均等に加えるために 3mm 厚の平板部を設け、ジャイロイド部と一体で出力した。材料はアルミ合金と CFRP の 2 通りとし、アルミ合金は AlSi10Mg を EOS M290 を用いて SLM (Selective Laser Melting) 方式で出力し、CFRP は PA6-CF を Raise3D Pro2 を用いて FDM (Fused Deposition Modeling) 方式で出力した。いずれも積層直交方向を載荷方向としている。

圧縮試験で得られた荷重変形関係を Figure 2 に、各試験体の破壊形式を Figure 3 に一覧で示す。先行研究^{[4][5][6]}では積層方向と載荷方向が同一の場合にせん断破壊が生じることが確認さ

れているが、積層直交方向に载荷した結果、せん断破壊と割裂破壊の2つの破壊形式が確認された。せん断破壊と割裂破壊の破壊形式の違いは、積層面間の強度によって決まると推測され、材料だけでなく3Dプリント方式の影響を大きく受ける。積層面間の強度が小さいFDM方式では脆性的な割裂破壊が先行しやすいが、ジャイロイド構造のセルサイズLを小さくすることで、より靱性に富むせん断破壊形式に移行する結果が得られたことから、FDM方式で出力した部材の構造体への利用につながる事が期待される。

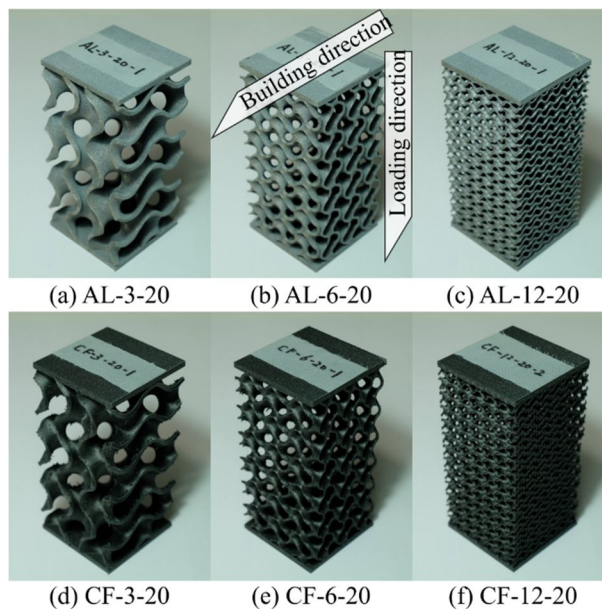


Figure 1 ジャイロイド試験体

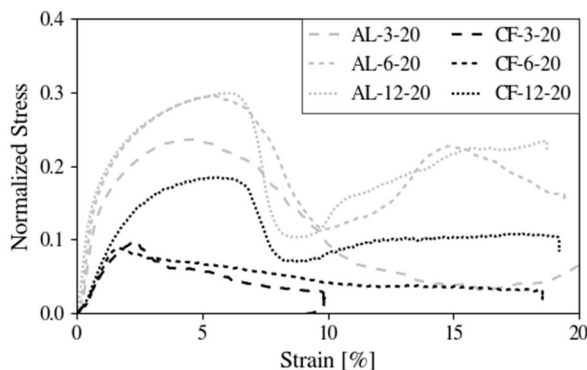


Figure 2 ジャイロイド試験体の荷重変形関係

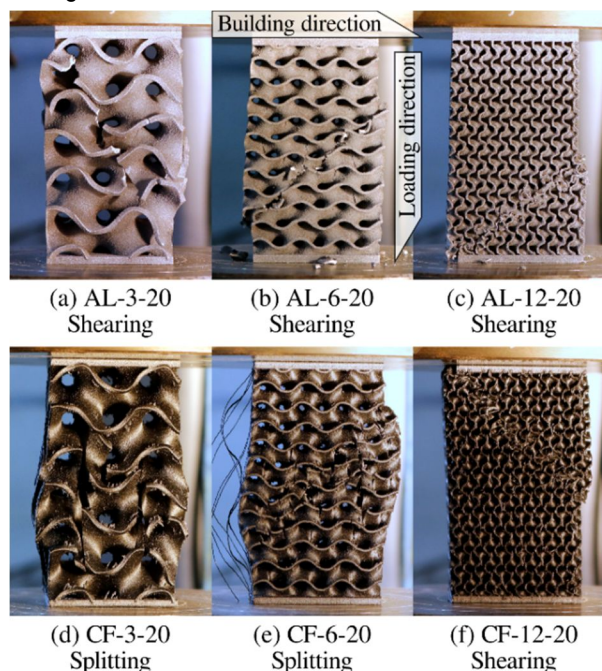


Figure 3 ジャイロイド試験体の破壊形式

(2) 門形架構試験体を用いた実証実験

対象建物の2階部分にある幅3820mm×高さ2505mmの架構 (Figure 4) を補強対象として、2/3スケールの縮小試験体を用いた実証実験を行った。補強対象架構は、両端の柱をつなぐシンシ梁と直交方向からシンシ梁に載る中引梁が不整形形状を有している。本架構をワイヤロープでブレース補強することを想定し、補強部材を以下の手順で設計・施工する。

三次元計測にはフォトグラメトリ技術を用い、梁交差部のメッシュデータを作成する (Figure 5)。

補強部材の架構側の外形は、得たメッシュデータとブーリアン演算を行いモデリングする。架構と反対側の外形は、ワイヤロープを巻き付けて取り付けられるように、円柱にレール状の溝を付けた形状とする。内部の充填構造は、セルサイズ8.3mm、充填率10%のジャイロイド構造とした (Figure 6)。

補強部材の製造は、アルミ合金 (材料: AlSi10Mg、機器: EOSM290) および CFRP (材料: PA6-CF、機器: Raise3D Pro3) を用いて行う。積層方向は、Figure 6 中の矢印の向きとした。



Figure 4 補強対象架構

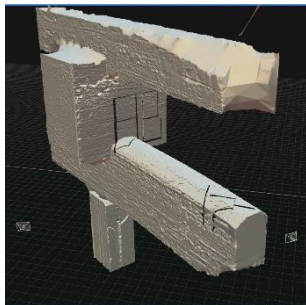


Figure 5 メッシュデータ

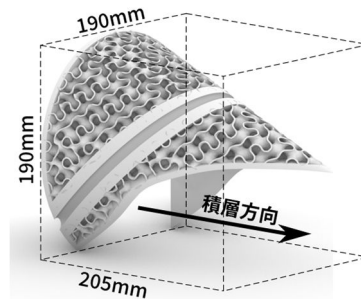


Figure 6 補強部材形状

水平加力実験は、無補強×2体 (試験体名称 F01、F02)、CFRP 補強×2体 (同 C01、C02)、アルミ合金補強×2体 (同 A01、A02) の計6体について実施した (Figure 7)。

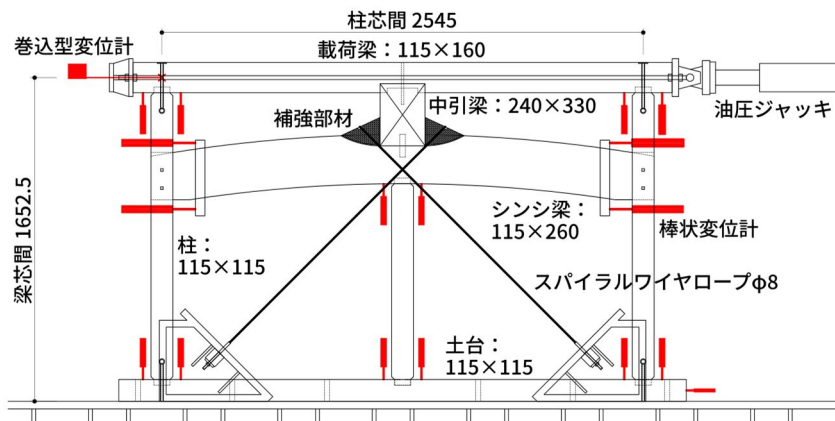


Figure 7 試験体セットアップ図

Figure 8 にアルミ合金製補強部材の取付状況を示す。3D スキャン時の測定誤差や 3D プリント時の出力誤差を考慮し、ブーリアン演算する際に 1mm オフセットして製作したところ、アルミ合金製と CFRP 製のいずれも隙間や干渉がほとんど生じず、良好な施工性が得られることが確認できた。また、Figure 9 に示す無補強試験体と補強試験体の荷重変形関係と比較すると、補強により初期剛性や最大耐力が上昇し、載荷初期のスリップ挙動もみられないことから、応力伝達の観点からも十分な精度でフィットしていることが確認できた。

アルミ補強試験体では補強部材の強度が高く、木架構の破壊が先行したのに対し、CFRP 補強試験体では Figure 10 に示すように補強部材のめり込み破壊が先行し、アルミ合金補強試験体

よりも最大荷重や変形能力が高い結果となった。最終的には柱の割裂破壊が生じてしまったものの、ワイヤロープの破断と異なりジャイロイド構造のめり込み破壊は急激な耐力低下を生じず、補強部材は既存部材に比べて容易に作成・設置できることから、既存木造建築物の構造補強において補強部材を先行破壊させるような損傷制御を行うことで、良好な変形能力と修復性を備えた構造補強が実現できる可能性を示すことができた。

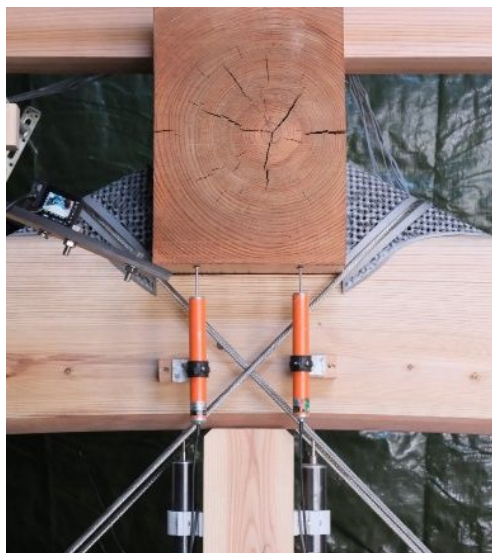


Figure 8 補強部材取付状況



Figure 10 めり込み破壊

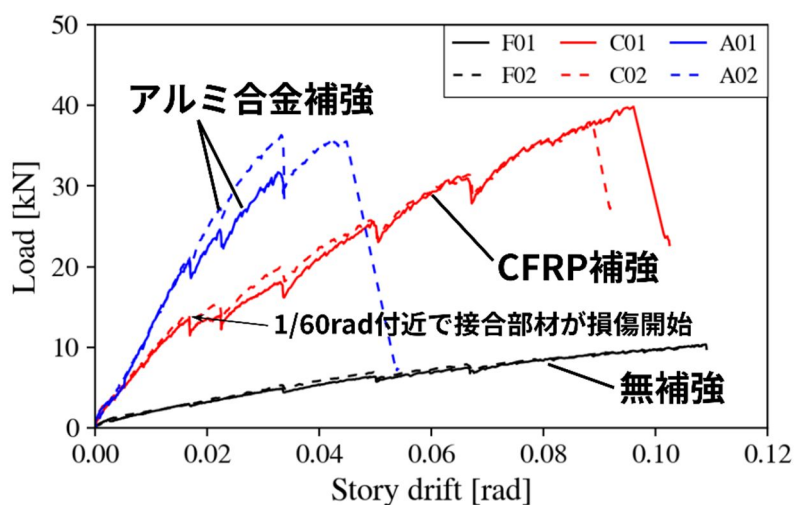


Figure 9 荷重変形関係

参考文献

- [1] 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（改訂版）事例集, 2017.3
- [2] MX3D: MX3D Bridge, <https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/>, 2024年5月8日最終閲覧
- [3] MX3D: Connector for Takenaka, <https://mx3d.com/industries/construction/connector-for-takenaka/>, 2024年5月8日最終閲覧
- [4] Maskery, N.T. Aboulkhair, A.O. Aremu, C.J. Tuck, I.A. Ashcroft, Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices, Additive Manufacturing, Volume 16, 2017, Pages 24-29, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.003>.
- [5] Maconachie, T., Tino, R., Lozanovski, B. et al. The compressive behaviour of ABS gyroid lattice structures manufactured by fused deposition modelling. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 107, 4449-4467 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05239-4>
- [6] Chenxi Lu, Chi Zhang, Pin Wen, Fei Chen, Mechanical behavior of Al-Si10-Mg gyroid surface with variable topological parameters fabricated via laser powder bed fusion, Journal of Materials Research and Technology, Volume 15, 2021, Pages 5650-5661, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.008>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 福島佳浩、松本直之、伊東優、今井公太郎、山口大翔	4. 巻 2022
2. 論文標題 不整斉木造架構を対象とした三次元計測およびAM技術を用いた構造補強方法の開発 その1 3Dプリント製 ジャイロイド構造の静的圧縮試験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集（CD-ROM）	6. 最初と最後の頁 485-486
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福島佳浩、松本直之、伊東優、今井公太郎、山口大翔	4. 巻 2023
2. 論文標題 不整斉木造架構を対象とした三次元計測およびAM技術を用いた構造補強方法の開発 その2 MEMS加速度セン サおよび温湿度センサを用いた伝統木造建築物のモニタリング	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集（CD-ROM）	6. 最初と最後の頁 201-202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福島佳浩、松本直之、伊東優、今井公太郎、山口大翔	4. 巻 2024
2. 論文標題 不整斉木造架構を対象とした三次元計測およびAM技術を用いた構造補強方法の開発 その3 三次元計測お よびAM技術を用いた構造補強を施した縮小門形架構の水平加力実験	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集（CD-ROM）	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福島佳浩	4. 巻 2022年9月号
2. 論文標題 不整斉木造架構のクチュール補強	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊建築技術	6. 最初と最後の頁 134-137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福島佳浩	4. 巻 2024年7月号
2. 論文標題 三次元計測技術と付加製造技術が可能にする旧くて新しい構造補強ディテール	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 月刊建築技術	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 福島佳浩、松本直之、伊東優、今井公太郎、山口大翔
2. 発表標題 不整齊木造架構を対象とした三次元計測およびAM技術を用いた構造補強方法の開発 その1 3Dプリント製ジャイロイド構造の静的圧縮試験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福島佳浩、松本直之、伊東優、今井公太郎、山口大翔
2. 発表標題 不整齊木造架構を対象とした三次元計測およびAM技術を用いた構造補強方法の開発 その2 MEMS加速度センサおよび温湿度センサを用いた伝統木造建築物のモニタリング
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福島佳浩、松本直之、伊東優、今井公太郎、山口大翔
2. 発表標題 不整齊木造架構を対象とした三次元計測およびAM技術を用いた構造補強方法の開発 その3 三次元計測およびAM技術を用いた構造補強を施した縮小門形架構の水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	今井 公太郎 (IMAI Kotaro) (20262123)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	
研究分担者	松本 直之 (MATSUMOTO Naoyuki) (30814389)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	伊東 優 (ITO Yu) (90839523)	東京大学・生産技術研究所・特任研究員 (12601)	
研究分担者	山口 大翔 (YAMAGUCHI Hiroto) (40983515)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------