研究報告

令和7年4月17日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理事長 岸 利治 殿

研究代表者

所 属 : 滋賀県立大学環境科学研究

院

氏 名 : 永井拓生

研究課題名:

3Dプリント接合部を用いた竹アーチ床システムの開発-デジタルファブリケ ーション技術による竹構造普及の加速化

助成金額: 100 万円

研究実施期間:自 令和6年4月1日 ~ 至 令和7年3月31日

研究報告 令和6年度 i-construction 分野 No.2

3Dプリント接合部を用いた竹アーチ床システムの開発-デジタルフ ァブリケーション技術による竹構造普及の加速化

Development of A Bamboo Arch Flooring System Using 3D Printed Joints - Acceleration of Promoting Bamboo Structure through Digital Fabrication Technology

滋賀県立大学環境科学研究院 講師 永井拓生

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 序論

丸竹を構造材料として利用するにあたっては未だ多くの課題があり、その1つは接合部の 開発である。接合部には、力学的に高い性能が必要とされるのはもちろんのこと、加えて、 自然に存在する竹稈のいびつな形にうまく追従する形と取付やすさが求められる。丸竹構造 における接合部はこれまでに多くの提案があるが、原始的で耐力・剛性が母材である竹に比 べ著しく小さいもの、もしくは力学的には優秀だが施工性が非常に複雑であるなど¹⁾、いま だ決め手となるような国際標準的方法が存在しない。

本研究では、丸竹を量産型住宅等の構造材料として利用しやすくすることを目的として、 丸竹同士の接合部に 3D プリントした繊維補強樹脂を用いる方法を研究する。まず、3D プリ ント樹脂の基本的な力学的性能の確認を行う。次に、実際の丸竹構造における接合部を想定 した接合部試験体の力学試験を行う。また、実験結果と既往の接合部耐力式による試算値の 比較を行い、破壊性状と接合部としての性能について検証する。

なお、本研究における実験方法や結果の詳細は割愛し、本報告末尾の発表論文に示す。

2. 材料と方法

3D プリント方法の1つである Fused Deposition Modeling (FDM) は、出力ノズルに機械的 に樹脂フィラメントを送り込み、熱で溶解した樹脂を押し出し積層させて造形物をプリント する方法である。したがって、造形物にはビルドプレートの面と平行に一定間隔で積層面が 生じることとなり、これにより出力された樹脂の力学的性質に強い異方性が与えられる。図 1 に FDM で印刷された 3D プリント樹脂における異方性のダイアグラムを示す。図中、「OLD」 は 3D プリントにおいて積層が進む方向を表し、ビルドプレート面に直交する方向を示す。 また、「ILD」は層外方向に直交する方向を表す。本稿では、層内方向における直交 2 軸を X-Y 方向、層外方向を Z 方向とする。また、充填形式を「三角形」もしくは「ジャイロイド」 とした場合、X-Y 方向の力学的特性にはほとんど差を生じず、木材に比べて工学的な取り扱 いが容易なため、使用上の利点となりうる。



図1:3Dプリント樹脂の方向の定義と異方性

本研究で用いた樹脂フィラメントは PAHT CF15(BASF 社)で,あらかじめ炭素繊維が混 ぜ込まれた炭素繊維補強フィラメントである。造形に使用した 3D プリンタは Raise 3D Pro2 Plus(Raise 3D 社製)である。本研究で用いた樹脂の基本的な力学的性能は,木質材料や竹 と同程度以上であり^{1,2)},また,耐熱性も高く,平常時の気温変化程度では性能に対する影響は大きくないと予想されるため,接合部材料としての使用可能性が期待される。

3. 3D プリント樹脂の力学試験

図 2 に各力学試験の方法を示す。本研究では、3D プリント樹脂を竹構造の接合部に使用 することを想定するため、力学試験は ISO 5257³)に倣って行う。



図 2:3D プリント樹脂の力学試験方法

表1に3Dプリント樹脂の各力学試験結果の平均値を示す。圧縮強度は充填率60%程度で 頭打ちとなるため、接合部の検討では60%を用いる。また、層外方向の引張強度と層内のせ ん断強度が弱点となるものの、圧縮強度とせん断強度は竹の平均値²⁾に対し50~60%程度の 値である。したがって、接合部への利用にあたっては、高い圧縮強度を活かすことや、せん 断の弱点方向を適切に回避するような使い方が求められる。

Direction	IFD [%]	IFP	f _c [MPa]	f _t [MPa]	F	lane-direction	IFD [%]	IFP	f _s [MPa]	
OLD	37	Gyroid	2.2	-	_	ILS	37	Triangular	4.2	
	37	Triangular	6.3	6.3			60	Triangular	6.8	
	60	Triangular	10.6	-		OLS-OLD	37	Triangular	7.4	
	75	Triangular	11.7	-			60	Triangular	11.2	
ILD	37	Gyroid	11.1	32.0		OLS-ILD	37	Triangular	5.6*	
	37	Triangular	14.6	24.7			60	Triangular	8.8*	
	60	Triangular	20.2	35.1	II	IFD: infill density, IFP: infill pattern, f_c : compression strength, f_t : tensile strength, f_s : shear strength, *:yiled strength of f_s				
	75	Triangular	20.5	39.6	\mathbf{f}_{t}					

表1:3Dプリント樹脂の力学試験結果のまとめ

4. 3D プリント接合部の力学試験

4.1. 試験方法

丸竹を軸力が支配的な構造形式(トラス,アーチ等)に用いることを想定し,引張・圧縮 軸力を伝達可能な接合部を想定した実験を行う。図3に接合部試験方法を示す。圧縮軸力は 竹稈端部の小口と3Dプリント樹脂の間の支圧応力で伝達され,引張軸力は竹の稈壁と稈内 に挿入された樹脂製詰め物とをビスで連結した1面せん断抵抗により伝達される。また,こ のビス接合部を竹稈の外周に均等に設けることで,二次的に生じる多少の曲げモーメントに 対しても抵抗可能とする。接合部材の3D-printing方向は,同図に示すように,竹稈の軸方向 に直交する方向とし,部材軸力の方向と引張・圧縮強度に優れた方向(層内方向)を一致さ せる。また,樹脂の詰め物は竹稈内の形状に完全にフィットさせることは難しいため,断面 形状を三又型または十字型とし,3もしくは4点で竹稈の内皮表面と接するような方式を提案する。



図3:軸力の伝達を目的とした接合部の力学試験の方法

接合部力学試験として, 圧縮試験とビスの1面せん断試験を行う。竹はモウソウチクとし, 両試験とも竹稈直径を約70mm,約100mmの2種類とする。圧縮試験に用いる竹について は,接合部試験用に加え近接した箇所からもう1つの試料を採取しおき,後者を用いて竹稈 自身の圧縮強度も確認する。ビスの1面せん断試験では,稈直径およびビスと竹稈小口の端 空き距離をパラメータ(10d,15d,20d)として実験を行う。また,稈直径70mmの試験体に ついては,ビス接合部のビスと竹稈壁が接触する側の竹稈の外皮の周方向にひずみゲージを 貼り,周方向の歪みも計測する。以上の各条件の組み合わせに対し,各3試験体について実 験を行う。

4.2. 接合部圧縮試験の結果

図4に接合部圧縮試験の圧縮応力度-変形関係,図5に試験後の試験体の写真を示す。接 合部試験体の圧縮応力度は,荷重を接合部樹脂と接する竹稈小口の断面積で除した値である。 また,同図には,比較のため,3Dプリント樹脂(充填率60%)および竹稈の圧縮試験結果も 示している。いずれの試験体においても,接合部試験体の圧縮強度は竹と樹脂の中間の値と なっている。



図4:接合部圧縮試験の圧縮応力度-変形関係



図 5: 接合部圧縮試験の試験後の試験体の写真

4.3. ビス1面せん断試験の結果

図6はビスの1面せん断試験結果,図7は試験後の試験体の写真である。図6の縦軸はビ

ス接合部 1 か所あたりの荷重 Fb をビスの支圧面積(ビス根元直径 d×稈壁厚 t)で除した値 Fb/dt である。試験体断面を確認したところ,ビスは曲げ変形を生じている場合とそうでな い場合の両方があるが,いずれも稈壁に対し垂直に打ち込まれた初期位置から大きく傾いて おり,3D プリント樹脂にビスがめり込んでいる。最大荷重はビスと竹稈の接触部において 小さな割れを生じた際に生じる。



図 6: ビス1 面せん断試験の結果



図 7: 竹稈だぼ接合の破壊モード 4)とビス1面せん断試験の試験後の試験体写真

また,図 6(b)は竹稈直径 70 mm の試験体の1つを例として,荷重-変形関係と接合部付近のひずみ-変形関係を重ねて示している。荷重が最大となるとき,周方向のひずみも急激に増加していることが分かる。したがってこのひび割れはせん断破壊ではなく,ビスが稈壁にめり込むことで竹稈壁が繊維直交方向(接線方向)に押し広げられることで生じるものと考えられる。竹稈壁のだぼ接合部の破壊モードは図7に示す3種類があげられる4)。このうち,モードAおよびモードCの理論上の耐力値は、ビスに作用する荷重が繊維平行方向の場合,次式のように求められる。

破壊モードA:
$$F_b = 1.1d \times t \times f_c$$
 (1)

破壊モード C:
$$F_b = 1.25 \times \frac{\pi \times t \times 1.1d \times f_{t,90}}{2\left(1 - \frac{1.1d}{2}\right)^2}$$
 (2)

ここで、d はビスの根元直径、f_c は竹の繊維平行方向圧壊強度、f_{t,90} は竹の繊維直交方向引張 強度、D [mm]は稈直径である。図 6(a)に各モード耐力の試算値をビスの支圧面積(d×t)で除 した値を点線で示している。それぞれ試験体の竹稈の平均直径 72.8 mm, 101.5 mm を用いて 算出した。稈直径 70 mm の試験体では、モード C の実験値/計算値の平均は 1.04 であり、よ く整合している。一方、稈直径 100 mm の試験体はモード A、C いずれも実験値/計算値の比 は 1.3~2 程度となっており、試験体に用いた竹の強度が大きかった可能性がある。

本稿の実験では試料の都合により, 接合部に用いた竹そのものの強度を確認することがで きなかったが, 接合部の試験においては, 3D プリント樹脂, 接合部, 竹そのもの, の3者の 力学試験をセットで進めていく必要がある。

(実験調査によって得られた新しい知見)

本研究では、丸竹どうしの予備的な接合部の提案として、圧縮・引張軸力を伝達する簡易 的な接合方法を提示した。圧縮軸力を竹稈断面の支圧で伝達する接合部は、樹脂単体よりも 高い強度を発揮した。このため、樹脂単体の力学試験により安全側の強度を評価することが 可能である。また、竹稈壁と 3D プリント樹脂をビス止めした 1 面せん断接合は、同様の厚 みの木質系材料とほぼ同程度の1か所当たりの耐力(1.5~3 kN)を持つことが確認された。 最大耐力時の破壊モードは竹稈壁とビスの接触部の周辺における繊維直交方向の割裂(モー ドC)により生じるものであり、竹稈直径 70 mmの試験体においては、ISO 22156の耐力算 定式とかなり近い値となった。今後は、3D プリンタを用いたデジタルファブリケーション 技術と竹構造の融合を長期的な目標とし、竹のトラスや柱といった実大規模の部材について 接合方法の提案と検証を行っていきたいと考える。

なお、本研究期間においては、本研究の最終目的である竹アーチ床システムの構築までは 具体化することができなかった。本研究で得られた基礎的な成果をもとに、今後、鋭意開発 を進めたいと考える。

参考文献

1) https://www.raise3d.jp/tds_ultrafuse_paht_cf15.pdf

- 2) T. Nagai, Preliminary study on relationship between culm morphology and mechanical characteristics of Japanese bamboo, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 Integration of Design and Fabrication, 2023, 277-287.
- 3) ISO 5257:2023 Bamboo structures Engineered bamboo products -Test methods for determination of mechanical properties using small size specimens, 2023.
- 4) ISO 22156:2021, Bamboo structures Bamboo culms Structural design. 2021.

(発表論文)

- [1] Y. Harada, T. Nagai, T. Kimura: Preliminary study on the application of 3D-printed resin for joints in round bamboo structures, The 14th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures (APCS 2025), Design and Construction Technology Toward Low-Carbon Society, June 9-12, 2025, Kanazawa, Japan. (採択決定)
- [2] 原田陽,永井拓生,木村俊明:3D プリント樹脂を用いた丸竹構造のための接合部に関する基礎的研究,その1 3D プリント樹脂接合部の予備的力学試験,日本建築学会大会 (九州),2025.9.(投稿済み)
- [3] 原田陽,高上尚,永井拓生,木村俊明: 3D プリント樹脂を用いた丸竹構造のための接合 部に関する基礎的研究,その2 3D プリント樹脂接合部の力学試験,日本建築学会大会 (九州),2025.9.(投稿済み)