

5 3D プリント製品の強度不足を補う嵌合接着技術の調査検討

大川正巳, 佐川洋行, 丸本翼, 松永尚徳

Examination of assembly bonding technology to reinforce 3D printer products

OKAWA Masami, SAGAWA Hiroyuki, MARUMOTO Tsubasa and MATSUNAGA Hisanori

In recent years, the Fused Deposition Modeling method reinforced with long carbon fibers has become widespread, and it has become possible to easily use higher-strength modeled products. However, the strength in the stacking direction is significantly lower than that in the stacking plane inward direction. In order to expand the scope of application of these shaped products, it is necessary to improve this shortcoming.

Therefore, we identified the material model of the modeled product material from two types of laminated flat plates and square pipe shaped products. Structural analysis was performed using the obtained material model, and it was confirmed that the rigidity characteristics of the molded product could be calculated accurately. Furthermore, we have established a method to reinforce the lack of strength in the stacking direction by fitting and adhering members in different stacking directions.

キーワード : 3D プリント, 異方性, 嵌合接着, 補強技術

1 緒 言

3D プリントは、フィラメント状の材料を用いて3次元 CAD データから3次元成形品を直接造形できるメリットを有する。当初は装置が高価であったこともあり、形状や機能の確認のための試作として利用されていた。しかし、装置の低価格化と普及に伴い、そのメリットを活かして少量生産の製品や、オーダーメイドが必要とされる医療福祉用具、加工対象に合わせた機械工作用治具等の造形に幅広く活用されるようになってきた。そして、近年では長炭素繊維強化フィラメントを使用する熱溶解積層(FDM)方式の3D プリントも市販されており、より高強度なものを造形することが可能となっている。

しかしながら、FDM 方式においては、積層方向は母材となる樹脂の溶着強度となるため、長繊維で強化された積層面方向と比較して強度が大きく低下する異方性を有する。この異方性が存在するため、長繊維で強化されたFDM 方式による造形品の適用範囲が狭められている。

そこで、本研究では、MarkForged 社製の Mark X による長炭素繊維強化フィラメントを用いた3D プリント造形品を対象として、繊維方向、繊維直交方向、積層方向の異方性を考慮して解析により造形品の剛性と強度を計算するための材料モデルを同定した。そして、積層方向の強度不足を補うため、積層方向の異なる複数の部材を嵌合接着する手法について解析により検討を進め、義足ソケットを簡略に模擬した試験体を造形し、曲げ試験によりその有効性を確認した。

2 3D プリント造形品の機械的特性評価

2.1 機械的特性取得のための試験体造形

長炭素繊維強化フィラメントを用いた3D プリント造形品は、繊維方向の強度・弾性率が高い直交異方性となる。直交異方性の材料モデル同定には、繊維方向(0°)と繊維直交方向(90°)、及び±45°方向の3種類の引張試験を行うことが一般的である¹⁾。しかしながら、3D プリントで一方方向のみに繊維配向させた造形を行うと熱収縮に起因するひずみが発生する恐れがある。その影響を回避するため、**図1(a)**に示す積層構成[0/90]の積層平板、及び**(b)**に示す積層構成[45/-45]の積層平板から切り出して引張試験片を作製した。加えて、積層方向については、**(c)**に示す角パイプの造形品から平面を切り出して引張試験片を作製した。

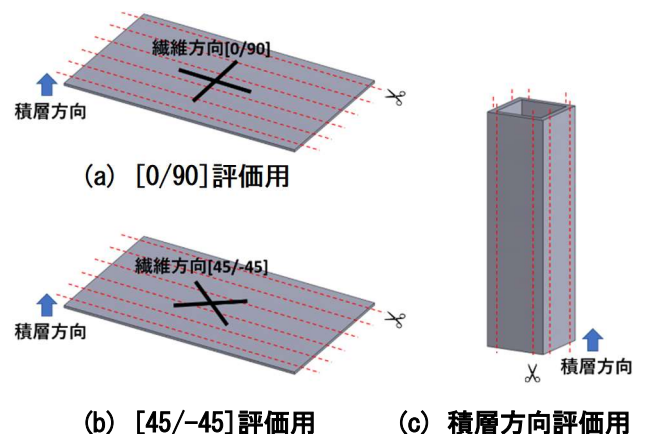


図1 試験品の造形と試験片の切出し方法

2.2 引張試験

作製した試験片にひずみゲージを貼付し、引張試験を行った。得られた応力-ひずみ線図を**図2**に示す。この図においては、ひずみゲージによる計測範囲を超えるひずみ領域まで表示するために、ストロークを試験片タブ間距離で除算してひずみとしている。荷重方向に配向された繊維が加わる[0/90]では強度が高く、せん断変形が発生する[45/-45]では大きな伸びが生じ、積層方向に対しての強度が著しく低い、非常に大きな異方性を確認できた。それぞれの引張強さと弾性係数を**表1**に示す。

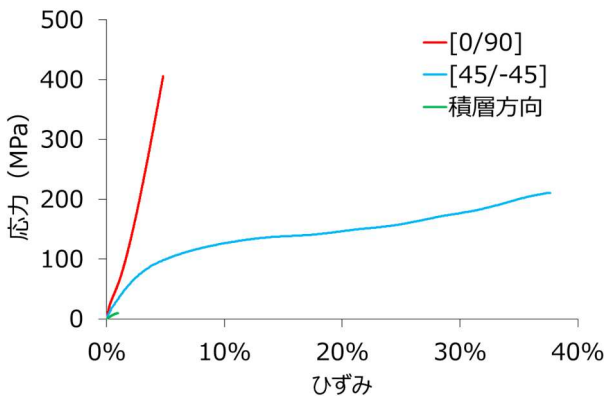


図2 応力-ひずみ線図

表1 引張強さと弾性率

	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)
[0/90]	396	31
[45/-45]	233	7.8
積層方向	9.3	2.8

2.3 弾性係数の同定

古典積層理論を用いると繊維強化複合材料の直交異方性材料として弾性係数が明らかであれば、任意の積層構成の積層平板における弾性係数を算出することができる。この理論と、表計算ソフト Excel のソルバー機能を用いると、複数種類の積層構成の積層板の弾性係数が既知であれば、収束するまで反復計算させることで繊維強化複合材料の弾性係数を同定することができる。

この手法を用いて、前述の引張試験で得られた2種類の積層平板の弾性係数をもとに、3Dプリンタ造形品の直交異方性材料モデルの弾性係数を同定した。その結果を**表2**に示す。ここで、各係数の添字は、1は繊維方向、2は繊維直交方向、3は積層方向を示す。

2.4 直交異方性材料として弾性係数の同定

引張試験の解析モデルを作成して解析を行い、同定した弾性係数により3種類の試験平板について、**図3**に示

すとおりの剛性を正確に再現できることを確認した。この図における実験値のひずみは、ひずみゲージによる計測値である。実験、解析ともに破断点を×印で示しており、[45/-45]においては図示したひずみ範囲では破断しない。なお、解析の材料モデルの引張強度は引張試験結果に合わせて調整した結果、繊維方向強度は800MPaとなり、フィラメントのカタログ値と完全に一致した。繊維直交方向、積層方向の強度はそれぞれ90MPa、10MPaとなった。

表2 長炭素繊維強化3Dプリンタ造形品の弾性係数

弾性係数		
E11	55.6GPa	[0/90][45/-45]から同定
E22	8.2GPa	[0/90][45/-45]から同定
E33	2.8GPa	積層方向計測値
ポアソン比		
ν_{12}	0.33	CFRPの代表値とした
ν_{23}	0.49	仮定値
ν_{31}	0.01	E11, E33, ν_{12} から算出
せん断弾性係数		
G12	2.2GPa	[45/-45]から算出
G23	2.8GPa	E22, ν_{23} から算出
G31	1.4GPa	E33, ν_{31} から算出

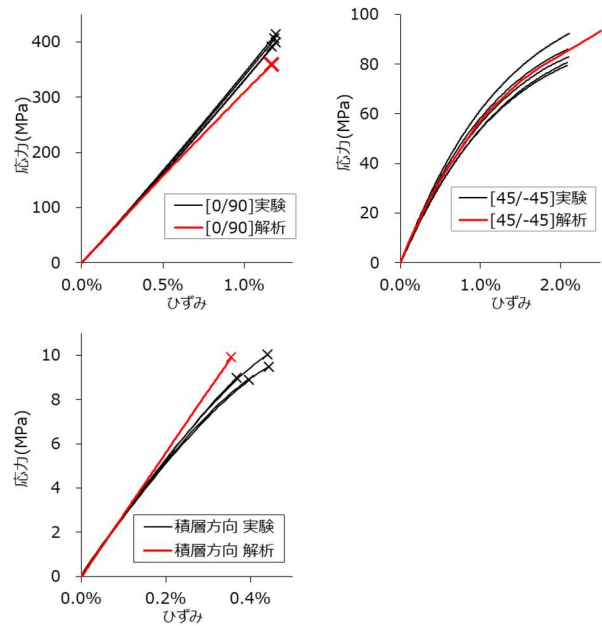


図3 引張試験の解析再現性の確認

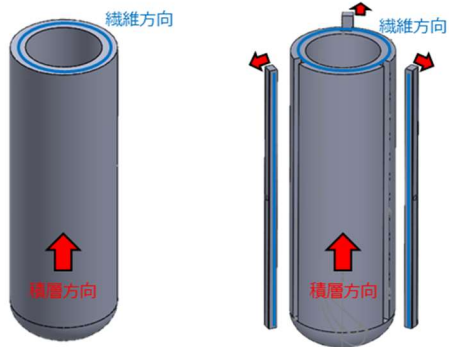
3 嵌合接着による補強効果の評価

3.1 検証モデルの決定

本研究では、積層方向の異なる複数の部材を組み合わせで嵌合接着することで、積層方向の強度を補うことを検討する。義足ソケットを小形・簡略化し、検証モデルとして形状を決定した。**図4**に示す一体造形モデルと嵌合接着モデルの2種類の検証モデルにより補強効果を検証した。一体造形モデルは円周方向に長繊維を配置して長

手方向に積層した。嵌合接着モデルにおいて、本体は円周方向に長繊維を配置し長手方向に積層させ、3本の補強部材を嵌合させる溝を形成する。補強部材は長手方向に長繊維を配向し厚さ方向に積層する構造とした。

また、嵌合接着の効果を簡便に評価するため、**図5**に示す3点曲げ試験により強度評価を行うこととした。



(a) 一体造形モデル (b) 嵌合接着モデル

図4 検証モデル

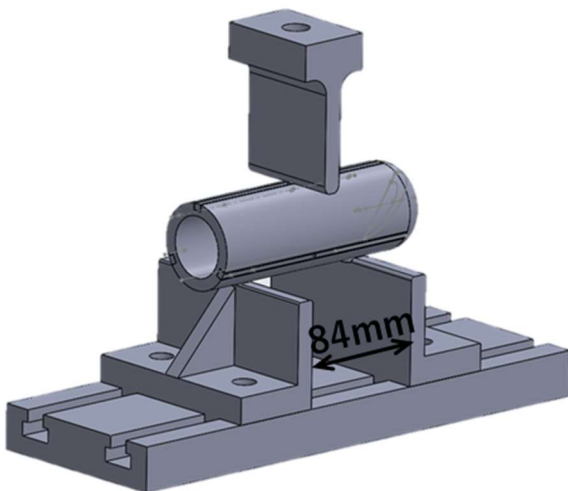


図5 3点曲げ試験

3.2 解析による強度評価

これまでに同定した直交異方性材料モデルにより強度解析を行った。積層構造物の強度と破壊形態を解析で予測するためには、積層レイヤー毎にシェル要素でモデル化して異方性を有する破壊条件を適用し、層間強度をタイド要素でモデル化することが望ましい²⁾が、モデル化が複雑となる。そこで、本研究では、簡便に剛性と最大荷重を評価することを目的として、ソリッド要素でモデル化し、解析ソルバーはMSC Marc 2010.2を用いた。ここで、嵌合接着モデルにおける接着強度は15MPaと想定した。解析による荷重-ストローク曲線を**図6**に示す。また、**図6**にて矢印で図示した時点におけるひずみ分布を**図7**に示す。両モデルとも矢印にて図示する圧子の下部から破断条件に達し、破断した要素は削除している。

また、**(b)**の嵌合接着モデルでは、赤破線で囲む補強部で長手方向の変形が分散し、この効果も受けて最大荷重と完全破壊に至るまでのストロークにおいて、嵌合接着モデルは一体造形モデルを上回ると予測した。

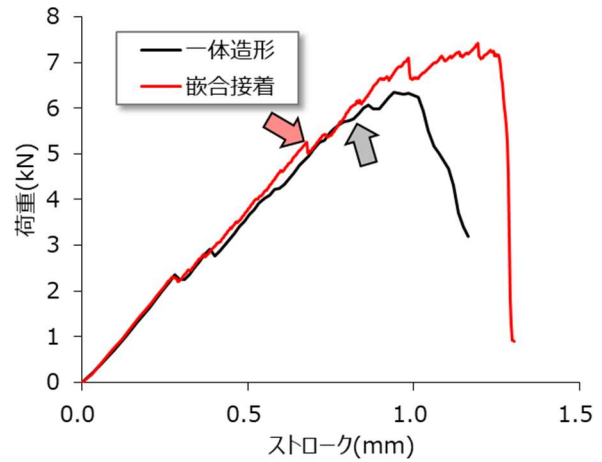
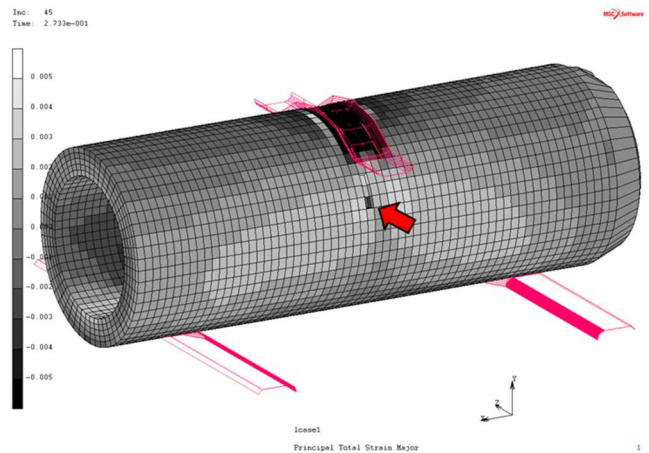
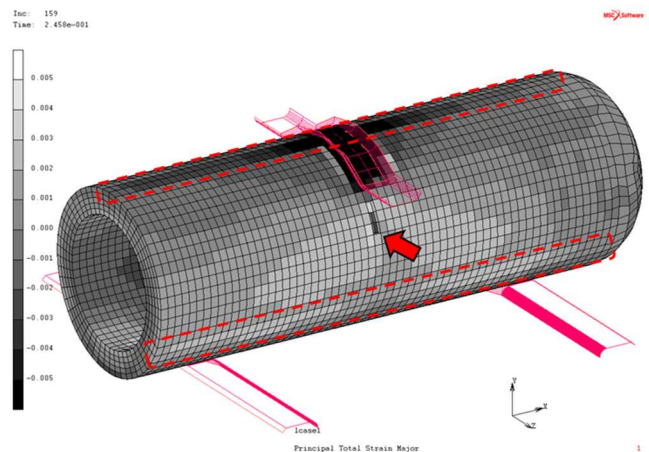


図6 荷重-ストローク曲線 (曲げ試験解析)



(a) 一体造形モデル



(b) 嵌合接着モデル

図7 ひずみ分布 (圧縮0.5~引張0.5%)

3.3 実験による強度評価

MarkForged社製Mark Xにより検証モデルを造形した。嵌合接着モデルにおいては、スリーボンド製の二液性エポキシ接着剤 2082C を用いて補強部材を嵌合接着した。適切な接着処理を行うことにより、その接着強度は最大25MPaを期待できる³⁾。

解析における強度評価と同様の3点曲げ試験を行い、得られた荷重-ストローク曲線を図8、破断直前の様子を図9、試験後の試験体を図10に示す。(a)一体造形モデルではストローク1.7mmで圧子下部において積層面に沿って破断した。(b)嵌合接着モデルでは全体が大きく変形しながらストローク5.4mmまで耐え、圧子下部において積層面に沿って破断した。補強部材の長繊維が破断していることから、補強部材が有効に作用したことが分かる。

最大荷重においては一体造形モデル7.1kNに対して嵌合接着モデル14.9kNの2.1倍、破断エネルギーにおいては同じく6.2Jに対して52.2Jの8.4倍と大幅な性能向上を達成できた。なお、図6に示した解析による荷重-ストローク曲線と実験結果では、大きな乖離が発生している。破壊形態は本研究のような簡易的な解析では評価できないことを明示している。

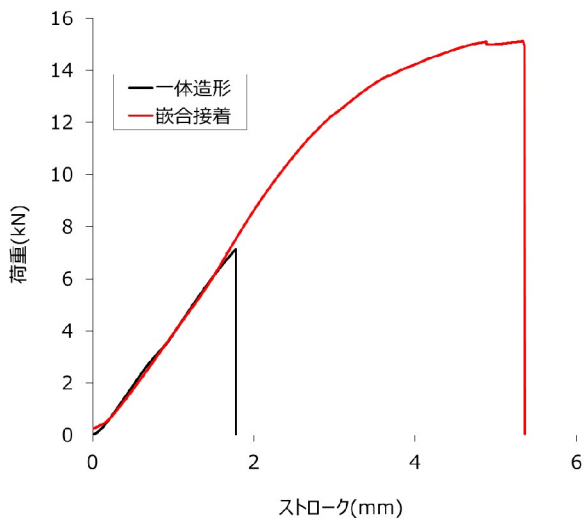
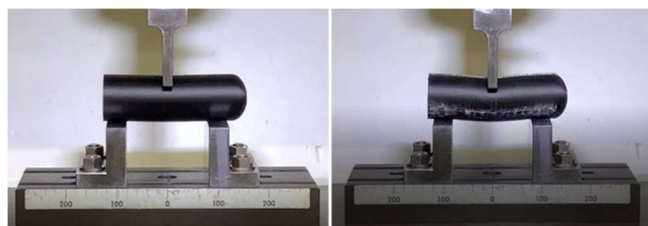
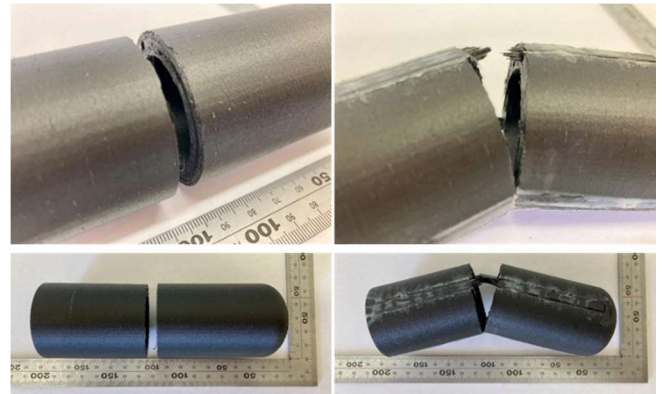


図8 荷重-ストローク曲線 (曲げ試験結果)



(a) 一体造形モデル (b) 嵌合接着モデル

図9 3点曲げ試験 (破断直前の様子)



(a) 一体造形モデル (b) 嵌合接着モデル

図10 試験後の試験体

4 結 言

本研究により、次のことが明らかになった。

- (1) 長炭素繊維等で強化されたフィラメントを用いた3Dプリンタ造形品の異方性は、[0/90]と[45/-45]の2種類の積層板、及び角パイプ造形品から切り出した平板を用いた引張試験を行うことで同定できる。
- (2) 3Dプリンタ造形品は積層方向の強度が著しく小さいが、異なる積層方向の部材を嵌合接着することでその強度を補うことが可能となる。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、株式会社HIVECには3Dプリンタ造形品を御提供頂いた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- 1) 松永他：広島県西部工技研究報告, 61(2018)
- 2) 松永他：広島県西部工技研究報告, 62(2019)
- 3) 技術資料：スリーボンド2082C