

1. 背景と目的

近年、気候変動に伴う水害が頻発化・激甚化しており、橋梁の損傷だけでなく落橋・流橋被害も増加している。著者らは、災害後でも迅速に架橋できる緊急仮設橋として、展開構造を応用したシザーズ橋や事前に部材の一部を組み立てたモジュール橋の基礎研究をこれまでにやってきた。ここで緊急仮設橋とは、発災後の機動力を重視した人命救助用、緊急車両用の新規規格の橋であり、土木学会で指針化を目指している¹⁾。従来の国や県などが所有する災害用の応急組立橋は、大型車両の通行を基本としているため架橋に時間を要し、かつ路幅の狭い山間部・山岳部での活用が難しいというデメリットがあった。

このような背景を踏まえ、著者らはトラス・トポロジー最適に基づく地域防災用の木製パネル橋の開発を試みてきた^{2,3)}。この木製パネル橋は、近年の頻発化・激甚化する自然災害に対して、地域住民でも持ち運べ、町内会の数人がいれば簡単に架設できることをコンセプトにしている。例えば、図 1 のような基本ユニットを描いており、極力ホームセンターなどの市販品を用いた木製パネル橋の構築を考えている。この基本ユニットを橋軸方向に連ねることで、支間長を調整する。一方で、パネル間を接合する継手部の形状は複雑になりがちで、市販品では代替しにくいと考えられる。

そこで、近年安価になりつつある FDM 方式 3D プリンタに着目し、継手部への応用を検討してきた⁴⁾。3D プリンタには Poly-Lactic Acid (PLA) 材がよく用い

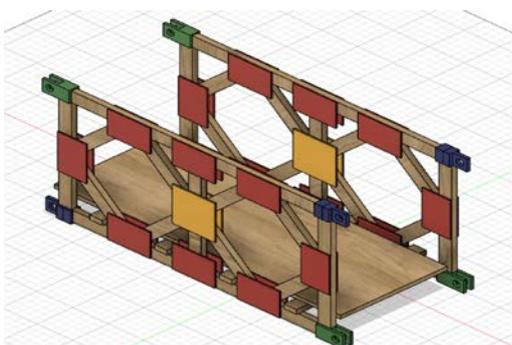


図 1 基本パネルのイメージ図（両端部がピン継手）

られるが、3D プリンタには印刷方向や内部の充填構造など設計自由度が多いため、その基本的な材料特性はもちろん、設計に向けた解析的検討も未だに少ない。よって本研究では、本研究では FDM 方式 3D プリンタにより造形された PLA 材の材料特性を明らかとし、かつ、その特性を再現できる解析モデルを構築することを目的とする。

2. 引張試験の概要

引張試験に用いた試験片の概要を図 2 に示す。試験片は、ひずみゲージが貼付できるようにプラスチック試験片 (JIS K 7139) を 1.5 倍に拡大したものを採用した。試験片の造形には、FDM 方式 3D プリンタ MF-2200D (武藤工業) を用いた。フィラメント材には、同社の PLA 材 ($\phi = 1.75 \text{ mm}$) を使用した。本研究では、板厚、インフィル構造、充填率の 3 種類の造形パラメータに着目した。試験片の板厚は 6,9 mm、インフィル構造はグリッド構造とファストハニカム構造 (図 3 参照)、充填率は 20%、50%、80%、100% とし、

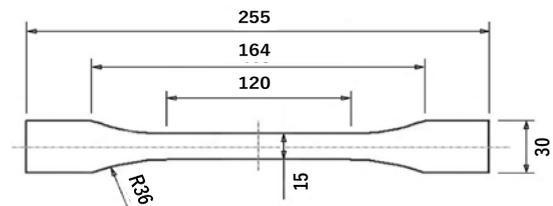


図 2 引張試験片の概要図

インフィル構造	20%	50%	80%	100%
ハニカム構造				
グリッド構造				

図 3 試験片のインフィル構造

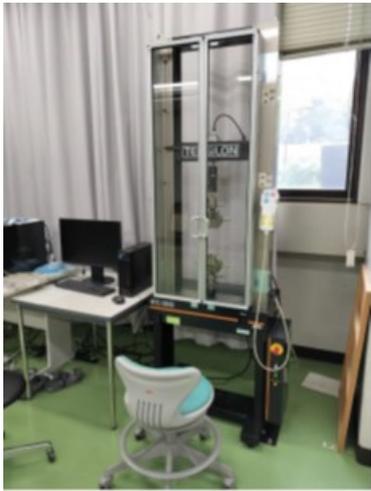


写真1 Tensilon RTI-1310 (信州大学工学部)

計 48 本 (16 パターン×3 本) の試験片に対して、Tensilon RTI-1310 (写真 1) にて引張試験を行った。

3. 引張試験の結果

引張試験で得られた弾性係数と 0.2% 耐力を 図 3、図 4 に示す。なお、内部の空隙の多い充填率 20% のモデルは 0.2% 耐力を求めることは出来なかった。図 3 と図 4 より、弾性係数と 0.2% 耐力は充填率が高くなるにつれて大きくなるのが分かった。また、充填率が 20%、50% ではハニカム構造の方が、充填率 80%、100% ではグリッド構造の方が優れた結果になった。これは、ハニカム構造よりもグリッド構造の方が同じパラメータでも 5.8%~11.3% ほど質量が大きく、PLA 材でより内部が満たされているためであると考えられる。さらに、板厚が厚い場合の弾性係数と 0.2% 耐力は、薄い場合に比べて大きい傾向があった。これは、板厚が薄いほどインフィルソリッドの影響が少なく、上下ソリッドや外周ソリッドに力が集中するためだと考えられる。

4. X 線顕微鏡を用いた考察

試験片の内部構造、ならびに破断状況を考察するために、写真 2 の X 線顕微鏡 Xradia 620 Versa を用いた X 線透過解析を行った。X 線顕微鏡で撮影した画像は、3D 画像処理ソフトウェア Dragonfly 3D World を用いて視覚的および数値的評価した。試験片には、板厚は 6 mm、インフィル構造はグリッド構造、充填率は 20% のものを用いた。

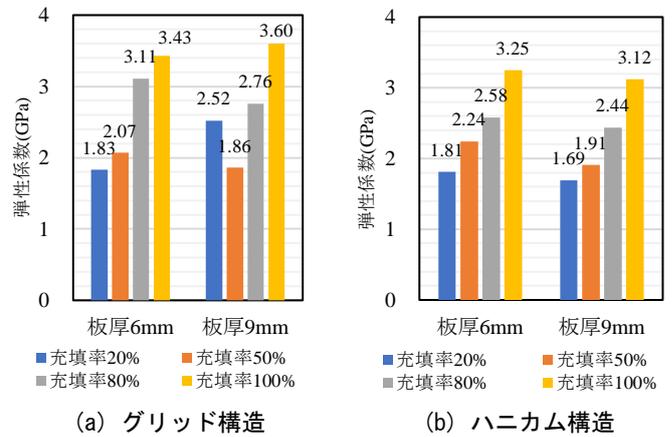


図3 弾性係数

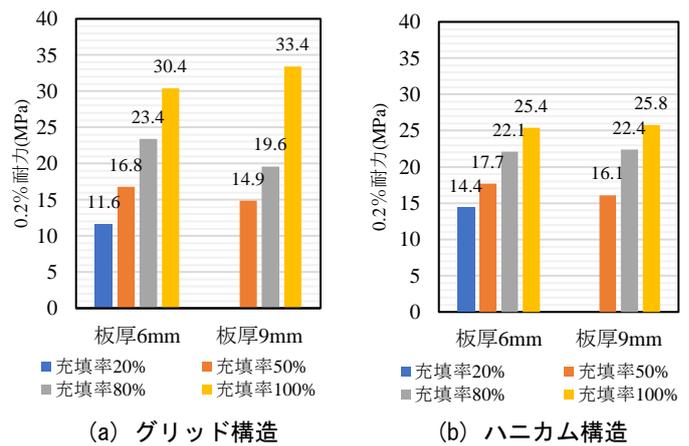


図4 0.2%耐力

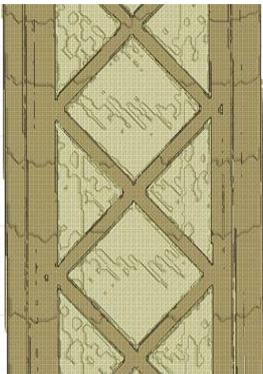
図 5 に試験後の供試体と Dragonfly 3D World によって作製した試験前後の破断箇所メッシュモデルを示す。図 5 の破断前後の様子を比較すると、インフィルソリッドと外周ソリッドの境界で破断が生じていること、外周ソリッドでフィラメントの層間剥離が生じていることが確認できた。また、外周ソリッドの層間剥離は図中の広い範囲で確認できたが、インフィルソリッドの破断は赤丸以外では生じていなかった。よって、グリッド構造を有する試験片では、インフィルソリッドと外周ソリッドが接する応力集中部が損傷することによって、外周ソリッドの負担が増え、試験片の脆性的に繋がったと考えられる。インフィル構造の充填率が高い場合は、インフィルソリッドと外周ソリッド間の応力集中も分散されると考えられ、強度増加に繋がったと予測される。



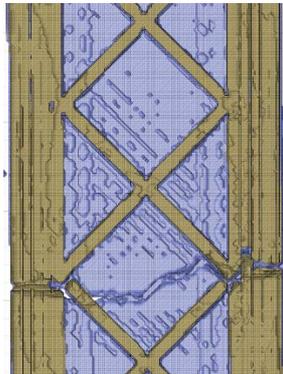
写真 2 X線顕微鏡 Xradia 620 Versa (信州大学工学部)



(a) 試験後の供試体



(b) 試験前の破断箇所



(c) 試験後の破断箇所

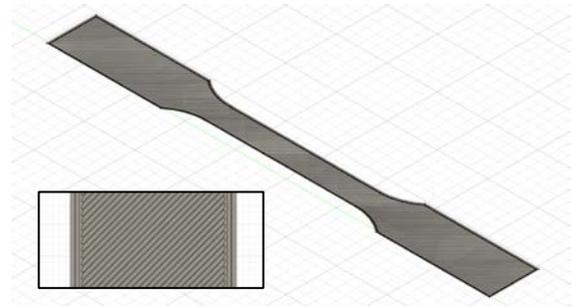
図 5 グリッド構造 (板厚 6 mm, 充填率 20%) の場合

5. FEM 解析の概要

3D プリンタで印刷される PLA 試験片は熱により溶かされた PLA 材が予め設定した印刷パターンに従って積層される。そのため、これを如実に再現しようとすれば、節点数・要素数が膨大な解析モデルとなり、計算コストが飛躍してしまう可能性が多いにある。そのため、如何に簡易的なモデルで材料試験の再現ができるかが重要になる。その足掛かりとして、図 6 に示すように、薄板としてシェル要素で作成した近似モデルと印刷形状をソリッド要素で作成した再現モデルを作成した。解析モデルの材料特性は、引張試験の結果をもとに弾性係数を 2703 MPa、ポアソン比を 0.3、実験データに基づく応力-ひずみ曲線を与えた。境界条件として、部材の片端の節点群に強制変位を与え、もう片端を完全固定とし、実験を再現した。



(a) シェル要素による近似モデル



(b) ソリッド要素による再現モデル

図 6 解析モデルの概要図

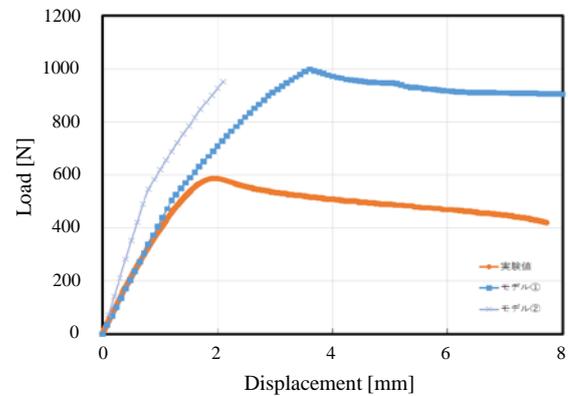


図 7 グリッド構造 (板厚 6 mm, 充填率 20%) の場合

6. FEM 解析の結果

代表例として、グリッド構造 (板厚 6 mm, 充填率 20%) の場合の荷重-変位曲線を図 7 示す。縦軸は試験機の引張荷重を、横軸は試験機のクロスヘッドの移動量をそれぞれ表す。図中の青色の線が近似モデルによる解析結果を、灰色の線が厳密モデルによる解析結果を、橙色の線が実験結果をそれぞれ指す。

当初、フィラメント形状を考慮した再現モデルの強度が低くなると予想していたが、近似モデルの方が実験結果に近い挙動を示した。なお、厳密モデルでは、図 8 のようにフィラメント間の接着箇所に応力集中が生じているが、図 5 のように実際には材料降

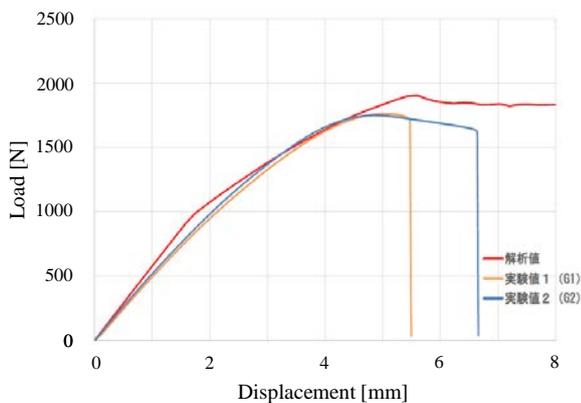
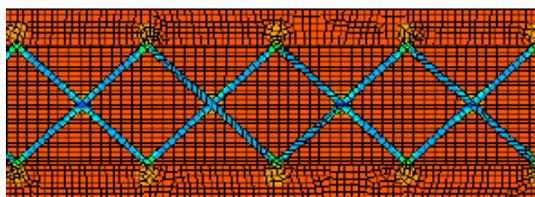


図7 荷重 - 変位曲線 (充填率 20%)



(a) 表面の状況



(b) 内部の状況

図8 近似モデルの応力分布図

伏後に剥離や破断などの挙動が生じて強度低下している可能性も考えられる。

同様に、充填率が低い PLA 造形物の引張試験も実施した。充填率が 100% の場合とは異なり、内部剛性が均一でないため、充填率 100% の場合の結果を参考に、フィラメント形状を考慮せず、かつ内部充填構造を再現できるように、表面と内部をそれぞれソリッド要素でモデル化を行い、再現した。図 8 は引張試験と近似モデルを用いて実施した解析結果を比較したものである。近似モデルでも荷重 - 変位曲線を再現できており、最高荷重の再現に課題を残した。

5. 結論と今後の展望

本研究で明らかとなったことを以下にまとめる。

- インフィル構造の充填率が高くなるに従って、弾性係数と 0.2% 耐力は高くなった。

- 板厚が厚い場合、充填率に対する弾性係数と 0.2% 耐力のばらつきが大きくなった。
- 充填率が低い場合はハニカム構造、高い場合はグリッド構造の方が弾性係数と 0.2% 耐力は高くなった。
- 板厚が薄く、充填率が低い場合、インフィルソリッドと外周ソリッドの境界の応力集中部に破断が生じた。
- 充填率が高い供試体に対してはシェル要素を用いた近似モデルを、充填率が低い供試体に対してはソリッド要素を用いた厳密モデルの方が再現性は高かった。

一方、最高荷重の再現性については課題が残った。今後の研究では、以下のことに着目することで再現性を高めたい。

- 印刷方向を加味した材料特性値
- 外周ソリッドやインフィルソリッドにおけるフィラメント間の剥離
- 外周ソリッドやインフィルソリッドにおけるフィラメントの破断

6. 参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：災害時の緊急架設を目的とした緊急仮設橋に関する調査研究小委員会報告書，2020。
- 2) 近広雄希，小池透之，水野翔太，中沢正利：トラス・トポロジー最適化と構造周期性を考慮したモジュール橋の最適パネル形状，構造工学論文集，70(A)，192-200，2024。
- 3) 中沢正利，近広雄希，有尾一郎：周期性構造橋梁を構成する基本モジュールとカンチレバー形式橋梁のトポロジー最適形状，構造工学論文集，67(A)，90-98，2021。
- 4) 千石遼登，近広雄希：FDM 方式 3D プリントを用いたパネル橋ピン継手の作製に向けた基礎的検討，令和 5 年度土木学会中部支部研究発表会，2024。