

3Dプリンタを用いた縮小実橋モデル試験体の製作に向けた 基礎的研究

村上 海翔¹・千田 知弘²・中沢 正利³・李 相勳³

¹学生会員 東北学院大学大学院 工学研究科環境建設工学専攻1年（〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1）

²正会員 東北学院大学准教授 工学部環境建設工学科（〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1）

³正会員 東北学院大学教授 工学部環境建設工学科（〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1）

1.

はじめに

発売当初、3D プリンタは数百万円から数千万円の導入コストが必要であり、規模の大きい施設等では購入、運用が叶わなかった。しかし、約3年前、家庭用3Dプリンタが数万円から十数万円の価格帯で発売されたのを契機に、著しく市場が拡大されるに至ったことは記憶に新しい。それ以降、競争原理に基づく3Dプリンタ本体の価格が低下とともに、同じ価格帯であっても、造形時間の短縮、使用できる材料の増加などといった性能向上が図られ、2021年度現在、大学の研究室単位でも購入、運用が可能なレベルまでになってきている。しかし、3Dプリンタを用いた土木系の研究は極めて少ないのが現状である^{1),2)}。

仮に、耐震評価を実在橋の縮小モデルで検討する場合、やはり金属3Dプリンタが最適であるが、上記背景に至っても、未だ数千万円から数億円の購入費用がかかり、ランニングコストも莫大なものとなる。費用対効果を鑑みると、実績が伴うFEM解析により高いニーズが集中することは当然の帰結といえ、3Dプリンタを研究に用いる事例が少ない理由の一つになっていると推察される。ただし、安価な樹脂系の3Dプリンタによって製作されたモデルを対象とした各種実験結果が、金属3Dプリンタで製作したモデルを対象とした結果と同程度の精度が得られるのであれば、購入の検討は十分に余地があると考えられる。

そこで本研究では、樹脂系材料を用いる3Dプリンタを実際に購入するにあたり、購入条件をどのように検討・設定したかを報告するとともに、購入した3Dプリンタの実際の作業性、使用した樹脂系材料の材料定数の算定、製作可能な最小寸法の検討を行った結果を報告する。

2. 購入する3Dプリンタに要求される性能の検討

(1) 購入検討条件

市場の拡大とともに、3Dプリンタは大いに発展しスペックが多様化している一方、3Dプリンタを対象とした土木系の文献が少ない状況下にある。この状況は、推奨とされる3Dプリンタが存在しないことと同義であった。そこでまず、購入の際し、3Dプリンタに求める性能を検討した上で、それを充足するモデルを探す必要があった。

今回、3Dプリンタ購入にあたって、我々が3Dプリンタに求めた性能および条件は以下の4つとなる。

- ①部材を詳細に製作可能
- ②モデル製作後にモデル自体が変形しない
- ③耐力があり、破壊試験を実施可能
- ④製作可能なサイズが大きい
- ⑤購入費用およびランニングコストが安価

①に関しては、実橋モデルの製作対象にアーチ橋やトラス橋も視野に入っており、その場合、ボックス断面はもとより、断面内の縦リブなども詳細に製作可能な性能が必要であった。

②に関しては、モデル製作後の冷却期間に、モデルが収縮し、歪みが生じる可能性があった。3Dプリンタで製作した実橋モデルの破壊試験を想定した場合、製作時に生じる歪みは初期不整として作用するため、歪みが生じない性能が必要であった。

③に関しては、初期の情報収集時において、3Dプリンタで製作したモデルは異方性が大きく、わずかな衝撃でも容易にせん断破壊し得るとの情報を得ていた。よって、異方性が小さく、ある程度の耐荷力を有するモデルを製作できる性能が必要であった。

④に関しては、小規模な万能試験機で破壊試験を実施することを想定し、橋長0.6m～1m程度のトラ

表-1 購入した3Dプリンタの性能表

造形方式	熱溶解積層法
使用材料	H-PLA
ノズル最高温度	300°C
ノズル直径	0.4mm
積層ピッチ	0.05~0.30mm
最大造形寸法	310×310×450mm
最大プリント速度	80mm/s
最大充填速度	200mm/s
消費電力	350W
入力形式	stl
価格	720,000円(税別)



写真-1 購入した3Dプリンタ (L-DEVO F300TP PLUS)

ス橋のモデルが製作可能な性能を目安とした。

⑤に関しては、本研究では購入費用を80万円以内、ランニングコスト（材料費）が年間10万円程度に設定した。

(2) 購入した3Dプリンタおよび性能

前節での検討を基に、表-1に示す性能を有するCANON・L-DEVO F3000TP PLUS (写真-1)を購入することとした。前節に示した①～⑤の条件から実際に購入に至るまでの経過は下記のとおりとなる。

前節で示した条件①～③は、3Dプリンタの性能では無く、使用する樹脂材料に強く依存し、①～③を満たす材料は多くは無く、CANONの場合H-PLAであり、H-PLAを使用できる機種がL-DEVOシリーズであった。その上で、④の条件を満たすモデルを選ぶこととしたが、価格が最大造形寸法に依存するこ

とが分かり、④と⑤から、本機を最終的に購入するに至った。なお、目標とした0.6m～1mの造形を行う場合、部材どうし接着することで対応することとした。また、L-DEVO F3000TP PLUSは、H-PLAを含め13種類の樹脂材料を使用することが可能である。H-PLA（以後、フィラメント）は1kgあたり約5000円となり、ランニングコストとしても⑤を満たす。また、造形方式はFDM（熱溶解積層法）であり、樹脂を高温で溶かし、直径0.4mmのノズルから樹脂をガラスボード上に押し出し積層して造形していく造形方式であるため、ボックス断面を製作することが可能な性能を有する。

3. 造形時の作業性および造形精度

(1) 造形時における作業性

CANON・L-DEVO F3000TP PLUSは、

[1]3DモデリングデータをAutoCADで作製し、stl方式で保存する。

[2]モデリングデータを専用編集ソフト(Cura)に読み込ませる。

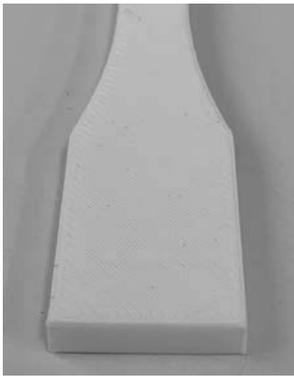
[3]造形倍率、造形位置、積層ピッチ等を入力し、USBに保存する。

[4]USBを3Dプリンタ本体に読み込ませ、ガラスボードを水平に調整し印刷を行う。

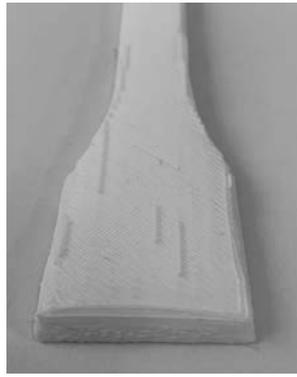
といった比較的容易な作業手順でモデルを造形することが可能である。しかしながら、[4]以降の工程で、作業性を著しく悪化させる現象が2つ確認された。

一つ目として、[4]に記したガラスボードを水平に調整する工程においては、フィラメントを排出するノズルとガラスボードとの間に0.15mmの隙間を作る必要があるが、その設定に際しては、厚さ0.15mmのゲージを用いて目分量で設定することになっており、その設定が造形精度にばらつきを生じさせることが挙げられる(写真-2)。例えば、ノズルとガラスボードの間隔が0.15mmよりも広い場合、造形物の表面が滑らかでは無く波状となり、逆に0.15mmよりも狭い場合、フィラメントが押しつぶされたような跡が残る。よって、モデル造形時には、一度簡易モデルを製作し、設定どおりに製作されているかを確認する必要がある。さらに、最適な隙間を設定できたとしても、振動等で容易にずれが生じ得るなど、[4]の工程の作業性は著しく低く、加えて造形精度に極めて影響するので、最新の注意が必要である。

2つ目として、データとしては表-1の造形寸法を



成功例



失敗例

写真-2 造形精度のばらつき

3Dプリンタ本体に入力できるが、データが大きいと製作過程でフィラメントが絡まってしまい、造形が失敗してしまうケース（写真-3）があることが挙げられる。この場合、3Dプリンタ自体にこの挙動に対するセーフティが組み込まれておらず、絡まった状態でも停止せずに作り続けてしまうため、造形に失敗するとともに、状況によってはフィラメントノズルが破壊される場合がある。よって、スペック的には全自動で造形が可能であるが、比較的に大きいデータの造形や、複雑な造形を行う際は、一定時間毎に確認する必要がある。

(2) フィラメントの積層の設定

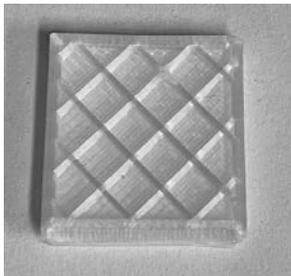
本研究の3Dプリンタは、溶かしたフィラメントを1本のノズルから出し、下から上へ積層していく熱溶解性積層法を用いている。この時の一層あたりの厚さを積層ピッチと言い、0.1mm~0.3mmの間で設定することが可能である。メーカー推奨は0.1mmであるが、これは積層ピッチが大きくなればなるほど造形速度は上がるのに対し、造形精度が下がるためである。また、充填率も設定可能である。充填率20%~100%に変化させた際の断面比較を写真-4に示す。メーカー発表では、充填率60%と100%とでは見た目に差が生じないとされており、写真-4からも確認できる。この充填率が強度にどれほどの影響を与えるかは本論文では確認していないが、今後確認していく予定である。



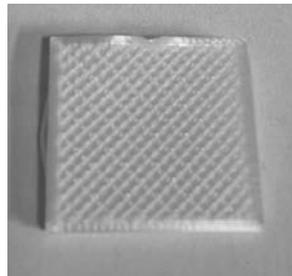
写真-3 フィラメントが絡まった例

前節で示したように、3Dプリンタで製作した造形物は異方性が強いことが示唆される¹⁾。この異方性は熱溶解性積層法の積層方法に由来している。本3Dプリンタは、まず対象造形物の外枠を最初に造型した後、軸方向に対して45°の角度で内部を充填していく（写真-5）。次の層からは前の層とは反対の向きの45°の角度で造形していくことを繰り返して積層していくため異方性は弱まるが、積層数が少ない場合、異方性が強く出てしまう。この工程は全自動で行われ、使用者には設定できない。また、積層方向を軸方向に対して平行および垂直にできないか確認するため、対象のCADデータを45°の角度で回転させたファイルを作成して3Dプリンタ本体に読み込ませたが、積層方法および積層方向に変化は無かった。よって、载荷試験のために造形する場合、ある程度の厚みを持たせないと、せん断破壊が生じ易い可能性が示唆された。

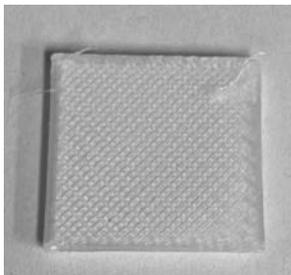
高さ方向の積層の失敗例を写真-6に示す。軸方向を高さ方向に設定した場合、一定の高さを超えると造形物が転倒することが分かった。これは、融けた



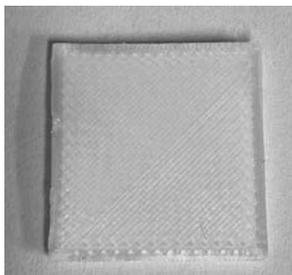
充填率20%



充填率40%



充填率60%



充填率100%

写真-4 充填率の違いによる断面の比較

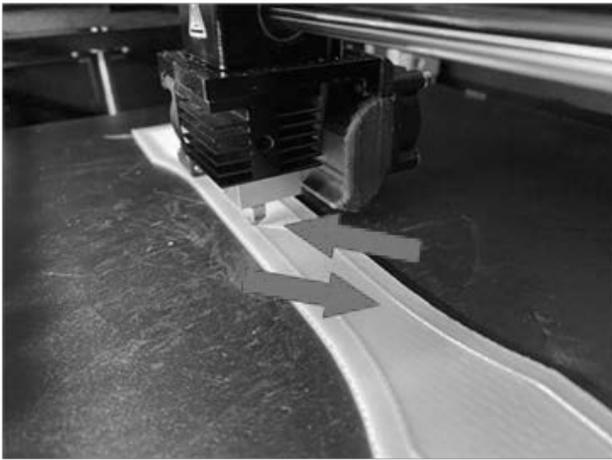


写真-5 充填の際の積層方向



写真-6 高さ方向の積層の失敗例

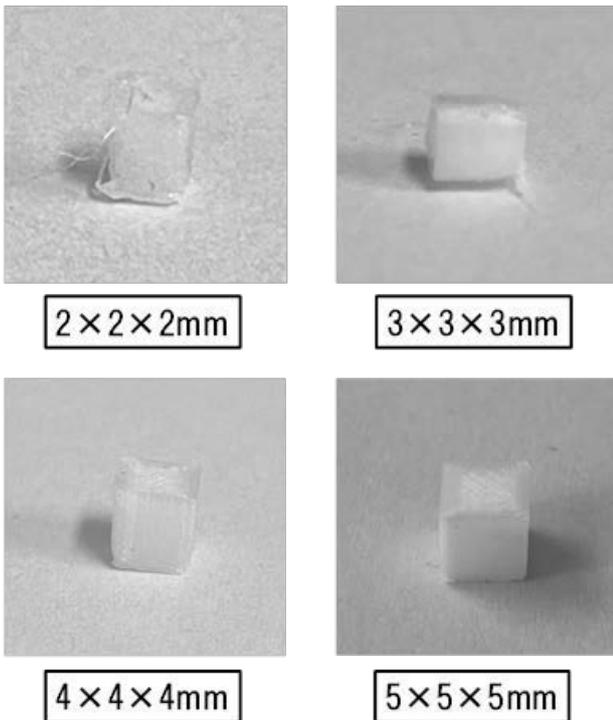


写真-7 断面寸法の違いによる造形精度の違い

フィラメントの粘性が高いため、ノズルが移動する際、造形物に引張力が作用するためである。転倒防止のため、支保工のような部材をCADデータに盛り込むことも可能であるが、造形後に削り取る必要があり、ボックス断面の場合、ウェブもしくはフランジの一部分の厚みが変わってしまうことが想定される。転倒をしない断面サイズと高さの検討もまた、今後実施していく予定である。

(3) ボックス断面を想定した最低寸法

本研究では、トラス橋や鋼アーチ橋を想定したボックス断面の造形が可能かどうかの確認も行った。厚さを0.5mm共通とし、断面寸法×高さを2mm～5mmとした寸法の異なるボックス断面の造形精度の違いを写真-7に示す。2mm×2mm×2mmのモデルでは、非常に荒い造形となるが、断面寸法の増加とともに、造形精度が向上していくことが見て取れ、5mm×5mm×5mmのモデルでは、空洞部の壁面の造形もなめらかなものとなった。

また、5mm×5mm×5mmのモデルであっても、厚さを0.2mmとした場合、造形精度が写真-7中の2mm×2mm×2mmのモデルほどの造形精度しか得られなかった。よって、ボックス断面を造形する場合は、厚さ0.5mm以上、断面寸法5mm×5mm以上にする必要があることが確認された。

4. 引張試験

(1) 試験体および試験概要

フィラメント (H-PLA) のヤング率とポアソン比はメーカー発表されていないため、引張試験から得られる応力ひずみ曲線の線形部からヤング率を算出することとした。引張試験を実施するに当たり、プラスチック材料JIS規格JIS K 7139³⁾を基にした試験を実施する予定であったが、試験体の幅が横ひずみを得るためのひずみゲージのサイズよりも狭かったため、ひずみゲージの寸法に合わせ、JIS K 7139の試験体寸法を1.5倍にして造形することとした。引張試験体の寸法を図-1に、実際に造形した試験体を写真-8に示す。フィラメント充填率は100%とし、計4本の試験体を造形した。ひずみゲージは単軸ひずみゲージを用いることとし、各試験体の中央部の両面に軸方向、軸直角方向に各一枚ずつ添付した。

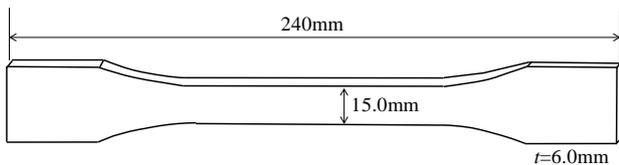


図-1 JIS K 7139を1.5倍した試験体寸法



写真-8 図-1を基に造形した引張試験体

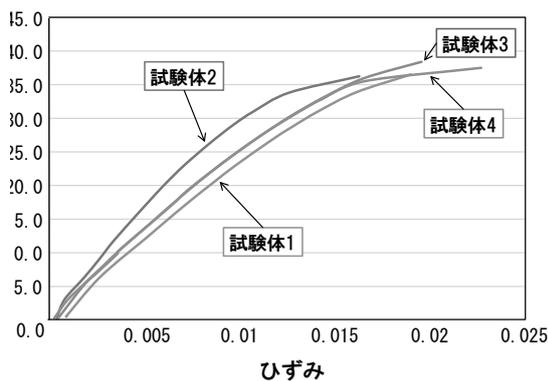


図-2 供試体の応力ひずみ曲線

(2) 引張試験結果およびヤング率とポアソン比の算出

引張試験から得られた4本の試験体の応力-ひずみ関係を図-2に、破断した試験体を写真-9に、脆性破壊の様子を写真-10に示す。全ての試験体は35MPaを過ぎた辺りから線形性を失うが、線形性を失った直後に破壊した試験体1は写真-9のように破断し、その他の試験体は写真-10に示すように、フィラメント繊維がほぐれるように伸びて行き、外側の繊維から徐々に切れて行くような脆性破壊が見られた。いずれの破壊においても、45°の角度でせん断破壊を生じているように見えるが、実際は、最外側のフィラメントの積層方向に沿って破壊に至っている。それを踏まえてあらためて写真-10をみると、最外側のフィラメントと同じ積層方向の層のフィラメントがほぼ同時に剥離しており、伸びている繊維は最外層とは逆向きの積層方向の繊維であることが分かる。

この特徴を鑑みると、トラス橋等を対象とした破壊試験を想定した場合、圧縮時の破壊性状を把握しておく必要があることが示唆される。

図-2を用いてフィラメントのヤング率を求めると、



写真-9 破断した試験体



写真-10 脆性破壊の様子

その平均は2,74GPaであった。このヤング率はスギ製材・甲種構造材1級⁴⁾の基準弾性係数7.0GPaの約1/3程度であるが、引張強度は16.2MPaの2倍以上となる35MPaであることから、載荷試験等に十分に使用できる強度を有すると考えられる。なお、等方性材料と仮定して算出したポアソン比の平均値は約0.383となり、一般的な土木材料と比して大きめの値となった。

5. まとめ

本研究では、実橋の縮小モデルの製作に3Dプリンタを用いることを想定し、導入する際に検討した条件設定と実際に導入した3Dプリンタの情報を紹介するとともに、造形するモデルの部材を想定した造形の可能造形寸法、作業性などを調べた結果を報告した。また、JISのプラスチック材料規格を基にした引張試験を実施したところ、得られたヤング率は

構造用のスギ製材と比して低めであったが、破壊強度は2倍以上を有するため、実橋モデルの破壊試験に十分に活用できる強度を有することが示された。

本研究を通じて、圧縮強度の調査、部材どうしの接着法の確立等、あらためて実施しなければならない課題が明らかとなったため、今後も実験を継続して行く予定である。

謝辞:本研究の一部は科研費18K18888の助成を受けたものである。また、3Dプリンタ購入にあたり株式会社東芝の山森直樹様に多大なるご助言をいただいた。ここに謝意を表す。実験の遂行にあたっては2020年度東北学院大学工学部環境建設工学科の卒研究生であった小林賢悟君（現：オリジナル設計株式会社）に協力いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 後藤文彦，田部井香月，吹附茜，大竹壯弥，野田龍：FEMと3Dプリンタを用いたハニカムパネルの挙動解析，構造工学論文集 Vol.63A, 2017.
- 2) 高橋智，児玉和也：3Dプリンタ造形物の強度評価と充填構造の設計「石巻専修大学 研究紀要」第31号，9-16, 2020.
- 3) JIS K 7139:2009. プラスチック試験片, 2009.
- 4) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-, p.395, 2011.