

3Dプリンターによる造形物を教育利用するための 強度に関する検討

岡村 吉永

A Study on the Strength of 3D Printed Objects for Educational Use

OKAMURA Yoshihisa

(Received October 21, 2024)

キーワード：3Dプリンター、熱溶解積層（FDM）方式、造形物の強度、STEAM教育

はじめに

情報関連技術の進展と普及はめざましく、学校現場においては、GIGAスクール構想（文部科学省、2020）で導入が進むコンピュータやタブレット端末はいうに及ばず、デジタル加工機械の活用も今後一般的になって行くものと考えられる。これに関連し、令和元年に一部改正された教材整備指針（文部科学省、2019）では、中学校の技術・家庭科（技術）に3Dプリンターが例示された。当時、高額であった3Dプリンターであるが、一般に家庭用マシンといわれる普及型については、性能が向上する一方で低価格化が進み、学校現場への導入も容易になりつつある。こうしたデジタル加工機械は、学びやアイデアを具体化しやすい特徴があり、STEAM教育に関連する経済産業省の「ものづくり（FAB）×課題解決のワクワクを学びへ連結する教育プログラム（FABLABの公教育導入実証）」（経済産業省、2018）において、学校におけるデジタルファブリケーション利用の有効性が報告されている。

この一方、デジタル加工機械による造形物については、従来の加工方法や加工原理が異なるため、造形物のデザインや設計、使用方法などについて、これまでとは違う新たな留意が必要なことも事実である。特に3Dプリンターでは、積層しながら造形物を作成するために層間の剥がれが起きやすいことに加え、造形時間の短縮や材料の消費を少なくすることをねらいとして造形物内部を目の粗い構造物で充填するため、見た目と強度が異なることも少なくない。積層方向や壁の厚さ、内部充填率によって強度が著しく異なることは、経験的によく知られている。こうした3Dプリンターによる造形物の強度に関する詳しい研究としては、造形物の強度評価と充填構造の設計に関する研究（高橋・児玉、2020）や造形物の破断荷重の予測（伊藤・佐藤・増田、2022）、インクジェット3Dプリンターの造形精度と強度に関する報告（安部、2017）などがみられるが、材料力学や材料試験等に関わる専門的知識を有さない者にとっては難解で利用が難しい。学校教育などの使用にあたっては「おおよそ、どのような設計や使い方が良いのか」といった、感覚的に理解しやすい指針が求められる。

このような状況を踏まえ、本研究では、家庭や学校での普及が進む熱溶解積層方式（Fused Deposition Modeling、以下FDM方式）の3Dプリンターを対象に、造形物をデザインしたり設計したりする際にどのようなことを配慮すれば必要な強度が得られやすいのかについて、そのヒントとなる資料の提供を行うことを目的として検討を行った。

1. 3Dプリンター造形物の強度試験

材料の強度試験については、金属材料を主体としてJIS（Z 2241:2011 など）に詳しく規定がなされている。ただし、本研究では、上述したように3Dプリンターによる造形物を学校で用いることを前提とし、そのための直感的に分かりやすく、かつ使用頻度が高いと思われる場面を想定した強度に関する指針を得ることを

目的とする。これを達成するため、本研究では、3Dプリンターによる造形物の強度を測る試験装置を製作し、これを用いた独自の評価試験を試行した。なお、今回はその手始めであることから、試験方法や製作した装置の有効性および課題についても検討する。

1-1 試験装置

3Dプリンターによる造形物の強度に関しては、プリンターテーブル面に並行な水平方向(XY方向)とテーブル面に垂直な積層方向(Z方向)とを意識する必要がある。特にFDM方式による造形物では、造形中の樹脂の熔融温度や樹脂流量などにもよるが、完成した造形物に外力が加わった際に積層面間での剥がれが起きやすく、破壊につながりやすい。本研究では、こうした積層方向による強度の違いを知り、造形に生かすための破壊試験を実施した。

図1に、本実験用に自作した試験装置を示す。装置は、引張試験および集中荷重による曲げ(片持ち梁)試験に対応しており、荷重測定にはMxmoonfree社製のデジタルフォースゲージHP-500を使用した。測定は、送りねじの回転によってフォースゲージを昇降させ、その時に生じた荷重の変化をパソコンで読み取るようにしている。現在は、昇降ハンドルで送りねじを回転させているが、将来的には、モーターでハンドル部を定速回転させ、変位量と荷重の変化を連動させるようにしたい。

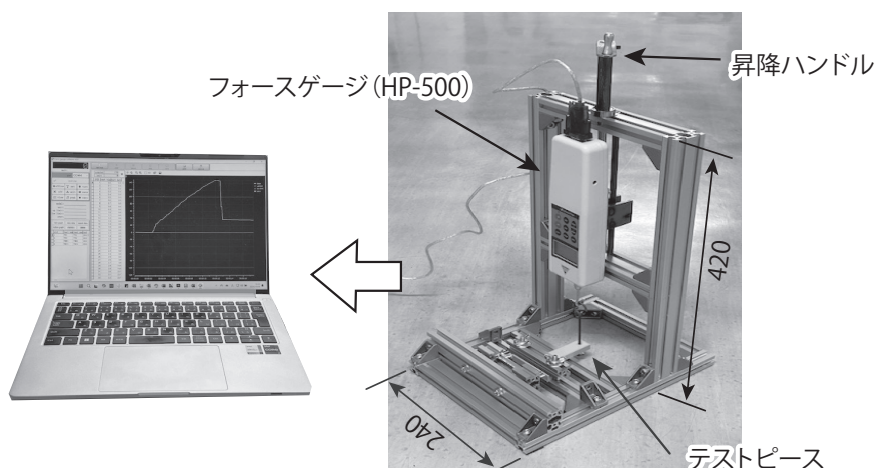


図1 自作した試験装置

1-2 試験方法

著者は、これまでに3Dプリンターを用いて多くの教材や教具などを作成してきた。その中には、実験装置や加工機械の部品製作も含まれるが、造形物の強度を意識するのは曲げ応力に加わる場合が多く、引張強度を意識したことはあまりない。こうした経験を踏まえ、手始めとなる本研究では、曲げ強さに焦点化して造形物の強度を評価することとし、図2のような試験を実施した。

試験するテストピースは、片持ち梁(幅20mm、厚さ10mm、長さ70mm)とし、梁根元の適切な固定方法を探るため後述する3種類の形状を試験した。なお、自作した試験装置の構造上、押し下げ方向に荷重を加えることが難しいため、テストピースの根元から60mmの梁先端中央部に直径4mmの丸穴を設け、穴に通した接続棒を引き上げることで梁先端部に集中荷重が加わるようにした。

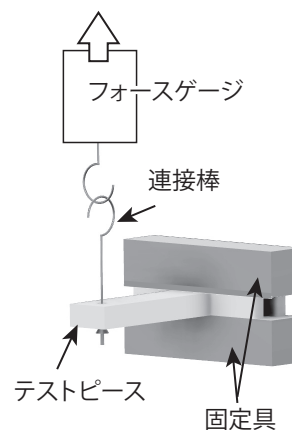


図2 試験方法

1-3 テストピース

テストピースの形状は、図3に示すA~Cの3通りで、それぞれについて、梁の長さ方向が積層方向となるZタイプおよび積層方向に直行するXYタイプを用意した。なお、FDM方式の3Dプリンターでは、造形速度の向上ならびに使用する樹脂の消費を抑えるため、造形物は外殻のみを成形し、内部は六角形のハニカム構造や四角い格子構造などで埋められることが多く、その充填率は15~20%が一般的である。

今回3Dプリンターで製作するテストピースも例外ではなく、Aタイプのテストピースでは、外殻部(梁と固定部の外側面部および上下面)のみに壁が形成され、内部はハニカム構造で充填されている。研究では、造形物の強度は壁部分の受け持つ割合が高いと予想し、比較のため、固定部の中にも梁の外側面壁が貫入す

るよう工夫したBタイプを製作した。ただし、Bタイプは梁の根元部分が固定部と繋がっているため、その影響が無視できないと考え、さらに梁の付け根部分が固定部と干渉しないCタイプを製作した。

テストピースの作成には、FDM方式の3Dプリンター（Flashforge社製Creator 3）を使用した。造形時の条件を表1に示す。なお、この3Dプリンターは、左右2つの造形用エクストルーダーを備えているが、予備実験で左右の造形物間に強度差が認められたため、研究では、より高い強度が得られた右側のみを使用してテストピースを作成した。

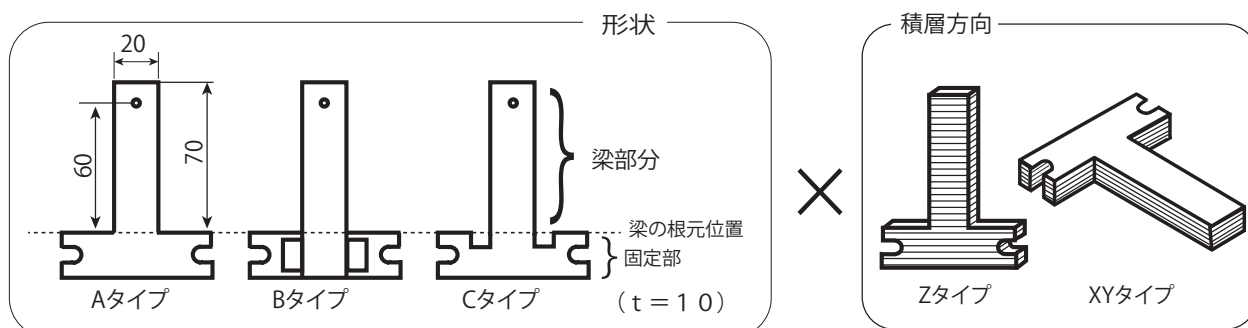


図3 テストピースの形状（A,B,Cタイプの太線で示した部分は、壁の位置）

表1 テストピース造形時の条件

スライサーソフト：	FlashPrint 5.8.7	充填率：	15 %
装置：	Flashforge Creator 3 (右側 エクストルーダーのみ使用)	モデル内部充填パターン：	六角形
使用樹脂：	Flashforge PLA (1.7mm)	プリント速度：	60mm / s
積層ピッチ：	0.18 mm	樹脂を出していないときの速度：	80mm / s
シェル・カウント：	3	ヘッド温度：	200 °C
ラフトの有無：	有	プラットフォーム温度：	45°C

2. 結果および考察

試験結果の例を図4に示す。縦軸は、加えた荷重値、横軸は、時間経過を示している。先に述べた通り変位量ではないことを断っておく。これをみると、荷重は時間とともに上昇した後、突如急低下する。この瞬間、梁根元の引張側に破断（図5）が生じており、荷重の急低下は、破壊によって梁の抗力が一気に失われたことが原因であることが分かる。ただし、今回製作した試験装置では、梁の変位量を測定できないため、

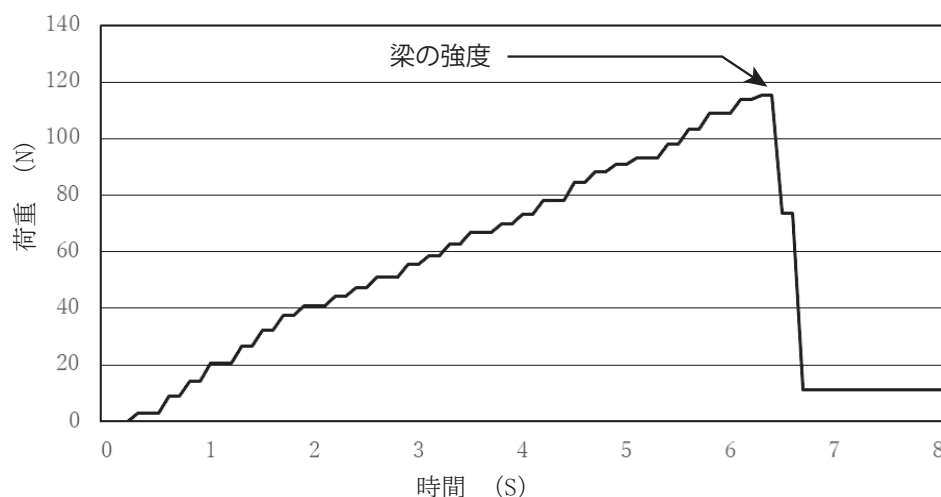


図4 試験結果（例）

詳しい現象については今後の課題とする。

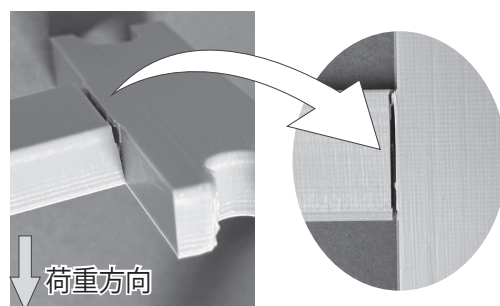
以上を踏まえ、本研究では、梁の抗力が急激に失われる直前の最大荷重値を梁の強度とし、各テストピースについて3回ずつ測定するようにした。

2-1 積層方向および梁の形状による強度

図3に示した3つのテストピースの形状と樹脂の積層方向とを組み合わせた試験の結果を図6に示す。図は、左側が、梁の長さ方向に樹脂を積層したZタイプ、右側が梁の長さ方向と直行する方向に樹脂を積層したXYタイプとなっており、それぞれについて梁の根元付近の形状が異なるA,B,Cタイプを並べている。なお、以降では、“積層方向－梁根元形状－試行回数”を組み合わせ、Z-A（積層方向がZで、梁根元形状がAタイプ）あるいは、Z-A1（Z-Aの試行1回目）の様に表記する。

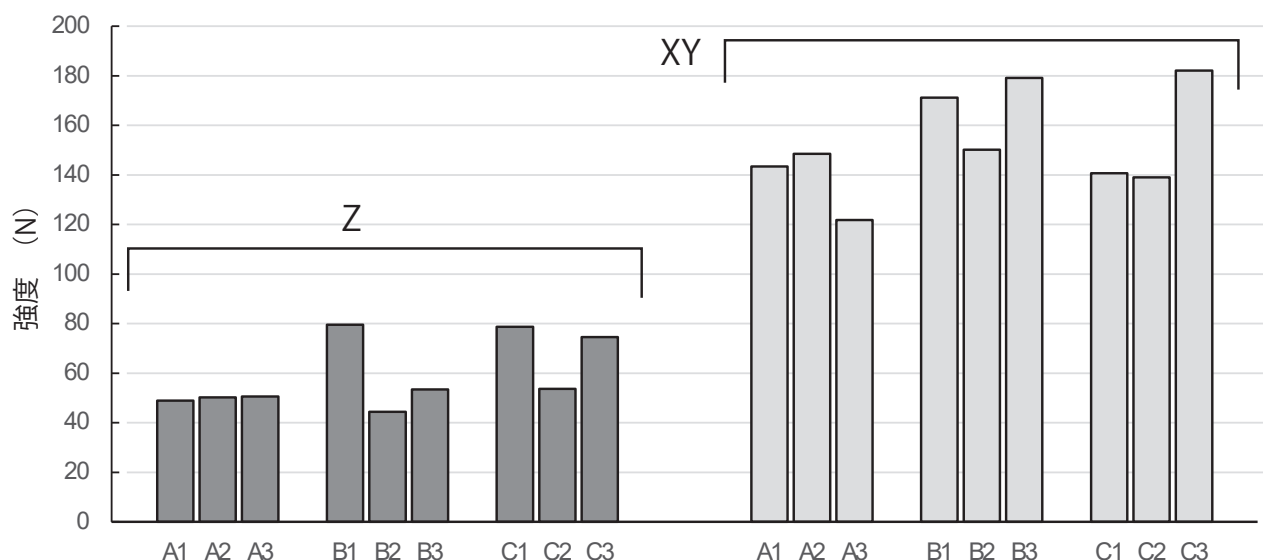
この図をみると、積層方向すなわちZ方向とXY方向の違いが強度に与える影響が大きく、Zタイプ、XYタイプとも梁の根元の形状による強度差は比較的小さいことが分かる。Zタイプ全体ならびにXYタイプ全体を平均値で比べると、Zタイプの平均値が59.4N（SD:14.0）であるのに対し、XYタイプの平均値は152.9N（SD:20.3）で、その比は、ほぼ1:2.5となった。使用する3Dプリンターの性能や造形時の設定、特にシェル・カウントや充填率によって変化する値だと考えられるが、無視できない差である。FDM方式の3Dプリンターで造形したことがある者にとっても参考になる値であり、積層方向の強度比を考慮した設計の重要性を示す結果といえるだろう。

積層方向ごとに梁の根元形状による強度の違いをみると、まずZ-Aについては、3回の試験とも強度は50N前後で大きなばらつきはみられなかった。Z-Bについては、Z-B2、Z-B3はほぼZ-Aと変わらないが、Z-B1が79.6Nと60%程度強度が高くなった。Z-B1の破断面（図7）をみると、図5に示した例のように破断面が一つに繋がっておらず、梁の側面に破断面D1、梁の引張側根元部分（写真では梁の上面側）と固定部を繋ぐ



※ 梁の引張側と側面に繋がる割れ

図5 梁根元部分の破断（例）



	Z			XY		
	A	B	C	A	B	C
1	49.0	79.6	78.7	143.4	171.2	140.7
2	50.2	44.4	53.7	148.5	150.2	139.0
3	50.6	53.4	74.6	121.8	179.2	182.1

図6 試験結果

※下表は、テストピースが破断した時の荷重値 (N)

位置に破断面 D 2 が生じていた。結果として、これが引きはがす積層面を増大させ、梁根元部分の抗力を高めたと考えられる。今後の検証が必要であるが、3D プリンターでの造形において、接合部に面取りやフィレットを設けることで造形物の継ぎ目にかかる応力を分散させ、造形物の強度を高めることが期待される。

Z-C については、Z-A や Z-B の結果から強度は 50N 前後に落ち着くと予想されたが、Z-C1、Z-C3 については、それよりも高い値となった。これについては、他のテストピース (XY タイプを含む) が梁付け根の引張側から破壊が進行し、破断後も圧縮側が繋がっているのに対し、Z-C1、Z-C3 では、図 8 のように固定位置の積層面で梁と固定部がきれいに破断、分離していた。試験時には、はじけるように梁部分が根元から離脱しており、単純な曲げではなく、引張試験に似た状態が生じていたことが強度を高めた一因と考えられる。なぜそのようなになったのか、試験方法が適正であったのかを含め、今後検討したい。

つぎに XY タイプについてみる。XY タイプは、積層方向に対して曲げ荷重が直交するため、積層間の剥がれは起きにくく、図 6 の結果に示したとおり、いずれの場合も Z タイプに比べて強度が高くなっている。

まず XY-A について、XY-A2 と YX-A3 の梁根元部分の破断部 (引張側) を比較した写真 (図 9) を示す。FDM 方式の 3D プリンターでは、造形物の底面を造形する際、最下層の 1 層目を一方向に塗りつぶした後、2 層目をこれと直行する方向に塗りつぶすのが一般的である。この作業を必要回数繰り返して所定の厚さの底面を作ることで造形物を丈夫にしておき、上面側でも同様の作業を繰り返す。今回のテストピースは、梁の長手方向と 45deg をなすように底面および上面の塗りつぶしを行っており、その影響が図 9 からも見えて取れる。写真では、梁の根元でジグザクに割れが進行しており、その方向は 45deg に傾けた塗りつぶし方向に沿っている。繰り返しになるが、XY タイプでは、引張側の面すなわち梁の底面に糸状に伸ばされた樹脂が層状にクロスして配置されている。それを引きちぎるように破断させるためには、積層面を引きはがすよりも大きな力が必要であり、XY タイプの強度を高める主因になったと考えられる。

なお、今回 XY-A3 については、他の 2 つよりもやや強度が低い結果となった。この理由は不明であるが、一因として造形時にラフトに接した底面を引張側に用いたことがあげられる。造形時の上面を引張側に用いた XY-A2 (XY-A1 も同様) に比べて、XY-A3 は、塗りつぶし面の粗さが目立ち、一気に割れが進行したように見える。詳細については、今後の課題としたい。

XY-B については、今回試した 6 タイプの中では最も強度が高いが、同じ XY タイプと比較した場合、その

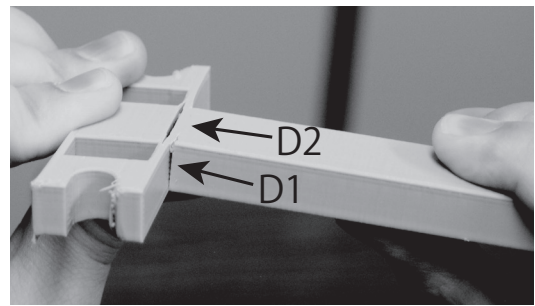


図 7 Z-B1 の破断面
(分かりやすくするため手で広げて撮影)

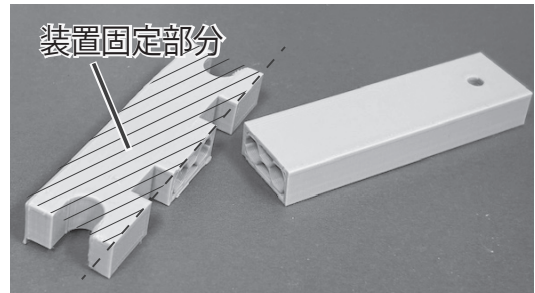


図 8 完全に分離した断面 (Z-C1)
(破線は固定位置)

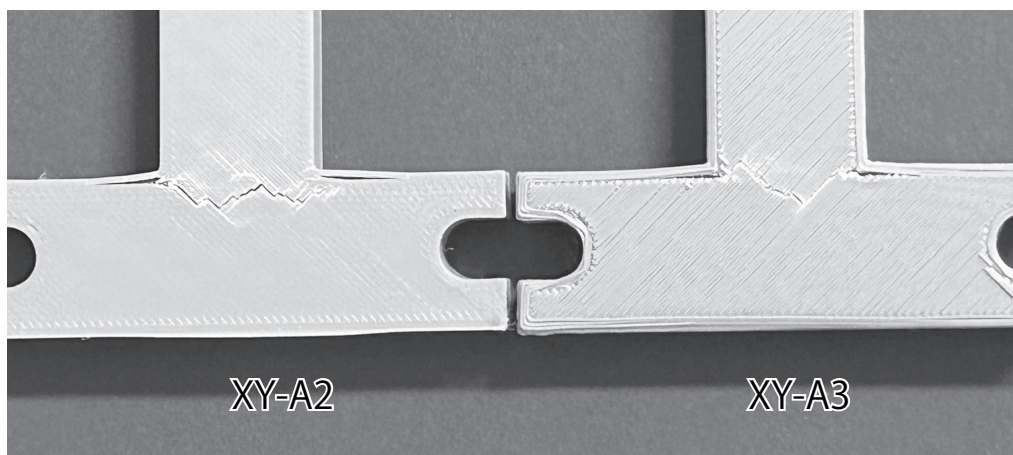


図 9 XY - A2 と XY-A3 の破断面比較

差は顕著とはいえない。図 10 は、XY-B2 の破断部を撮影したものである。梁側面の壁が固定部内に貫通するように工夫した構造が影響したのか、引張側の割れは固定部側に進行せず、梁先の方に向いていた。これは、供試した 3 つのテストピース全てに共通する。何らかの理由で造形物が破壊する方向をコントロールしなければならなかった場合、B タイプの形状は有効であるのかもしれない。

XY-C については、図 11 のように、取り付け位置を斜めに横切る形で引張側の面が割け、それが両サイド（梁側面）の割れに繋がっている。この傾向は供試した 3 つのテストピースに共通しており、梁の長さ方向に対する割れの幅は、全 6 タイプのテストピース中、最大となった。なお、この割れ幅は、XY-C1 が 14.7mm、XY-C2 が 14.9 mm でほぼ等しく、XY-C3 が 10.5 mm と狭くなった。理由は不明であるが、図 6 に示した強度とは逆の関係になっており興味深い。いずれにせよ XY-C タイプは、割れの長さや強度にばらつきが生じやすいようであり、設計時に避けることが望ましいと思われる。

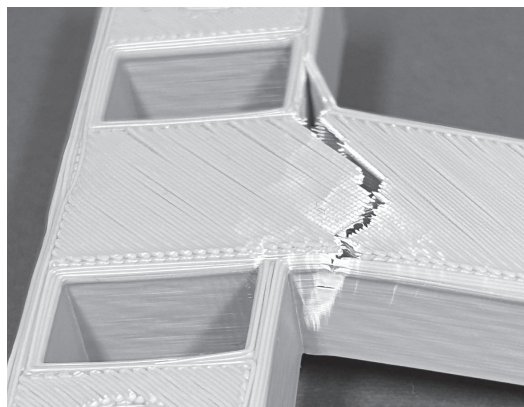


図 10 XY-B タイプの破断

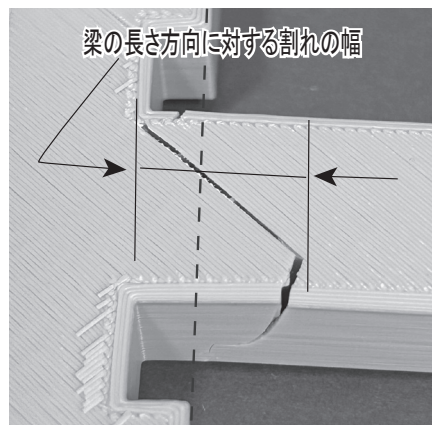


図 11 XY-C タイプの破断
(破線は取り付け位置)

3. 終わりに

FDM 方式の 3D プリンターを教育で有効活用することを目指して、曲げ荷重によって造形物が破断する限界値を強度として評価試験を行った。自作した試験装置については、評価の信頼性を高めるために自動昇降機能を設けるなど、いくつか改善検討が必要ではあるが、測定自体は精度を含め安定的に行えており、有効活用できるものであったといえよう。

造形物の強度に関しては、梁根元形状（3 形状）×積層方向（2 方向）のテストピースを用いる中で、今後の評価に使用するべき標準的な形状を考える有効な資料が得られたと思う。造形物の壁の厚さや充填率、より複雑な断面形状などを試し、学校教育に有効活用するための試験方法を確立したい。

参考文献

- 阿部顕一（2017）：インクジェット 3D プリンター造形物の造形精度と強度の報告，神奈川県立産業技術総合研究所研究報告，No. 23，pp. 13-15
- 伊藤皓太・佐藤真・増田幸雄（2022）：熱溶解積層方式樹脂 3D プリンターにおける造形物の破断荷重の予測，長野県工技センター研報，No. 17，pp. M54-M58
- 経済産業省（2018）：<https://www.learning-innovation.go.jp/verify/a0002/>，最終閲覧日 2024. 10. 07
- 高橋智・児玉和也（2020）：3D プリンター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，pp. 9-16
- 文部科学省（2020）：https://www.mext.go.jp/content/20200625-mxt_syoto01-000003278_1.pdf，最終閲覧日 2024. 10. 10
- 文部科学省（2019）：https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2019/08/06/1316723_4_2.pdf，最終閲覧日 2024. 10. 11