

小型卓上コンクリート 3D プリンタの開発と積層体の評価

ライフサイクル工学分野
田崎悠斗

建設用 3D プリンタ 試験体簡易作製 積層造形
省資源 力学試験 コールドジョイント

1. はじめに

国内の建設業は、就労人口の減少や低い労働生産性が課題となっている¹⁾。そのような状況下で、建設用コンクリート 3D プリンタ (以下、3DCP) が注目されている。3DCP には、デザインの自由度向上、時間短縮、省人化などの多くの利点がある²⁾。一方で、特有の造形方式により積層体内部に発生する不連続層が強度的な弱点となる。また、使用材料に相反する2つの性質「押出性」と「自立性」が要求される³⁾。実用化には、これらの点を考慮し、力学性能と積層性を満たすコンクリートの調合の開発が求められる。

調合検討に当たり、硬化体の性状を確認するためには造形した積層体から得た試験体に対して力学試験を行う必要があるが、現状で実機 3DCP は建設会社などに設置が限られ手軽な利用が難しい。また、使用時には配管の閉塞回避と圧力の確保、積層前の動作確認などに多くの先送りモルタルが必要であり、これらは積層体に用いられず廃棄される。簡易に試験体を得るための検討として模擬試験体³⁾の提案があるが、型枠にモルタルを時間差で打ち込むことで不連続層の簡易的な再現に成功した一方、実機試験体強度との差異が存在し、積層性も評価することができない。

これらの背景から、市販の工具等で実機 3DCP を小型で再現した卓上 3DCP を提案・試作し、材料ロスを抑えた小規模な積層体の造形、および試験体の作製を試みる。また、得られた試験体の力学性能を評価するため、既往の実機 3DCP により得た試験体⁴⁾ (以下、実機試験体) や模擬試験体³⁾での結果と比較する。

2. 卓上 3DCP の開発

図 1 に、開発した卓上 3DCP を示す。卓上 3DCP は、図 1 に示すようなパーツを用いて作製した。押し出しにはスクリューを取り付けた市販の電動ドリルを用いる。図 2 に示すように、モルタル投入兼押し込み口からモルタルを投入し押し込みを行い、安定化電源により制御されたドリルを回転させることでモルタルを吐出し積層する。吐出に合わせて一軸レール上の積層台をスライドさせ、1 層分の積層が完了した後、吐出口の高さを上げ、次の層の積層を行う。この繰り返しにより積層体を得る。実機 3DCP ではデジタル制御によってノズルが上下左右方向に動くことで造形を行うが、卓上 3DCP では、上下調整ハンドルと一軸上を移

動するレールの調整により代替した。圧送部分のパーツは市販の 3D プリンタにより造形した。モルタル投入・押し込み部分の容積は約 0.36 L (57×43×145 mm) で、一度に積層できるモルタル量におおよそ等しい。スクリューはセメント押出成形技術を参考に、スクリューを回転させることで、モルタルの連続・断続的な押し出しが可能な点を考慮して選定を行った。

3. 卓上 3DCP の評価

3.1 使用材料

既往の実機試験体および模擬試験体で使用実績のあるブレミックス材料を用いて、水添加率を 14.75 % とした。

3.2 積層評価

図 3 に卓上 3DCP により得られた積層体を示す。卓上 3DCP を用いて実機のように材料を押し出し、1 層ずつ積み上げる造形方法を再現可能であった。本検討の範囲では、おおよそ長さ 300×幅 80×高さ 170 mm の造形が可能であ

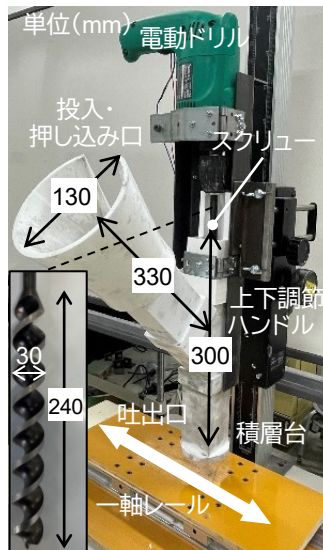


図 1 卓上 3DCP



図 2 積層状況

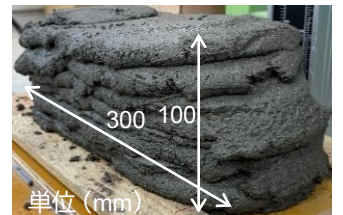


図 3 卓上 3DCP 積層体

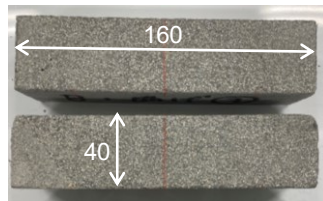
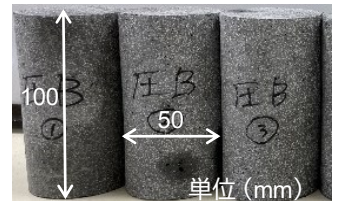


図 4 卓上 3DCP 試験体



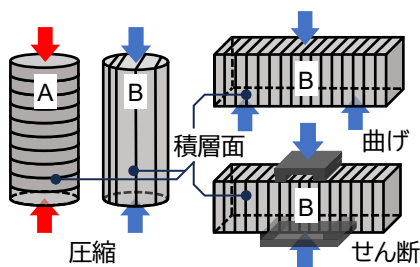


図5 試験体概略図

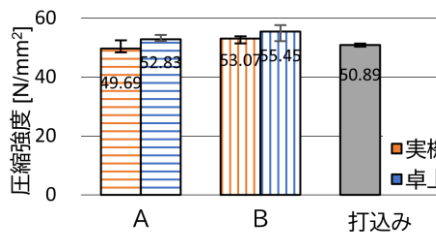


図6 圧縮試験結果

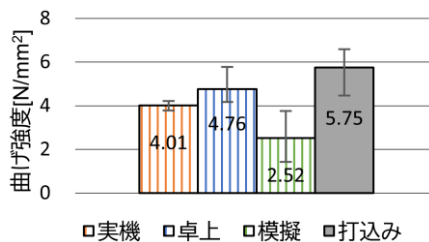


図7 曲げB試験結果

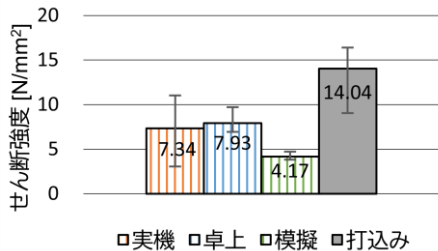


図8 せん断B試験結果

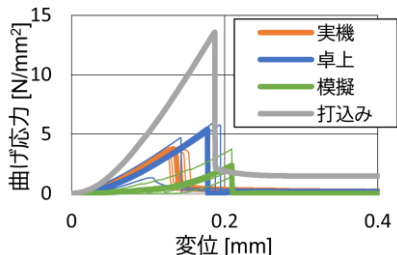


図9 曲げB応力-変位曲線

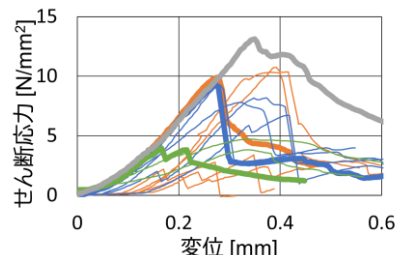


図10 せん断B応力-変位曲線

た。図4に示す卓上3DCPで造形した積層体から作製した試験体において、試験体表面に欠陥等は確認されず、試験体の作製が可能であることを確認した。

造形時の先送りモルタルの量は、圧送パーツ部の約0.2L (57×43×40mmの直方体+半径17mm×高さ110mmの円柱)のみである。一方、実機3DCPでは、ホース(1インチ×約5.5m)、ポンプや投入口等合わせて約5.0Lが必要である。両者を比較すると、小型卓上化により、約96%の先送りモルタルのロス削減可能と算出できる。

3.3 積層体の力学性能評価方法

図5に示す各種試験体を、卓上3DCPで造形した積層体から切り出して作製した(以下、卓上試験体)。ここでは、荷重方向と積層方向が垂直な場合をA方向、平行な場合をB方向とし、以下では圧縮A・圧縮Bのように定義する。卓上試験体において圧縮試験(JISA 1108・JISA 1149)、曲げ試験(JIS R 5201)およびせん断試験(直接二面せん断試験⁸⁾を参考)を行った。得られた結果と実機試験体結果との差異から、積層体における力学性能の再現性を考察した。また、求めた差異と、実機試験体結果と模擬試験体間結果の差異を比較することで、模擬試験体と比較した再現性の向上についても検証した。考察にあたっては、強度の平均値と破壊挙動に着目した。

4. 力学試験結果

圧縮および曲げ試験の最大強度を図6、7および8に示す。ここでは、紙幅の都合上曲げ試験はB方向のみの記載としている。曲げB以外では、実機試験体と卓上試験体の結果に大きな差異は確認されず、約8%以内であった。また、模擬試験体と比較して実機との差異が小さいことを確認した。しかし曲げBでは、実機と卓上の差異が約24%と比較的大きくなった。この原因として試験体ひとつあたりに含まれる不連続層数が考えられる。実機3DCPの積層は層厚7mmで実施したが、卓上3DCPの積層は上下調整ハンドルの

固定に制限があるため、約10-12mmで実施した。その結果、試験体1つあたりに含まれる不連続層数は卓上の方が少なく、不連続層の影響が小さくなり、実機と比較して強度が大きくなったと考えられる。他にも、ノズルによる積層面の押し付けの影響が挙げられる。現状、卓上3DCPは形状等の検討途中で、パーツを簡易的に固定して積層を行っているため、押し込み時の力によってノズルが下に動き、積層面に外力が加わったことが考えられる。これらは、今後固定方法に関して改良を行うことで改善が見込まれる。

破壊挙動に関して、図9、10に示すように、卓上試験体の破壊挙動は実機に近く、模擬試験体の再現度を上回ることが確認された。理由としては、卓上試験体の不連続層の再現数が模擬試験体と比較して多いことが考えられる。

5. まとめ

実機3DCPを小型で再現した卓上3DCPを開発し、実機3DCP同様1層ずつ積み上げる造形方法を再現した積層体の造形および試験体の作製に成功した。造形時の材料ロスは実機と比較して約96%の削減に成功した。また、作製した試験体において、実機試験体の力学性能として特徴的である不連続層の影響等を確認し、実機の力学性能を模擬できることを確認した。

[参考文献]

- 丸屋剛ら, コンクリート工学年次論文集, Vol. 59, pp. 173-180, 2021
- 石田哲也ら, コンクリート工学, Vol. 58, pp. 45-51, 2020
- 小林紀行ら, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, pp. 1606-1611, 2023
- 浅川智哉ら, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), A1 材料施工, pp. 913-914, 2022
- 宮田賢優ら, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, pp. 1888-1893, 2020
- 浅川智哉ら, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, pp. 1642-1647, 2023
- 宮田賢優ら, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, pp. 1558-1563, 2022
- 魚本健人ら, コンクリート工学論文集, Vol. 19, pp. 106-117, 1981