

建設用コンクリート 3D プリンターによる積層構造体の層間補強に関する基礎的研究

ライフサイクル工学分野
宮田賢優

3D プリンター 3D プリンティング 積層工法
コールドジョイント 繊維補強

1. はじめに

近年は様々な材料・機構による 3D プリンターが開発され、建設分野においても、セメント系材料を対象とした 3D プリンティング技術の開発がされつつある。ここでは、チクソトロピー性を有するセメント系材料を吐出・積層させる形式の建設用コンクリート 3D プリンター（以下、建設 3D プリンター）を対象とする。建設 3D プリンターによる積層物の問題点の一つに、積層間に生じるコールドジョイントのような不連続層の存在と、これによる強度低下が挙げられる。本研究では、積層間への金属繊維の埋設を提案し、不連続層による強度低下の抑制の可能性を実験により確認する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では、積層するセメント系材料に建設 3D プリンターに適したフレッシュ性状となるようにプレミックスされたモルタルを用いた。積層体の層間に用いる金属繊維には、繊維補強コンクリートに用いられる両端フック型の市販鋼繊維（HDR、密度 7.85 g/cm³、繊維長 30 mm、直径 0.38 mm、引張強度 2610 MPa 以上）と、市販の針金（SWMGS-2、密度 7.59 g/cm³、引張強度 448 MPa）を使用した。また、SWMGS-2 に関しては、直径が 0.55、0.7、0.9、1.2 mm のものを長さ 30 mm に切断して使用した。

2.3 試験体作製方法

試験体は建設 3D プリンターによって作製した。幅 50 mm、長さ 500 mm、両端部を直径 100 mm の円状とするダンベル形状にモルタルを吐出して積層体を作製した。このとき、1 層の高さを 10 mm として、これを 18 層まで積層させた。この積層体を、図 1 に示す通り、試験方法に適した形状に切断し、試験体を作製した。得られた試験体は、気温 20 °C、湿度 50% の恒温室内にて気中養生を材齢 4 週まで行った。

ここでは、層間に特に補強を行わない積層体試験体に加え、積層間に金属繊維を挿入した試験体を作製した。表 1 に、実験パラメータとした金属繊維の直径と埋設本数を示す。ここでは、圧縮試験体の断面積 A (=1600 mm²) を基準として、埋設される SWMGS-2 金属繊維の総断面積が一定となるように計画した。ただし、HDR を利用した D38 についてのみ、HDR と SWMGS-2 との引張強度比を考慮して総断面積は異なる値としている。金属繊維が積層体の内部でなるべく均一に分散されるよう、平面上および各層での高さ方向での配置をずらして挿入した。

圧縮試験および曲げ試験は JIS R 5201 を、割裂引張試験は JIS A 1113 を、せん断試験は煉瓦で事例のある二面せん断試験²⁾を参考に行った。

3. 実験結果

3.1 力学特性

圧縮強度の結果を図 2 に示す。金属繊維の有無や分布による明確な違いは確認できなかった。圧縮強度に関しては、繊維補強コンクリートなどでも、補強繊維の混入による強度増進は限定的であることが知られており²⁾、この傾向と一致する。さらに、N0 では試験結果のばらつきは小さかった一方で、金属繊維を用いたシリーズではばらつきが大きくなる傾向が見られた。図 3 に引張試験の結果を示す。平均値に着目すると、補強繊維を用いたシリーズではやや小さくなる傾向がみられる。

表1 実験パラメータ

シリーズ	金属繊維直径[mm]	断面積当たりの埋設本数 [本/A mm ²]	断面積当たりの金属繊維総断面積 [mm ² /A mm ²]
N0	—	—	—
D38	0.38	8	1.36
S55	0.55	20	4.75
S70	0.7	12	4.62
S90	0.9	7	4.45
S120	1.2	4	4.52

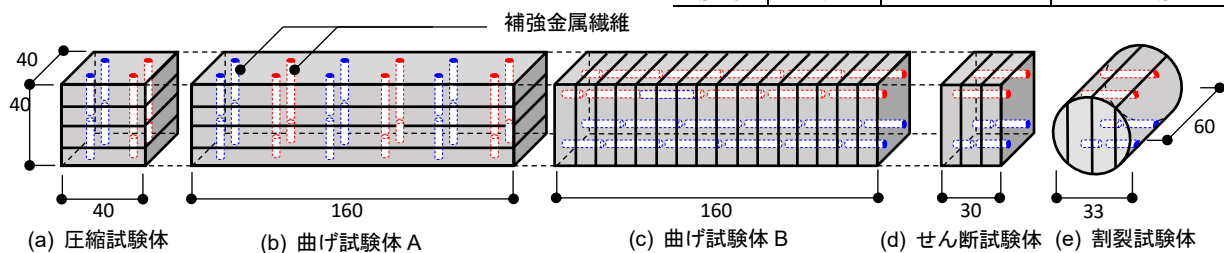


図 1 試験体概略

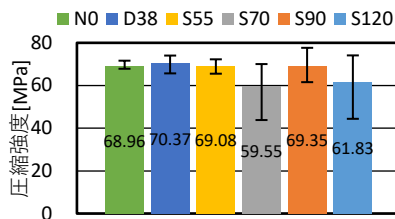


図2 圧縮強度の平均値

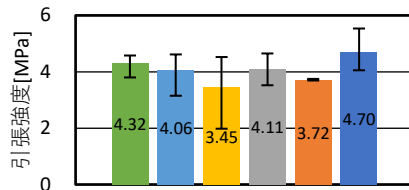


図3 引張強度の平均値

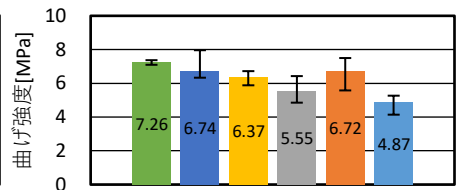


図4 曲げ強度 A の平均値

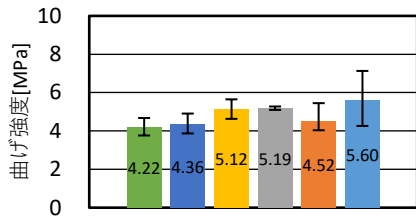


図5 曲げ強度 B の平均値

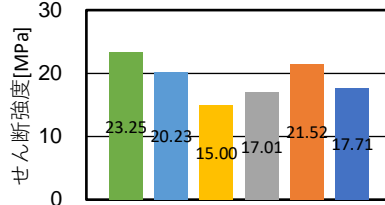


図6 せん断強度



写真1 空隙の様子

方で、引張強度の最大値に着目するとやや大きくなる傾向がみられる。特に S120 シリーズの最大値は他と比較して大きな値を示している。すなわち、金属繊維が力学特性を向上させ得る可能性が確認できる。

曲げ試験の結果を図4および図5に示す。曲げ強度 A の平均値は一定の傾向が見られない一方で、曲げ強度 B については、補強繊維を用いることで増大する傾向が見られ、特に最大値に着目すると繊維径が大きい場合に増加している。また、N0 に注目すると、曲げ強度 A よりも曲げ強度 B が小さい。このことは、層間が力学的な弱点となるためと考えられる。この一方で、S120 に関しては、曲げ強度 B が曲げ強度 A を上回っており、金属繊維による層間補強は、特に曲げ強度 B を向上させ得るという結果が得られた。

せん断強度の結果を図6に示す。金属繊維を挿入した試験体の値は、総じて N0 よりせん断強度が低くなった。この結果の原因として、後述する金属繊維挿入時の巻き込み空隙が挙げられる。

3.2 挿入した金属繊維周囲の空隙

試験体の作製に当たって、金属繊維を積層体の上部から挿入する際に、写真1に示すような金属繊維周囲に空隙が生じる場合が見られた。この一方で、このような金属繊維周囲の空隙は必ず生じるものではなく、十分にモルタルが充填される場合も見られた。金属繊維が適切に層間に挿入された場合には、各種強度の改善に寄与したものと考えられる。この一方で、空隙が生じた場合には欠陥となるものと考えられ、この金属繊維の周りの空隙の不安定さが、先に示した力学特性のばらつきに繋がったと考えられる。

本検討の範囲では、空隙を生じてしまう原因として、以下の点が考えられる。まず1点目として、金属繊維の挿入が特に直径の小さい S55 や D38 においては、必ずしも垂直に行われなかった点が挙げられる。鉛直方向からずれて角度が生じた状態で金属繊維をモルタルに挿入すると、写真1のように金属繊維がモルタルを押しつけてしまい、空隙を巻き込んだと考えられ

る。2点目は、金属繊維が予め曲がっている場合や、正確な直線形状ではない場合に、1点目と同様の理由で空隙を巻き込む場合があった。最後に、建設3Dプリンターでは、積層後の試験体に振動を与えられないため、巻き込み空隙を除去することができなかった。これらの点は、今後の検討課題である。

また、繊維径の違いによる強度試験結果の差については、上述の1点目である、特に繊維径の小さな金属繊維が垂直に挿入されにくかったことが理由として挙げられる。垂直に挿入されなかった金属繊維は、試験方法によっては補強が期待される方向とは異なって挿入されてしまったものと考えられる。

4. 結論

ここでは、建設3Dプリンターによる積層体について、層間に生じるコールドジョイントのような不連続層の存在による強度低下を、金属繊維を埋設することで抑制することを提案した。基礎的な実験を行った結果、下記の点を確認された。

1. 適切に金属繊維が挿入された場合には、層間を補強することで、各種の力学特性の改善が可能であることが確認された。
2. 金属繊維の挿入が適切に行われなかった場合には、金属繊維の周囲に空隙を生じさせる場合があった。このような空隙は、力学特性の低下につながるものと考えられる。

参考文献

- 1) Wangler, T., Rousset, N., Bos, F., Salet, T., Flatt, R.: Digital concrete: a review, Cement and Concrete Research, Vol. 123, Article Number 105780, 2014
- 2) 梶田秀幸, 寺西浩司, 家田栞里, 向山大貴, 宮野和樹: 建設用3Dプリンターに用いるセメント系材料の物性評価方法に関する研究(その1. プリンティング材料の押し出し性の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1273-1274, 2019.9
- 3) 中浜貴生, 畑中重光, 三島直生: 煉瓦目地のせん断試験方法および破壊基準に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.1225-1232, 2009
- 4) Neves, R.D., Fernandes de Almeida, J.C.O.: Compressive behavior of steel fibre reinforced concrete, Structural Concrete, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, 2005