

建設用コンクリート 3D プリンタに適用可能な 繊維補強セメント系複合材料の開発

DEVELOPMENT OF APPLICABLE FIBER-REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES TO 3D CONCRETE PRINTERS

古江 翔子
Shoko FURUE

The development of concrete 3D printers for construction, which are expected to contribute significantly to labor-saving and manpower-saving at building construction sites, has been actively carried out in recent years. However, due to its manufacturing process, it is not easy to employ reinforcement of steel bars as in typical RC structures. In this paper, I developed an applicable fiber-reinforced cementitious composite material for a concrete 3D printer. Also, evaluation indices for printability and buildability were investigated. As a result, a composition reinforced with 2 vol.% fiber was developed, and its fresh properties could be easily evaluated by the cone plunger test.

Keywords: 3D printing, fiber-reinforced cementitious composites, cone plunger test, cross sectional geometry

3D プリンティング, 繊維補強セメント系複合材料, コーンプランジャー試験, 断面形状

1. はじめに

本邦は少子高齢化と人口減少の厳しい局面にあり、特に建設分野においては労働者の高齢化が避けられない。また、気候変動による異常気象も常態化しつつあり、労働災害防止の観点からも建築施工の現場では省力化・省人化が強く求められている。加えて、COVID-19 パンデミックは建設業界への影響も大きく、建築施工のあり方自体の変革を余儀なくされている。これらの社会情勢を踏まえ、無人施工を指向した建設用コンクリート 3D プリンタ（以下、建設 3D プリンタ）の実現が強く望まれており、国内外において活発な研究が行われている¹⁾。しかしながら、広く検討が行われている積層方式の建設 3D プリンタでは、その造形プロセスから通常の RC 構造物のように補強鉄筋を導入することが容易でない。地震国である本邦では特に、RC 構造にできない点は耐震性の面から致命的であり、諸外国と比べ大きく後塵を拝する一因となっている。この欠点を回避するために、建設 3D プリンタによる積層物を埋設型枠として鉄筋を配置し、後からコンクリートを打ち込む方法²⁾などが提案されているが、鉄筋による形状の制約や、無人化・省力化への貢献が限定的になるなど建設 3D プリンタの強みを十分に活かすことができていない。また、繊維補強セメント系複合材料 (FRCC) を用いて構造性能を得る試み³⁾もあるが、繊維混入がフレッシュ性状を著しく変化させるため、特定の建設 3D プリンタと調合の組み合わせの成功例に留まっている。すなわち、一般化された材料設計が提案されるには至っていない。材料開発時に必要となるフレッシュ性状の印刷適性や硬化体の物性を確認する試験方法 (品質管理手法) の標準化・体系化が望まれる。これらの背景を踏まえ、本研究では積層可能な FRCC の開発を目指すと共に、印刷適性を評価する試験の妥当性について確認する。

2. 実験概要

本研究では、印刷適性評価試験として、多くの参考文献で採用されている①フロー試験、②自立性評価試験³⁾を用いて、積層可能な FRCC を選定した。その後、実機 3D プリンタで積層を行い、得られた試験体の力学特性を取得した。また、積層体の断面形状から積層性を評価した。その後、再度①フロー試験、②自立性評価試験を行い、追加で③コーンプランジャー試験⁴⁾、④凝結試験、⑤ハンドペーンせん断試験、⑥レオメーター測定を実施し、積層試験の試験結果と比較することで、印刷適性評価試験の妥当性も評価した。

2.1 使用材料

基準モルタルとして、積層実績のあるプレミックス材料 (P) を採用し、W/P = 14.75%を用いた⁵⁾。FRCC には、結合材 (B) として早強ポルトランドセメント (C) およびシリカフェーム (SF) を用いた。細骨材 (S) として珪砂 7 号を、また、繊維系鉱物であるワラストナイト (Wo) を細骨材の一部として用いた。試験に使用する材料はすべて 20 °C 環境下で前日から準備し、力学試験以外の試験は 20 °C・R.H.50% 環境下で行った。

2.2 調合

調合は、FRCC として十分な引張強度や靱性能を有することを念頭に、補強繊維量 2.0 vol.% を目標としたモルタルに設定した。その上で、圧送・積層が可能な調合が得られるように候補を選定した。この際には、後述するフレッシュ性状の試験項目の測定結果が、基準モルタルの結果に近いものを選定した。水結合材比 (W/B) は 30% で固定し、結合材のうち C 85%、SF 15% とした。Wo は S の 10% 置換として混和し、PE 繊維は、練り混ぜ体積に対して外割で添加した。また、セルローズナノファイバー (CNF) は、ブレンダーもしくはホモジナイザーを用いて分散した濃度 0.05% 溶

表-1 使用調合 (wt.%, PEのみ vol.%)

	C	SF	Wo	S	W	SP	PE	CNF
S60-F1.25	85	15	10	50	28	2	1.25	-
S40-F1.5	85	15	10	30	28	2	1.5	-
S55-F1.5	85	15	10	45	28	2	1.5	-
S30-F2.0	85	15	10	20	28	2	2.0	-
S40-F2.0	85	15	10	30	28	2	2.0	-
S55-F2.0	85	15	10	45	28	2	2.0	-
S50-F2.0C	85	15	10	40	28	2	2.0	0.005
S60-F2.0C	85	15	10	50	28	2	2.0	0.005

液を予め作製した。CNF が結合材に対して 0.005%となるように、溶液を練混ぜ水として用いた。用いた調合の一覧を表-1に示す。

2.3 試験概要

2.3.1 ①フロー試験

フロー値は、練り直後に JIS R 5201 に準じて測定した。調合スクリーニングの際には、モルタルミキサーを用いて 1 L を練り混ぜ、積層試験後に追加で実施する際には、遊星式羽根付きパン型強制練りミキサーを用いて 30 L を練り混ぜた後に測定した。

2.3.2 ②自立性評価試験

練混ぜ直後からの自立性を評価するため、フレッシュモルタルの圧縮試験を行った。図-1 に示すように、ガラス版の上に載せた型枠 (φ100 mm×H50 mm) を用いて試料を成形し、所定の時間静置した後、ねじ式手動荷重試験機を用いて荷重した。変位は荷重板の角の 4 点で測定し、その平均値を得た。調合スクリーニングの際には、モルタルミキサー (容量 2 L) を用いて 1 L を練り混ぜ、練上がり後 10 分間で試験を行った。積層試験後に追加で実施する際には、オムニミキサー (容量 5 L) を用いて 3.5 L を練り混ぜ、練上がり後 15, 30, 45, 60, 75, 90 分間静置後に試験を行った。荷重中の応力-ひずみ曲線を描くことによって、自立性を確かめた。

2.3.3 ③コーンプランジャー試験

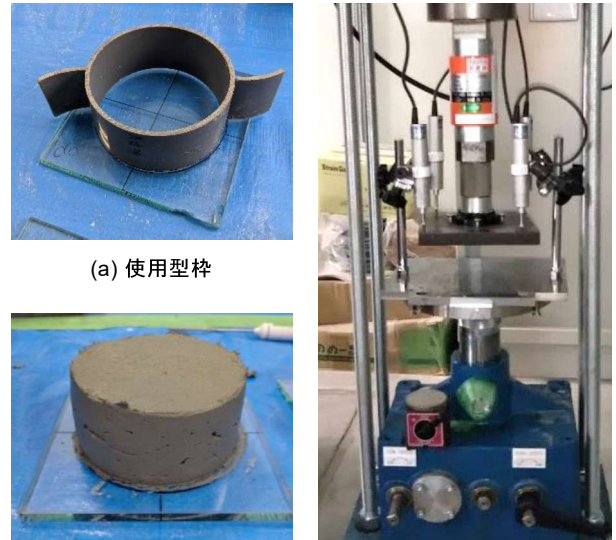
フレッシュモルタルの降伏応力を求めるため、コーンプランジャー試験を行った。図-2 に示すように、試料を型枠 (φ170 mm×H40 mm) に詰め、質量 893.2 g、先端角度 30°のコーンを自由落下によって貫入させた。図に示すように、先端角度 θ [°]、質量 m [kg] のコーンを試料に貫入させた際の貫入深さ h [m] から、式(1)によって降伏応力 τ_0 [Pa] が求められることが提案されている⁴⁾。なお、 g [m/s²] は重力加速度である。

$$\tau_0 = \frac{m \times g \times (\cos \theta)^2}{\pi h^2 \times \tan \theta} \quad (1)$$

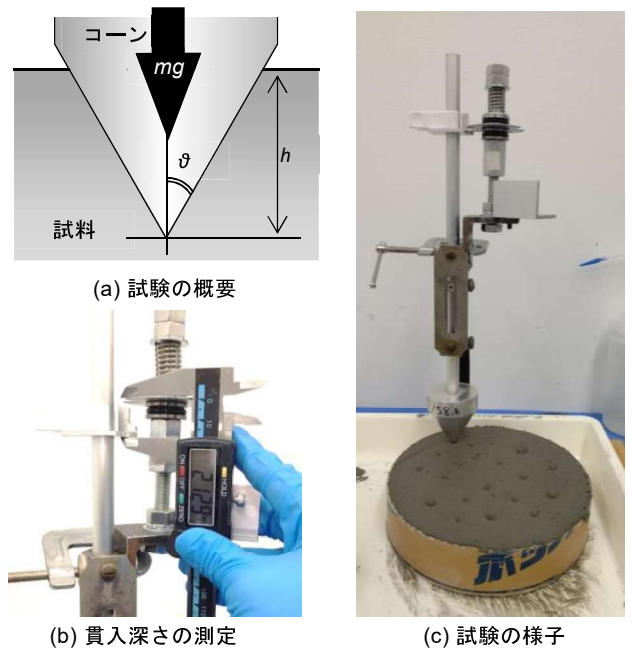
試験は、調合ごとに 2 回ずつ行い、練り後 10~60 分後まで 5 分ごとに行なった。貫入深さは試験機に取り付けた治具をガイドとしてノギスで測定した。試料はモルタルミキサーを用いて 1 L を練り混ぜ、ガラス板の上に設置した型枠に 2 層に分けて詰めた。1 層ごとに 60 回突き棒で突いた後に表面を均し、詰め終えた後に上面へガラス板を設置して上下を反転させた。したがって、コーンを貫入させる試験面は詰めた際の底面である。

2.3.4 積層試験

①フロー試験および②自立性評価試験の結果から選択した調合を



(a) 使用型枠 (b) 脱型後の試験体 (c) 荷重試験機
図-1 自立性評価試験装置



(a) 試験の概要 (b) 貫入深さの測定 (c) 試験の様子
図-2 コーンプランジャー試験装置

用いて積層試験を行った。積層体は、1 層の目標幅を 80 mm 程度として、長さ 700 mm の直線部分とその両端部に直径約 200 mm の円形が接するダンベル形状で、目標高さを 220 mm 程度として積層した。得られた積層体から、後述の力学試験に用いる試験体を切り出したほか、積層性の評価のため切断面の形状を取得した。断面形状の表面粗さを算出して積層性を示す指標として用いた。この時、上層・下層の高さ 50 mm 部分を除いた一般部を対象として行った。

2.3.5 力学試験

得られた調合の打込み試験体、および、積層体から切り出した試験体を用いて力学特性を確認した。圧縮強度は JIS A 1108、曲げ強度は JIS R 5201 を援用して測定結果を得た。圧縮試験では φ50 mm×H100 mm の円柱状、曲げ試験では D40 mm×H40 mm×L160 mm

の角柱状の試験体を用い、材齢7日で測定した。積層体は積層直後に大まかに切断した後、圧縮供試体はコアドリルにより採取・研磨して成形した。圧縮試験は、積層方向に対して垂直に載荷する方向 A（圧縮 A）と、積層方向に対して平行に載荷する方向 B（圧縮 B）に対して行った。曲げ試験はコンクリートカッターおよびグラインダーを用いて成形し、方向 A（曲げ A）と方向 B（曲げ B）に対して行った。載荷方向と積層方向の関係について、曲げ試験を例として図-3に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 ①フロー試験

図-4に各シリーズのフロー試験結果を示す。積層実績のある基準モルタルでは、0打で101 mm、15打で127 mmであった。この値を参考とすると、ここで用いた調査シリーズではいずれも0打で105 mm程度、15打で115~130 mmの範囲にあり、大きな差は見られない。すなわち、フロー試験のみの結果では積層に適した調査を選択することは困難であった。

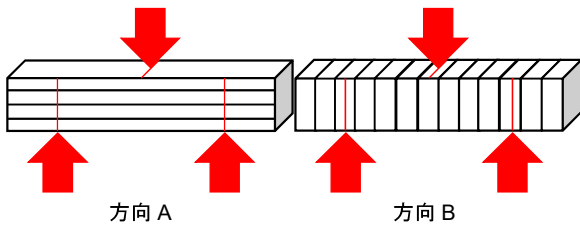


図-3 曲げ試験載荷方向

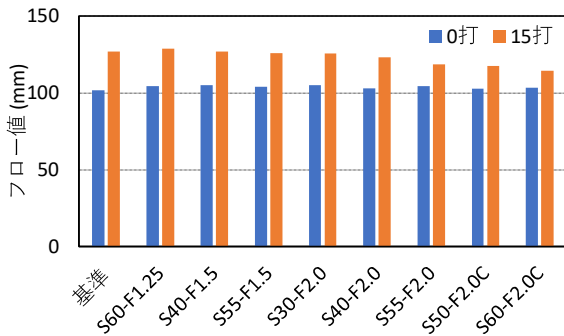


図-4 フロー試験結果

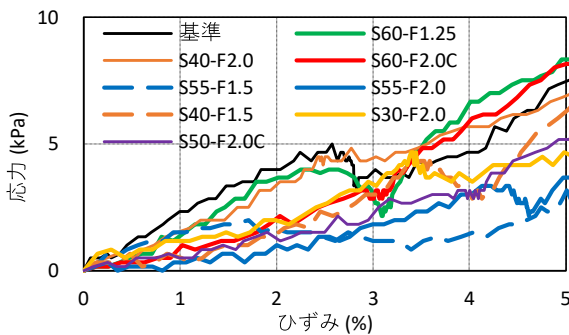


図-5 自立性評価試験時の応力とひずみの関係

3.2 ②自立性評価試験

図-5に得られた応力-ひずみ曲線を示す。建設3Dプリンタでの積層に用いるためには、印刷直後の自立性が要求される。5%変形時（変形量2.5 mm）の応力が積層実績のある基準モルタル（7.5 kPa）と同等とみなせる7 kPa以上の応力を示したS60-F1.25, S40-F2.0, S60-F2.0Cの3つのシリーズを以降の積層試験に用いる調査として選択した。積層速度や積層高さなどにより条件は異なるが、圧送が可能な範囲では自立性の大きさは積層時の形状維持などに有利と考えられる。

3.3 ③コーンプランジヤー試験

図-6にコーンプランジヤー試験の結果として、練上り後経過時間と式(1)によって算出した降伏応力の関係を示す。いずれの調査でも練上り後からの経過時間に伴って降伏応力が大きくなった。基準モルタル, S40-F2.0, S60-F1.25は同程度の降伏応力を示し、S60-F2.0Cのみ他の調査よりも大きい値を示した。図-7にコーンプランジヤー試験の結果と自立性評価試験の結果の関係を示す。この図から明らかなように、算出された降伏応力は自立性試験から得られる変形に対する抵抗性と相関が認められる。自立性評価試験は、国内外を問わず広く用いられる試験方法であるが、試験体の準備や載荷を踏まえると必ずしも簡便な方法ではない。特に、経時変化を確認するには時間ごとに試験体を準備する必要があり、同一サンプルで繰返し計測を行うことはできず、このことに起因する結果のばらつきも懸念される。コーンプランジヤー試験は一つのサンプルから経時変化を計測可能であり、試験自体もより簡便に実施が可能であった。すなわち、コーンプランジヤー試験はより簡便な自立性評価試験として採用できるものと考えられる。

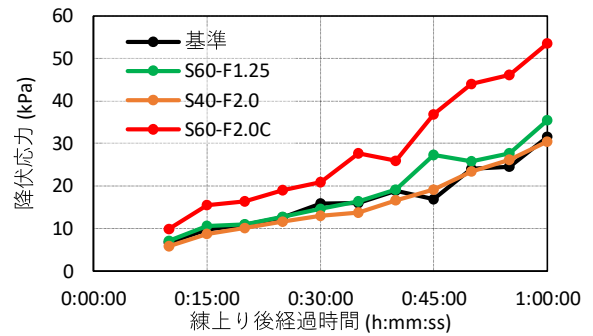


図-6 降伏応力の経時変化（コーンプランジヤー試験）

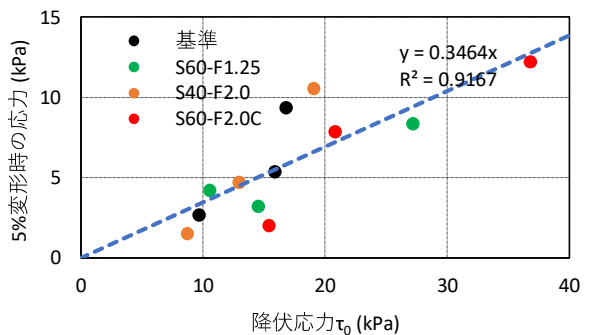


図-7 降伏応力と自立性の関係

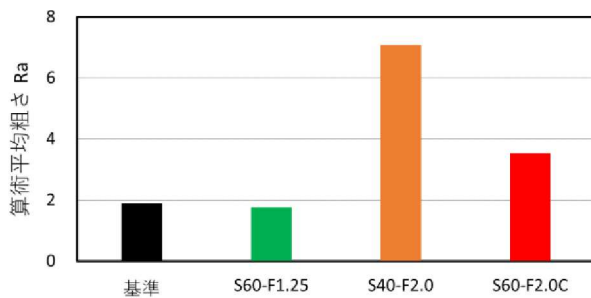


図-8 算術平均粗さ

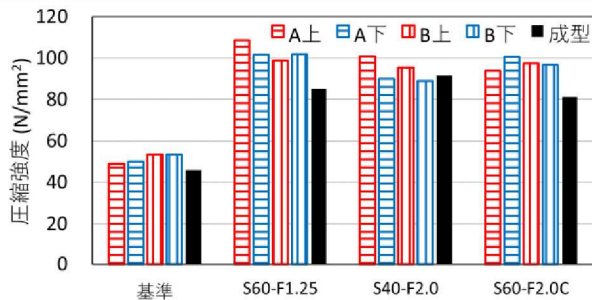


図-9 圧縮強度

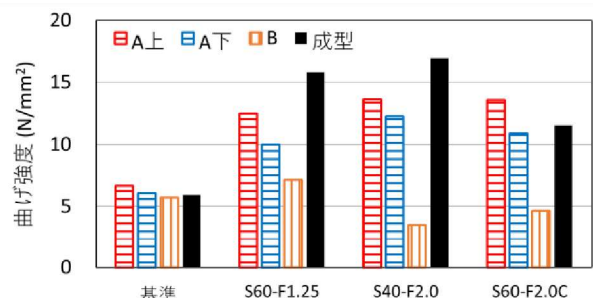


図-10 曲げ強度

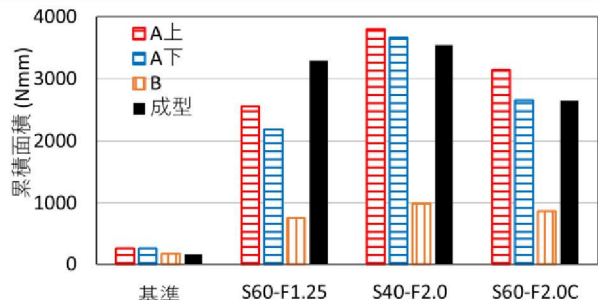


図-11 曲げ試験時の累積面積

3.4 積層試験

ここまでの検討を踏まえ、S60-F1.25、S40-F2.0、および、S60-F2.0Cの3水準の調合について建設3Dプリンタを用いた積層を行った。積層試験体の積層性について、断面形状を座標として取得し、算術平均粗さRaをJIS B 0601:2013に従って求め、評価した。図-8に算出されたRaを示す。S40-F2.0は、自立性評価試験では基準モルタルと同程度の値を示していたが、Raの値は相対的に大きく不整形な断面形状となった。これは、圧送後のフロー値が大きくなった(15打136mm→155mm)ことが原因と考えられる。圧送の前後で流動性が変化した理由は、今後さらに検討を行う必要がある。圧送の前後で流動性が変化しなかったS60-F1.25やS60-F2.0Cはおおむね良好な積層性が得られた。したがって、本研究で候補選定に採用した自立性評価試験は、流動性が圧送の前後で変化しない限りは妥当な評価方法であり、自立性評価試験と相関関係のあるコンプレッジャー試験は、さらに簡易的な評価方法として提案できる。

3.5 力学試験

図-9に圧縮試験、図-10~11に曲げ試験の結果を示す。圧縮試験結果について、FRCCシリーズはいずれも100MPa程度を示しており、基準モルタルよりも圧縮強度が大きい。積層方向の違いや成型供試体との強度差は限定的であった。曲げ試験結果については、FRCCにおけるB試験体の曲げ強度が特に小さい。これは、荷重方向に平行に層間が存在するため、層間に生じる欠陥の存在⁵⁾や、混入繊維が層を跨いで補強することが困難であったため生じたものと考えられる。一方で、A試験体の曲げ強度は基準モルタルから大きく改善されており、異方性が見られる。図-11は、曲げ試験時の変位と荷重の関係から、曲線下の面積を破壊エネルギーに準じる簡易的な靱性指標として示したものである。繊維混入量が2.0vol.%のシリーズの場合は、積層体において大きくなっていることが確認できる。これは、特にA試験体においてたわみ硬化が確認できた

ためである。B試験体の挙動は極めて脆性的であった。したがって、FRCC材料とするのみでなく、層間補強についても検討を行う必要があると示唆される。

これらの結果から、本検討の範囲では、積層性と力学挙動の双方を満たす調合として、S60-F2.0Cを得た。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 補強繊維を用いるFRCCにおいて、フロー試験および自立性評価試験により積層可能な調合の選定が可能であった。
- (2) コンプランジャー試験をより簡便な自立性評価試験として提案できる。
- (3) 積層試験により得られた積層体は、その断面形状を算術平均粗さにより評価することができる。
- (4) FRCC積層体は、曲げ挙動において基準モルタルから大きく改善が可能であった。特に、繊維混入量が2.0vol.%のシリーズの場合は、たわみ硬化が確認できた。
- (5) 曲げ挙動は、層間の欠陥に起因すると考えられる異方性が生じる。

参考文献

- 1) 石田哲也, 木ノ村幸士: 3Dプリンティング技術がもたらす建設産業へのインパクト, コンクリート工学, Vol. 58, No.1, pp. 45-51, 2020.
- 2) 清水建設プレスリリース https://www.shimz.co.jp/com_pany/about/news-release/2020/2020022.html (閲覧日: 2021年1月11日)
- 3) Arunothayan, A.R., et al.: Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction, Construction and Building Materials, Vol. 257, p. 119546, 2020.
- 4) Mazhoud, B., et al.: Underwater 3D printing of cement-based mortar. Construction and Building Materials, Vol. 214, pp. 458-467, 2019.
- 5) 宮田賢優ら: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 1888-1893, 2020.