

建設用 3D プリントに適用可能な FRCC の材料開発と評価方法の開発

DEVELOPMENT OF MATERIAL DESIGN AND EVALUATION METHOD OF FRCC APPLICABLE TO 3D CONCRETE PRINTING SYSTEMS

宮田 賢優
Yoshihiro MIYATA

3D concrete printing (3DCP) systems are attracting great attention as new construction technology and are under a highly competitive development situation in the worlds. However, due to its manufacturing process, it is not easy to employ reinforcement of steel bars as in typical RC structures. In this paper, we focused on the cone plunger test and used this test to determine the mix proportion. As a result, it was possible to propose several formulations of high-strength FRCC that could be applied. As a result of mechanical tests, laminates with compressive strength of 140 MPa and uniaxial tensile strength of 5 MPa were obtained.

Keywords: Cone plunger test, 3D concrete printing (3DCP), fiber-reinforced cementitious composites, Buildability
コーンプランジャータスタ、建設用 3D コンクリートプリンタ、繊維補強セメント系複合材料、積層性、

1. はじめに

近年、建設用コンクリート 3D プリンタ (以下、3DCP) の開発が、国内外問わず極めて活発に行われている¹⁾。建築施工現場の省力化・省人化などの形で極めて大きな変革をもたらす可能性がある技術として注目を集めている。しかしながら、3DCP では、通常の RC 構造物のように鉄筋補強を導入することは容易でない²⁾。この欠点を回避するために様々な補強方法が提案・開発されているが、たとえば積層体を埋設型枠として通常の鉄筋コンクリートと組み合わせる方法³⁾や、積層体を PC 棒鋼などで緊張して補強する方法⁴⁾など、現場作業を伴う手法では省人化・省力化という 3DCP 最大の長所とトレードオフの関係となる。これとは異なる手法として、繊維補強セメント系複合材料 (以下、FRCC) を使用して構造性能を得る試みも、既に多くの材料開発が試みられている^{5),6),7)}。著者らもこれまで、積層可能な FRCC 材料の開発を行うため、積層適性を評価する試験方法を検討してきた⁸⁾。FRCC を 3DCP に適用する場合には、フレッシュ性状が大きな課題であり、その簡便かつ適切な評価方法としてコーンプランジャータスタを提案し、圧送性と積層性を併せ持つ FRCC を開発した。しかし、十分な補強効果を得るためには、たとえば UFC 指針⁹⁾に示される超高強度・高靱性 FRCC (以下、UHP-FRCC) として定義される、圧縮強度 150 MPa 以上、引張強度 5 MPa といった卓越した力学性能の FRCC を用いることが望ましいと考えられる。

そこで本稿では、3DCP での圧送・積層によって積層体を得ることが可能な UHP-FRCC の開発を行うことを目的に検討を行い、フレッシュ性状と硬化体の力学特性について評価した。

2. 実験

2.1 実験概要

本研究では、3DCP に適用可能な高強度 FRCC の調査を得るために、フレッシュ性状についての積層適性評価試験と、得られた積層試験体についての力学試験を実施した。

積層適性評価試験として、①コーンプランジャータスタ⁹⁾、②フロー試験、③自立性評価試験⁷⁾を採用した。積層可能な FRCC の調査を選定するに当たり、測定パラメータの目安を得るため積層実績のある基準モルタル (プレミックス材料)¹⁰⁾の試験結果を用いて、これと近い調査を候補として選定した。その後、3DCP 実機で圧送試験を行い、圧送可能と判断された調査は続いて積層体を得た。

力学試験については、得られた試験体を用いて圧縮強度、引張強度、曲げ強度を取得した。

2.2 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% で用いた。FRCC 材料には、結合材 (B) として早強ポルトランドセメント (C) およびシリカフューム (SF) を用いた。細骨材 (S) として珪砂 6 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。混和剤には高強度用の高性能減水剤 (SP) を用い、繊維には長さ 6 mm のポリエチレン繊維 (PE) を用いた。ただし、異なる繊維長を組み合わせる場合は、12, 18 mm のものも使用した。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・50% RH を目標に制御した環境下で行った。

2.3 調合

本研究で用いた調合の一覧を表-1に示す。調合は、UHP-FRCCの定義と合致する圧縮強度 150 MPa、引張強度 5 MPa を目標として、これまでの著者らの検討⁹⁾をベースに、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、後述するコーンプランジャー試験から得られる降伏応力が、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 22% で固定した。また、結合材は C 82%, SF 18% の一定の比率とした。PE 繊維は、練混ぜ体積に対して外割で添加した。

2.4 各試験の概要

2.4.1 コーンプランジャー試験

フレッシュモルタルのせん断降伏応力は、圧送性と積層性に強い関係がある⁹⁾。このせん断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。写真-1に示すように、まだ固まらない試料をφ170 mm×H40 mmの型枠に詰め、質量 600 g、先端角度 30°のコーンを自由落下によって貫入させた。この際には、非接触レーザー変位計で貫入深さを計測した。写真-1(a)に示すように、先端角度θ (=30) [°]、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 τ₀ [Pa] が求められることが提案されている。なお、g [m/s²] は重力加速度である。

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

調合のスクリーニングの際には、練り上がり後 10、20 分に、2 台の試験装置を用いて各時間 3 回ずつ行った。圧送試験を行ったシリーズでは、練り上がり後 10~60 分後まで 10 分ごとに、同様の計測を行った。試料はモルタルミキサーを用いて練り混ぜ、写真-1(b)に示すように平らな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。

2.4.2 フロー試験

フロー値は、練上がり直後と練上がり後 10~60 分後まで 10 分ごとに、JIS R 5201 に準じて測定した。練混ぜには、オムニミキサーを用いた。

2.4.3 自立性評価試験

練り上がり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。写真-2に示すように、ガラス板の上に載せた型枠 (φ100×H50 mm) を用いて試料を成形し、所定の時間静置した後、万能試験機を用いて 0.1 mm/min の変位制御で載荷した。スクリーニングの結果に基づいて、圧送試験に供したシリーズでは、オムニミキサー (容量 5 L) を用いて 3.5 L を練り混ぜ、練り上がり後 10、20、30、40、50、60 分間静置後に試験を行った。

2.4.4 圧送・積層試験

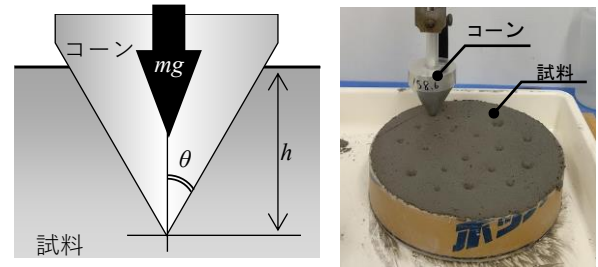
コーンプランジャー試験により選定した調合を用いて圧送・積層試験を行った。圧送試験は、各調合の圧送が可能であることを確認するため、3DCP 実機の合計長さ (7.2 m) と曲がり形状が同様のフレキシブルホースをポンプに接続し、モルタルを圧送した。圧送試験の際にポンプ内圧力が 4 MPa を越えた調合は安全性を考慮して圧送不可と判断し、積層試験は行わなかった。

表-1 使用配 (調) 合 (wt.%, PE のみ vol.%)

	C	SF	W ₀	S	W	SP	PE
A0-F2	82	18	-	35	18.5	1.7	2
A3-F2	82	18	3	35	18.5	1.7	2
A5-F2	82	18	5	35	18.5	1.7	2
A8-F2	82	18	8	35	18	2.2	2
A10-F2	82	18	10	35	18	2.2	2
A5-F2.2	82	18	5	35	18.3	1.9	2.2
A3-F2C	82	18	3	35	18.3	1.8	2 ^{**}
既往	85	15	50	10	28	2	2

※ 網掛けは選定された配 (調) 合

** 繊維長 6, 12, 18 mm をそれぞれ 1.2, 0.5, 0.3 vol.% で組合せ



(a) 試験の概要

(b) 試験の様子

写真-1 コーンプランジャー試験装置



(a) 使用型枠

(b) 脱型後の試験体

写真-2 自立性評価試験体

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、300 mm として 2 本積層した。得られた積層体から、力学試験に用いる試験体を後述する方法で切り出した。

2.4.5 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、ヤング率は JIS A 1149、一軸引張強度は UFC 指針⁸⁾、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、一軸引張試験では図-1に示す通り、最小断面寸法が 30 mm×30 mm のダンベル型の試験体を用い、曲げ試験では D40 mm×H40 mm×L160 mm の角柱状の試験体を用いた。20 °C・50%RH 環境下で気中養生し、圧縮試験と曲げ試験は材齢 7 日で測定、一軸引張試験体は、試験体の切り出しの都合上、材齢 28 日で測定した。積層体は積層直後に大まかに切断した後、圧縮試験体はコアドリルにより採取・研磨して φ50 mm×100 mm の円柱に成形した。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。一軸引張試験体はウォータージェットカッターを用いて成形し、積層方向に対して垂直に載荷する方向 A (引張 A) と積層方向に対して平行に載荷する方向 B (引張 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 40×40×160 mm に成形し、

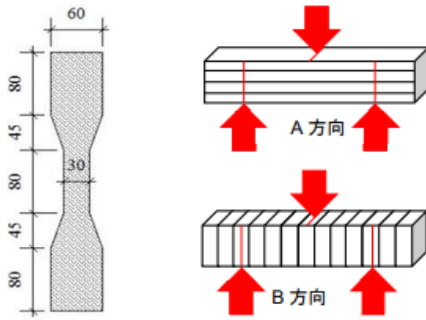


図-1 一軸引張試験体 図-2 試験载荷方向

表-2 選定結果

シリーズ	10分		20分	
	σ [kPa]	判定	σ [kPa]	判定
A0-F2	3.2	B	4.3	C
A3-F2	5.1	A	6.1	B
A5-F2	6.0	A	8.6	A
A8-F2	6.5	A	10.6	A
A10-F2	7.3	D	14.1	D
A5-F2.2	6.3	A	7.7	A
A3-F2C	5.8	A	9.0	A

※ 網掛けは選定された配(調)合

A : $6.9 > \sigma > 4.6$ (10分), $11.0 > \sigma > 7.3$ (20分)

B : $4.6 > \sigma > 3.2$ (10分), $7.3 > \sigma > 5.1$ (20分)

C : $3.2 > \sigma$ (10分), $5.1 > \sigma$ (20分)

D : $\sigma > 6.9$ (10分), $\sigma > 11.0$ (20分)

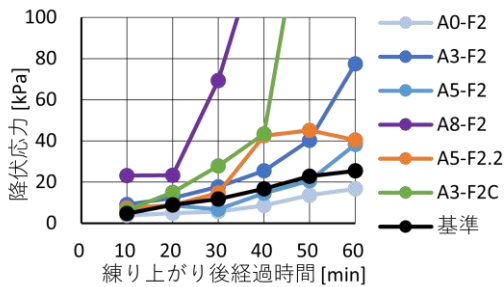


図-3 降伏応力の経時変化

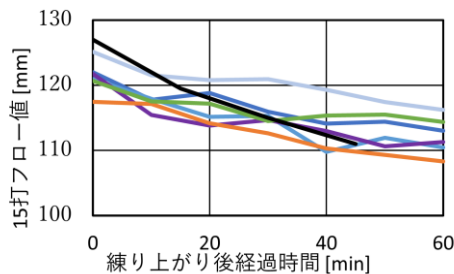


図-4 15打フロー値の経時変化

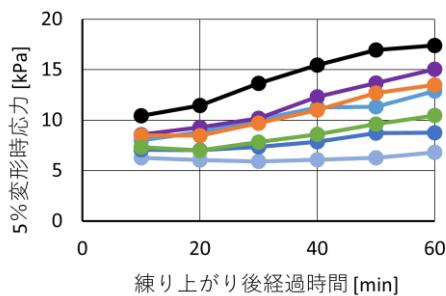


図-5 自立性経時変化

方向 A (曲げ A) と方向 B (曲げ B) に対して行った。試験方法と積層方法の関係について、曲げ試験を例として図-2 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 コーンブランジャー試験

各調合の積層可否を判断する規準として、コーンブランジャー試験で得られる降伏応力 σ にしきい値を設定した。このしきい値の設定には、積層実績のある基準モルタルで予め測定した降伏応力を用いた。具体的には、練上がり後 10 分と 20 分において、それぞれ 4.6 kPa 以上、7.3 kPa 以上の降伏応力をしきい値として設定した。それぞれの値から、その 1.5 倍未満の降伏応力 σ の範囲を積層可能と考えられる「A」と判定した。また、「B」、「C」、「D」の判定も設けた。このしきい値と、しきい値によって調合を選定した結果を表-3 に示す。A5-F2, A8-F2, A5-F2.2, A3-F2C が、10 分と 20 分において A 判定となり、積層可能な調合と判断された。ただし本研究では、設定したしきい値の妥当性を確認するために、「B」、「C」判定の調合も以降の積層試験を行った。ただし、「D」判定を示した A10-F2 は、ポンプに大きな負荷が掛かる懸念から積層試験を行わなかった。

図-3 にコーンブランジャー試験の結果として、練り上がり後経過時間と式(1)によって算出した降伏応力の関係を示す。圧送不可となった A8-F2 は基準調合よりも各時間における降伏応力が 4 倍以上大きくなっている。また、調合選定の際に降伏応力の値が小さく、判定が B・C になった A0-F2 は常に基準を下回っている。一方で A5-F2 は基準に近い挙動を示し、判定と対応している。

3.2 フロー試験

図-4 に 15 打フロー値の経時変化を示す。圧送不可となった A8-F2 と、コーンブランジャーの結果から積層に適していた A5-F2 が似た挙動を示している。すなわち、フロー試験のみの結果では積層に適した調合を選択することは困難であった。

3.3 自立性評価試験

図-6 に 5%変形時の応力の経時変化を示す。コーンブランジャー試験の結果から、フレッシュ性状が一番適していた A5-F2 と、積層体が一部または完全に得られなかった A8-F2 と A5-F2.2 が近い挙動を示しており、自立性評価試験のみでは調合の選定は困難であったと考えられる。

3.4 圧送・積層試験

図-6 に圧送・積層試験時のポンプ圧力の最大値をまとめた図を示す。なお、A0-F2 と基準の圧送試験時のポンプ圧力は計測不備があり取得できなかった。図-6 の結果、A8-F2 は圧送試験時に 4 MPa 近い圧力がかかったため、圧送不可と判断し、積層試験を行わなかった。また、A5-F2.2 は積層試験時にポンプ圧力が 4 MPa を越えた

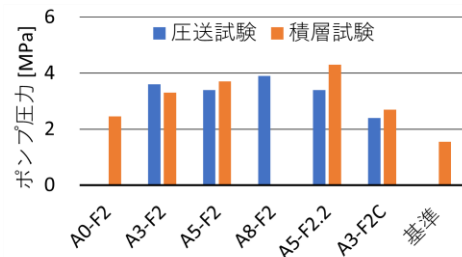


図-6 ポンプ圧力

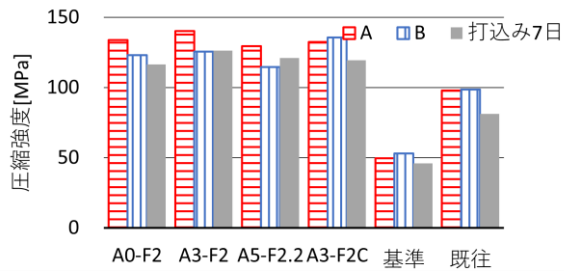


図-7 圧縮強度

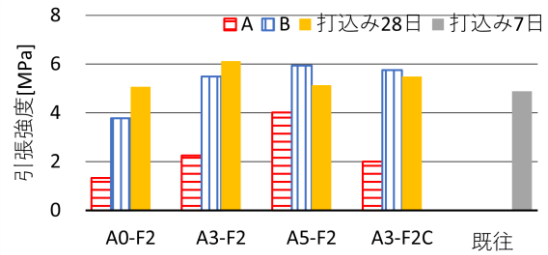
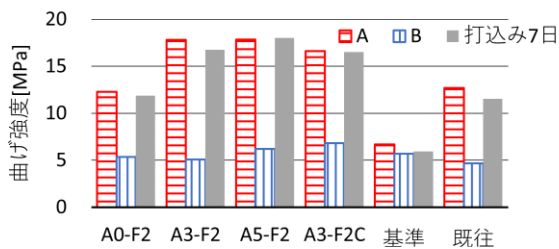


図-8 引張強度



ため、積層体を1本取得したのみで、積層を中止した。

3.5 力学試験

図-7に圧縮試験、図-8に引張試験、図-9、10に曲げ試験の結果を示す。また、既往の検討で得られた、積層可能なFRCC⁵⁾と力学性能を比較する。表-3に調査を示す。ただし、既往で使用したSとWoは平均粒子径などがやや異なる。また、結合材に対して0.005%分のセルロースナノファイバー(CNF)を使用している。圧縮試験結果について、FRCCシリーズはいずれも目標とする150MPa以上は満たさなかったが、140MPa前後を示しており、既往の研究で得られた積層可能なFRCCよりも約40MPa強度が向上した。引張試験結果について、引張Bと打込み試験体ではほとんど差が見られず、積層の有無による違いは見られなかった。一方で、引張Aは引張強度が極端に小さくなり、異方性が確認できた。また、本研究の全てのシリーズで、打込みの引張強度が5MPaを越えた。曲げ試験についても、A0-F2以外のシリーズの曲げ強度が既往の曲げ強度より向上していることが図-10から分かる。一方で、曲げBについては基準調合も含めてすべてのシリーズで同程度の曲げ強度を示しており、層間が力学的な弱点となったことが示唆される。そのため、層間を貫くような補強が必須であると考えられる。図-11に曲げAの応力-変位曲線を示す。既往と比較すると全てのシリーズで靱性が向上していることが確認できる。更に、Woを含むシリーズではより高い靱性を示している。これらの結果から、A3-PE2とA5-PE2、A3-PE2Cについては、3DCPに適用可能であり、かつ、UHP-FRCCに近い力学性能を有する調合として得ることができた。また、圧送性、自立性と力学挙動の全てを勘案すると、A5-PE2がここでの評価指標を総合的に満たす調合であることが確認できた。

4. まとめ

本研究の試験範囲内で得られた結論を以下に示す。

- (1) 3DCPに適用可能な高強度FRCC調合を選定するにあたり、フロー試験や自立性評価試験のみでは困難である一方で、コーンランジャー試験での試験結果から選定を行うことが可能

であった。

- (2) 積層体の得られた高強度FRCCの一部(A3-PE2, A5-PE2, A3-PE2C)では、圧縮強度140MPa程度、引張強度5MPa以上と概ねUHP-FRCCに並ぶ力学特性が得られた。
- (3) 積層体として得られた高強度FRCCでは、強い異方性が確認できた。この異方性は層間の欠陥に起因すると示唆される。
- (4) 圧送性、自立性と力学挙動の全てを勘案すると、A5-PE2がここでの評価指標を総合的に満たす調合であると確認できた。

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, pp.45-51 2020.
- 2) Pacheco Torgal, F., Wu, Z., Memari, A. M. & Duarte, J. P. State of the Art Review of Reinforcement Strategies and Technologies for 3D Printing of Concrete. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 360 Vol. 15, pp.360 2022.
- 3) 山本伸也, 小倉大季, 阿部寛之 & 菊地竜. 建設用3Dプリンティング技術の開発とその実用化. *コンクリート工学* Vol. 59, pp.655-660 2021.
- 4) 鈴木三馨, 山本悠人, 木ノ村幸士 & 畑明仁. 歩道橋のトポロジー最適化設計と3Dプリンティング技術を用いた製作および構造性能実証. *コンクリート工学年次論文集* Vol. 42, pp.1291-1296 2020.
- 5) 宮田賢優, 古江翔子, 宮澤友基 & 西脇智哉. 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配(調)合と評価指標の検討. *コンクリート工学年次論文集* Vol. 43, pp.1397-1402 2021.
- 6) Zhu, B. et al. Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction. *Mater. Des.* Vol. 181, 2019.
- 7) Arunothayan, A. R., Nematollahi, B., Ranade, R., Bong, S. H. & Sanjayan, J. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Constr. Build. Mater.* Vol. 257, pp.119546 2020.
- 8) 土木学会. 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案). vol. *コンクリートライブラ* 2004.
- 9) Lootens, D., Jousset, P., Martinie, L., Roussel, N. & Flatt, R. J. Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *Cem. Concr. Res.* Vol. 39, pp.401-408 2009.
- 10) Nishiwaki, T., Miyata, Y., Furue, S., Fukatsu, S. & Kajita, H. Reinforcing Interlayers of Three-Dimensional-Printed Mortar Using Metal Fiber Insertion. *Mater. J. Vol.* 118, pp.331-340 2021.