

論文 3D プリンティングに適した短繊維補強モルタルの配合および押出性に関する実験的検討

前堀 伸平*1・黒澤 真一*1・小川 洋二*2・張 文博*3

要旨：著者らは、3D プリンティングに適用できるセメント系材料の開発を進めており、柱・壁構造体への適用が可能となるような新しい短繊維補強モルタル材料について、材料面と施工面から検討を行った。その結果、短繊維の形状および混入量を調整してモルタルの流動性を確保することで、要求される性能（押出時の流動保持性および必要な圧縮強度、曲げ強度）を満たす配合を選定できた。また、分離低減剤の使用と微粉末の調整により、3D プリンティングにおいて安定した押出性を継続的に実現できた。押出に伴う短繊維の分離や偏在の現象は見られず、良好な繊維分散性を継続できた。

キーワード：3D プリンティング、短繊維、圧縮強度、曲げ強度、押出性、繊維分散性

1. はじめに

建設業において生産性向上が求められる中、材料押出方式の3D プリンティングによる建設施工の事例が報告されている。材料押出方式の3D プリンティングに用いるモルタル材料は4つの要求性能、すなわち(a) 定常的な押出に必要な流動保持性、(b) 良好なポンプ圧送性、(c) ノズル押出後の自立安定性、(d) 積層後の速硬性を兼ね備える必要がある。これまで著者らは、上記の性能をいづれも簡易的な手法で評価できる可能性を示すとともに、これに基づいて3D プリンティングに適したセメント系の材料を開発してきた^{1),2)}。

本稿では、3D プリンティングによるプレキャスト部材の積層造形を念頭に置いて、柱・壁構造体への適用が可能となるような、短繊維補強モルタル材料の配合と性能について、材料面と施工面から検討を行った。

2. 全体概要

2.1 使用材料

使用した粉体材料を表-1に示す。結合材(P)には、表-2に示すとおり Al_2O_3 や SO_3 の成分比率が通常のポルトランドセメントよりも高い、初期の反応性を高めた速硬性を有するセメントを用いた。細骨材(S)は、砕砂および微粉末を併用して使用した。砕砂の最大粒径は2mm、粗粒率は2.86である。微粉末は、比表面積 $8160\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $45\mu\text{m}$ 残分4.0%のものを使用した。混和材料には、高性能減水剤、消泡剤、凝結遅延剤および分離低減剤を用いた。実際に使用する際は、上記すべての材料を予め混合してプレミックス粉体とした。

表-3に使用した合成短繊維(以下、「短繊維」と表記)を示す。建設分野での実用性および埋設型枠用途での使

用実績等を考慮して、いずれも市販のビニロン繊維を使用した。なお、既往の研究にて開発した建設用3D プリンティングシステム(以下、「3DP システム」と表記)³⁾のノズル内径が25mmであることより、繊維長さはその半分程度とした。

2.2 練混ぜおよび試験方法

3章の配合検討では、材料の練混ぜおよびフレッシュ試験は 20°C 、70% RHの恒温恒湿室にて行った。練混ぜにはJIS R 5201に規定されるホバートミキサを用い、プレミックス粉体および繊維を低速15秒空練りし、注水後に低速2分練り混ぜ、かき落としの後、低速で更に2分

表-1 使用粉体材料

材料	種類	記号	密度 (g/cm^3)	概要
結合材	速硬性セメント	P	3.08	比表面積 $3,970\text{cm}^2/\text{g}$
	砕砂	S1	2.71	最大粒径2mm, F.M.=2.86
細骨材	微粉末	S2	2.71	比表面積 $8,160\text{cm}^2/\text{g}$ $45\mu\text{m}$ ふるい残分4.0%
混和剤	分離低減剤	V	1.32	水溶性粉末
混和剤	高性能減水剤	SP	-	ポリカルボン酸系粉末
	消泡剤	De	-	非イオン系粉末
	凝結遅延剤	Re	-	オキシカルボン酸系粉末

表-2 結合材の主な化学成分

ig.loss (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2Oeq (%)	Cl ⁻ (ppm)
1.9	17.2	9.8	2.6	59.4	1.0	6.9	0.47	152

表-3 使用合成短繊維

材料	種類	記号	密度 (g/cm^3)	概要
合成短繊維	ビニロン	F1	1.30	呼び径0.04mm, 呼び長さ12mm
		F2	1.30	呼び径0.1mm, 呼び長さ12mm
		F3	1.30	呼び径0.3mm, 呼び長さ15mm

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 修(工) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 博(工) (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 博(工) (正会員)

練り混ぜた。

試験方法の概要を以下に示す。フロー試験は JIS R 5201 に準拠して行い、フローコーンを垂直方向に取り去った直後に測定したフロー値を 0 打フロー、15 秒間に 15 回の落下運動を与えた後に測定したフロー値を 15 打フローとした。フロー試験を練混ぜ直後以外で行う際は、測定直前にホバートミキサで低速 20 秒の練返しを行い、再攪拌した試料を試験に供した。

圧縮強度試験には $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用いて、JIS A 1108 に準拠して実施した。曲げ強度試験には $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体を用いて JIS A 1106 に準拠して、それぞれ $n=3$ で実施した。各供試体の作り方は通常のコンクリートと同様に、JIS A 1132 に準拠した型枠への打込みとした。養生条件は、材齢 1 日まで 20°C 環境下での封かん養生、脱型後は材齢 4 日まで $20^\circ\text{C}99\%\text{RH}$ の湿潤箱内での湿潤養生とし、その後は材齢まで $20^\circ\text{C}70\%\text{RH}$ 環境での気中養生とした。

2.3 検討の手順

本稿で実施した検討手順を図-1 に示す。3 章では 3D プリンティングに適したフレッシュ性状および構造体への適用が可能な硬化体強度をとともに満足するような材料面での配合検討を行い、適切な短繊維を選定した。4 章では 3DP システムを用いて施工面での懸案事項について評価・検証を行った。具体的には、押出試験を実施して押出各段階での繊維分散性について評価を行うとともに、押出状況を経過観察し、押出中の課題に応じて配合の修正を行った。最後に、得られた配合を用いた 3D プリンティングを実施し、積層性を検証した。

3. 短繊維補強モルタルの配合検討

3.1 検討の前提となる各種パラメータの設定

本稿では、ベースとなるモルタル配合に繊維を体積比で外割混入する。繊維の混入でモルタルの流動性は大きく低下することが想定されたため、高性能減水剤はメーカー推奨の最大量 ($P \times 0.6\%$)、また凝結遅延剤は一定の流動保持性を確保する観点から過去の実績 ($P \times 0.9\%$) 以上の量で、それぞれ固定とした。また、分離低減剤は添加しないものとした。

過去の検討¹⁾より、3DP システムによる押出積層が可能であるモルタルのフレッシュ性状は、0 打フローおよび 15 打フローの範囲によって概ね選定することができる。本章では、0 打フロー $115 \pm 15 \text{mm}$ 、15 打フロー $170 \pm 20 \text{mm}$ を目標範囲に設定した。一方硬化体強度としては、柱・壁構造体へ適用することを想定して、高い圧縮強度および曲げ強度を発現することが求められる。ここでは配合を早期に判断するため材齢 7 日で評価することとし、圧縮強度 50MPa 以上、曲げ強度 10MPa 以上を目

標に設定した。

なおモルタルの自立安定性は、過去の検討にてゴム硬度あるいはベーンせん断強度によって確認している²⁾が、本稿の配合はいずれも必要十分な値が得られたため、検討項目からは割愛した。

3.2 細径短繊維を混入した配合検討

まずは、表-3 に示す汎用的な細径短繊維 F1 を用いた短繊維補強モルタルの配合検討を行った。ここでは、過去に得られた配合²⁾をベースとして、表-4 に示すとおり $W/P=34\%$ 、 $S1/P=60\%$ および 120% 、 $S2/P=0$ とした配合について、それぞれ F1 の混入率を 0.5、1.0、1.5vol% としてフレッシュ性状を確認した。練混ぜ直後の 15 打フローの結果を図-2 に示す。いずれの配合でも、F1 の混入率が増えるにつれ 15 打フローは低下した。 $S1/P 120\%$ の配合では、F1 の混入率 1.0vol% 以上で 15 打フローは 150mm を下回り、流動性を確保できなかったのに対し、 $S1/P=60\%$ とした配合では、F1 の混入率 1.5vol% まで 15 打フローは 150mm 以上となり、流動性を確保できた。そこで、 $S1/P=60\%$ として、F1 の混入率を 1.0、1.5vol% としたそれぞれの配合について、フロー値が目標範囲内に収まるよう $S2/P$ を調整した上で、供試体 (TP) を採取

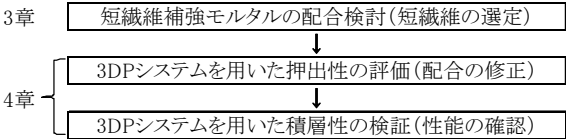


図-1 検討の手順

表-4 細径短繊維の検討配合				
実施内容	W/P (%)	S1/P (%)	S2/P (%)	F1混入率 (vol%)
フロー	34	60,120	0	0.5, 1.0, 1.5
強度	34	60	5	1.0
			0	1.5
			0	-

※全配合とも $V/P=0$ 、 $SP/P=0.6\%$ 、 $De/P=0.2\%$ 、 $Re/P=0.9\%$

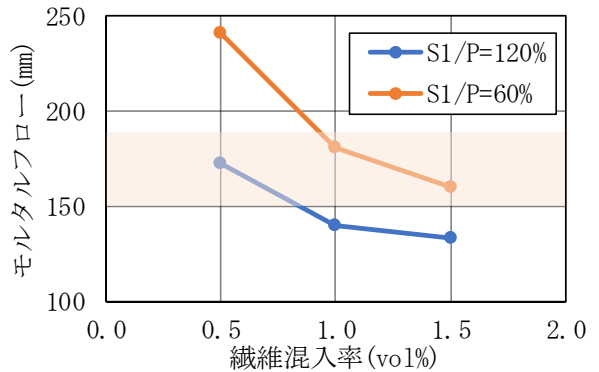


図-2 繊維混入率 (F1) と 15 打フローの関係

して強度試験を行った。あわせて、繊維を混入しないベース配合についても、同様の試験を行った。

材齢 7 日での各強度試験結果について、繊維混入率との関係を図-3 に示す。圧縮強度については、繊維のないベース配合では 60.6MPa と目標強度（50MPa）を十分に満足しているのに対し、F1 を混入した配合では、ベース配合より強度が低下しており、F1 の混入率 1.5vol% とした配合では目標強度を下回った。一方、曲げ強度は F1 の混入率とともに増加しているが、目標強度（10MPa）には及ばない結果となった。

以上の結果より、曲げ強度の向上には更なる F1 混入が必要と考えられるが、それに伴い圧縮強度は低下する懸念がある。またフレッシュ性状においても、フロー値がさらに低下して練り混ぜ自体が困難になることが予想された。以上のことから、F1 をこれ以上混入するのは困難であると判断した。

3.3 太径短繊維を混入した配合検討

前節の結果より、混入する短繊維の形状を見直すこととした。具体的には、表-3 に示すとおり呼び長さはほぼ同等で呼び径がより太い短繊維である F2 および F3 を用いて、短繊維補強モルタルの配合検討を行った。検討した配合を表-5 に示す。

F2 を用いた配合では、W/P=34%、S1/P=60%、S2/P=15% として、それぞれ F2 の混入率を 2.0、2.5、3.0vol% としてフレッシュ性状を確認した。練混ぜ直後のフロー値の結果を図-4 に示す。F2 の混入率 2.5vol% まで 15 打フローは 150mm 以上となり、流動性を確保することができた一方、F2 の混入率 3.0vol% では流動性を確保することが困難であったので、F2 の混入率 2.5vol% にて TP を採取して強度試験を行ったところ、圧縮強度 57.3MPa、曲げ強度 8.0MPa と F1 よりも高い結果が得られた。

F3 を用いた配合では、S1/P=60%、S2/P=5% とした配合について、F3 の混入率を 3.0vol% に固定して、W/P を 34、31、28% と変化させて、フレッシュ性状を確認した。練混ぜ直後のフロー値の結果を図-5 に示す。P/W が大きくなるほどフローは低下する傾向が認められたものの、いずれも 15 打フローは 150mm 以上となり、流動性を確保できることがわかった。そこで、配合ごとに S2/P を調整してフロー値を目標範囲内に調整した上で、TP を採取して強度試験を行った。材齢 7 日での各強度試験結果について、P/W との関係を図-6 に示す。曲げ強度はいずれも大幅に向上し、目標強度と同等以上の結果が得られた。また圧縮強度も目標強度を満足しており、P/W が大きいほど増加する傾向が認められた。以上の結果より、4 章の検討では、F3 を混入した配合にて実施することとした。

3.4 繊維混入率と曲げ強度の関係

本章の W/P=34% での曲げ強度試験結果について、繊維

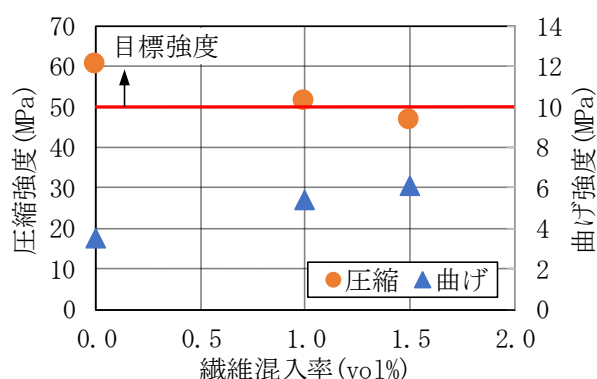


図-3 繊維混入率（F1）と強度の関係

表-5 太径短繊維の検討配合

実施内容	W/P (%)	S1/P (%)	S2/P (%)	F2/F3混入率 (vol%)
フロー	34	60	15	F2:2.0,2.5,3.0
	34,31,28		5	F3:3.0
強度	34	60	15	F2:2.5
フロー経時、強度	34		35	F3:3.0
	31		15	
	28		5	

※全配合ともV/P=0, SP/P=0.6%, De/P=0.2%, Re/P=1.2%

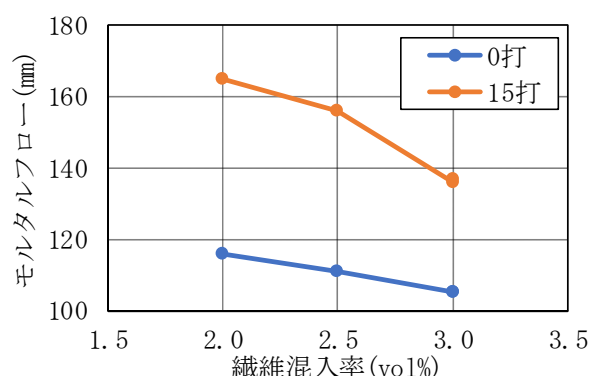


図-4 繊維混入率（F2）とモルタルフローの関係

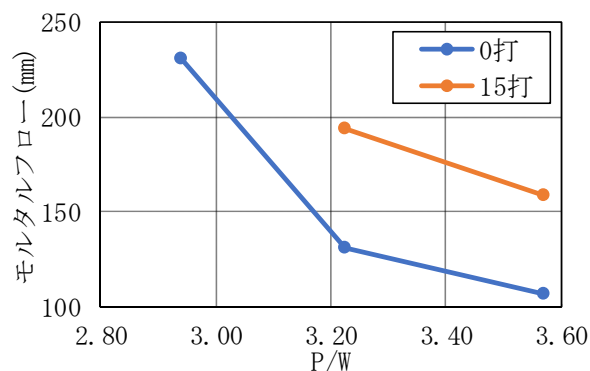


図-5 P/W とモルタルフローの関係（F3：3.0vol%）

混入率との関係を図-7 に示す。短繊維（呼び径）の違いにかかわらず、繊維混入率が増加するほど曲げ強度も増加する傾向が確認された。

繊維混入率が同等の場合、細径短繊維の方が短繊維の本数は多くなり、より均質な引張補強効果が期待できる。しかし、本検討の範囲では細径短繊維の混入に伴う粘性増加の影響により流動性が著しく低下し、繊維混入率を高めることが困難であった。一方、太径短繊維を用いると流動性の低下が抑えられ、より繊維混入率を高めることが可能となったため、曲げ強度に及ぼす引張補強効果が高まったものと考えられる。今後は、これら短繊維の特徴を踏まえ、複数の短繊維を組合せることで流動性と繊維混入率をバランスよくコントロールする⁴⁾など、さらに引張補強効果を高めるような検討を進めたい。

4. 3D プリンティングに関する評価試験

4.1 試験概要

短繊維補強モルタルの積層性を評価するため、3DP システムを用いて試験を実施した。3DP システムの構成を図-8 に示す。図-8 に示す 3DP システムは、練り混ぜたモルタルをホッパーに投入し、汎用のポンプによりホースを経由してノズル部分に圧送し、ノズル部分に内蔵されているスクリーンを回すことによってノズル先端から押し出すものである。

この 3DP システムを用いた積層では、径の小さいノズル先端部で閉塞するリスクが高いと考えられる。そこで、まず図-8 に示すノズル部分のみを用いたノズル押出試験により、目視観察によるノズル押出状況や経過の観察を行い、ノズル押出性を確認した。次に、ノズル押出試験で選定した配合を対象に、ポンプ圧送からノズル押出までを通して行う試験（以下、「3DP 押出試験」と表記）によって、目視観察によるノズル押出状況やポンプ圧送の経過観察を実施し、システム全体の押出性を確認した。また、最後に積層性評価試験を行った。

ノズル押出試験や 3DP 押出試験では、おおよそ注水から 30 分後より試験を開始した。また試験中に繊維の混入量が変化し、硬化体の強度に影響を与える可能性があると考え、練混ぜ直後、押出前半と押出後半の 3 段階に分けて、それぞれ 10～15 分程度かけて試料を 20L 程度採取し、繊維洗出し試験により繊維量を確認するとともに、曲げ強度試験体を作製した。繊維洗出し試験では、各段階で 1kg の試料を 3 回ずつ採取し、それぞれに目開き 0.15mm のふるいの中で水洗いしてペースト分を落とし、残った粗粒分と繊維の混合物を 105℃で 24 時間乾燥した後、繊維のみを取り出した。曲げ強度試験体の作り方は、通常のコンクリートと同様に、JIS A 1132 に準拠した鋼製型枠への打込みとした。

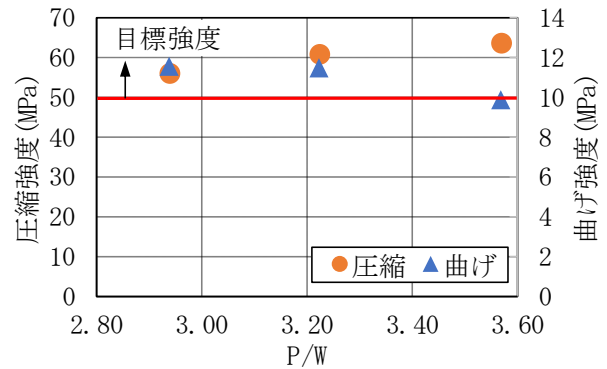


図-6 P/W と強度の関係 (F3 : 3.0vol%)

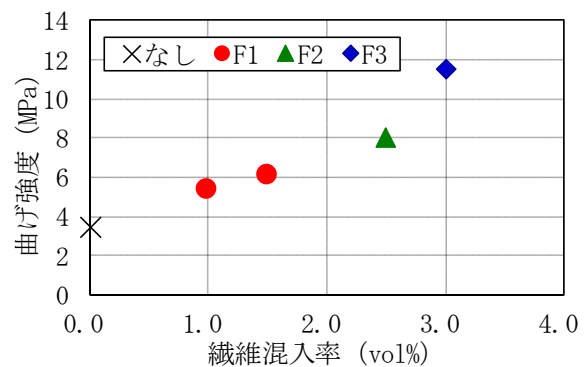


図-7 繊維混入率と曲げ強度の関係 (W/P=34%)

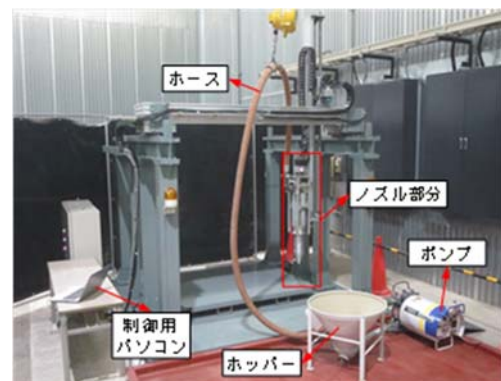


図-8 3DP システムの構成

なお、3 章で選定した短繊維 F3 を使用した配合は、W/P が 28～34%の範囲内において、いずれも流動性と強度を確保できたが、ノズル押出試験では W/P の中間値である 31%（表-6 に示す配合 Extr.1）を用いて実施した。

4.2 ノズル押出試験による評価

ノズル押出試験では、試験中における試料の押出状況と繊維の分散性について検討した。練混ぜ直後にフロー試験を行い、フロー値が目標範囲内であること確認してから、ノズルにモルタルを充填して押出試験を開始した。

まず、配合 Extr.1 を用いて試験を行ったところ、当初は押出が順調であり、図-9 (a) に示すように異常なく

表－6 押出試験に用いた配合およびその押出状況

配合	試験内容	S1/P (%)	S2/P (%)	SP/P (%)	F3 混入率 (vol %)	W/P (%)	V/P (%)	押出状況
Extr.1	ノズル押出	60	15	0.60	3.0	31	0	ノズル数回閉塞
Extr.2	ノズル押出	60	15	0.20	2.0	30	0	順調
Extr.3	ノズル/3DP 押出	60	15	0.20	2.5	31	0	順調
Extr.4	3DP 押出	60	25	0.20	2.5	31	2	順調

形状を保持したが、数分後に図－9 (b) のように閉塞を生じた。そこで、閉塞箇所を確認したところ、ノズル先端部に多くの繊維が溜まっていたことがわかった。これは、3.0vol%との繊維混入率が多いこと、また試験中の目視観察より粘性が十分に確保されず、材料分離が助長されていることに起因していると判断した。そこで、SP量を1/3に低減し、繊維量をそれぞれ2.0 vol %と2.5 vol %に変更した、表－6 に示す配合 Extr.2 と Extr.3 を作成して、再度ノズル押出試験を実施した結果、両配合ともノズル押出試験での閉塞は解消された。

また、繊維混入率が2.0～3.0vol%の場合、すなわち配合 Extr.1～3 について、試験の3段階において試料を採取し、洗い出した繊維量の結果を図－10 に示す。洗い出した繊維量の理論値に対する割合は、練混ぜ直後で88～100%、ノズル押出後で94～104%であり、ノズル押出に伴う繊維量の大きな変化は認められなかった。いずれも、土木工事標準仕様書⁵⁾に規定されている設計繊維混入量の80%以上を満足しており、ノズル押出によらず繊維分散性が良好であると判断できる。

同様に各段階で採取した試験体による材齢7日の曲げ強度試験結果を図－11 に示す。繊維混入率が2.5 vol %以上で、曲げ強度が目標強度の10MPaを達成できた。ここで、配合 Extr.3 では押出後半のみ曲げ強度が増加しているが、洗い出した繊維量はほぼ同等であることより、繊維の配向性が影響した可能性も考えられる。その検討については、今後の課題としたい。なお、繊維混入率3.0vol%の配合 Extr.1 では、図－9 (b) のように閉塞がみられたことから、以下の3DP 押出試験では配合 Extr.3 を用いることとした。

4.3 3DP 押出試験による評価

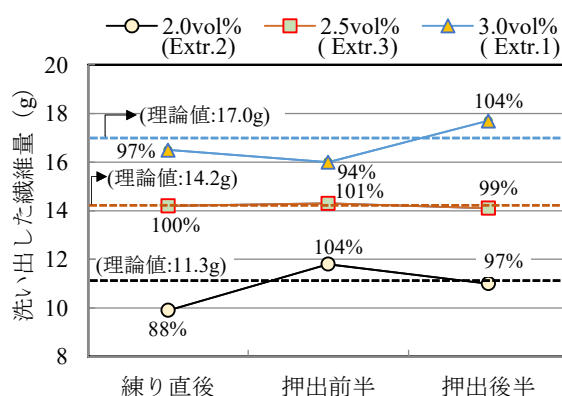
繊維混入率2.5vol%の配合 Extr.3 にて3DP 押出試験を行ったところ、試験の進行に伴い材料分離が顕著となった。本配合のフロー値の経時変化を図－12 に示す。60分まで時間経過とともにフロー値は増え続けており、特に15打フローが190mm程度と高い値を示した。

そこで、微粉末S2を増やし、さらに分離低減剤Vを使用することにより粘性を高めた表－6 に示す配合 Extr.4 を作成し、再度3DP 押出試験を実施したところ、ポンプ圧送やノズル押出に伴う材料分離や閉塞もなく、継続してスムーズに押し出せることを確認した。配合

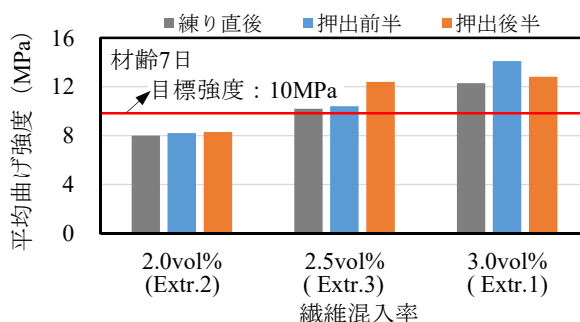


(a) 正常押出状態 (b) ノズルが閉塞する寸前

図－9 正常押出状態と閉塞する直前のフィラメント



図－10 ノズル押出各段階における繊維量の変化



図－11 ノズル押出各段階の曲げ強度

Extr.4 のフロー値を図－12 にあわせて示すが、経時30分以降の0打フローが安定しており、15打フローも180mm以下に収まっていることが確認できた。

ノズル押出試験と同様、各段階において繊維洗出しと曲げ強度試験体の試料を採取してそれぞれ試験を行った。繊維洗出し試験は、練混ぜ直後、押出前半と後半の3回

に分けて行ったが、曲げ強度試験体は、練混ぜ直後と押出試験後の2段階で作製した。

洗い出した繊維量を理論値に対する割合で整理した結果を図-13に示す。多少の増減はあるものの、いずれも繊維分散性が良好であることが確認できる。

3DP 押出前後における両配合の曲げ強度の測定結果を図-14に示す。いずれも練混ぜ直後と3DP 押出後における曲げ強度がほぼ同程度であることから、3DP 押出でも材料の均質性を保持できている。また、モルタルの曲げ強度は材齢7日で目標強度の10MPaを超えており、分離低減剤Vの使用は曲げ強度にほとんど影響しないことが確認できた。なお、配合 Extr.4 の材齢7日の圧縮強度は54.4MPaであり、目標強度を満足することを別途確認している。

最後に、配合 Extr.4 の積層性を検証するため、3DP システムを用いた外寸が500mm×500mmで幅一列の四角中空体での連続積層を試みた。その結果、途中一切閉塞することではなく、一度に50cm以上の積層が可能であることを確認した。

以上より、配合 Extr.4 は高い曲げ強度を有し、かつ押出性・積層性に支障がない、3D プリンティングに適した短繊維補強モルタルであることが示された。

5. まとめ

本検討において得られた知見を以下に示す。

- (1) 汎用的な細径短繊維 F1 を用いた場合、混入量の増加に伴う流動性の低下が著しく、3D プリンティングに必要な流動性を確保するためには、混入できる繊維量に限界があり、結果的に曲げ強度の大幅な向上が困難であった。
- (2) 太径短繊維 F3 を用いると混入量に対して流動性の低下が抑えられるため、3D プリンティングに必要な流動性を確保しながら、より多くの繊維を混入することが可能となり、曲げ強度の向上により効果的であった。
- (3) 3DP システム全体での押出中において、短繊維 F3 を使用したモルタルの繊維分散性は良好であった。
- (4) F3 混入率が2.5vol%、W/P が31%、S2を増やしVを使用して粘性を確保した配合 Extr.4 は、高い曲げ強度を有し、かつ押出性と積層性に支障がないことが示された。これにより、3D プリンティングによる曲げ部材などへの適用が期待できる。

参考文献

- 1) 村田哲，木ノ村幸士，前堀伸平，宮本昌周：3D プリンティングに適したセメント系材料の簡易な品質確認方法に関する実験的検討，コンクリート工学年

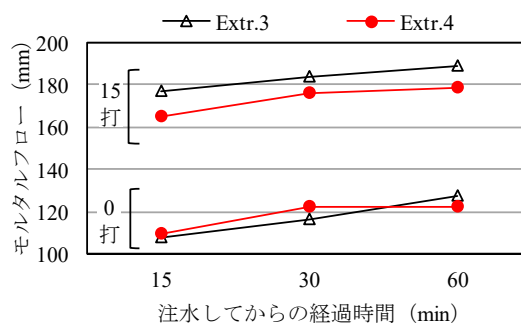


図-12 3DP 押出試験に用いた配合のフレッシュ性状

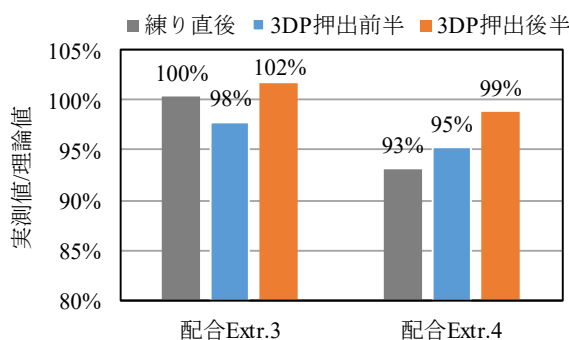


図-13 3DP 押出各段階における繊維量の変化

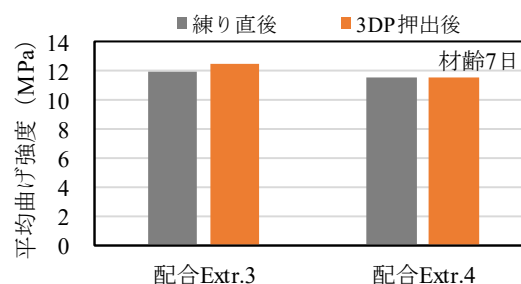


図-14 3DP 押出各段階の曲げ強度

次論文集，Vol.41，No.1，pp.2027-2032，2019。

- 2) 黒澤真一，前堀伸平，小川洋二，村田哲：3D プリンティングに適したセメント系材料の処方に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1846-1851，2020。
- 3) 村田哲，木ノ村幸士，小尾博俊，山本悠人：3D プリント技術を応用した新たなコンクリート施工法の開発と展望，大成建設技術センター報，第51号，pp.23-1~23-6，2018。
- 4) 中村成春，VAN MIER Jan G. M.，梶田佳寛，佐藤幸恵：PVA 繊維を使用したハイブリッド・ファイバー・コンクリートの流動性に関する研究，セメント・コンクリート，No.709，pp.52-59，2006。
- 5) (社)日本鉄道施設協会：土木工事標準仕様書 東日本旅客鉄道株式会社編，付P8-20，2005.4