

# 論文 セルロースナノファイバーを添加した吹付けモルタルの特性

木村 一葵\*1・根本 浩史\*2・馬場 勇介\*3・伊達 重之\*3

**要旨：**本稿ではセルロースナノファイバーが有するチキソトロピー性に注目し、モルタルに添加した際の各種性状および吹付けに及ぼす影響の確認を行った。その結果、セルロースナノファイバーを添加することで静置時の塑性粘度が増加、フローの保持性が向上、空気量の増加が確認された。また、硬化特性においてはセルロースナノファイバーの添加による影響が少ないことが確認された。吹付け性状においてはセルロースナノファイバーの添加によってはね返り（下垂）率の低減が確認された。これは、セルロースナノファイバー添加による降伏値の回復速度が向上したことによるものと考えられる。

**キーワード：**セルロースナノファイバー、チキソトロピー性、吹付け工法、はね返り、下垂

## 1. はじめに

吹付け工法とは圧縮した空気により、施工面に対して直接コンクリートあるいはモルタルを吹付ける施工方法<sup>1)</sup>であり、通常の打ち込みと比較し、型枠が不要な上、複雑な地形においても容易に施工が可能である。そのため、NATM工法における支保工や法面補強工事などに広く用いられている。また、吹付け工法の応用技術の一つとして、材料噴射型3Dプリント技術が注目されており、様々な研究開発が行われている。

吹付け工法における施工課題の一つとして、はね返りの発生が挙げられる。はね返りは、コンクリートやモルタルを吹付ける際に発生する跳ね返りや付着せずに落下することであり、はね返りした材料は廃棄されるため、施工費用や環境負荷の増大の要因となる。なお、本稿では、はね返りは大きく分け2種類とし、吹付けた際に跳ね返るものと、付着後に施工面に留まることが出来ずに下垂するものと定義する。

一般的に流動性の高い材料は、はね返りの抑制や圧送性の向上が期待されるが、下垂を引き起こすといった課題も挙げられる。一方で粘性が高い材料は下垂の抑制が期待されるが、跳ね返り増大や、圧送性低下が懸念される。そのため、吹付け材料には、圧送時の流動性を確保し、吹付け後は吹付け面に付着するような性質、すなわちチキソトロピー性（以下、チキソ性）が求められる。チキソ性とは力が加わった際に塑性粘度が下がり、力が取り除かれることにより時間経過とともに塑性粘度が回復する性質のことである。

そこで、本研究ではセルロースナノファイバー（以下、CNF）に注目した。CNFとは環境省が利活用を推進している植物由来のナノ素材である。植物に多く含まれているセルロースを化学的方法などで繊維径が

3~100nmまで細かく碎断したものである。また、CNFは様々な機能を有しており、木材を原料として作られるが、竹や藁、農業残渣などからも生み出すことが可能である<sup>2)</sup>。そのため、CNFはカーボンニュートラルかつSDGsに対応が期待される材料である。また、様々な分野での活用が期待されており、CNFのチキソ性を利用したスプレー式の塗料やボールペンのインクなどが開発されている<sup>3)</sup>。そこで、CNFを吹付け材料に添加することによって、チキソ性を吹付け材料に付与し、はね返り低減や圧送性向上につながる可能性があると考えた。そこで、本研究ではモルタルにCNFを添加した際のフレッシュ性状と硬化性状および吹付け時に及ぼす影響の確認を目的に試験及び実験を行った。

## 2. CNFの添加が各種性状に及ぼす影響

現状、CNFは建設分野での活用事例や研究が少なく、特にコンクリートやモルタルにCNFを用いた研究はあまり行われていない。そこで、CNFを添加した際のモルタルのフレッシュ性状、レオロジー特性および硬化性状を確認した。硬化性状としてはモルタルの強度と耐久性に及ぼす影響を評価するため、強度と水分浸透抵抗性について確認をした。

### 2.1 試験概要

#### (1) フレッシュ性状

CNFを添加したモルタルのフレッシュ性状の確認を目的としてモルタルフロー試験および空気量試験を行った。

モルタルフロー試験はJIS R 5201、空気量試験はJIS A 1128に準拠した。また、モルタルフロー試験では、練上がりから5分後と30分ごとの経時におけるフロー値を計測した。

\*1 東海大学大学院 工学研究科建築土木工学専攻 (学生会員)

\*2 清水建設(株) 博(工) (正会員)

\*3 東海大学 建築都市学部 土木工学科 博(工) (正会員)

(2) レオロジー特性

羽根沈入式粘度測定試験を行い、CNFを添加した際の静置時と加振時の塑性粘度および降伏値を評価した。また、静置時と加振時の塑性粘度の変化量からチキン性の評価を行った。

図-1に試験器の概要を示す。羽根沈入式粘度測定試験はモルタル中に羽根を沈入させるのにかかった時間から塑性粘度および降伏値を評価する試験である。試験では、図-1のようにモルタルを詰めた円筒容器をセメント強さ試験に用いられるテーブルパイプレータに固定したうえで、3枚の羽根を有する器具をモルタル試料に自重で沈入する時間を測定する<sup>4)</sup>。そして、沈入時に載せる錘の質量を段階的に変え、沈入時間を測定することで図-2のようにせん断ひずみ速度  $v$  ( $=L/T$ ) とせん断応力  $\tau$  ( $=W/A$ ) の近似線を求める。そして、測定結果の近似線におけるせん断ひずみ速度が0の時(x切片)のせん断応力の値を降伏値とし、塑性粘度は傾きの逆数をみかけの塑性粘度  $\eta'$  とした。既往の研究において、塑性粘度が既知の流体を用いた実験により求めたみかけの塑性粘度と塑性粘度の校正線<sup>4)</sup>からモルタルの塑性粘度  $\eta$  を算出した。

本試験では、静置時と加振時の2水準で計測を行い、CNF添加率における降伏値および塑性粘度の変化量を評価した。一般的に本試験は試料を静置状態にし測定するが、実施工を想定したケースについては、供試体に振動を付与できるシステムを採用し、加振時におけるレオロジー特性を測定した。

(3) 圧縮強度

圧縮強度試験はJIS A 1108 準拠し行った。なお、供試体はJSCE-F 561-2018を参考に吹付け充填にてモルタル供試体を作製した。

(4) 水分浸透抵抗性

水分浸透速度係数はJSCE-G 582-2018に準拠して試験を行い、以下の式(1)を用いて水分浸透速度係数を算出した。なお、供試体は圧縮強度試験と同様の方法で作製した。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \sqrt{\bar{t}}) \cdot (L_i - \bar{L})}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \sqrt{\bar{t}})^2} \tag{1}$$

A: 水分浸透速度係数(mm/ $\sqrt{hr}$ )

n: データ数

$\sqrt{t_i}$ : i番目のデータの浸漬時間の平方根( $\sqrt{hr}$ )

$\sqrt{\bar{t}}$ : 浸せき時間の平方根の平均値( $\sqrt{hr}$ )

$L_i$ : i番目のデータの浸透深さ(mm)

$\bar{L}$ : 浸透深さの平均値(mm)

2. 2 試験配合および使用材料

表-1に本試験で用いた試験配合を示す。配合Iはフレッシュ性状の試験、配合IIは羽根沈入式粘度測定試験、配合IIIは圧縮強度試験及び水分浸透速度係数試験で用いた配合としている。CNFの添加率はセメント量に対して0%、0.025%、0.050%の3水準とした。配合I、IIは一般的な吹付けコンクリートの配合に対して粗骨材を除いた配合とした。配合Iはフローに及ぼすCNF添加量の影響を確認するために各配合の単位

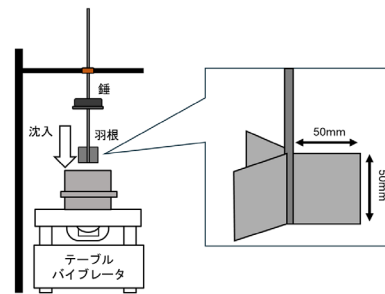


図-1 羽根沈入式粘度測定試験器<sup>4)</sup>

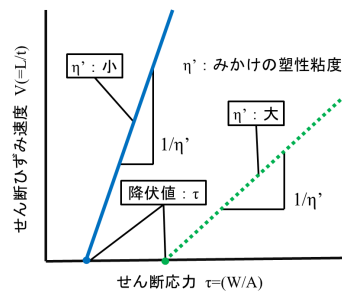


図-2 せん断ひずみ速度とせん断応力の関係

表-1 試験配合

配合	W/C (%)	S/C	CNF 添加率 (C×%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				目標 15 打フロー値 (mm)
				W	C	S	CNF	
I	45.0	2.5	0	250	589	1488	0	200±5 (無添加時)
			0.025				0.14	
			0.050				0.28	
II	46.0	2.5	0	265	585	1464	0	180±10
	47.5		0.025	276	580	1451	0.14	
	48.5		0.050	285	577	1443	0.27	
III	50.0	0.75	0	456	912	684	0	240±10
			0.025				0.21	
			0.050				0.43	

表-2 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	S	川砂	2.69
		8号珪砂	2.54
混和材	CNF	CNF	1.50
練混ぜ水	W	上水道水	1.00

量を統一した。羽根沈入式粘度測定試験では配合Ⅰを用いた際に羽根が CNF を添加した水準において流動性が不足して沈入しなかったため、目標フロー値を 180±10mm に統一し、配合Ⅱとした。配合Ⅲは吹付け充填によって供試体を作製する都合上、吹付け機が詰まらずに吹付けが行えるよう、目標フロー値を 240±10mm, S/C を 0.75 とした。

表-2 に試験配合の材料を示す。CNF は練混ぜ水を置換し、3wt%のスラリー状のものを使用した。

### 2. 3 試験結果および考察

#### (1) CNF の添加がフレッシュ性状に及ぼす影響

図-3 に CNF 添加率が 15 打フローの経時変化に及ぼす影響を示す。

図-3 より、CNF 添加率の増加に伴い、初期のフロー値が低下することが確認された。これは、練混ぜ水に CNF を添加することによって、CNF が水素結合を介してゆるやかなネットワーク構造を形成し、水自体を増粘させる<sup>9)</sup>ことによってモルタルの粘度が増加したことによるものと考えられる。

また、CNF を添加することによって、15 打フロー値の経時変化が緩やかになることが確認された。これは、CNF を添加することで、セメント粒子間に CNF のネットワーク構造が形成されることによって、セメント粒子の凝集抑制につながったことによるものと推察される。

図-4 に CNF 添加率が空気量に及ぼす影響を示す。図-4 より、CNF 添加率の増加に伴い、空気量の増加が確認された。これは、CNF の添加によってモルタルの粘性が増加し、練混ぜ過程で気泡を巻き込みやすく、空気が抜けにくくなったためであると考えられる。

図-5 に CNF 添加率ごとのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係、図-6 に CNF 添加率が塑性粘度に及ぼす影響を示す。

図-5 と図-6 より、CNF 添加率増加に伴い、静置時では、塑性粘度が増加することが確認された。これは、モルタルフロー試験結果の傾向と同様に、練混ぜ水に CNF を添加したことで CNF の有する増粘効果が付与され、モルタルの粘度が増加したと考えられる。一方

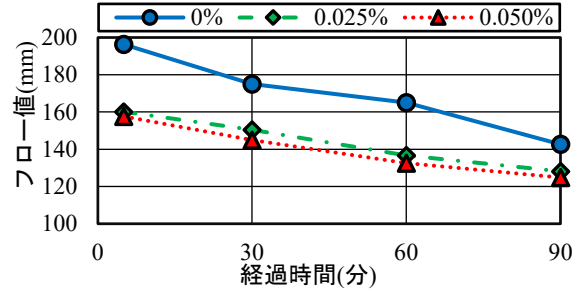


図-3 CNF 添加率が 15 打フローの経時変化に及ぼす影響

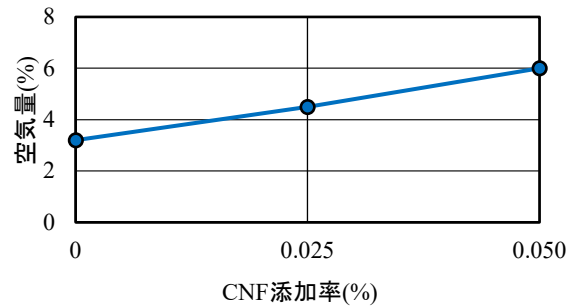


図-4 CNF の添加が空気量に及ぼす影響

で、加振時の塑性粘度は CNF の添加に関わらず低下し、同程度であることが確認された。これは、CNF の添加によらず、モルタルがチキソ性を有しているため、加振によって塑性粘度が低下したことによるものと考えられる。しかし、CNF 添加によって静置時から加振時への塑性粘度の低下量は無添加と比較し、大きいことが確認された。本試験ではフロー値を統一し W/C を変更させた水準で行っており、CNF 添加率が大きくなることで単位水量が増加しているが、CNF 添加率 0.050% においては単位水量の増加による影響よりも CNF 添加の影響が大きく、静置時の塑性粘度が大きくなったと考えられる。

図-7 に CNF 添加率が降伏値に及ぼす影響を示す。図-5 と図-7 より、静置時、加振時ともに CNF 添加率による降伏値の大きな変化は見られなかった。また、CNF 添加率に関わらず、加振時に降伏値が低下したことが確認された。これは、モルタルがチキソ性を有していることから、加振によって降伏値が低下したのと考えられる。

#### (2) CNF の添加が硬化性状に及ぼす影響

図-8 に CNF 添加率が圧縮強度に及ぼす影響を示す。図-8 より、圧縮強度は CNF 添加率に関わらず同程度であることが確認された。このことから、CNF の添加は強度にほとんど影響を与えないと考えられる。

図-9 と図-10 に CNF 添加率と水分浸透深さの関係および水分浸透速度係数の関係を示す。図-9 より、い

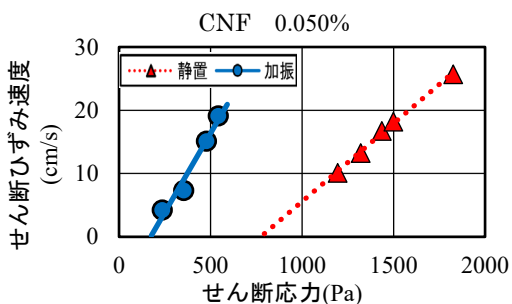
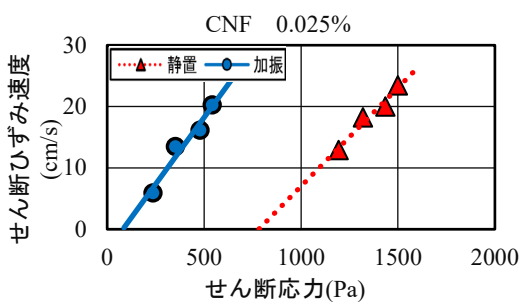
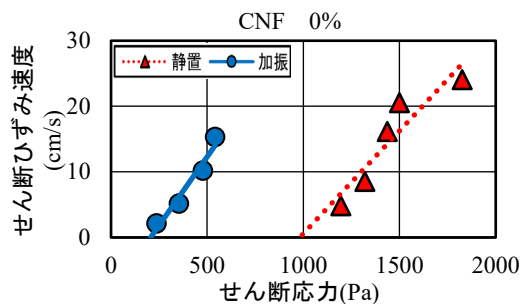


図-5 CNF 添加率ごとのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

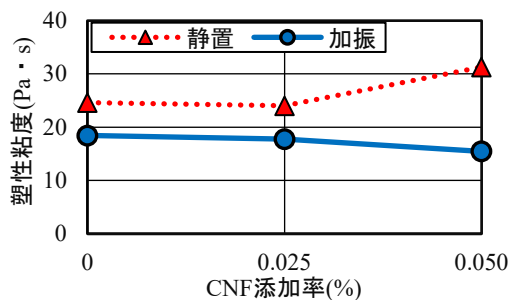


図-6 CNF 添加率が塑性粘度に及ぼす影響

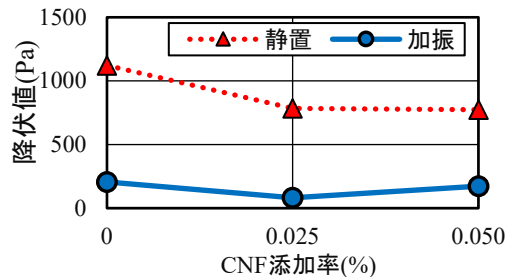


図-7 CNF 添加率が降伏値に及ぼす影響

ずれの浸漬時間においても CNF の添加率に関わらず同程度であることが確認された。また、図-10 より、全ての水準において水分浸透速度係数は同程度であつ

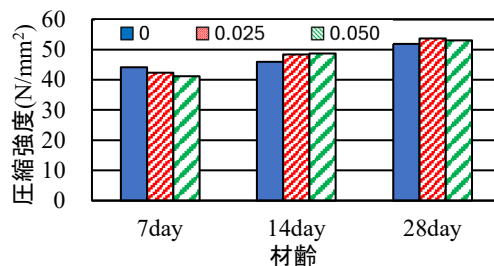


図-8 CNF 添加率が圧縮強度に及ぼす影響

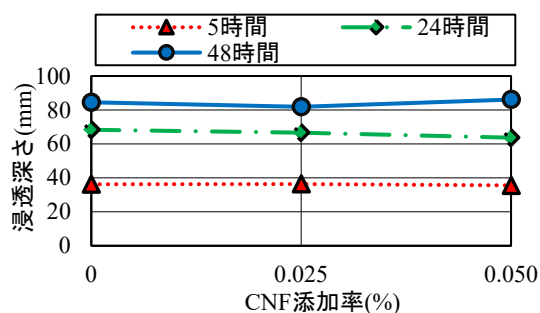


図-9 CNF 添加率と水分浸透深さの関係

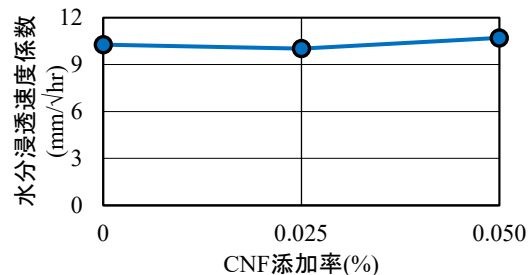


図-10 CNF 添加率と水分浸透速度係数の関係

た。このことから、CNF の添加による水分浸透抵抗性の低下はほとんどないと考えられる。

以上の結果より、CNF を添加によるモルタルの硬化性状への影響は小さいことが確認された。

### 3. CNF の添加が吹付けに及ぼす影響

2. 3 より CNF を添加することでモルタルを増粘させ、静置時の塑性粘度が大きくなることが確認された。また、モルタルがチキソ性を有していることで CNF の添加率に関わらず塑性粘度と降伏値が加振によって低下することも確認された。そこで、CNF を添加したモルタルを吹付けた際に CNF が吐出量とはね返り率に及ぼす影響の確認のため、吹付け評価実験を行った。

#### 3. 1 吹付け評価実験の実験概要

図-11 に吹付け評価実験の概略図を示す。吹付け評価実験はモルタルを吹付けることによって吹付けた際の吐出量、はね返り（下垂）率を定量化し、評価する実験である。

図-11 のように吹付け機の位置を固定し、実験を行

った。実験後、吹付け板の下端から幅 300mm×奥行 350mm の範囲に落下したモルタルの量をはね返り（下垂）量とし計測した。

コンプレッサの空気圧は 0.5MPa、吹付け角度は 90 度とし、2000g のモルタルを吹付け機により吹付けた。吹付け時間は 60 秒とした。吹付け終了後、吹付け前と吹付け後の吹付け機の質量の差から吐出量を、吐出量に対して、はね返った量の割合をはね返り（下垂）率とし CNF の添加による吹付けに及ぼす影響の評価を行った。

### 3.2 実験配合

表-3 に本実験で用いたモルタル配合を示す。使用材料は 2.2 と同様のものを用いた。目標フロー値は吹付けが可能な流動性を確保しつつ、吹付けた際に下垂しにくいフロー値として、215±10mm に統一した。

### 3.3 結果および考察

表-4 に本試験における実測のフロー値を、図-12 に CNF 添加率が吐出量に及ぼす影響を示す。図-12 より CNF 添加率増加に伴い、吐出量が若干増加することが確認された。これは、加振時における羽根沈入式粘度測定試験の結果より、CNF の添加によって静置時の降伏値が低下し流動性が向上したこと、モルタルの塑性粘度が低下し圧送時の抵抗が減少したためであると考えられる。

図-13 に CNF 添加率ははね返り（下垂）率に及ぼす影響、写真-1 に CNF 添加率によるモルタルの下垂の比較を示す。図-13 よりはね返り率は CNF 添加率の増加に伴い、はね返り（下垂）率の低減が確認された。また、写真-1 より単位水量の増加による影響よりも CNF 添加率増加による増粘効果の影響が大きくなったことから、下垂するモルタルの量が低減したことが確認された。

一般的に降伏値が増大するとモルタルの流動を抑制できることから下垂が低減できると考えられる<sup>6)</sup>。しかしながら、2.3 の羽根沈入式粘度測定試験において、CNF の添加による静置時の降伏値の向上は確認されていないにもかかわらず、図-13 と写真-1 で示されるように CNF の添加により下垂が抑制されるという結果は、モルタルを圧送し吹付け、吹付け板に付着した後の降伏値の回復速度が向上したことによるものであ

ることが示唆される。つまり、付着後の降伏値の回復はモルタルが再びこぼれることによるものであることから、無添加の場合は降伏値の回復には分単位の時間を要し、付着後の動きが止まらず下垂しやすいのに対して、CNF が添加されると降伏値の回復速度は秒単位で速いことから付着後の動きが瞬時に抑制され、下垂低減に寄与しているものと推察される。

図-14 に CNF の添加が経過時間の降伏値の変化に及ぼす影響の予想図を示す。モルタルはセメント粒子間の凝集と初期の水和反応によって、降伏値および塑性粘度が向上する。そのモルタルに力を加えることで、粒子間の結合が切れ、静置することで再び凝集し、粘度が回復する。一方で CNF は水素結合とイオン性の官能基による反発作用によってモルタル内に三次元的に孤立分散したネットワーク構造になっていると考えられる。そこに力を加えることで、ネットワーク構造を容易に破壊でき、静置することで、すぐに再構築され速やかに降伏値および粘度が回復する<sup>8)</sup>。両者とも降伏値および粘度は回復するが、セメント粒子の凝集による回復は分単位の変化であり、CNF による回復は秒単位の変化であると推察される。このことから、図-14 に示すように、CNF をモルタルに添加することで降伏値の回復速度が向上し、吹付け後数秒間で降伏値が回復したことから、本実験において下垂低減につながったと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では CNF を添加したモルタルの各種性状および吹付けに及ぼす影響の定量的な評価を目的に試験および実験を行った。以下に本研究で得た知見を示す。

- (1) セルロースナノファイバーの添加率増加に伴い初期フローの減少と空気量の増加が確認された。また、フローの経時変化が緩やかになることが確認

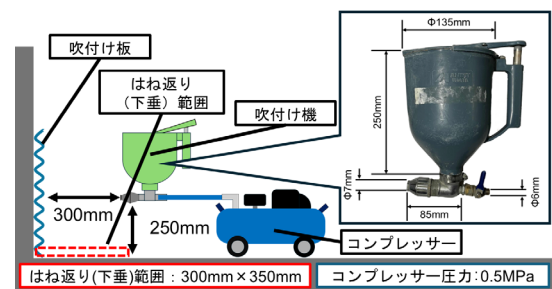


図-11 吹付け評価実験の概略図

表-3 モルタル配合

配合	W/C (%)	S/C	CNF 添加率 (C×%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				目標 15 打フロー値 (mm)
				W	C	S	CNF	
IV	54.0	0.75	0	475	880	660	0	215±10
	55.0		0.025	479	872	654	0.20	
	56.5		0.05	486	861	645	0.41	

表-4 実測のフロー値

CNF 添加率(%)	0 打(mm)	15 打(mm)
0	114	218
0.025	115	218
0.050	115	217

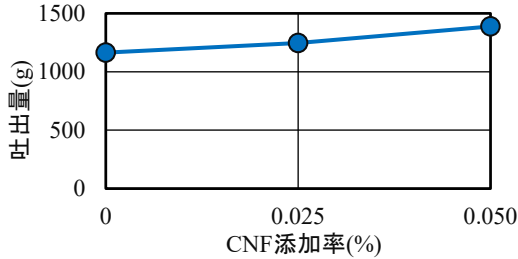


図-12 CNF 添加率が吐出量に及ぼす影響

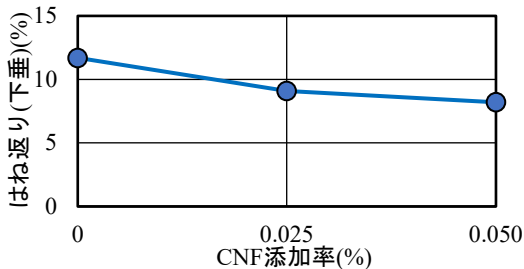


図-13 CNF 添加率がはね返り(下垂)率に及ぼす影響

された。これはセルロースナノファイバーによりセメント粒子間にネットワーク構造を形成することによる増粘効果と凝集抑制効果によるものだと考えられる。

- (2) セルロースナノファイバーの添加によって、静置時の塑性粘度が増加することが確認された。また、モルタルがチキソ性を有していることからすべての水準において加振時に塑性粘度と降伏値の低下が確認され、CNF の添加によって塑性粘度と降伏値の低下量が向上したことも確認された。
- (3) 圧縮強度は空気量の増加に反してセルロースナノファイバーの添加率に関わらず同程度であることが確認された。また、水分浸透抵抗性もセルロースナノファイバーの添加率に関わらず同程度であることが確認された。
- (4) 吹付け評価実験においてセルロースナノファイバーの添加率増加に伴い吹付けた際の吐出量が若干増加することが確認された。また、セルロースナノファイバーの添加によって下垂によるはね返りの低減も確認された。これは、添加することで、降伏値の回復速度が向上したことによるものと考えられる。そのため、セルロースナノファイバーを添加した際の降伏値と塑性粘度の回復速度を確認する必要があると考えられる。

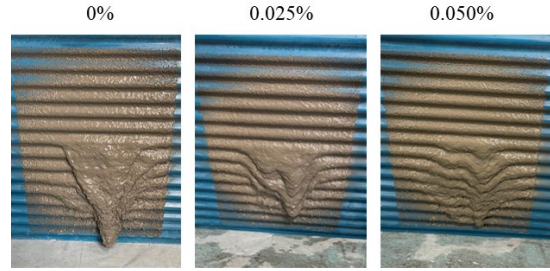


写真-1 CNF 添加率によるモルタルの下垂の比較

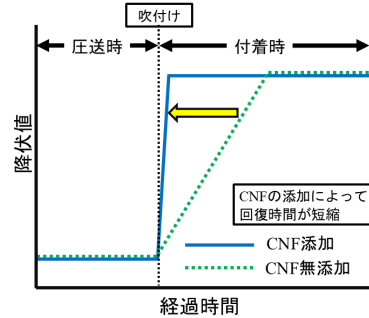


図-14 CNF の添加が経過時間の降伏値の変化及ぼす影響の予想図

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、王子ホールディングス株式会社様には本研究で使用した CNF を提供して頂き、考察の助言などの多大なご協力を頂きました。ここに付記し謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 山本康弘：コンクリート新技術，コンクリート工学，Vol.19，No.5，pp.66-67，1981
- 2) 矢野浩之：セルロースナノファイバーとその利用 日本画像学会誌，Vol.55，No.3，2016
- 3) 環境省：脱炭素・循環経済の実現に向けたセルロースナノファイバー利活用ガイドライン
- 4) 室賀陽一郎，伊達重之，大須賀哲夫：モルタルの粘性評価試験装置の開発，土木学会年次学術講演概要集，Vol.55，No.5，V-406，2000
- 5) 後居洋介：TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの増粘剤としての利用，森林科学，No.81，pp27-30，2017
- 6) 江端公章：塗料・塗膜の物性と評価方法，塗料基礎講座，pp.206-211
- 7) 根本浩史，平野修也，伊達重之，橋本紳一郎：コンクリートのこわばりを低減する混和剤，コンクリート工学，Vol.57，No.1，pp.16-19，2019
- 8) 第一工業製薬：レオクリスタより引用