

セルロースナノファイバーを用いたコンクリートの実用化に向けた実験的研究

2215013 小木曾 太一

2215031 宮田 恭輔

指導教員 エ・ルドンオチル

セルロースナノファイバー コンクリート 乾燥収縮率
ブリーディング 凝結 保水性

1. 本研究の背景および目的

近年、建設分野ではカーボンニュートラルの実現に向けて、コンクリートの環境負荷低減が急務となっている。特に、セメント製造に伴う CO₂ 排出削減が強く求められており、材料レベルでの改善策の検討が進められている。一方、製紙業界では、損紙などを活用したバイオマス系新素材としてセルロースナノファイバー（以下 CNF: 写真 1¹⁾ 参照）が注目されており、軽量、高強度、高比表面積、保水性などの特性から、セメント系材料への適用可能性が期待されている。

既往研究²⁾では、CNF を用いたコンクリート（以下 CNF コンクリート）の試験練りを実施し、CNF 添加によるブリーディング量の低減、材料分離抵抗性の向上、圧縮強度の増進などが報告されている。しかし、CNF コンクリートの実用化を考えると、より広範囲での水セメント比の相違が CNF コンクリートの諸性状に及ぼす影響を体系的に評価するに至っていない。また、長期性状である乾燥収縮挙動やヤング係数の把握は十分とはいえず、実施工に向けて複数の課題を解決する必要がある。

そこで、本研究では、

- 1) 針葉樹 20%・広葉樹 80% からなる CNF（以下 N20L80）を固形分で 0.01% 添加したコンクリートを対象とし、水セメント比を変えた場合のフレッシュ性状および硬化後性状に及ぼす影響を体系的に明らかにする
- 2) 富士市からの要請に応えるべく、富士川楽座の舗装への CNF コンクリートの適用を可能にする CNF の仕様を明確化し、実用化に向けた課題を整理することを目的として、実験（試験練り）を行った。

2. 実験概要

本研究では、CNF コンクリートの実用化を目指すべく、建築用普通コンクリートを対象とした実験 I（呼び強度 27N/mm²、目標スランプ 20cm）と舗装用コンクリートを対象とした実験 II（呼び強度 21N/mm²、目標スランプ 12cm）を実施した。

両実験とも、試験練りにおいて CNF の添加・無添加で、フレッシュ性状、硬化前性状および硬化後性状を比較・評価することとした。とりわけ、2024 年度の研究²⁾で課題

とされた CNF コンクリートの乾燥収縮性状を明らかにすることとした。

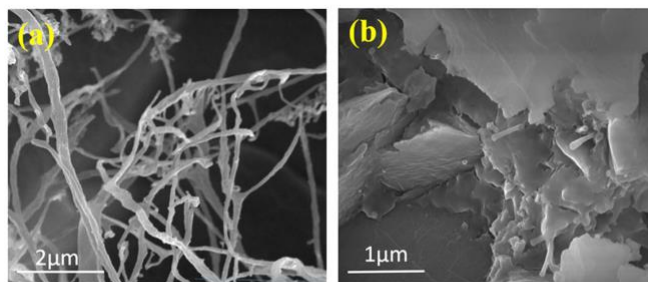


写真 1 CNF (a) と CNF 添加セメント硬化体 (b) の画像

2. 1 使用材料およびコンクリートの計画調査

表 1 に、本実験で用いた材料一覧を示す。実験 I と実験 II では、基本的に共通の材料を用い、化学混和剤のみ建築用コンクリート（実験 I）では高性能 AE 減水剤を、舗装用コンクリート（実験 II）では AE 減水剤（高機能タイプ）とした。CNF は水に溶解したスラリー状のものとしたが、この CNF には質量比で水が 98% を占めており、この水の質量を練混ぜ水に含めることとした。写真 2 に使用材料の一例を示す。

表 1 使用材料一覧

材料	記号	諸元
セメント	C	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm ³
練混ぜ水	W	地下水：温度 15°C
細骨材	S	富士川中流域産川砂（富士川興業）： 表乾密度 2.62g/cm ³ 、粗粒率 2.85、吸水率 1.50%
粗骨材	G	富士川中流域産川砂利（石森工業）： 表乾密度 2.66g/cm ³ 、粗粒率 6.30、吸水率 0.94%
CNF	CNF	N20L80（丸富製紙）：針葉樹 20%+広葉樹 80%、 解繊度：2pass
化学 混和剤	Ad1	高性能 AE 減水剤標準形 I 種：フューホール HP-8
	Ad2	AE 減水剤標準形 I 種 高機能タイプ：フューホール EX60

表 2 および表 3 に、コンクリートの計画調査を示す。実験 I では、一般構造物で用いられる建築用普通コンクリートを対象とし、水セメント比 (W/C) を 55%、50%、45% および 40% の 4 水準で試験練りを行った。試験練りでは、各 W/C に関して、CNF 無添加のベースコンクリート（以下ベース）にて基準となる性状を把握し、その後 CNF（N20L80）を固形分で 0.01% を添加したコンクリート（以下 CNF コン）と比較した。その際、練上がり直後のコンクリートのスランプを 20.0±2.5cm、空気量を 5.0±1.5% となるよう化学混和剤の添加量を調整した。

実験Ⅱでは、舗装用コンクリートを対象に、W/Cを60%、55%および50%の3水準とし、このうちW/C50%の場合はCNFコンのみで試験練りを行った。実験Ⅱでは、実験Ⅰと同様、CNF無添加のベースコンにて基本性状を確認した後、CNFの固形分0.015%を添加したCNFコンと性状を比較した。舗装用コンクリートの目標スランプは12.0±2.5cm、空気量は5.0±1.5%とし、施工性が確保できるよう化学混和剤の添加量を調整した。

表2 建築用普通コンクリートの計画調合（実験Ⅰ）

調合名	W/C	s/a	単位量 kg/m ³					
			C	W	S	G	CNF	Ad1
W/C55%ベース	55.0	48.2	309	170.0	867	947	—	3.09
W/C55%CNFコン	55.0	48.2	309	159.6	867	947	10.4	3.09
W/C50%ベース	50.0	49.6	340	170.0	880	907	—	1.36
W/C50%CNFコン	50.0	49.6	340	159.6	880	907	10.4	1.36
W/C45%ベース	45.0	48.6	378	170.0	846	910	—	1.512
W/C45%CNFコン	45.0	48.6	378	159.5	846	910	10.5	1.512
W/C40%ベース	40.0	47.6	425	170.0	812	907	—	1.70
W/C40%CNFコン	40.0	47.6	425	159.5	812	907	10.5	1.70

表3 舗装用コンクリートの計画調合（実験Ⅱ）

調合名	W/C	s/a	単位量 kg/m ³					
			C	W	S	G	CNF	Ad2
W/C60%ベース	60.0	48.7	292.0	175.0	868	938	—	2.92
W/C60%CNFコン	60.0	48.7	291.3	159.5	878	938	15.7	2.92
W/C55%ベース	55.0	48.0	318.0	175.0	854	938	—	3.18
W/C55%CNFコン	55.0	48.0	317.2	159.5	854	938	15.7	3.18
W/C50%ベース	50.0	47.2	350.0	175.0	828	939	—	3.50
W/C50%CNFコン	50.0	47.2	349.1	159.6	828	939	15.7	3.50



a) 各種骨材および練混ぜ水 b) CNF (スラリー)
写真2 使用材料

2.2 測定項目および測定方法

表4に、本研究における測定項目および測定方法を示す。実験Ⅰ、実験Ⅱのいずれも同一手順で測定し、練り上がったコンクリートのフレッシュ性状、硬化前性状および硬化後性状を評価した。なお、両実験における各種測定は写真3に示すように行った。

表4 測定項目および測定方法

フレッシュ性状 練上がり直後 静置30分経過後	スランプ	JIS A 1101
	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
硬化前性状	コンクリート温度	JIS A 1156
	ブリーディング量	JASS 5T-504:2021
硬化後性状	凝結性状	JIS A 1147
	圧縮強度	JIS A 1108
	ヤング係数	JIS A 1149
	乾燥収縮率	JIS A 1129-3

フレッシュ性状については、練上がり直後と静置30分後にスランプ、スランプフロー、空気量およびコンクリ

ート温度を測定し、CNFの添加がコンクリートの流動性および施工性に及ぼす影響を把握することとした。

硬化前性状では、ブリーディング量および凝結の始発・終結時間を測定し、CNFの保水性が硬化前コンクリート中の自由水の挙動や凝結特性に及ぼす影響を評価した。

硬化後性状としては、圧縮強度、ヤング係数および乾燥収縮率を測定し、CNFの添加による力学特性および長期変形性への影響を明らかにすることとした。



写真3 各試験の実施状況

3. 実験結果およびその考察

3.1 実験Ⅰ

1) フレッシュ性状

図1にスランプ試験結果を示す。スランプは、練上がり直後において全調合で目標値が得られた。また、静置30分経過後は、W/C55%ベースとW/C45%でCNFコン以外の全調合で目標値が得られた。なお、空気量およびコンクリート温度は、目標値を満足した。

2) 硬化前性状

図2にブリーディング量を示す。CNF添加によって全調合でブリーディング量が低減し、W/C50%では収縮ひび割れ制御指針³⁾で品質確保の目安(上限値)とされる0.3cm³/cm²以下となった。これは、CNFがその内部に水を保持することで水和反応に寄与し、その結果として自由水の上昇が抑制されたためと考えられる。

図3に凝結試験結果を示す。貫入抵抗値0.5N/mm²に達する時間は300~333分で、いずれの調合も一般的な建築施工で必要とされる打重ね許容時間が十分に確保できる結果となった。なお、W/C40%では、水和反応が早まり、他の調合より凝結が速まる傾向を示したが、他の調合では、CNFの添加によって凝結が遅延したり早まったりしな

った。

3) 硬化後性状

図4に圧縮強度試験結果を示す。材齢91日までの強度発現を見ると、全調合でCNFコンの方がベースより若干圧縮強度が高い傾向にあった。この傾向は、材齢の進行に伴って明確になり、CNFの保水性に伴う水和促進作用によって組織がより緻密化したことが要因と推察される。一方、ヤング係数はCNFコンとベースとで同等であった。

図5に乾燥収縮率を示す。CNF添加の有無にかかわらず乾燥収縮率は概ね同等で、材齢の進行に伴い同様の収縮挙動を示した。乾燥材齢26週におけるCNFコンの乾燥収縮率は、いずれもベースと同程度で、CNF添加による乾燥収縮率に対する効果は限定的であった。

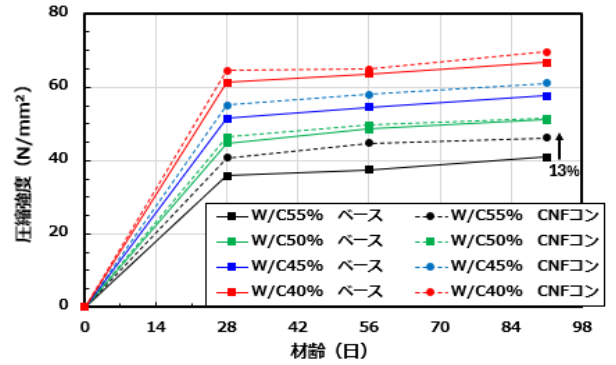


図4 標準養生供試体の圧縮強度 (実験 I)

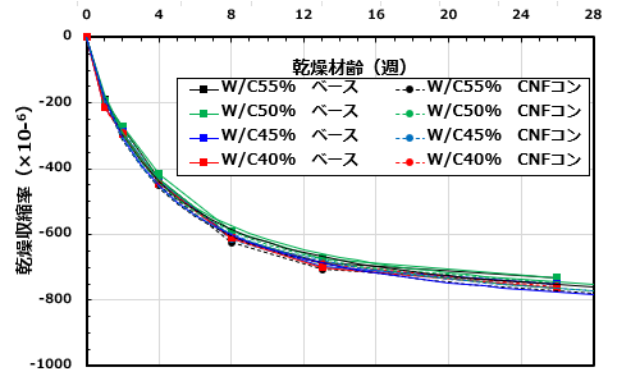


図5 供試体の乾燥収縮率 (実験 I)

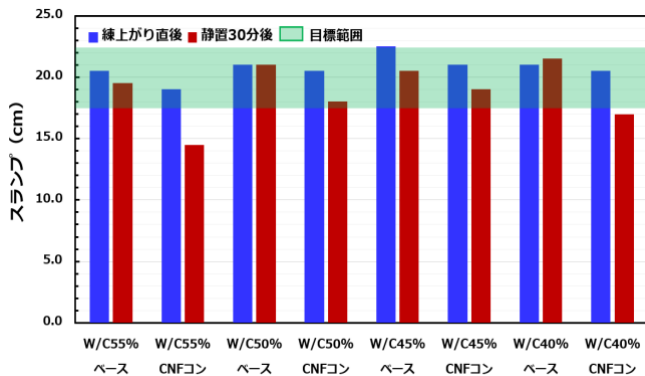


図1 スランプ試験結果 (実験 I)

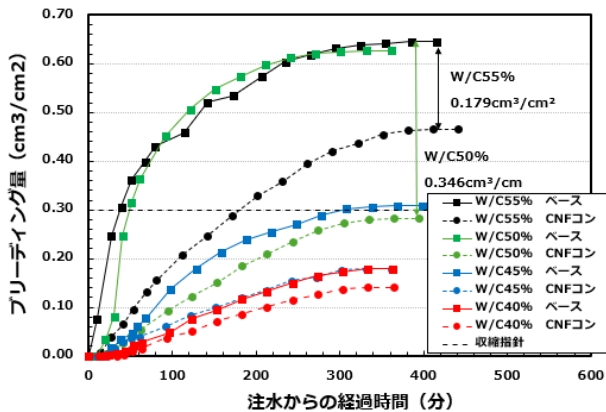


図2 ブリーディング試験結果 (実験 I)

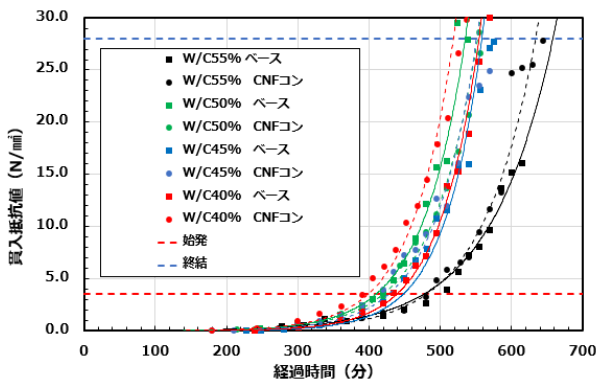


図3 凝結試験結果 (実験 I)

3.2 実験 II

1) フレッシュ性状

図6にスランプ試験結果を示す。CNFコンのスランプはベースより小さく、CNFを添加することで、練上がり直後から流動性が低下する傾向が認められた。

実験 I でも同様に CNF 添加によるスランプ低下が認められたことから、実験 II では舗装用コンクリートの目標スランプを確保できるよう、CNF 添加時の低下量を見込んだ調整を行った。その結果、全ての調合で所要スランプが得られ、空気量やコンクリート温度も規定範囲内となった。

2) 硬化前性状

図7にブリーディング量を示す。いずれの調合も CNF 添加によってブリーディング量は低減したが、本実験の目標値 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ を上回る、あるいはそれに近い値となった。

図8に凝結試験結果を示す。貫入抵抗値 0.5 N/mm^2 に達する時間は $210 \sim 301$ 分であった。CNF 添加によって、凝結が遅延したり、速まるような傾向は認められなかった。

3) 硬化後性状

図9に圧縮強度試験結果を示す。材齢91日までの強度発現性は、いずれの調合も CNF コンがベースをわずかに上回った。これは、実験 I と同様に、CNF による組織の緻密化によるものと推察される。なお、CNF コンのヤング係数は全調合でベースと同等であった。

図10に乾燥収縮率を示す。いずれの調合も、CNF 添加の有無による顕著な差は認められず、同様の乾燥収縮挙動

を示した。乾燥収縮率も実験 I と同様に、CNF による乾燥収縮に対する抑制効果は限定的であった。

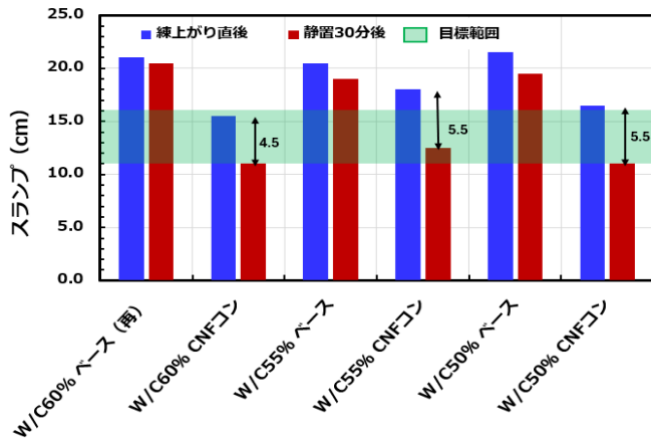


図 6 スランブ試験結果 (実験 II)

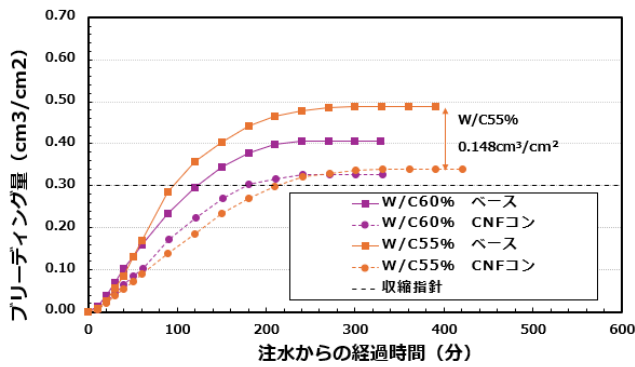


図 7 ブリーディング試験結果 (実験 II)

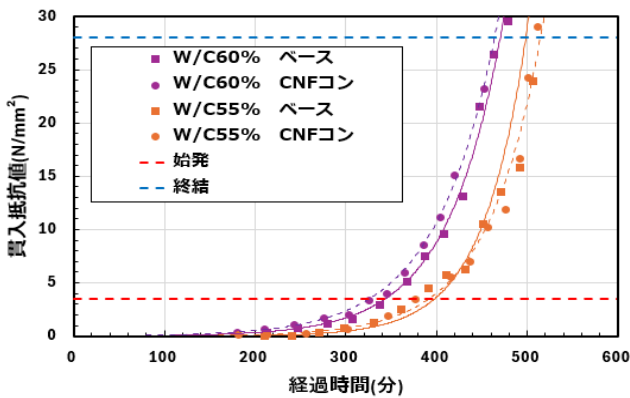


図 8 凝結試験結果 (実験 II)

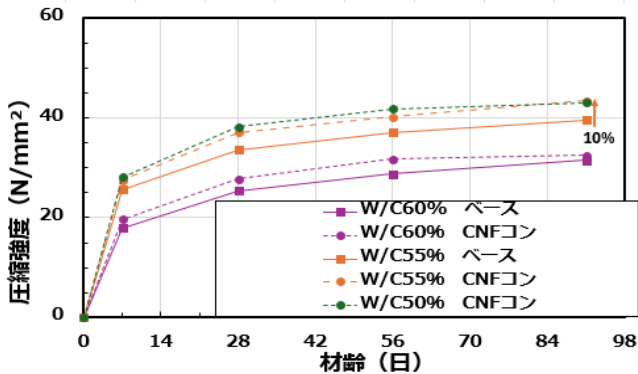


図 9 標準養生供試体の圧縮強度 (実験 II)

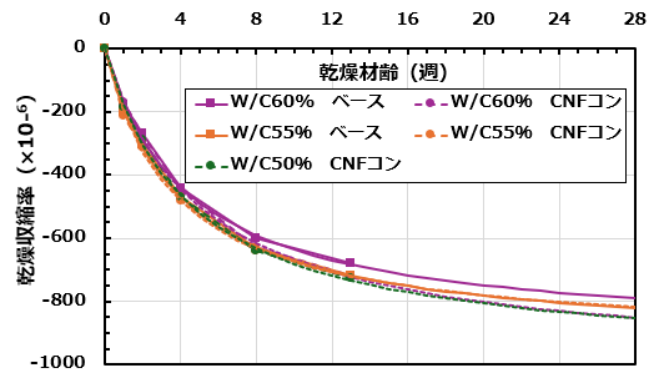


図 10 供試体の乾燥収縮率 (実験 II)

4. 本研究のまとめ

本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- ・フレッシュ性状では、両実験に共通して CNF 添加によるスランブ低下が認められたが、低下量を考慮した割合および化学混和剤の添加量を調整することで、いずれも十分な施工性を確保することができる。
- ・硬化前性状では、建築用・舗装用のいずれのコンクリートも CNF 添加によってブリーディング量が減少し、それに伴い材料分離抵抗性が向上したと考えられる。凝結試験の結果から、実施工に必要な打重ね許容時間を確保できる。
- ・硬化後性状では、CNF コンの圧縮強度は CNF 無添加のベースと同等、または若干増進する。一方、CNF コンのヤング係数および乾燥収縮率はベースと同程度であり、CNF の力学的性状や長期的性状に及ぼす影響は限定的である。
- ・CNF は適切な割合設計を前提とすることで、確実な施工性を確保し、かつ品質安定化に寄与する材料である。
- ・実験 I の結果から建築用のコンクリートでは、CNF を添加してもヤング係数や乾燥収縮率はベースと同程度であるが、実用化は可能であると考えられる。
- ・実験 II の結果より、舗装用のコンクリートとしてスランブの変動は大きいものの、CNF コンを使用しても問題はないと判断できる結果となった。
- ・今後は、CNF の保水効果と微細構造化による影響が乾燥収縮挙動に及ぼす影響を解明するとともに、CNF の最適添加量や分散性に着目した実験検討が必要と考える。

参考文献

- 1) SCIENTIFIC REPORTS www.nature.com/scientificreports/
- 2) 高傘禮萌：セルロースナノファイバーのコンクリートへの適用性に関する基礎的研究，静岡理科大学 卒業論文，2025.3
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針・同解説，2023