

論文 超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料の収縮性状に関する基礎的研究

高桑 謙吾^{*1}・西脇 智哉^{*2}・Sukmin Kwon^{*3}・五十嵐 豪^{*4}

要旨: 超高強度マトリックスに数種類の補強鋼繊維を組み合わせることにより、優れた力学特性を実現した超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料（以後 UHP-FRCC）が開発されている。ここでは UHP-FRCC の材齢 28 日までの収縮量と質量の経時変化を測定し、併せて曲げ強度と圧縮強度を測定することで、UHP-FRCC の収縮性状と力学的特性を得た。その結果、UHP-FRCC に使用されているモルタルは乾燥収縮量と自己収縮量はほぼ等しいことが、また、繊維を混入したモルタルの曲げ強度と曲げ靱性は、混入繊維によるモルタルマトリックスの補強効果が大きく、養生条件の違いによる影響は小さいことが確認された。

キーワード: UHP-FRCC, 自己収縮, 乾燥収縮, 質量変化率, 曲げ強度, 繊維種類

1. はじめに

超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料 (Ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composites, 以後 UHP-FRCC) とは、圧縮強度が 150 N/mm² 以上、引張強度が 5 N/mm² 以上の力学的性能を持つ繊維補強セメント複合材料である¹⁾。著者らはこれまで、大きさ、形状の異なる複数種類の補強繊維を組み合わせ、圧縮強度 200 N/mm² 級のマトリックスに対して適用することで、極めて優れた力学特性を実現した UHP-FRCC を提案してきた²⁾。ここでは、マルチスケール繊維補強として、破壊進行領域で生じる極めて微細なひび割れから、これらが統合して形成する目視可能なサイズのひび割れまで、それぞれのレベルに応じた適切な大きさの補強繊維を組み合わせる手法を提案している。その結果、一軸引張応力下においても複数微細ひび割れの発生と、これに伴う疑似ひずみ硬化特性を示し、引張強度 20 N/mm² と最大荷重時ひずみ 1% 以上の高い力学的特性の両立を実現している。

この一方で、UHP-FRCC は水セメントが小さく、単位セメント量も約 1200 kg/m³ と極めて多いため、乾燥収縮よりも、自己収縮によるひび割れのリスクが懸念される³⁾。自己収縮は、セメントの水和によってコンクリート内の水分が消費され、内部の相対湿度が低下する自己乾燥によって生じる。既往の研究において指摘されているように、セメントペースト中の内部相対湿度は水セメント比が小さくなるほど低下することが確認されており、低水セメント比であるほど自己収縮は大きくなる⁴⁾。このことに加えて、UHP-FRCC は超

高強度を達成するために、シリカフュームを添加することが前提となっている。既往の研究において、シリカフュームの添加は内部相対湿度が低下する原因となることが確認されており、シリカフュームの添加量が多いほど内部相対湿度の低下が大きい⁵⁾。ここで用いる UHP-FRCC は、セメントの 18% をシリカフュームに置換したプレミックスセメントを用いているため、このことも自己収縮をより大きくすることが予想される。しかし、本研究で対象としている、特に数種類の補強繊維を同時に用いた UHP-FRCC の乾燥収縮、自己収縮に関する知見は十分に得られておらず、定量的なデータを蓄積することが必要である。

これらの背景から、本研究では異なる補強鋼繊維を用いた UHP-FRCC を作製し、異なる養生条件の実験検討を行った。収縮ひずみと質量の経時変化を 28 日まで計測し、その後、に載荷試験を行って、UHP-FRCC の収縮性状と力学的特性実験的に取得した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および試験体の作製

表-1 に使用材料を示す。また、表-2 に本検討で採用した 2 種の大きさと形状の異なる鋼繊維（メゾサイズ繊維としてストレート形状（以下、MF）、マクロサイズ繊維として両端フック加工（以下、LF））の物性を示す。表-3 に示すシリーズごとの調査条件で試験体を作製した。ここでは、UHP-FRCC を HF シリーズ、同じ調合のモルタルマトリックス部分のみを C シリーズとし、MF、LF 繊維をそれぞれ単独で用いた 4 つの

*1 東北大学 工学部 建築・社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 日本学術振興会特別研究員 兼

University of Michigan, Advanced Civil Engineering – Materials Research Lab Research Scholar 博士 (工学) (正会員)

*4 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

表-1 使用材料

名称	略称	備考
セメント	SFCS	シリカフェュームプレミックスセメント（低熱セメント：82%，シリカフェューム：18%）密度：3.01 g/cm ³ ，比表面積：6,555 cm ² /g
細骨材	S	珪砂 6号 密度：2.61 g/cm ³ ，最大粒径：0.212mm
ワラストナイト	Wo	繊維長：50~2000 μm，アスペクト比：3~20，密度：2.9g/cm ³
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物，密度：1.05g/cm ³
消泡剤	D	ポリエーテル系，密度：1.05g/cm ³

表-2 鋼繊維の物性

繊維の種類	密度 (g/cm ³)	長さ (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (MPa)	アスペクト比 (-)
MF	7.85	6.0	0.16	2000	37.5
LF		30.0	0.38	3000	78.9

表-3 調合表

シリーズ名	SFCS (kg/m ³)	S (kg/m ³)	Wo (kg/m ³)	W (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	D (kg/m ³)	MF (vol.%)	LF (vol.%)
C	1514.3	530.0	196.9	180.2	24.2	0.3	-	-
MF							2.5	-
LF							-	2.5
HF				1.5	1			

シリーズを対象とする。ただし、マイクロサイズ繊維として用いるワラストナイトはモルタルマトリックスの一部として扱い、すべてのシリーズに用いている。また、W/B=0.15は共通とした。MF、LFシリーズには、それぞれ C シリーズの調合に対して外割の体積比で 2.5%を混入した。HFシリーズにはこれらの 2 種類の鋼繊維を C シリーズの調合に対して外割の体積比で MF を 1%、LF を 1.5%混入した。

練り混ぜは最初にセメント、細骨材、ワラストナイトをミキサーに投入して 1 分間空練りをし、続いて水、減水剤、消泡剤をあらかじめ混ぜ合わせたものを投入し 3 分間練り混ぜた。MF、LF、HF シリーズでは、全ての繊維を 6 回に分けそれぞれ 30 秒ごとに投入して練り混ぜ、最後の繊維投入後は 2 分半練り混ぜた。

収縮量、質量の計測および曲げ試験には、図-1 に示す 40×40×160mm の角柱試験体を用いた。ただし、切欠きは湿式のコンクリートカッターによって導入し、その後 6 時間以内に曲げ荷重試験を行った。また、圧縮試験には φ50mm×100mm の円柱試験体を用いた。

2.2 長さ変化および質量変化

異なる養生条件における UHP-FRCC の収縮量と質量の経時変化を測定する。試験体として Kwon²⁾の開発し

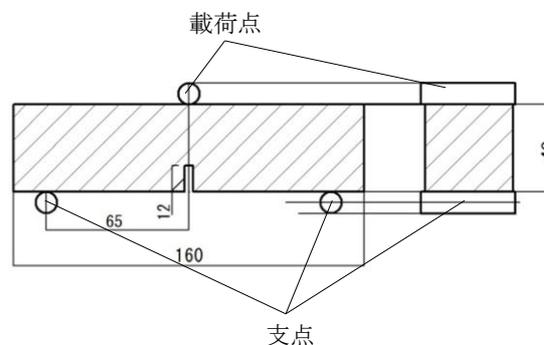


図-1 曲げ荷重試験の概要 (単位: mm)

た UHP-FRCC の他に、これに用いる超高強度モルタルマトリックス単体と、種類の異なる 2 種類の鋼繊維をそれぞれ単独で混入したものの合計 4 種類を用いた。これらの試験体に生じる収縮性状を経時的に計測することで、鋼繊維の混入がモルタルの収縮性状に与える影響と、混入した鋼繊維の形状が収縮性状に与える影響について考察を行う。また、収縮量、質量測定の後、曲げ試験と圧縮試験を行って、力学的特性への影響を確認する。

2.3 実験方法

作製した試験体は材齢 1 日で脱型した後、水中養生 (水温 20℃)、封緘養生 (20℃、アルミ粘着テープに

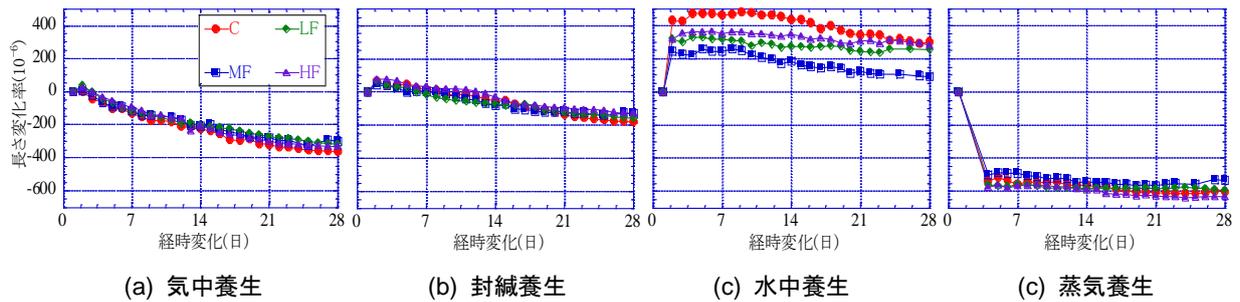


図-2 各養生条件における時間に伴う長さ変化率

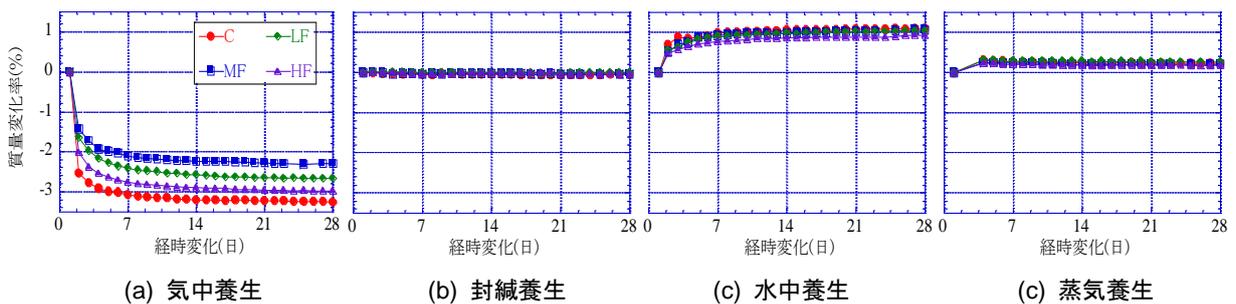


図-3 各養生条件における時間に伴う質量変化率

よる封緘), 気中養生 (20°C, 60%RH), 蒸気養生 (90°C で 48 時間の蒸気養生を行った後, 気中養生と同環境) の 4 種類の養生を行った。それぞれのシリーズの角柱試験体は材齢 28 日までの収縮量と質量を測定し, 材齢 7, 28 日目に三点曲げ試験と圧縮試験を行った。角柱試験体の長さは, 基準長さとなる 160mm のインバー鋼との差分を, 試験体の設置方法を変えて 1 体につき 2 回マイクロメーターを用いて 1/1000mm まで計測し, その平均値を得た。この値を基準長さに加えたものを, その試験体の長さとした。質量は電子天秤を用いて 0.1g まで計測した。

三点曲げ試験は, 図-1 のようにスパン 130mm で, 深さ 12mm まで切り欠きを入れた試験体を用いた。JCI-S-002-2003⁶⁾に示される試験方法を参照し, 切り欠き部分にはクリップゲージを取り付けて CMOD を計測し, CMOD が 3mm までの範囲で破壊エネルギーを算出した。曲げ試験の載荷速度は, C シリーズは CMOD で 0.005mm/秒(載荷点変位で最大約 1.4mm/分), その他のシリーズは荷載点変位で 0.25mm/分とした。

3. 実験結果

3.1 長さ, 質量変化

図-2 に養生条件別でまとめた長さの経時変化, 図-3 に養生条件別でまとめた質量の経時変化をシリーズごとにまとめたグラフを示す。これらのグラフから, 同一の養生条件下においての長さおよび質量変化率は,

シリーズごとの大きな差異が見られなかった。この一方で, 水中養生の長さの経時変化, 気中養生の質量の経時変化にはシリーズの間で明確な差異が見られた。水中養生条件下における材齢 14 日程度までの長さ変化率は膨張が大きいものから順に C シリーズ, HF シリーズ, LF シリーズ, MF シリーズとなっており, 気中養生条件下における質量変化も減少の大きいものからこの並びとなっている。C シリーズが他のシリーズよりも膨張していたのは他シリーズに混入した鋼繊維が膨張による疑似的な引張力を負担し, 膨張を抑制したものと考えられる。

図-4 に各シリーズの気中養生, 封緘養生条件下における長さの経時変化を示す。封緘養生は水分の逸散がないため自己収縮のみ, 気中養生は乾燥収縮と自己収縮分の収縮量である。UHP-FRCC に使用されているモルタルは乾燥収縮と自己収縮の収縮率はほぼ等しい。しかし, 既往研究⁷⁾の水セメント比が 0.36 であるコンクリートの自己収縮は乾燥収縮の 3 倍程度ある。水セメント比が小さくなるほど自己収縮が大きくなることを考慮すると, 本実験で用いた UHP-FRCC の自己収縮は, 自己収縮と乾燥収縮をあわせた全収縮量に対する割合が小さいと考えられる。これは, 骨材の影響のほか, ミクロ繊維として混入したワラストナイトの影響が示唆される。既往の研究⁸⁾において, 繊維を混入した高強度モルタルの自己収縮率は, 同水セメント比のモルタルのみの自己収縮率と比較すると収縮が小さく

なること、また、混入した繊維の繊維長が短くアスペクト比が小さい場合には収縮は大きくなることが報告されている。本実験における C, MF, LF シリーズにおいても同様の結果が得られた。HF シリーズと LF シリーズの自己収縮率は C シリーズを下回っており、その差は 80×10^{-6} 程度である。材齢 28 日までの収縮率の測定は 1 つのシリーズ、1 つの養生条件ごとに最低 7 つの試験体について行っており、各シリーズの標準偏差はすべて 35×10^{-6} 程度であった。このばらつきを考慮しても LF 繊維の混入によって自己収縮を抑制している可能性は大きいと考えられる。また、この傾向はマイクロ繊維として混入したワラストナイトの影響により、C シリーズであっても自己収縮を抑制した可能性も考えられるため、今後の検討の課題としたい。

図-5 に蒸気養生における各シリーズの密度の経時変化を示す。ここでは試験体の初期の寸法を $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ とし、長さ変化率から 28 日までの体積変化を算出し、求めた体積で質量を除いたものを密度した。水中養生の試験体は時間経過に伴い密度が上昇している。これは外部から供給された水分と反応して水和物を生成するためであると考えられる。封緘養生の試験体は終始密度に変化がなく、蒸気養生の試験体も材齢 4 日以降は気中養生と同じ条件下にあっても気中養生の試験体で見られた激しい密度の低下は見られなかった。蒸気養生条件は、高温湿気環境下で水和反応が促進されているため、材齢 4 日までに水和反応が促進され、自己収縮、質量の増加が生じ、蒸気養生後は、十分に水和反応が進んだためにあまり密度が変化しなかったと推測される。

図-6 に封緘養生と蒸気養生終了直後の材齢 4 日を基準とした蒸気養生の長さ変化を示す。蒸気養生を行った試験体は材齢 4 日以降では気中養生と同じ条件下にありながら、封緘養生よりも収縮が小さい。封緘養生が自己収縮のみの収縮量であることを考えると、蒸気養生を経て水和が促進されて、自己収縮の原因となる水和反応が終了しつつあることが原因と考えられる。蒸気養生を行うことで 600×10^{-6} 程度の大きな収縮が生じるが、たとえばプレキャスト部材の製造などにおいて、この収縮率を予め考慮した設計を行うことで、蒸気養生後には寸法安定性の高い部材ができるものと考えられる。

鋼繊維を混入した MF, LF, HF シリーズでは、混入鋼繊維を拘束体としての、収縮に伴う繊維周辺のひび割れは、微細なものも含めて目視では確認できなかった。またいずれのシリーズでも、水中養生、封緘養生、気中養生の長さ変化が材齢 28 日の時点で継続してい

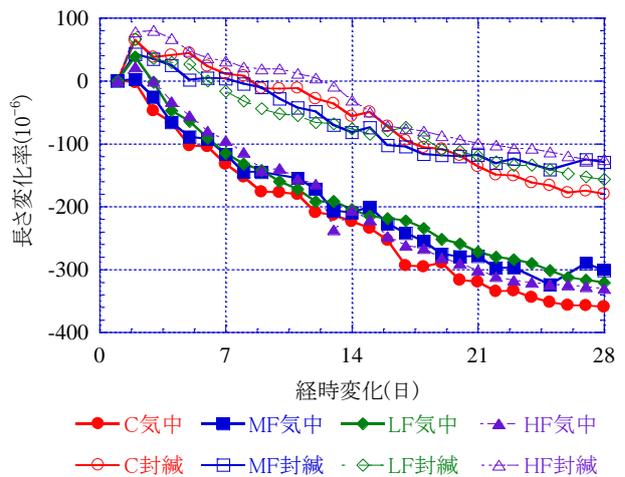


図-4 気中養生、封緘養生の長さ変化率の経時変化

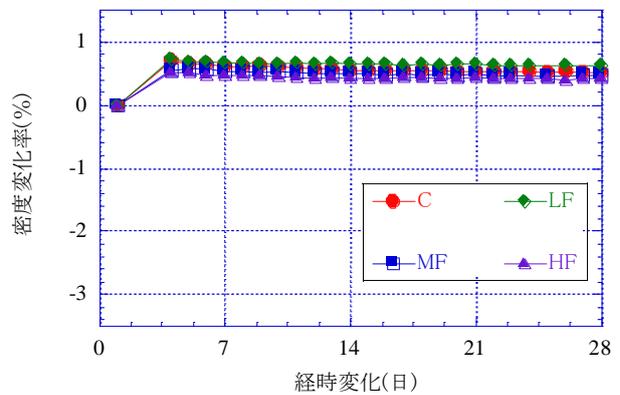


図-5 蒸気養生の密度の経時変化

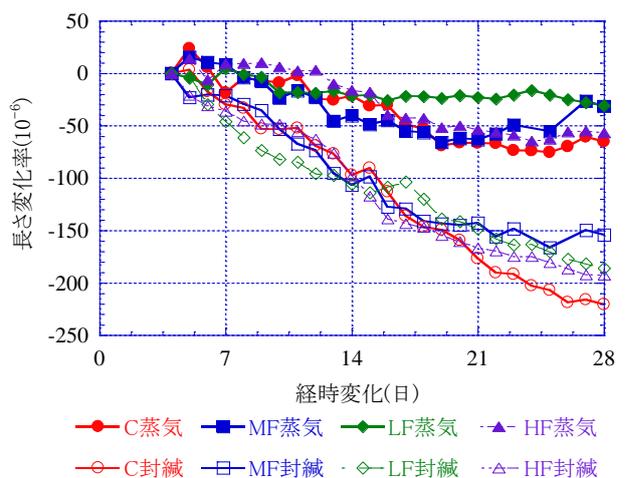
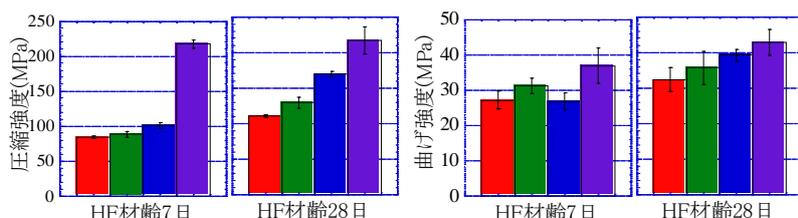
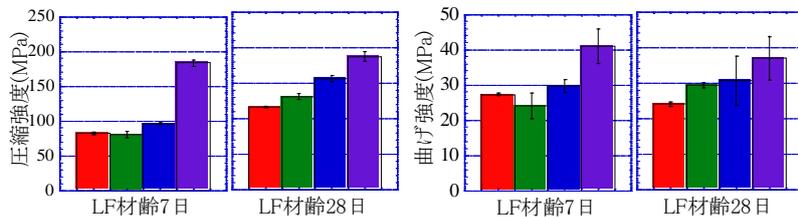
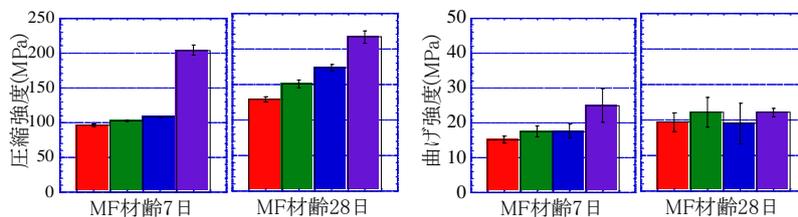
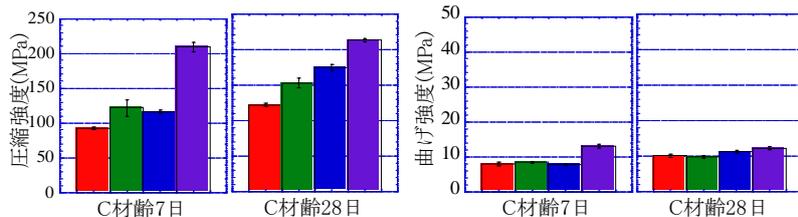


図-6 材齢 4 日を基準とした蒸気養生と封緘養生の長さ変化率



■ 気中 ■ 封緘 ■ 水中 ■ 蒸気

図-7 圧縮強度

■ 気中 ■ 封緘 ■ 水中 ■ 蒸気

図-8 曲げ強度

■ 気中 ■ 封緘 ■ 水中 ■ 蒸気

図-9 曲げ靱性(CMOD3mm まで)

ることから、今後はさらに長期の材齢までの計測が必要と考えられる。

3.2 圧縮、曲げ強度および曲げ靱性

各シリーズの、各養生条件における圧縮強度を図-7に、曲げ強度を図-8に、曲げ靱性を図-9に示す。ただし、曲げ靱性については脆性的に破壊したCシリーズを省略している。圧縮強度について、材齢7日・28日のいずれの場合であっても、強度の大きい方から順に、基本的には蒸気養生、水中養生、封緘養生、気中養生の順となっている。低熱セメントをベースとしたプレミックスセメントであるため、材齢7日の初期段階における強度発現については、先に示した蒸気養生、水中養生、封緘養生、気中養生の順序とはなっていないものもある。材齢28日においては、すべてがこの順序であり、水和反応が進展しているほど、すなわち、十分な水和反応を経た蒸気養生が最も強く、その他は養生条件がより湿潤である水中養生、封緘養生、気中養生の順に圧縮強度が高いことが確認できる。

曲げ強度については圧縮強度と異なり、材齢7日においてはCシリーズとMFシリーズでは封緘養生と水中養生の強度がほぼ等しく、HFシリーズでは封緘養生の方が大きい。これは、強度レベルが同程度である場合、乾燥した状態の試験体の方が高い強度を示すためと考えられる⁹⁾。材齢28日での曲げ強度は、MFシリーズ以外の3つのシリーズにおいては、圧縮強度と同じように養生条件が湿潤であるほど曲げ強度が高くなる傾向が見られたが、MFにおいては同材齢の圧縮強度にみられる養生条件による優劣が見られなかった。Cシリーズは繊維が混入されていないため、モルタル部分の強さがそのまま曲げ強度を反映したのと考えられる。またLF繊維は両端のフック部分で架橋しているため、同繊維を混入したLF、HFシリーズにおいてはLF繊維の周辺モルタルマトリックスの強度が大きいほど、すなわち養生条件が湿潤であるほど曲げ強度が大きくなったと考えられる。MFシリーズの曲げ強度の養生条件による強度の大きさの違いが圧縮強度の養生条件による強度の大きさの違いと一致しな

ったのは、MF 繊維とモルタルマトリックス部分との付着は摩擦によるものであるため、モルタルマトリックス部分の圧縮強さの曲げ強度に対する影響が小さかったからだと考えられる。曲げ靱性については、曲げ強度と同様の傾向を示しており、また、異なる繊維の組み合わせによる HF シリーズの曲げ靱性が LF シリーズよりも大きい。これは、マクロ繊維を単独で用いるよりも、メゾ繊維との組み合わせによって用いることが有効であることを示していると考えられる。これらの結果は、収縮に伴って繊維周囲に生じていると考えられる微細ひび割れや、曲げ試験後の破断面における繊維周囲のひび割れ状況の詳細な観察を行うことで、より詳しい考察を得られるものと考えられるため、今後の検討課題としたい。

4. まとめ

UHP-FRCC を含む 4 種類のシリーズについて、異なる養生条件下での長さ・質量の経時変化を測定した。また、収縮量、質量測定の後、曲げ試験と圧縮試験を行って、力学的特性への影響を確認した。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) UHP-FRCC に使用されているモルタルの自己収縮量は乾燥収縮量とほぼ等しい。
- 2) 水中養生条件下において、繊維を混入しないモルタルは膨張挙動を示し、繊維を混入することでモルタルの膨張を抑える傾向が見られた。
- 3) 繊維を混入したモルタルの自己収縮量が既往の研究の結果と同様に、抑制される傾向を確認した。UHP-FRCC に使用されているワラストナイトが収縮性状に影響を与えている可能性があり、今後ワラストナイトの有無による収縮性状の検討が必要である。
- 4) 48 時間の蒸気養生後に気中養生条件下においても、材齢 28 日までの試験体の密度が変化しないことから、蒸気養生により十分な水和反応が行われていると考えられる。
- 5) 鋼繊維を混入したモルタルは養生条件が湿潤であるほど圧縮強度は増加するが、曲げ強度、曲げ靱性には同様の傾向が必ずみられるわけではなく、混入した繊維の性状により異なる。
- 6) 両端フック加工の鋼繊維を混入したモルタルの曲げ強度はモルタルの圧縮強度に影響を受ける

が、ストレート性状の鋼繊維を混入したモルタルの曲げ強度はモルタルの圧縮強度に影響を受けにくい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費・挑戦的萌芽研究 25630228 (代表：西脇智哉) の助成を受けた研究成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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) 2004
- 2) Sukmin K, Nishiwaki Tomoya, Kikuta Takatsune, Mihashi Hirozo: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, ACI Materials Journal, Vol.111, No.3, 2014.
- 3) 武者 浩透, 福浦 尚之, 大熊 光, 大島 邦裕：繊維補強コンクリートのプレキャスト化技術の現状と課題, コンクリート工学, Vol.50, No.5, pp.473-480, 2012
- 4) 堀田 智明, 名和 豊春：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響 日本建築学会構造系論文集, Vol. 565, pp.1-7, 2003
- 5) Jensen, O.M., Hansen, P.F.:Autogenous relative humidity change in silica fume-modified cement paste, Advances in Cement Research, No.25, 33-38,1995
- 6) 日本コンクリート工学協会：切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 (JCI-S-001), JCI 規準集, 2003
- 7) Saje, D., Bandelj, B., Sustersic, J., Lopatic, J, Saje, F.: Autogenous and Drying Shrinkage of Fibre Reinforced High-Performance Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.10, 59-73, 2012
- 8) Paillere A. M. , Buil M., Serrano J. J. Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete, ACI Materials Journal, Vol.111, No. 86, 1989
- 9) 岡島 達雄：コンクリートの強度・ヤング係数と水分の関係, コンクリート工学, Vol.32, No. 9, pp.20-24, 1994.