

鋼繊維増量による圧縮強度 300N/mm<sup>2</sup> を有する UFC の曲げ強度・収縮抑制効果・耐爆裂性の向上

太平洋セメント(株) 正会員 ○森 香奈子, 正会員 安田 瑛紀, 正会員 河野 克哉, 多田 克彦

## 1. はじめに

圧縮強度 150N/mm<sup>2</sup> 以上の超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC) は, 従来のコンクリートに比べて強度, 靱性, 耐久性が飛躍的に向上した材料であり, これらの特長を活用して様々な構造物へ利用されている. 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)」 (以下, UFC 指針案) では, 補強用繊維として鋼繊維を 2vol.% 以上混入することを標準としており, 実際は 2vol.% での使用が多い. しかし, 所要のコンシステンシーを確保した上で, より高い混入率とすることによって靱性などの力学性能を向上できれば, 適用範囲の拡大に繋がり, さらに爆裂抑制効果を付与することでトンネル構造物などへも利用可能になると考える. そこで本研究では, 鋼繊維混入率の異なる圧縮強度 300N/mm<sup>2</sup> 以上の超高強度繊維補強コンクリートについて, 強度, 長さ変化および耐爆裂性を評価した.

## 2. 実験概要

## (1) 使用材料および配合

結合材 (以下, B) には低熱ポルトランドセメント (以下, C), 石英微粉末 (以下, Q) およびシリカフェーム (以下, SF) を用いた. また, 細骨材 (以下, S) には珪砂, 混和剤には高性能減水剤 (以下, SP) ならびに消泡剤 (以下, DF) を練混ぜ水の一部として用いた. さらに, 補強繊維 (以下, F) として UFC 指針案に適合する直径 0.2mm, 長さ 15mm の鋼繊維 (以下, ST) ならびに爆裂防止効果が期待できる直径 0.014mm, 長さ 6mm のポリプロピレン繊維 (以下, PP) を使用した. コンクリートの配合を表-1 に示す. 結合材の配合は, 各粉体の粒度分布を考慮して空間率が最小となる混合割合とした<sup>1)</sup>. 水結合材比 (以下, W/B) は 14% または 15%, SP 添加量は B×2.5%, DF 添加量は B×0.1%, ST 混入率は 2.0vol.% または 3.5vol.% (外割), PP を適用した配合では混入率を 0.1vol.% (外割) とした.

## (2) 練混ぜおよび試験体の作製・養生

オムニミキサ (容量 5L) に B, S, W, SP および DF を投入して 4 分間の練混ぜを行い, ST および PP を混入してさらに 2 分間練り混ぜた. 練り上がった PFC を型枠 (φ5×10cm) に打ち込み, テーブル型の外部振動機にて締固め

表-1 PFC の配合

配合名	W/B (wt.%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )			F (vol.%)		B×wt.% <sup>*2</sup>	
		W	B <sup>*1</sup>	S	ST	PP	SP	DF
PFC-2.0%	14	190	1356	934	2.0	0	2.5	0.1
PFC-3.5%	14	190	1356	934	3.5	0	2.5	0.1
PFC(P)-2.0%	15	199	1323	934	2.0	0.1	2.5	0.1
PFC(P)-3.5%	15	199	1323	934	3.5	0.1	2.5	0.1

\*1 B=C+Q+SF, \*2 W の一部に内割置換

表-2 試験結果 (フロー, 圧縮・曲げ強度)

配合名	W/B (wt.%)	フロー (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
PFC-2.0%	14	252	335	53.7
PFC-3.5%	14	217	332	69.7
PFC(P)-2.0%	15	262	337	-
PFC(P)-3.5%	15	196	333	-

を実施した. 型枠に打ち込んだ後, 筆者らの開発した方法を参考として<sup>2)</sup>, 材齢 48 時間まで封緘養生 (温度 20°C) を行った試験体 (長さ変化測定用以外) は, 脱型後すぐに脱気吸水処理 (30 分間) した. 吸水処理後の試験体は, 1 次熱養生として蒸気養生 (最高温度 90°C, 48 時間保持), 2 次熱養生として加熱養生 (最高温度 180°C, 48 時間保持) の 2 段階の熱養生を実施した. 一方, 長さ変化測定用試験体は, 型枠に打ち込んだ直後から試験終了時まで封緘養生 (温度 20°C) とした.

## (3) 試験項目および試験方法

試験項目は, フロー試験 (JIS R 5201: 無振動, 180 秒経過後のフロー), 圧縮強度 (JSCE-G505-1999), 曲げ強度, 長さ変化および耐爆裂性の 5 項目とした. 曲げ強度は, 40×40×160mm 試験体を使用し, 切欠きのない 3 等分点曲げ試験によって評価した. 長さ変化は, 既往の報告を参考に<sup>3)</sup>, 型枠からの拘束, 表面からの水分の逸散を防いだ試験体 (40×40×160mm) 中央部に埋め込んだモールドゲージにより, 打ち込み後から材齢 7 日まで連続して測定した. 耐爆裂性は, ISO834 の加熱温度パターンを参考に, 小型の箱型電気炉により 400°C から 1110°C まで 3 時間かけて試験体を加熱し, その後試験体を取り出して, 損傷状態の目視観察により評価した.

## 3. 実験結果

## (1) フレッシュ性状・圧縮強度・曲げ強度

フロー, 圧縮強度および曲げ強度の結果を表-2 に示す.

キーワード 鋼繊維, 超高強度繊維補強コンクリート, 圧縮強度, 曲げ強度, 長さ変化, 耐爆裂性

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) 中央研究所 TEL. 043-498-3893

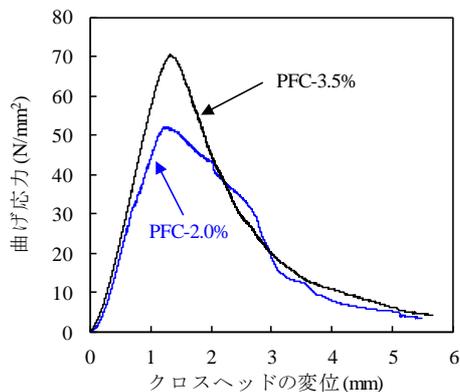


図-1 曲げ試験結果

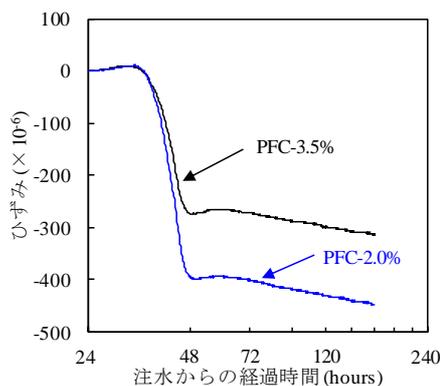


図-2 長さ変化測定結果



(a)PFC(P)-2.0% (b)PFC(P)-3.5%  
図-3 1100°C加熱後の試験体

フローの結果より、鋼繊維増量による流動性の低下が認められた。しかし、いずれの水準についても流し込みによる試験体の成型は可能であった。圧縮強度は、W/B および PP 有無の影響は認められず、いずれの水準においても 330N/mm<sup>2</sup> 程度の高い強度が得られた。

曲げ試験は W/B14%, PP 混入なしの 2 水準のみ実施した。図-1 に示す曲げ応力と変位の関係から、曲げ試験時の最大応力を曲げ強度とした。UFC 指針案に示される鋼繊維 2.0vol.% の曲げ強度の平均値は 35.1 N/mm<sup>2</sup> であることから、曲げ強度 53.7 N/mm<sup>2</sup> の PFC-2.0% は、従来の UFC よりも高い曲げ強度であることが確認できた。これは、PFC が空隙の少ない非常に緻密なセメントマトリクスであることにより<sup>3)</sup>、鋼繊維との付着力が向上することで繊維が引き抜けにくくなった結果、最大応力が増加したと推測する。鋼繊維を 2.0vol.% から 3.5vol.% に 1.75 倍増量した場合、曲げ強度は 69.7 N/mm<sup>2</sup> となり約 30% 増加したことから、鋼繊維増量による曲げ強度向上の効果が確認できた。鋼繊維増量による曲げ強度の向上は、マトリクスを PFC とすることにより、より高い効果が得られると考える。

## (2) 長さ変化

材齢 7 日までの長さ変化を図-2 に示す。図には、熱膨張係数を一定と仮定した温度ひずみの補正により、凝結始発からの自己収縮ひずみ(収縮をマイナス)の結果を示した。また、長さ変化の測定は、曲げ試験同様に W/B14%, PP 混入なしの 2 水準のみ実施した。鋼繊維の混入率によらず、始発から約 24 時間後(注水から約 48 時間後)までに急激に自己収縮が進行し、その後の収縮は緩やかになった。材齢 7 日のひずみは、PFC-2.0% で  $-433 \times 10^{-6}$ 、PFC-3.5% で  $-315 \times 10^{-6}$  となり、PFC-3.5% の収縮ひずみは約 30% 低減した。これは、鋼繊維がセメントマトリクスの収縮を拘束する働きをする際、繊維量が多いほど拘束力が大きくなり、結果として収縮抑制に高い効果を発揮したためと考える。

## (3) 耐爆裂性

耐爆裂性の評価として、1110°C まで加熱した後の試験体の目視観察を実施した。これまでの検討により、PP を混入せず鋼繊維のみで補強した場合、1110°C 加熱後に爆裂破壊することがわかっている<sup>4)</sup>。そこで、耐爆裂性の評価は PP 混入ありの 2 水準のみ実施した。目視評価の結果、PFC(P)-2.0% は図-3(a) のように幅 2~3mm のひび割れが発生し、軽微な損傷が認められた。一方、PFC(P)-3.5% は図-3(b) のように幅 1mm を超えるひび割れの発生は認められず、ほぼ損傷なしと判断できた。つまり、鋼繊維増量による耐爆裂性向上への効果が確認できた。既往の研究において鋼繊維の爆裂抑制効果が報告されており<sup>5)</sup>、本結果もこれと一致するものであった。

## 4. まとめ

圧縮強度 300N/mm<sup>2</sup> 以上有する超高強度繊維補強コンクリートの鋼繊維の増量が、コンクリートの物性に及ぼす影響を評価した。その結果、鋼繊維 3.5vol.% の配合では、鋼繊維 2.0vol.% の配合に比べ曲げ強度が約 30% 増加し、自己収縮ひずみは約 30% 低減できた。さらに、鋼繊維の増量により耐爆裂性も向上することがわかった。

## 【参考文献】

- 1) 鈴木道隆ら：粒度分布のある多成分ランダム充填層の空隙率，化学工学論文集，Vol.11，No.4，pp.438-443，1985.
- 2) 河野克哉ら：世界最高強度を発現するコンクリートの開発ならびに更なる性能向上の可能性，コンクリート工学，Vol.54，No.7，pp.1-8，2016.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，2002.9
- 4) 森香奈子ら：高温爆裂を防止した圧縮強度 300N/mm<sup>2</sup> を有する超高強度繊維補強コンクリートの開発，土木学会第 72 回年次学術講演概要集，V-546，pp.1091-1092，2017.
- 5) 三井健郎ら：設計基準強度 80~200N/mm<sup>2</sup> 超高強度コンクリート柱の耐火性能に及ぼす有機繊維および鋼繊維の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.648，pp.461-468，2010.