

高温加熱を受けた圧縮強度 300N/mm²を有するコンクリート中の合成繊維の熱変化

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 小亀 大佑, 正会員 河野 克哉, 多田 克彦

1. はじめに

土木構造物の長大化や建築物の高層化に伴い超高強度コンクリートの研究開発が進み、近年は圧縮強度 450 N/mm²以上のコンクリートも開発されている。しかし、超高強度コンクリートは火災などによる高温時の爆裂抵抗性が低いと、合成繊維の少量混入などにより爆裂抑制を考慮する必要がある。このとき合成繊維は、高温時に消失し空洞を形成することで効果を発揮すると考えられている。そこで本研究では、筆者らの開発した耐爆裂仕様かつ圧縮強度 300 N/mm²の超高強度コンクリートについて²⁾、顕微鏡観察により、高温加熱後による合成繊維の変化を評価した。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

圧縮強度 300N/mm²程度の超高強度コンクリート（以下、HC-300）には、結合材（以下、B）には低熱ポルトランドセメント（以下、LC）、石英微粉末（以下、Q）およびシリカフューム（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、SP1）ならびに消泡剤（以下、DF）を用いた。また、補強繊維（以下、F）として直径 0.2mm、長さ 15mm の鋼繊維（以下、ST）ならびに爆裂防止のための直径 0.014mm、長さ 6mm のポリプロピレン繊維（以下、PP）を使用した。さらに、強度レベルの異なるコンクリートと比較するため、普通ポルトランドセメント（以下、C）および JIS R 5201 適合の標準砂（以下、JIS-S）を用いて、圧縮強度がそれぞれ 180N/mm²程度（以下、HC-180）、120N/mm²程度（以下、HC-120）のコンクリートを作製した。HC-180 および HC-120 にも高性能減水剤（以下、SP2）、DF および PP を使用した。コンクリートの配合を表-1 および表-2 に示す。

(2) 練混ぜおよび試験体の作製・養生

HC-300 の試験体作製では、オムニミキサ（容量 5L）に B, S, W, SP1 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 HC-300 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²⁾、材齢 48 時

表-1 HC-300 の配合

| 配合名 | W/B (wt.%) | 単位量 (kg/m ³) | | | F (vol.%) | | B×wt.% ^{*2} | |
|--------|---------------|--------------------------|-----------------|-----|-----------|-----|----------------------|------|
| | | W | B ^{*1} | S | ST | PP | SP1 | DF |
| HC-300 | 15 | 192 | 1282 | 934 | 2.0 | 0.2 | 2.5 | 0.02 |

*1 B=LC+Q+SF, *2 W の一部に内割置換

表-2 HC-180 および HC-120 の配合

| 配合名 | W/C (wt.%) | 単位量 (kg/m ³) | | | PP (vol.%) | C×wt.% ^{*1} | |
|--------|---------------|--------------------------|-----|-------|---------------|----------------------|------|
| | | W | C | JIS-S | | SP2 | DF |
| HC-180 | 28 | 240 | 858 | 1287 | 0.2 | 1.5 | 0.02 |
| HC-120 | 38 | 300 | 790 | 1185 | 0.2 | 1.5 | 0.02 |

*1 W の一部に内割置換

間まで封緘養生（温度 20℃）を行った試験体は、脱型後すぐに脱気吸水処理（30 分間）を実施した。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℃、48 時間保持）、2 次熱養生として加熱養生（最高温度 180℃、48 時間保持）の 2 段階の熱養生を実施した。一方、HC-180 および HC-120 の試験体作製では、モルタルミキサ（容量 5L）に NC, JIS-S, W, SP2 および DF を投入して 1.5 分間の練混ぜを行い、PP を混入してさらに 1.5 分間練り混ぜた。練り上がり後は、HC-300 同様に型枠への打込みと締固めを実施した。24 時間の封緘養生（温度 20℃）後に脱型し、水中養生（温度 20℃）を 7 日間実施した。養生終了後の各配合の圧縮強度は、HC-300 が 304N/mm²、HC-180 が 176 N/mm²、HC-120 が 117 N/mm²であった。

(3) 耐爆裂性試験方法

小型の箱型電気炉を用いて、ISO834 の加熱温度パターンを参考にして 400℃から 1110℃まで 3 時間かけて円柱試験体を加熱した。試験体は設定温度 1110℃に到達後、電気炉内から取り出して室温まで冷却した。

(4) 顕微鏡観察方法

耐爆裂性試験後の円柱試験体を長軸の中央部で切断し、その切断面を実体顕微鏡にて観察することで、PP の消失の状況、残存 PP の変色や形状変化について評価した。さらに、HC-300 については、走査電子顕微鏡（以下、SEM）による観察も実施した。

3. 実験結果

(1) 耐爆裂性試験

耐爆裂性試験後の試験体写真を図-1 に示す。目視観察の

キーワード 超高強度コンクリート, ポリプロピレン繊維, 圧縮強度, 高温加熱, 顕微鏡観察

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



HC-300 HC-180 HC-120

図-1 耐爆裂性試験後の試験体

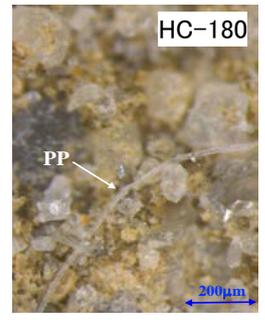
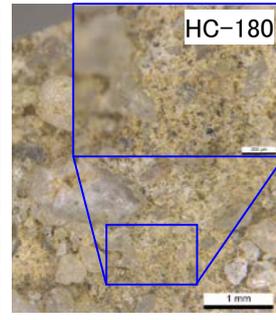
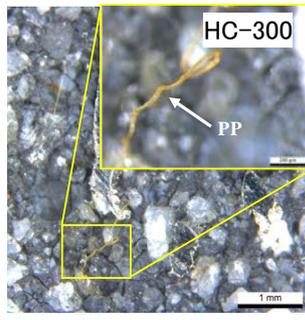


図-2 試験体側面近傍の実体顕微鏡観察
(右上に図中の口の範囲を一部拡大)

図-3 実体顕微鏡観察
(試験体中央)

結果、いずれの配合についても大きな損傷は認められず、試験体の表面に微細なひび割れが発生している程度であった。試験体の色調の変化に着目すると、HC-300は、加熱・冷却過程での鋼繊維の酸化の影響と思われる黒い汚れが表面に現れたものの、マトリクス部の明瞭な色の変化は認められなかった。一方、HC-180およびHC-120は、耐爆裂性試験後に試験体（マトリクス部）全体が灰白色に変化し、さらに部分的に赤みがかっている状況が確認できた。また、HC-300に比べ、亀甲状の微細なひび割れが多く見られた。

(2) 顕微鏡観察

耐爆裂性試験後の試験体について、実体顕微鏡による観察結果を図-2に示す。HC-300では、熱の影響を受けると考えられる試験体側面近傍においてもPPが残存しており、元々は半透明であったPPが褐色化して収縮している状態にあった。一方、HC-180およびHC-120ではPPが消失していた。そこで、この2配合については試験体中央部の観察も実施した。その結果、図-3に示すようにPPの残存が認められた。本試験で使用したPPの熱分析の結果を図-4に示す。熱重量測定（以下、TG）の結果より、窒素（以下、N₂）雰囲気では470℃以上、大気（以下、Air）雰囲気では400℃以上でほぼ全ての繊維が消失し、測定後には炭化したサンプルが少量残っている程度であった。Air雰囲気で合成繊維の消失が低温側で起こるのは合成繊維の酸化分解によるものであり、N₂雰囲気や真空中など酸素が十分に供給されない状態では繊維の分解が高温側になるといわれている³⁾。HC-300は、結合材の粉体構成を最密充填になるように設計しており、さらに蒸気養生によりセメントの水和反応、シリカフェームのポズラン反応を促進させることで養生終了後には非常に緻密なセメントマトリクスを実現している。これより、高温加熱時において、温度上昇の影響を受けやすい試験体側面近傍であっても、PPが完全分解するための酸素が不足し、残存したと推察する。一方、HC-180およびHC-120は、圧縮強度100N/mm²

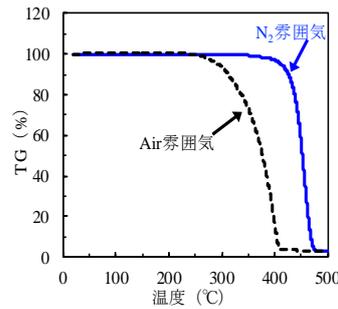


図-4 PPの熱分析結果

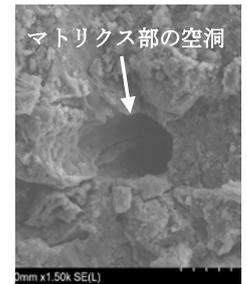


図-5 SEM観察

以上の超高強度ではあるもののHC-300に比べ硬化体の緻密性は低く、また高温加熱過程で微細なひび割れが多数生じることで、内部に酸素が供給されやすくなったと考える。

HC-300ではPPの残存が多く認められたものの、SEM観察によって図-5に示すようにPPが消失したと推察できる形跡も確認できた。以上のことから、HC-300のように組織が非常に緻密となり高温環境下でも完全にはPPが消失しない硬化体であっても、部分的なPPの消失やPPの収縮による空間形成により爆裂破壊を抑制できると考える。

4. まとめ

圧縮強度300N/mm²を有する超高強度コンクリートでは、最高温度1000℃以上の高温加熱後も内部のPPの分解・消失が進行しにくいことが顕微鏡観察より確認できた。圧縮強度100~200N/mm²レベルでは視認可能なPPが減少したことより、組織が非常に緻密な硬化体ではPPの熱変化は起こりにくいものの、PPの収縮や部分的な消失により高温加熱時の爆裂抑制に効果を発揮する可能性が示唆された。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 森香奈子ら：高温爆裂を防止した圧縮強度300N/mm²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.
- 3) 浜田文将：ポリプロピレンの熱分解，高分子化学，Vol.19, No.207, pp.402-406, 1962