

論文 圧縮強度 300N/mm² 以上を発現する超高強度繊維補強コンクリートの高温爆裂防止に関する熱養生温度と合成繊維の効果

森 香奈子*1・安田 瑛紀*2・河野 克哉*3・多田 克彦*4

要旨: 高温加熱を受けることによる爆裂対策としてポリプロピレン (PP) 繊維を混入した圧縮強度 300N/mm² 以上の超高強度繊維補強コンクリートについて、製造工程での高温熱養生および PP 繊維の直径・長さが耐爆裂性に及ぼす影響を検討した。その結果、PP 繊維の融解温度を超える温度で加熱養生を行い製造することで、その後 1000℃以上の高温環境下に置かれた際にもモルタル部のひび割れや剥落が抑制されることがわかった。細く長い PP 繊維を選択することで高い爆裂防止効果が得られることが明らかとなり、硬化体内部の顕微鏡観察によって細い PP 繊維は融解しやすいことが耐爆裂性の向上に寄与する可能性を示した。

キーワード: 超高強度, 爆裂防止, 鋼繊維, ポリプロピレン繊維, 熱養生, 顕微鏡観察

1. はじめに

超高強度コンクリートは土木構造物の長大化や建築物の高層化を可能にし、セメントマトリクスの緻密化による高耐久化も実現した優れた材料である。さらに、結合材にシリカフュームを使用して鋼繊維による補強を行うことで 200N/mm² 以上の圧縮強度を発現し、じん性や耐久性を飛躍的に向上させた超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC) が開発され、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¹⁾。しかし、超高強度コンクリートは火災などの高温加熱を受けた場合に爆裂現象を起こす危険性がある。コンクリート構造物の耐火性は、住宅や商業施設などを対象とする建築分野のみならず、内部での車両火災が危惧されるトンネル構造物など土木分野でも要求される性能である。コンクリートの爆裂防止策の一つとして合成短繊維を少量混入する方法があり、合成繊維にはポリプロピレン (以下, PP) 繊維, ポリエチレン繊維, ポリビニルアルコール繊維などを使用することで効果が得られることが報告されている²⁾。既往の研究では、設計基準強度 200N/mm² レベルの超高強度コンクリートについて耐火性が検討された事例がある³⁾。しかし近年では、450N/mm² を超えるさらに高強度のコンクリートが開発されており、その製造工程においてコンクリートへの吸水処理, 最高温度 180℃の加熱養生を行うなど従来のコンクリートと大きく異なる材料である⁴⁾。このような超高強度, 超緻密化したコンクリートに対して、従来の爆裂防止対策が有効であるかは不明である。

そこで本研究では、PP 繊維を少量混入した圧縮強度 300N/mm² 以上の超高強度繊維補強コンクリート (以下,

UFC-STPP) について、高温爆裂防止効果を検討した。さらに、コンクリート硬化体の製造工程における熱養生の最高温度が耐爆裂性に及ぼす影響について評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料, 配合および練混ぜ

(1) 使用材料

使用した材料を表-1 に示す。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) およびシリカフューム (以下, SF) を用いた。石英微粉末は、粒度分布を考慮した充填シミュレーションにより最適と推定された平均粒子径を持つ材料を選択した^{4),5)}。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 (以下, W) の一部として用いた。さらに、補強繊維 (以下, F) として土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」に適合する鋼製の短繊維 (以下, ST) ならびに爆裂防止効果が期待できる PP 繊維を使用した。使用した PP 繊維の概要を表-2 に示す。繊維径および繊維長を要因として 3 種類を検討した。

(2) 配合

UFC-STPP の配合を表-3 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⁵⁾。水結合材比 (以下, W/B) は 15%, DF 添加量は B×0.02%, 鋼繊維混入率は 2vol.% (内割) の一定とした。PP 繊維混入率は 0.1vol.% または 0.2vol.% (外割) とし, SP 添加量は PP 繊維混入なしの場合 B×1.5%, PP 繊維混入ありの場合 B×2.5% とすることにより自己充填可能な流動性を得られるよう調整した。

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 第 2 研究部 高機能コンクリートチーム 副主任研究員 修(工) (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 第 2 研究部 高機能コンクリートチーム 研究員 修(工) (正会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 第 2 研究部 高機能コンクリートチーム 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 太平洋セメント (株) 中央研究所 第 2 研究部 高機能コンクリートチーム チームリーダー (正会員)

表-1 使用材料

種類	名称	記号	成分ならびに物性
結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント	C	比表面積 3330cm ² /g, 密度 3.24g/cm ³
	石英微粉末	Q	密度 2.69g/cm ³ , 純度 99%以上
	シリカフェューム	SF	比表面積 20m ² /g, 密度 2.24g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法 0.3mm, 密度 2.61g/cm ³
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF	ポリアルキレングリコール系
繊維 (F)	鋼繊維	ST	直径 0.2mm, 長さ 15mm, 密度 7.84 g/cm ³
	ポリプロピレン繊維	PP	表-2 に概要を示す

表-2 PP 繊維の概要

記号*	直径 (μm)	長さ (mm)	密度 (g/cm ³)	アスペクト比**
D14-L4	14	4	9.1	286
D14-L6	14	6	9.1	429
D18-L6	18	6	9.1	333

*記号: D[繊維の直径(μm)]-L[繊維の長さ(mm)]

**アスペクト比: 繊維の長さ/繊維の直径

表-3 配合

配合名	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				PP* (%)	B × %**	
		W	B	S	ST		SP	DF
PP-0%	15	192	1282	934	157	0	1.5	0.02
D14-L4-0.2%	15	192	1282	934	157	0.2	2.5	0.02
D14-L6-0.1%	15	192	1282	934	157	0.1	2.5	0.02
D14-L6-0.2%	15	192	1282	934	157	0.2	2.5	0.02
D18-L6-0.1%	15	192	1282	934	157	0.1	2.5	0.02
D18-L6-0.2%	15	192	1282	934	157	0.2	2.5	0.02

*0.1%(0.91kg/m³)または 0.2%(1.82kg/m³)を外割添加, **Wの一部に内割置換

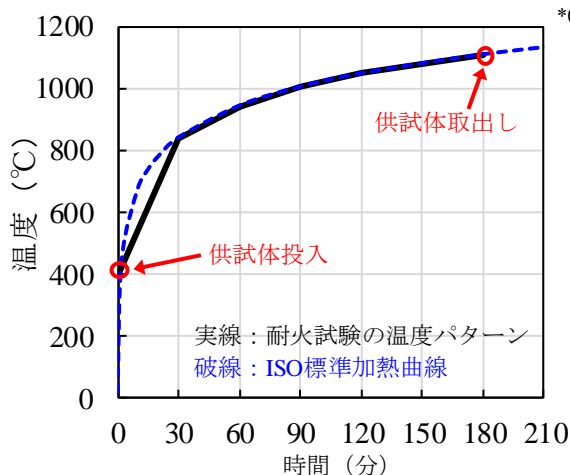


図-1 耐火試験の加熱温度パターン

(3) 練混ぜ

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, 鋼繊維および PP 繊維を混入してさらに 2 分間練り混ぜた。練り上がった UFC-STPP を型枠に打ち込み, テーブル型の外部振動機にて締固めを実施した。

2.2 吸水処理および熱養生

(1) 吸水処理

型枠に打ち込んだ後, 材齢 48 時間まで封緘養生 (温度 20°C) を行った供試体は, 筆者らの開発した方法を参考として, 脱型後すぐにアクリル製密閉容器と真空ポンプを用いて脱気吸水処理 (30 分間) を行った⁴⁾。

(2) 熱養生

吸水処理後の供試体は, 1 次熱養生として蒸気養生 (昇温速度 15°C/hr, 最高温度 90°C, 最高温度 48 時間保持), 2 次熱養生として加熱養生の 2 段階の熱養生を実施した。加熱養生は最高温度を 180°C または 155°C の 2 パターンとした。ただし, いずれの最高温度の場合も昇温速度は 60°C/hr, 最高温度は 48 時間保持の一定条件とした。

2.3 硬化体の試験方法

(1) 圧縮強度試験

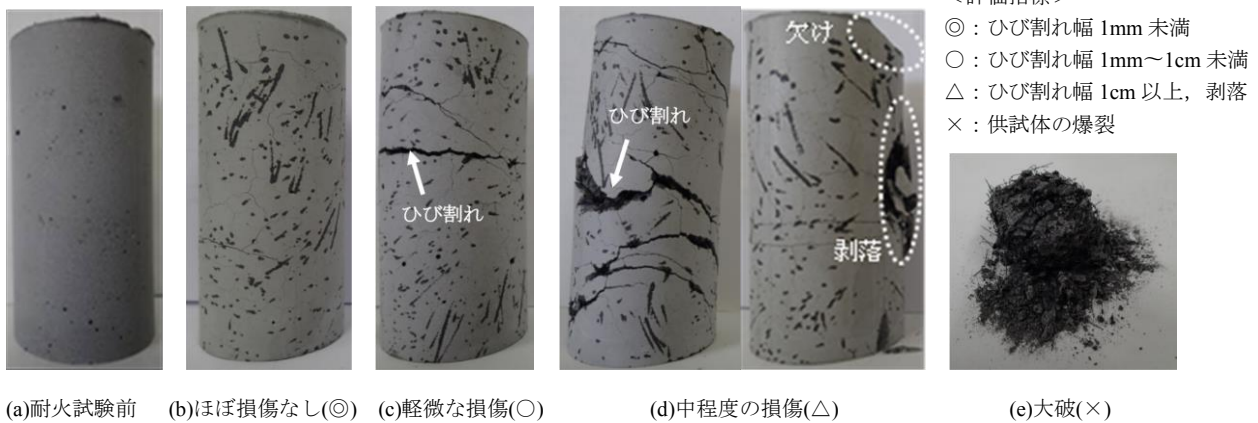
2 段階の熱養生を完了した供試体 (φ5×10cm) は, JSCE-G505-1999 に準じて圧縮強度を測定した。

(2) 耐火試験

耐爆裂性の評価は, ISO834-1:1999 (E) の加熱温度パターンを参考に, 図-1 に示すように 400°C から 1110°C まで 3 時間かけて供試体 (φ5×10cm) を箱型電気炉内で加熱することで実施した。加熱終了後の供試体は, 目視評価による外観観察および質量減少率の測定を行った。目視評価はモルタルの剥落や剥離の有無, 表面に発生したひび割れ幅などから 4 段階で評価した。評価基準を図-2 に示す。

(3) 顕微鏡観察

1 次熱養生 (蒸気養生), 2 次熱養生 (加熱養生) および耐火試験の各高温環境が PP 繊維に及ぼす影響を評価するため, 各熱養生および耐火試験終了後の供試体内部の観察を実施した。観察には実体顕微鏡および走査型電



(a)耐火試験前 (b)ほぼ損傷なし(◎) (c)軽微な損傷(○) (d)中程度の損傷(△) (e)大破(×)

(※供試体表面の黒色の点・線は、鋼繊維の酸化によるもの)

図-2 耐火試験の目視評価基準

子顕微鏡（以下、SEM）を使用し、熱の影響を受けやすいと思われる供試体表面から数 mm の範囲を観察した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状と圧縮強度

フレッシュ性状および圧縮強度の結果を表-4に示す。フレッシュ性状は、JIS R 5201 に準拠した落下振動を与えない場合の 180 秒経過後のフロー、JIS A 1128 に準拠したエアメーター（圧力法）による空気量測定の結果により評価した。フローは PP 繊維混入により低下し、その傾向は PP 繊維の混入率および寸法による差が認められた。繊維長 4mm の場合、混入率 0.2 vol.% としても 250mm 以上のフローとなった。一方、繊維長 6mm の PP 繊維を混入率 0.2vol.% で使用した場合、フローは 240mm 以下となった。しかし、いずれの水準においても型枠への流し込み成型が可能な流動性が確保できた。

2 段階の加熱養生終了後の圧縮強度は、180℃で加熱養生した水準では全て 300N/mm² 以上となった。一方、PP 繊維を混入し 155℃で養生した水準では 280N/mm² 程度となり、加熱養生温度が低い場合には圧縮強度が低下することがわかった。180℃加熱養生の結果から、PP 繊維の形状は圧縮強度に影響しないことがわかった。しかし、PP 繊維混入率が高い場合には圧縮強度が約 1 割低下した。これは、PP 繊維の影響だけではなく、練混ぜ中の巻き込みによる空気量増加も影響したと考える。

3.2 耐爆裂性

(1) 加熱養生温度の影響

直径 14μm、長さ 6mm の PP 繊維 (D14-L6) を 0.2vol.% 混入し、加熱養生温度を要因とした 2 水準の耐火試験結果について PP 繊維 0% と比較して表-5 に示す。鋼繊維のみで補強し PP 繊維を混入していない供試体は、耐火試験中に爆裂破壊し円柱形を保っていなかった。PP 繊維を混入した供試体は大破しておらず、PP 繊維混入による爆裂防止

表-4 フレッシュ性状および圧縮強度

配合名	フロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	
			180℃	155℃*
PP-0%	273	3.2	335	319
D14-L4-0.2%	260	5.3	301	-
D14-L6-0.1%	262	3.2	337	-
D14-L6-0.2%	228	6.4	304	282
D18-L6-0.1%	269	4.7	331	-
D18-L6-0.2%	233	5.3	308	-

*155℃加熱養生は PP-0% および D14-L6-0.2% のみ実施

表-5 耐火試験結果（加熱養生温度の影響）

配合名	目視評価		質量減少率(%)*	
	180℃	155℃	180℃	155℃
PP-0%	×	×	-	-
D14-L6-0.2%	◎	△	5.4	7.5

*PP-0%の供試体は爆裂したため質量減少率の測定なし

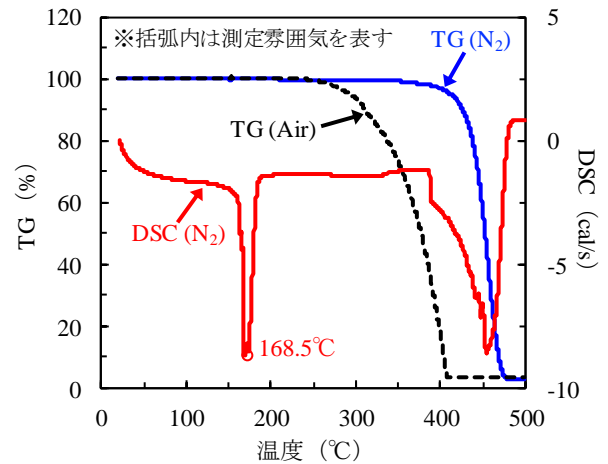
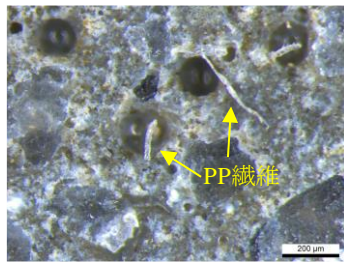
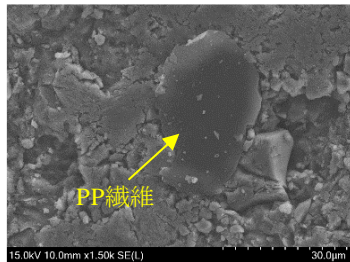


図-3 PP (D14-L6) の熱分析結果

効果が認められた。耐火試験終了後に D14-L6-0.2% の供試体を目視観察したところ 180℃で加熱養生した水準は表面に微細なひび割れが認められる程度で、損傷がほとんど

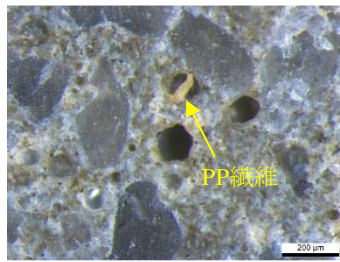


(a) 実体顕微鏡像

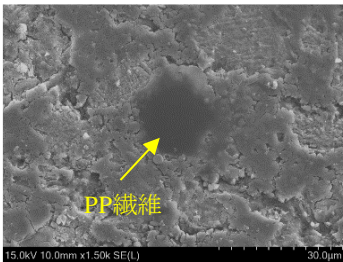


(b) SEMの2次電子像

図-4 90°C蒸気養生後のD14-L6

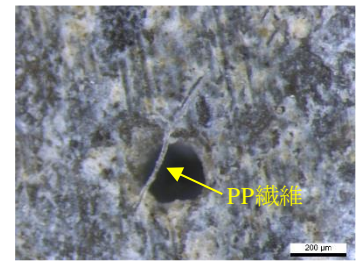


(a) 実体顕微鏡像

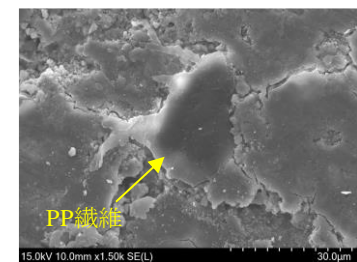


(b) SEMの2次電子像

図-5 180°C加熱養生後のD14-L6



(a) 実体顕微鏡像

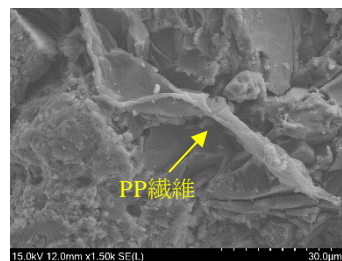


(b) SEMの2次電子像

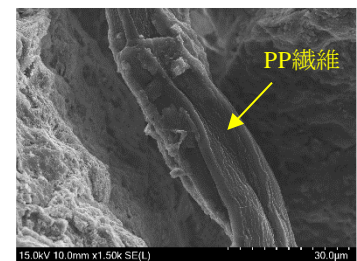
図-6 155°C加熱養生後のD14-L6



(a) 実体顕微鏡像(180°C加熱養生)



(b) SEMの2次電子像(180°C加熱養生)



(c) SEMの2次電子像(155°C加熱養生)

図-7 耐火試験後のD14-L6

どなかった。しかし、155℃で加熱養生した水準は表面からモルタルの剥落が起こり、180℃加熱養生の場合に比べて明らかに耐爆裂性が低下していることがわかった。

図-3にD14-L6の熱重量測定(以下、TG)および示差走査熱量測定(以下、DSC)の結果を示す。DSCの結果より、D14-L6の融解は150℃付近で開始し、融解温度のピークは168.5℃であることがわかった。このことから、155℃で加熱養生した場合はPP繊維の融解はほとんど起こっておらず、180℃で加熱養生した場合はPP繊維の融解が起こっていると考えられる。90℃蒸気養生後および加熱養生後に供試体内部のPP繊維を顕微鏡観察した結果を図-4～図-6に示す。実体顕微鏡での観察結果より、155℃加熱養生の場合、90℃蒸気養生後と比べて明確な差が認められなかった。しかし180℃加熱養生の場合、半透明のPP繊維が褐色化して収縮している状態が認められた。さらにSEMの2次電子像より、155℃加熱養生の場合はPP繊維とモルタル部の間に隙間が認められた。一方、180℃加熱養生の場合はPP繊維と周囲のモルタル部との接着が認められた。これらの観察結果から、PP繊維の融解温度を超える最高温度で加熱養生することにより、耐火試験前の養生工程においてPP繊維の融解が進

行したと判断でき、このことが表-5に示したように加熱養生温度が耐爆裂性に影響したと考える。耐火試験後の供試体内部を顕微鏡観察したところ、図-7に示すようにPP繊維の残存が認められ、UFC-STPP中の全てのPP繊維が消失したわけではないことがわかった。圧縮強度70N/mm²程度の高強度コンクリートの高温爆裂防止に関する既往の研究では、500℃以下の加熱でコンクリート内部のPP繊維が消失したと報告されている⁶⁾⁷⁾。本試験で使用するPP繊維のTG測定では、図-3に示したように窒素(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雰囲気において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ためであり、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⁸⁾⁹⁾。UFC-STPPは、結合材にシリカフュームや高純度の石英微粉末を使用して粒子間空隙を最小化することにより非常に緻密なセメントマトリクスを実現しているため、高温加熱時にPP繊維が完全分解するための酸素が不足していたと考える。すなわち、UFC-STPP内部でのPP繊維の熱変化は、UFC-

STPP に比べて強度レベルが低く、空隙の多いコンクリートとは異なる可能性が示唆された。以上のように、本試験では耐火試験中に全ての PP 繊維が消失することはなかった。しかしながら、図-7 に示した SEM の 2 次電子像の比較より、155℃加熱養生に比べ 180℃加熱養生では残存 PP 繊維の収縮が大きく、PP 繊維が細くなっている状態が確認できた。このことから、PP 繊維の融解温度以上での加熱養生が、コンクリートの耐爆裂性向上に寄与する可能性が示唆された。

コンクリートの爆裂メカニズムに関する水蒸気圧説では、コンクリートの含水率が高いほど爆裂が発生しやすいとされている。このことから、UFC-STPP を 100℃以上の高温で加熱養生することによりコンクリート内部の水分が蒸発し、耐爆裂性向上に寄与していると考えた。そこで、PP-0%および D14-L6-0.2%の水準について、加熱養生工程における供試体の質量減少率の値を表-6 に示す。PP 繊維を混入しない場合、加熱養生による質量減少率は温度の影響を受けず同等であった。PP 繊維混入時の質量減少率は、155℃加熱養生では 1.6%、180℃加熱養生では 3.2%と温度が高いほど上昇した。PP 繊維混入時に質量減少率が大きくなったのは、PP 繊維の付着水分率 (30~40%) の影響と推察するものの、加熱養生の最高温度が高いほど質量減少率が大きくなる理由については現在のところ明らかにできていない。しかし、加熱養生温度が高いほど、UFC-STPP 製造段階において、火災時の爆裂や欠陥の原因となる硬化体内部の水分を低減できる可能性が明らかとなった。

以上の結果より、UFC-STPP を 180℃で加熱養生することにより 300N/mm² 以上の高い圧縮強度の発現のみでなく、耐爆裂性を向上させる効果もあることがわかった。

(2) PP 繊維径および長さの影響

PP 繊維の混入率、繊維径および繊維長を要因とし、180℃で加熱養生した 6 水準の耐火試験結果を PP 繊維混入なしと比較して表-7 に示す。PP 繊維混入率 0.2vol.% の場合、繊維長 6mm の D14-L6 および D18-L6 は繊維径に関係なく高い耐爆裂性を示し、目視評価による明確な違いは認められなかった。しかし、繊維長 4mm の短い D14-L4 では、図-2 (d) に示した中程度の損傷を受けた左側の写真のように、円柱供試体の軸が傾くほどの幅 1cm 以上の

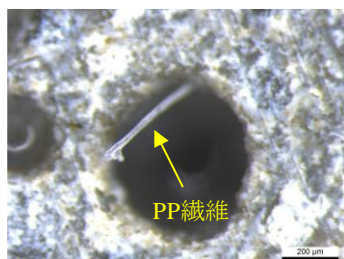
ひび割れが発生し、明らかに耐爆裂性は低下した。これは、PP 繊維の融解で発生する空隙の効果により加熱時の蒸気圧が逸散されることで耐爆裂性が向上すると考えた場合、繊維が長い方が供試体表面までの空隙ネットワークが形成されやすくなるためと推測する。繊維長 5~20mm の PP 繊維を使用した既往の研究において長い繊維が耐爆裂性に有効であることが報告されている¹⁰⁾。本試験結果は既往の結果と一致するものであり、さらに繊維長 4mm と 6mm のわずかな差でも繊維長の効果が大きいことを明らかにした。PP 混入率 0.1vol.% の場合、PP 繊維の直径による耐爆裂性の差が認められ、直径 14μm の細かい PP 繊維を混入した供試体はひび割れ幅 1mm 程度の軽微な損傷であった。しかし、直径 18μm の太い PP 繊維を混入した供試体では一部でモルタルの剥落が起こった。直径 18μm と 48μm の PP 繊維の耐爆裂性を比較した既往の研究において細かい繊維が有効であることが報告されている¹⁰⁾。これは、繊維長および繊維混入率が等しい場合、繊維径が小さいほど繊維本数が多くなり蒸気圧の逸散ルートが増える効果によるものと考えられる。また、アスペクト比が 69~855 の PP 繊維を用いて、繊維のアスペクト比とコンクリートの爆裂深さの関係を評価した既往の研究では、アスペクト比 400~600 の PP 繊維が爆裂の抑制に効果的であると報告している¹¹⁾。これより、アスペクト比

表-6 加熱養生工程での供試体の質量減少率

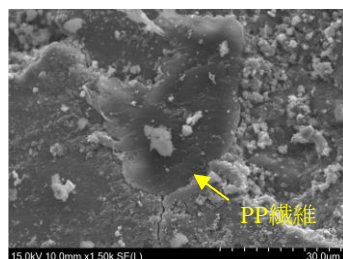
配合名	質量減少率(%)	
	180℃加熱養生	155℃加熱養生
PP-0%	0.7	0.6
D14-L6-0.2%	3.2	1.6

表-7 耐火試験結果 (PP 繊維径・長さの影響)

配合名	目視評価	質量減少率 (%)
PP-0%	×	-
D14-L4-0.2%	△	5.9
D14-L6-0.1%	○	5.5
D14-L6-0.2%	◎	5.4
D18-L6-0.1%	△	7.1
D18-L6-0.2%	◎	5.8



(a) 実体顕微鏡像



(b) SEM の 2 次電子像

図-8 180℃加熱養生後の D18-L6

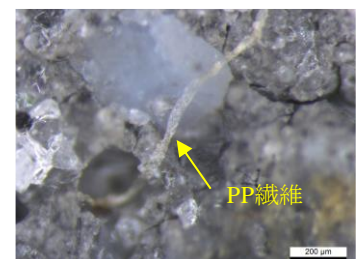


図-9 耐火試験後の D18-L6 (実体顕微鏡像)

が 429 である D14-L6 は爆裂防止に有効な形状を持つ繊維であったと考える。

D18-L6 を適用した供試体内部の 180℃加熱養生後の観察結果を図-8 に、耐火試験後の観察結果を図-9 に示す。図-5 に示したように、D14-L6 は 180℃加熱養生後に繊維の変色や収縮、周囲のモルタルとの接着が見られ、加熱養生過程で PP 繊維の融解が進行していることが示唆された。しかし、D18-L6 は 180℃加熱養生後にも繊維の変色や収縮が認められず、SEM 観察では周囲のモルタルとの間に隙間が生じ接着していないことがわかった。耐火試験後の実体顕微鏡による観察から、供試体内部に残っていた D14-L6 は褐色に変色していたのに対し、D18-L6 は変色していないものが残っていた。以上より、繊維径の小さい D14-L6 の方が熱の影響により変化しやすいことが、UFC-STPP の耐爆裂性向上に寄与したと考える。

4. まとめ

本研究では、爆裂防止のためポリプロピレン (PP) 繊維を混入した圧縮強度 300N/mm² 以上を発現する超高強度繊維補強コンクリート (UFC-STPP) について、使用する PP 繊維の形状、UFC-STPP の製造工程における加熱養生温度が耐爆裂性に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 鋼繊維を 2vol.%, PP 繊維を 0.1vol.% または 0.2vol.% 混入した UFC-STPP は流し込み成型可能なフレッシュ性状を示し、180℃加熱養生後の圧縮強度は 300N/mm² 以上となった。
- (2) PP 繊維を混入せず鋼繊維のみで補強した UFC-STPP は、最高温度 1110℃まで 3 時間かけて加熱する過程で爆裂破壊した。PP 繊維を混入した硬化体は 3 時間加熱後も爆裂しておらず、PP 繊維の少量混入による爆裂防止効果が明らかとなった。
- (3) UFC-STPP を PP 繊維の融解温度を超える温度で加熱養生して製造することにより、耐爆裂性向上の効果が得られることがわかった。加熱養生後の硬化体内部を顕微鏡で観察した結果から、融解温度を超える高い温度での養生により PP の融解が進行することで耐爆裂性が向上する可能性が示唆された。
- (4) 直径 14μm または 18 μm、長さ 4mm または 6mm の異なるサイズの PP 繊維について耐爆裂性を比較した結果、直径 14μm かつ長さ 6mm の繊維の適用が耐爆裂性の向上に有効であることがわかった。これは、繊維が長いほど硬化体内部の蒸気を逸散させるネットワークが形成されやすく、繊維径が小さいほど同一混入率における繊維本数が増加したためと考える。また、繊維径が小さいほど融解が進んでい

ることが顕微鏡観察から確認できた。

謝辞

本研究の実施にあたり、ダイワボウポリテック株式会社からポリプロピレン繊維を提供いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 北海道土木技術会 コンクリート研究委員会：超高強度繊維補強コンクリートに関する小委員会報告書，2014
- 2) 日本コンクリート工学会：高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書，2017.9
- 3) 三井健郎，米澤敏男，小島正朗，三橋博三：設計基準強度 80~200N/mm² 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.461-468，2010.2
- 4) 河野克哉，森香奈子，多田克彦，田中敏嗣：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.702-709，2016.7
- 5) 鈴木道隆，市場久貴，長谷川勇，大島敏男：粒度分布のある多成分系ランダム充填層の空間率，化学工学論文集，Vol.11，No.4，pp.438-443，1985
- 6) 高野智宏，堀口敬，佐伯昇：高温加熱を受ける高強度繊維補強コンクリートの耐火性能について，土木学会論文集 E，Vol.63，No.3，pp.424-436，2007.7
- 7) 小澤満津雄，Dantas Rafael，森本博昭：高温環境下における繊維混入高強度コンクリートの通気率変化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1199-1204，2011.6
- 8) 株式会社リガク 分析装置測定データ集 TG-DTA 測定データ集：<https://www.rigaku.com/ja/technique/d07> (閲覧日：2018 年 1 月 5 日)
- 9) 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
- 10) 百瀬晴基，桜本文敏，柳田克巳：ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度 150N/mm² の超高強度コンクリートの耐火性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.995-1000，2003.6
- 11) 川西貴士，近松竜一，吉田公宏，屋代勉：耐火型高機能 SFRC セグメントの開発，大林組技術研究所報，No.74，2010.12