

論文 繊維長さの短いポリプロピレン繊維と鋼繊維の混入率が超高強度コンクリートの爆裂抑制に与える影響に関する研究

峯 竜一郎^{*1}・松田 拓^{*2}・若林 信太郎^{*3}・横山 徹^{*4}

要旨：150N/mm²級超高強度コンクリートの高温環境下における爆裂の抑制を目的とし、長さが2mmのポリプロピレン繊維と鋼繊維の混入率および単位粗骨材かさ容積の異なる試料を作製し、フレッシュ性状、圧縮強度、爆裂抑制性能を確認した。その結果、流動性は、それぞれの繊維の混入率が増加すると低下した。圧縮強度は、それぞれの繊維の混入により若干低下する傾向にあった。爆裂抑制性能の確認は、鉄筋による拘束がある角柱試験体を用いて実施した。ポリプロピレン繊維混入率を増加させることで爆裂抑制性能の向上が認められたが、単位粗骨材かさ容積の違いによる爆裂性状の違いが見られた。

キーワード：超高強度コンクリート、単位粗骨材かさ容積、爆裂、ポリプロピレン繊維、鋼繊維

1. はじめに

圧縮強度が60N/mm²を超える高強度コンクリートは高温環境下において爆裂現象が発生することが知られている¹⁾。近年、高強度コンクリートの爆裂抑制対策として、ポリプロピレン繊維（以下、PP繊維と略記）をコンクリートに混入する技術が実用化されている²⁾。また、PP繊維に加え、鋼繊維を混入することで、さらに爆裂抑制性能を向上できるといった報告³⁾もある。百瀬ら⁴⁾は、PP繊維の長さや径が爆裂抑制性能に与える影響を検証しており、PP繊維が長く、径の細い方が爆裂抑制性能向上に寄与すると報告している。既往の研究⁵⁾においては、長さが10mm以上のPP繊維についての報告は多くあるが、長さが10mm未満のPP繊維を用いた報告は少ない。

一方で、爆裂試験は供試体の寸法や形状の影響を受ける⁶⁾とされている。円柱や角柱の小型試験体レベルの爆裂試験においては、鉄筋拘束の有る条件とすることで、実大部材の爆裂現象を再現できているとは言い難いが、鉄筋拘束なしの条件と比べ、爆裂が発生しやすいとの報告がある⁷⁾。

本実験では、繊維長さが10mm未満の範囲として、長さ2mmのPP繊維に着目し⁸⁾、PP繊維と鋼繊維の混入率の違いおよび単位粗骨材かさ容積の違いが超高強度コンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度および爆裂抑制性能に与える影響を確認した。爆裂試験については、鉄筋拘束のある角柱試験体を用いて実験を実施した。

2. 使用材料および調査条件

実験で使用したコンクリートの材料を表-1に示す。結合材(B)として、中庸熟ポルトランドセメント(MC)

と高強度用混和材(AD:スラグせっこう系混和材とシリカフュームが質量比で7:3)を用いた。膨張材(EX)はエトリンガイト-石灰複合系を用いており、細骨材(S)は硬質砂岩砕砂、粗骨材(G)は硬質砂岩碎石を用いた。化学混和剤は高性能減水剤(SP)とし、収縮低減タイプを用いた。

本実験で使用したPP繊維と鋼繊維の物性値を表-2に示す。PP繊維は繊維長さ2mm、繊維径が18μm、熔融温度が約160℃のものを使用した。鋼繊維は繊維長さが30mm、フック型の形状のものを使用した。

調査条件と実験の要因と水準およびフレッシュ試験結果を表-3に示す。水結合材比(W/B)は17.0%とした。膨張材は細骨材と体積置換した。また、PP繊維と鋼繊維は調合の外割で混入した。なお、各実験シリーズで材

表-1 使用材料

名称	種類	物性値	記号
セメント	中庸熟ポルトランドセメント	密度：3.21g/cm ³ 比表面積：3220g/cm ²	MC
混和材	高強度用混和材*	密度：2.64g/cm ³	AD
膨張材	エトリンガイト-石灰複合系	密度：3.05g/cm ³	EX
水	上水道水	-	W
細骨材	栃木県鹿沼市産硬質砂岩砕砂	表乾密度：2.62g/cm ³ 吸水率：1.08%	S
粗骨材	栃木県鹿沼市産硬質砂岩碎石	表乾密度：2.64g/cm ³ 吸水率：0.62% 実績率：62.1%	G
化学混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系(収縮低減型)	SP

*スラグせっこう系混和材：シリカフューム=7:3(質量比)

表-2 繊維の物性値

名称	繊維長さ(mm)	繊維径(μm)	密度(g/cm ³)	熔融温度(°C)	記号
鋼繊維	30	600	7.85	-	sf
ポリプロピレン繊維	2	18	0.91	160	PP

*1 三井住友建設 技術本部 技術研究所 修士(工学) (正会員)

*2 三井住友建設 技術本部 技術研究所 博士(工学) (正会員)

*3 三井住友建設 建築本部 建築技術部 博士(工学) (正会員)

*4 三井住友建設 建築本部 建築技術部

表-3 調合条件と実験の要因と水準およびフレッシュ試験結果

実験シリーズ	NO.	記号	要因	W/B (%)	実験水準			調合条件								フレッシュ試験結果		
					単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	鋼繊維混入率 (Vol%)	PP繊維混入率 (Vol%)	単位量 (kg/m ³)								SP添加率 (B×%)	スランプフロー (cm)	
								W	B	MC	AD	EX	S	G	sf			PP
I	1	G0.55-sf0-PP0	繊維混入率	17.0	0.55	0.00	0.00	155	912	737	175	10	491	893	0.0	0	1.55	77.1
	2	G0.55-sf0-PP3				0.00	0.33	155	912	737	175	10	491	893	0.0	3	1.85	67.5
	3	G0.55-sf1.0-PP2				1.00	0.22	155	912	737	175	10	491	893	78.5	2	1.85	64.0
	4	G0.55-sf1.0-PP1				1.00	0.11	155	912	737	175	10	491	893	78.5	1	1.85	67.4
	5	G0.55-sf0.75-PP2				0.75	0.22	155	912	737	175	10	491	893	58.9	2	1.85	69.6
	6	G0.55-sf0.5-PP2				0.50	0.22	155	912	737	175	10	491	893	39.3	2	1.75	70.9
	7	G0.55-sf0.5-PP1				0.50	0.11	155	912	737	175	10	491	893	39.3	1	1.85	73.6
II	8	G0.45-sf0.0-PP0	単位粗骨材かさ容積	0.45	0.00	0.00	155	912	737	175	10	653	731	0.0	0	1.41	66.8	
	9	G0.45-sf1.0-PP2			1.00	0.22	155	912	737	175	10	653	731	78.5	2	1.71	62.5	
	10	G0.35-sf0-PP0	0.35	0.00	0.00	155	912	737	175	10	814	568	0.0	0	1.41	72.4		
	11	G0.35-sf1.0-PP2		1.00	0.22	155	912	737	175	10	814	568	78.5	2	1.56	63.1		

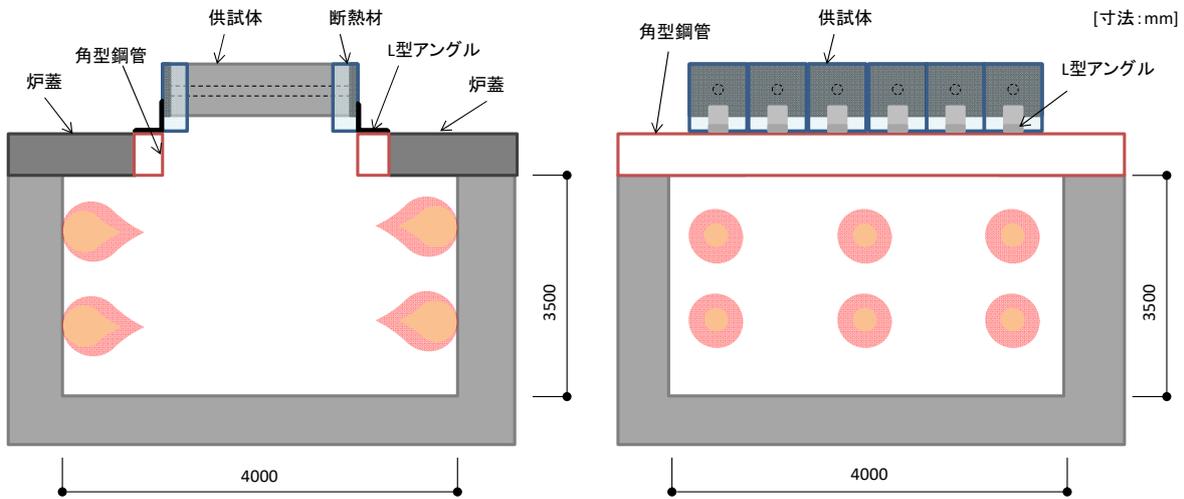


図-1 耐火炉と供試体設置状況

料はロットの異なるものを使用した。目標スランプフローは設定せず、繊維を混入した試料については、繊維混入によるロスを見込み、繊維を混入していない試料よりもSP添加率を増加させた。また、目標空気量は2.0%とした。

実験は次に示す2つの要因の影響を確認した。一つ目は、PP繊維と鋼繊維の混入率(単位粗骨材かさ容積0.55m³/m³)、二つ目は、単位粗骨材かさ容積の違い(単位粗骨材かさ容積0.45m³/m³および0.35m³/m³)とした。

3. 実験概要

3.1 爆裂試験に使用した耐火炉

爆裂試験に使用した水平耐火試験炉(炉内寸法:幅×奥行×高さ=4000×4000×3500mm)と供試体の設置状況を図-1に示す。耐火炉は炉壁から水平方向に火炎が出るものであり、熱源は都市ガスとした。耐火炉の炉蓋の一部を試験治具に置き換えることで、試験体を設置した。

3.2 加熱曲線および加熱時間

爆裂試験時の炉内温度は、JIS A 1304に規定されてい

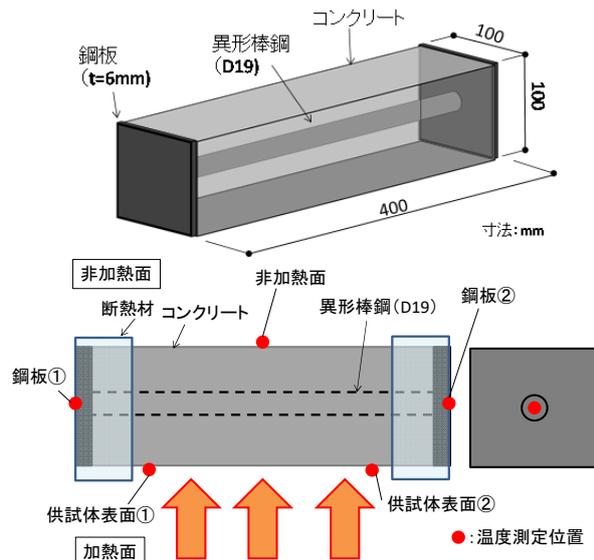


図-2 爆裂試験の供試体と温度測定位置

る標準加熱曲線Aに準拠するよう制御した。既往の文献⁹⁾によると、加熱開始後30分程度までに大きな爆裂は終了することが多いとされていることから、加熱時間は着火から30分間とした。試験終了後は、自然放冷で雰囲気

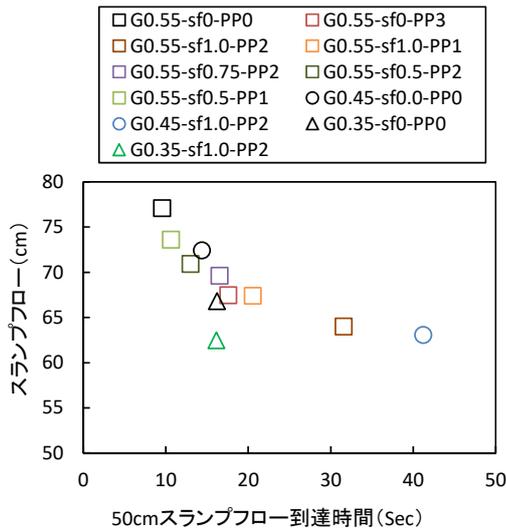


図-3 50cm スランプフロー到達時間とスランプフローの関係

温度になるまで存置した。

3.3 供試体

爆裂試験に使用した供試体の詳細を図-2 に示す。供試体の形状は角柱 (100×100×400mm) とし、加熱面は1面とした。D19の異形棒鋼の両端に厚さ6mmの鋼板を溶接した拘束治具を配置し、コンクリートを打設し、供試体を製作した。コンクリートのかぶり厚さは約40mmとした。また、試験体の両端にある鋼板が加熱の影響を受けないように、両端から50mmの範囲を厚さ25mm、耐熱温度1200℃以上の無機質繊維で作られた耐火ブランケットで被覆した。そのため、試験における有効加熱面は100×300mmの範囲であった。爆裂試験時の温度測定は図-2 に示す位置で実施した。測定箇所は、加熱面のコンクリート表層付近、非加熱面のコンクリート表層付近および拘束鉄筋の温度確認のため、鉄筋と鋼板が溶接されている部分とした。なお、加熱面は打込み面に対して側面側とし、1水準につき2体で試験を実施した。

3.4 供試体の養生条件

コンクリートの爆裂現象の要因として、含水率の影響が大きい⁹⁾と言われている。そこで、繊維の混入率が要因の場合は、試験材齢まで20℃封かん養生としたもの(20℃)と、材齢7日まで20℃封かん養生を行い、その後気中養生とし試験材齢まで養生したもの(7dry)とした。爆裂試験の材齢はそれぞれ、135日と141日とした。

単位粗骨材かさ容積を要因としたものは、材齢7日まで20℃封かん養生を行い、その後、気中養生とし試験材齢まで養生(7dry)した。爆裂試験の材齢は91日とした。

3.5 爆裂試験結果の評価方法

爆裂試験結果の評価は既往の研究¹⁾を参考に、有効加熱面(100×300mm)を縦横それぞれ20mmのメッシュで分割し、その交点(全96点)における深さ方向を測定



a) G0.55-sf0-PP3
SP : B×1.85%
スランプフロー値 : 67.5cm
b) G0.55-sf1.0-PP2
SP : B×1.85%
スランプフロー値 : 64.0cm

図-4 フレッシュ性状の一例

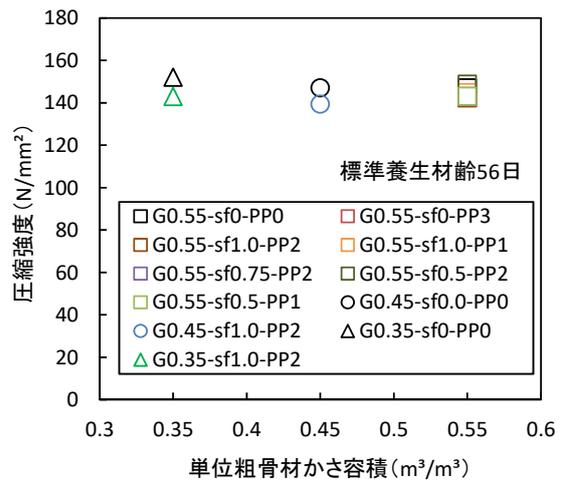


図-5 単位粗骨材かさ容積と圧縮強度の関係

し、(1)最大爆裂深さ(2)平均爆裂深さ(3)爆裂面積率をそれぞれ測定した。測定にはノギスを使用した。

4 実験結果

4.1 フレッシュ試験結果

50cm スランプフロー到達時間とスランプフローの関係を図-3 に示す。いずれの単位粗骨材かさ容積の条件においても、PP 繊維と鋼繊維を混入することで、SP 添加量が増加した。また、PP 繊維と鋼繊維の混入率の増加に伴い、スランプフローは小さくなり、50cm スランプフロー到達時間が長くなる傾向が見られた。フレッシュ性状の一例として、G0.55-sf0-PP3 と G0.55-sf1.0-PP2 のスランプフロー試験後の状況を図-4 に示す。SP 添加量は同一であったが、スランプフローは G0.55-sf0-PP3 の方が大きくなった。また、50cm スランプフロー到達時間は G0.55-sf0-PP3 の方が約15秒早く、PP 繊維のみを0.33vol%混入した場合の方が、鋼繊維とPP 繊維を併用し、それぞれの混入率が1.0vol%、0.22vol%の場合に比べ、流動性が高くなる傾向が見られた。

4.2 圧縮強度試験結果

単位粗骨材かさ容積と標準養生材齢56日の圧縮強度の関係を図-5 に示す。繊維を混入していない試料に着目すると、単位粗骨材かさ容積の違いによる圧縮強度の

違いは見られず、147～152N/mm²の範囲だった。PP 繊維と鋼繊維を混入した試料の圧縮強度は 139～152N/mm²の範囲となった。繊維を混入していない試料と PP 繊維と鋼繊維を混入した試料の圧縮強度を比べると、同等もしくは若干低下する傾向が見られた。

4.3 爆裂試験結果

爆裂試験時の温度測定結果の一例を図-6 に示す。炉内温度は、JIS A 1304 に示される標準加熱曲線と比べ、加熱開始から 10 分までの範囲においては若干高くなっているが、同様な傾向となった。また、供試体表面の温度(受熱面)は炉内温度に比べ約 200℃程度低くなったが、最高温度は約 600℃まで上昇した。爆裂が発生したと思われる爆裂音は加熱開始から 13 分を過ぎた頃(受熱面温度が約 400℃)から発生し、加熱終了までの間に断続的に確認された。爆裂試験結果を表-4 に示す。繊維混入率が要因のものに着目すると、養生条件が 20℃の場合は、爆裂した試料は、繊維を混入していない試料(G0.55-sf0-PP0)と鋼繊維混入率が 1vol%、PP 繊維混入率が 0.11vol%の試料(G0.55-sf1.0-PP1)の 2 水準だった。養生条件が 7dry の場合は、爆裂した試料は繊維を混入していない試料(G0.55-sf0-PP0)と鋼繊維混入率が 1vol%、PP 繊維混入率が 0.11vol%の試料(G0.55-sf1.0-PP1)および鋼繊維混入率が 0.5vol%、PP 繊維混入率が 0.11vol%の試料(G0.55-sf0.5-PP1)の 3 水準だった。

単位粗骨材かさ容積が要因のものに着目すると、単位粗骨材かさ容積を 0.45m³/m³とした場合、繊維を混入していない試料(G0.45-sf0-PP0)が爆裂し、単位粗骨材かさ容積を 0.35m³/m³とした場合、繊維を混入していない試料(G0.35-sf0-PP0)と鋼繊維混入率が 1vol%、PP 繊維混入率が 0.22vol%の試料(G0.35-sf1.0-PP2)が爆裂した。本実験の範囲内において、コンクリート中に PP 繊維のみを混入した場合と PP 繊維と鋼繊維を混入する場合のどちらも爆裂抑制効果が確認された。爆裂試験後の試験体

の状況を図-7 に示す。単位粗骨材かさ容積の違いによらず、繊維を混入していないものは加熱面が全体的に爆裂し、粗骨材が露出していた。鋼繊維を混入せず、PP 繊維のみを 0.33vol%混入した G0.55-sf0-PP3 は、加熱面に亀甲状のクラックが確認されたが、爆裂の発生はなかった。鋼繊維を混入した G0.55-sf1.0-PP1 と G0.35-sf1.0-PP2 については、爆裂が発生し表層のコンクリートが剥離していたが、鋼繊維を混入した影響で剥落までは至らなかったことが確認された。特に G0.35-sf1.0-PP2 はその影響が顕著であった。爆裂試験後の試料の破面を光学顕微鏡で観察した結果を図-8 に示す。粗骨材とセメントペーストの界面にクラックが散見された。高温環境下におけるセメントペーストと骨材の挙動の違いにより発生していると考えられる¹⁾。

爆裂試験時の含水率と圧縮強度の関係を図-9 に示す。養生条件が 20℃の G0.55 を見ると、含水率は 3.26～3.58%の範囲にあり、圧縮強度は、153～167N/mm²の範囲であった。養生条件が 7dry の G0.35、G0.45 を見ると、含水率は 3.14～3.27%の範囲にあり、圧縮強度は 145～161N/mm²の範囲であった。どちらも同様であり、養生条件の違いによる含水率と圧縮強度の大きな違いは見られなかった。

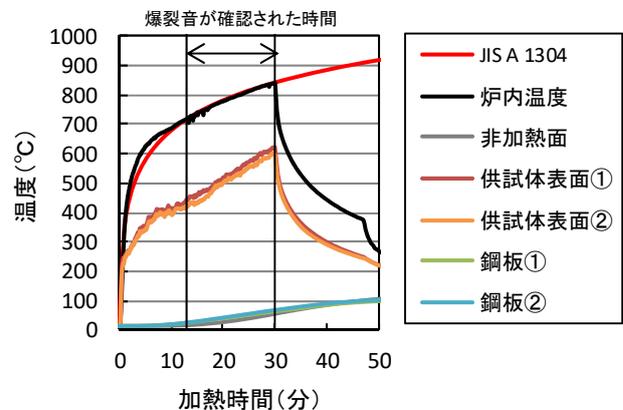


図-6 温度測定結果

表-4 爆裂試験結果

NO.	記号	要因	W/B (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	鋼繊維混入率 (vol%)	PP繊維混入率 (vol%)	養生条件										
							20℃封かん養生 (20℃)				材齢7日まで20℃封かん養生、その後気中養生 (7dry)						
							試験材齢 (日)	含水率 ^{※1} (wt%)	試験時の圧縮強度 (N/mm ²)	爆裂 ^{※2} 試験評価	試験材齢 (日)	含水率 ^{※1} (wt%)	試験時の圧縮強度 (N/mm ²)	爆裂 ^{※2} 試験評価			
1	G0.55-sf0-PP0	繊維混入率	17.0	0.550	0.00	0.00	135	-	-	-	141	3.37	-	×			
2	G0.55-sf0-PP3				0.00	0.33						3.55	153	○	3.20	-	○
3	G0.55-sf1.0-PP2				1.00	0.22						3.29	162	○	3.20	-	○
4	G0.55-sf1.0-PP1				1.00	0.11						3.26	162	×	3.16	-	×
5	G0.55-sf0.75-PP2				0.75	0.22						3.34	162	○	3.12	-	○
6	G0.55-sf0.5-PP2				0.50	0.22						3.35	162	○	3.14	-	○
7	G0.55-sf0.5-PP1				0.50	0.11						3.40	167	○	3.20	-	△
8	G0.45-sf0.0-PP0	単位粗骨材かさ容積	-	0.450	0.00	0.00	-	-	-	91	3.27	161	×				
9	G0.45-sf1.0-PP2				1.00	0.22					-	-	-	3.17	146	○	
10	G0.35-sf0-PP0				0.00	0.00					-	-	-	3.22	156	×	
11	G0.35-sf1.0-PP2	1.00	0.22	0.350	1.00	0.22	-	-	-	3.14	145	△					

※1: JIS A 1476 に準拠し、同一養生とした円柱供試体 (φ100×200mm) の質量から求めた

※2: ○: 爆裂なし, △: 1体爆裂, ×: 2体爆裂

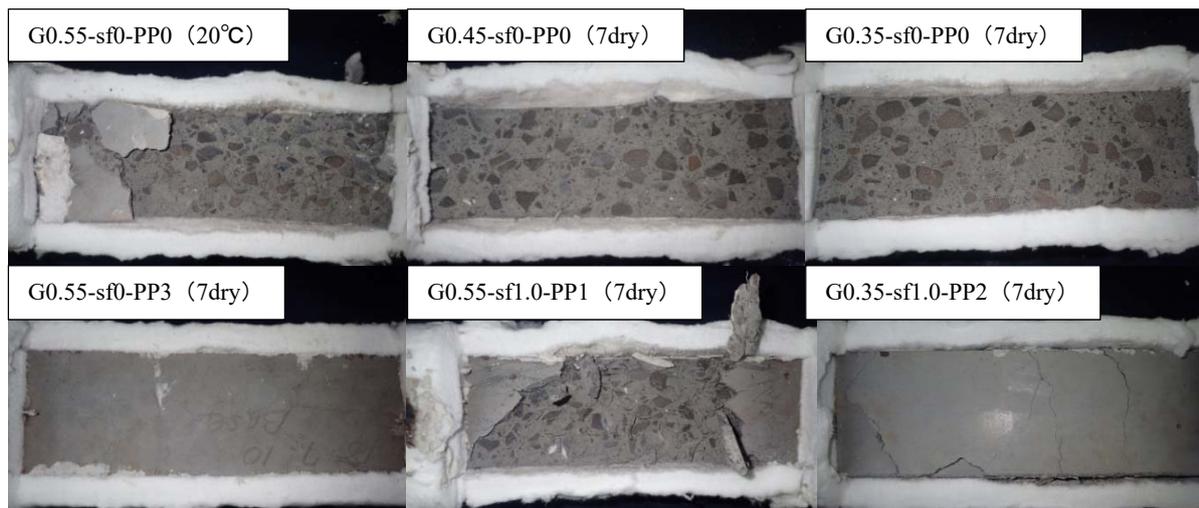


図-7 爆裂試験後の試験体の状況



図-8 光学顕微鏡による観察結果（倍率 20 倍）

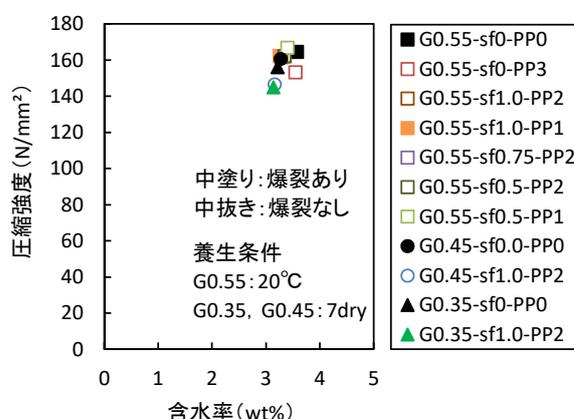


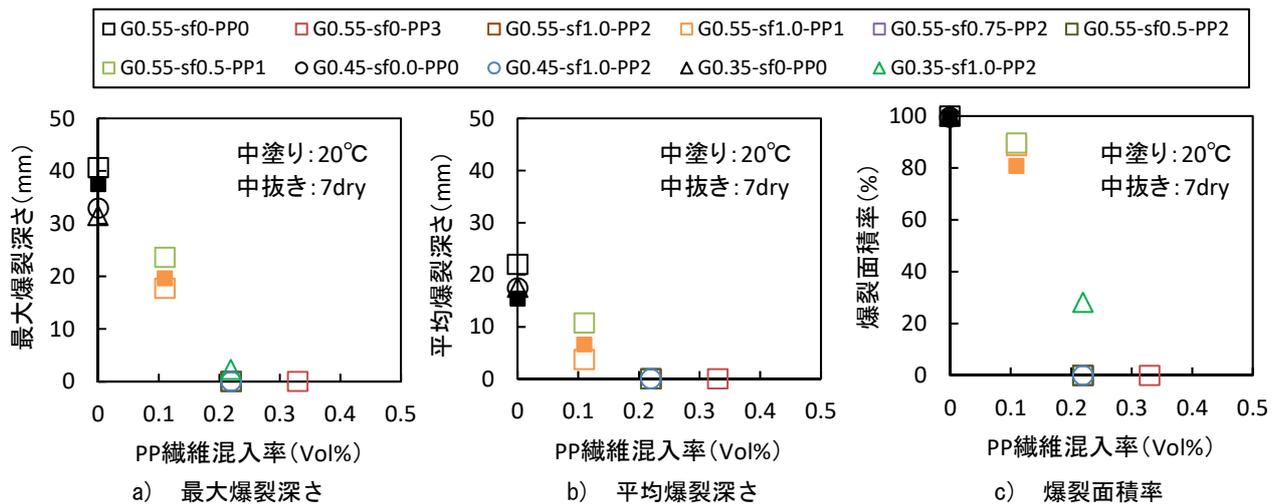
図-9 爆裂試験時の含水率と圧縮強度の関係

PP 繊維混入率と各種爆裂評価の関係を図-10 に示す。なお、養生条件 20°C の結果は、爆裂が発生した試料のみをプロットした。最大爆裂深さを見ると、PP 繊維混入率が増加すると、最大爆裂深さが小さくなる傾向が見られた。G0.55-sf1.0-PP1 と G0.55-sf0.5-PP1 を比較すると、鋼繊維混入率が増加すると、最大爆裂深さが小さくなった。また、単位粗骨材かさ容積の違いに着目すると、繊維を混入していない試料の最大爆裂深さは単位粗骨材かさ容積が $0.55 > 0.45 > 0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の順に大きくなった。なお、最大爆裂深さが 40mm を超えているものについては、測定箇所が隅角部であり、鉄筋の露出はなかった。平均爆裂深さと最大爆裂深さは同様の傾向となった。爆裂面積率は、PP 繊維混入率の増加に伴い小さくなった。繊維を混入していない試料の爆裂面積率は 100% であった。養生条件の違いによる各種爆裂評価の違いは見られなかった。

本実験においては、含水率と圧縮強度に大きな違いが見られないことから、コンクリートの爆裂の有無については、鋼繊維と PP 繊維の混入率が影響しており、特に PP 繊維混入率の影響が大きいと推察される。

繊維混入率の影響については、単位粗骨材かさ容積が $0.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の条件において、PP 繊維のみの場合は 0.33vol% 以上、PP 繊維と鋼繊維を併用する場合は PP 繊維を 0.22vol% 混入すれば、爆裂抑制効果が確認された。既往の文献⁴⁾によれば、PP 繊維の長さが 10mm の場合、混入

率を 0.11vol% にすれば爆裂抑制効果が確認されている。PP 繊維の長さが 2mm の場合、長さが 10mm の場合より混入率を増加させることで、水蒸気圧緩和に必要な空隙が形成できると考えられる。また、鋼繊維混入率がコンクリートの爆裂抑制に与える影響は明確ではないが、爆裂深さや面積率を小さくする傾向が確認できた。単位粗骨材かさ容積の影響については、単位粗骨材かさ容積を $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ とした条件において、PP 繊維を 0.22vol% 混入したが爆裂が発生している。単位粗骨材かさ容積が小さくなると、単位モルタル容積が増加するため、爆裂抑制に必要な PP 繊維混入率が増加すると推察される。また、繊維を混入していない試料の単位粗骨材かさ容積が増加すると最大爆裂深さが大きくなる傾向は、単位粗骨材かさ容積が増加すると、単位容積あたりのセメントペーストと粗骨材との接触面積が増加することによる熱応力の影響などが考えられるが、今後の課題としたい。また、G0.55-sf0.5-PP1 については、養生条件 20°C では爆裂が発生せず、7dry は爆裂している。原因は明確ではなく、こちらも今後の検討課題としたい。今後、載荷加熱試験を実施し、単位粗骨材かさ容積と最適な PP 繊維混入率の関係について確認する予定である。



※養生条件 20°Cについては、爆裂が発生した試料のみ記載した

図-10 PP 繊維混入率と各種爆裂評価の関係

5 まとめ

長さ 2mm のポリプロピレン繊維と鋼繊維の混入率および単位粗骨材かさ容積の違いが 150N/mm² 級超高強度コンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度および爆裂抑制性能に与える影響について、本実験の範囲内で以下の知見を得た。

- (1) ポリプロピレン繊維と鋼繊維の混入率が増加すると、流動性は低下する傾向が見られた。
- (2) ポリプロピレン繊維と鋼繊維を混入すると、圧縮強度は同等もしくは若干低下した。単位粗骨材かさ容積の違いによる影響は大きく見られなかった。
- (3) 混入率を 0.33vol%以上とすれば、ポリプロピレン繊維のみで爆裂抑制できた。
- (4) 単位粗骨材かさ容積が 0.45~0.55m³/m³ の場合、ポリプロピレン繊維混入率を 0.22vol%，鋼繊維混入率を 0.5vol%以上で爆裂抑制できた。
- (5) 単位粗骨材かさ容積が 0.35m³/m³ の場合、ポリプロピレン繊維混入率が 0.22vol%では爆裂抑制効果が少ない結果となった。

謝辞

本実験は、東京理科大学 火災科学研究センター内の耐火炉で実施した。実験方法について、兼松学教授、大宮喜文教授、李在永助教、西尾悠平助教の助言を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：高温環境化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
- 2) たとえば森田武ほか：耐火性に優れた超高強度コン

クリートの仕様と施工，コンクリート工学，Vol.39，No.11，pp.18-23，2001.11

- 3) 三井建郎ほか：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，第 75 巻，第 648 号，PP.461-468，2010.2
- 4) 百瀬晴基ほか：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
- 5) たとえば樋口優香ほか：石灰石粗骨材を用いた高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究（その 2 物性試験および供試体加熱実験結果），日本建築学会学術講演梗概集（関東），pp.55-56，2015.9
- 6) 谷辺徹ほか：高強度コンクリートの爆裂性評価に及ぼす供試体種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1087-1092，2017
- 7) 桜本文敏ほか：超高強度コンクリートに関する開発研究（その 5.小型供試体における耐火性状），日本建築学会学術講演梗概集（北陸），pp.479-480，1992.8
- 8) 松田拓ほか：樹脂粉末を混入した高強度コンクリートの品質，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），pp.399-400，2005.9
- 9) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学，Vol.45，No.9，pp.87-91，2007.9
- 10) 山崎庸行ほか：爆裂防止用ポリプロピレン短繊維を混入した高強度コンクリートの性状に関する研究（その 3 供試体による耐火性状および遷移クリープ特性），日本建築学会学術講演梗概集（東海），pp.335-336，1994.9