

ポリプロピレン短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

Study on Effect of Polypropylene and Steel Short Fiber Content on Explosive Spalling Control of Ultra-high-strength Concrete

技術研究所 峯 竜一郎 RYUICHIRO MINE
技術研究所 松田 拓 TAKU MATSUDA
技術研究所 坂本 遼 RYO SAKAMOTO
建築技術部 若林 信太郎 SHINTARO WAKABAYASHI
建築技術部 横山 徹 TORU YOKOYAMA

高温環境下における 150N/mm²級超高強度コンクリートの爆裂抑制を目的とし、鉄筋により拘束された角柱供試体 (100×100×400mm) を用い、ポリプロピレン繊維と鋼繊維の混入率ならびに単位モルタル容積を変化させて爆裂試験を行った。試験の結果、爆裂抑制性能はポリプロピレン繊維混入率の増加により向上したが、鋼繊維混入率の影響は明確でなかった。また、単位モルタル容積を増加させると爆裂の程度が大きくなる傾向となった。

キーワード：超高強度コンクリート、爆裂、ポリプロピレン繊維、鋼繊維、単位モルタル容積

Explosion tests were conducted on 150N/mm² class ultra-high-strength concrete for the purpose of control explosive spalling under high temperature environment. The test specimen is a square-sectioned column (100×100×400mm) embedded with deformed bar at the center, and test parameters are content of polypropylene and steel short fiber and unit mortar volume. As a result, explosion was suppressed as the polypropylene fiber content increase, but effect of steel fiber content was not clear. In addition, when the unit mortar volume is increased, the damage of explosive spalling tends to increase.

Key Words: ultra-high-strength concrete, explosive spalling, polypropylene fiber, steel fiber, unit mortar volume

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もある³⁾。

百瀬らは、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⁴⁾。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と言われている⁶⁾。円柱や角柱の小型供試体レベルの爆裂試験においては、鉄筋拘束があ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⁾。

本報では、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モルタル容積の違いが超高強度コンクリートの爆裂抑制性能に与える影響を確認するため、鉄筋拘束のある角柱供試体の爆裂試験を実施した。

2. 使用材料および調合条件

コンクリートの使用材料を表-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：スラグせこう系混和材とシリカフェームが質量比で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）は硬質砂岩砕石を用いた。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。

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。コンクリートの調合条件を表-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、材料のロットは実験シリーズIとII、IIIで異なるものを使用した。目標スランプフローは設定せず、繊維を混入したものについては、繊維混入によるロスを見込み、繊維を混入していないものよりもSP添加率を増加させた。また、目標空気量は

2.0%とした。

試験では、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の違い（実験シリーズI）、二つ目は、単位モルタル容積の違い（実験シリーズIIおよびIII）である。

3. 試験概要

(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、供試体を設置した。

(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、自然放冷で雰囲気温度になるまで存置した。

(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

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砕石	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

表-2 各種繊維の物性値

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

表-3 コンクリートの調合条件

実験シリーズ	NO.	記号	W/B (%)	実験水準				調合条件								
				単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位モルタル容積 (L)	鋼繊維混入率 (Vol%)	PP繊維混入率 (Vol%)	単位量 (kg/m ³)								
								W	B	MC	AD	EX	S	G	sf	PP
I	1	G 55-sf0-PP0	17.0	0.55	662	0.00	0.00	155	912	737	175	10	491	893	0.0	0
	2	G 55-sf0-PP3				0.00	0.33	155	912	737	175	10	491	893	0.0	3
	3	G 55-sf1.0-PP2				1.00	0.22	155	912	737	175	10	491	893	78.5	2
	4	G 55-sf1.0-PP1				1.00	0.11	155	912	737	175	10	491	893	78.5	1
	5	G 55-sf0.75-PP2				0.75	0.22	155	912	737	175	10	491	893	58.9	2
	6	G 55-sf0.5-PP2				0.50	0.22	155	912	737	175	10	491	893	39.3	2
	7	G 55-sf0.5-PP1				0.50	0.11	155	912	737	175	10	491	893	39.3	1
II	8	G 45-sf0.0-PP0	0.45	723	0.00	0.00	155	912	737	175	10	653	731	0.0	0	
	9	G 45-sf1.0-PP2			1.00	0.22	155	912	737	175	10	653	731	78.5	2	
III	10	G 35-sf0-PP0	0.35	785	0.00	0.00	155	912	737	175	10	814	568	0.0	0	
	11	G 35-sf1.0-PP2			1.00	0.22	155	912	737	175	10	814	568	78.5	2	

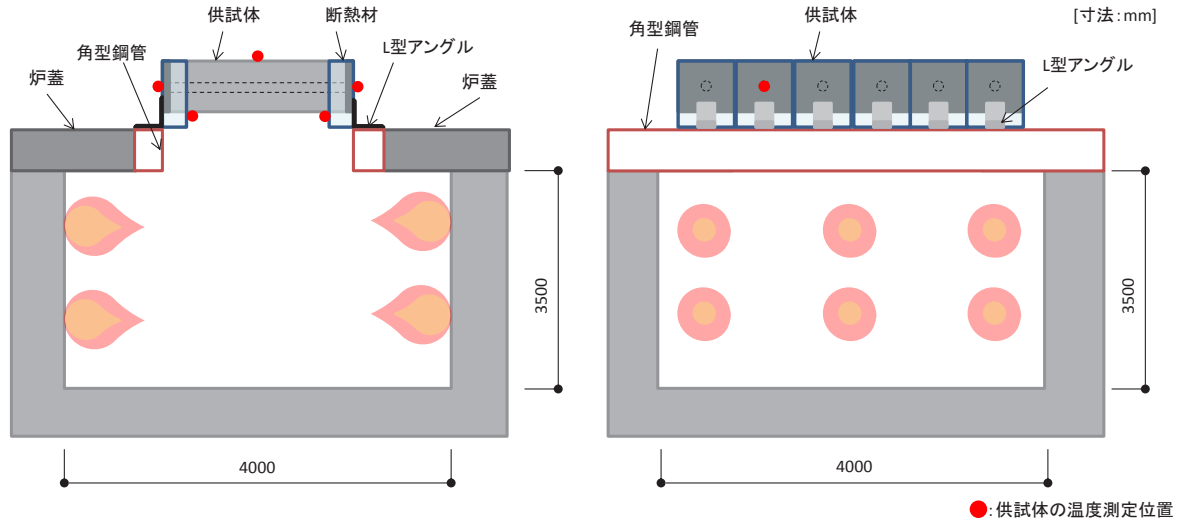


図-1 耐火炉の概要

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、供試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、試験時の有効加熱面は100×300mmの範囲であった。

試験時の温度測定は図-1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。

(4) 供試体の養生条件

爆裂現象の要因として、含水率の影響が大きい¹⁰⁾と言われている。そこで、繊維の混入率が要因の場合(実験シリーズI)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。爆裂試験時の材齢はそれぞれ、135日と141日であった。

単位モルタル容積を要因(実験シリーズIIおよびIII)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。爆裂試験時の材齢は91日であった。

(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

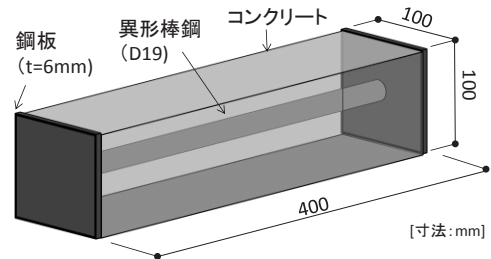


図-2 爆裂試験の供試体

で分割し、その交点(全96点)における深さ方向を測定し、(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算出した。測定にはノギスを使用した。

4. 試験結果

(1) フレッシュ試験結果および圧縮強度試験結果

爆裂試験を実施したコンクリートのフレッシュ試験結果および標準養生材齢56日の圧縮強度試験結果を表-4に示す。フレッシュ試験結果を見ると、いずれの単位モルタル容積の条件においても、PP繊維と鋼繊維を混入すると、SP添加量を増加させても、スランプフローが小さくなる傾向が見られた。

圧縮強度試験結果を見ると、繊維を混入していない供試体の圧縮強度は147~152N/mm²の範囲であり、単位モルタル容積の違いによる影響は見られなかった。PP繊維と鋼繊維を混入した供試体の圧縮強度は139~149N/mm²の範囲となり、繊維を混入していない供試体と比べると、同等もしくは若干低下する傾向が見られた。

(2) 爆裂試験結果

爆裂試験時の温度測定結果の一例を図-3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、同等な傾向となった。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-5 に示す。繊維混入率の違いに着目すると、養生条件が 20℃で爆裂した供試体は、繊維を混入していない G55-sf0-PP0 と鋼繊維混入率が 1vol%、PP 繊維混入率が 0.11vol% の G55-sf1.0-PP1 の 2 水準だった。養生条件が 7dry で爆裂した供試体は繊維を混入していない G55-sf0-PP0 と鋼繊維混入率が 1vol%、PP 繊維混入率が 0.11vol% の G55-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 G55-sf0.5-PP1 の 3 水準だった。

単位モルタル容積の違いに着目すると、単位モルタル容積を 723L とした場合、繊維を混入していない G45-sf0-PP0 のみが爆裂した。単位モルタル容積を 785L とした場合、全ての水準が爆裂した。

爆裂試験後の供試体の状況を図-4 に示す。単位モルタル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 G55-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 G55-sf1.0-PP1 と G35-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、剥落までは至らないことが確認された。特に G35-sf1.0-PP2 はその影響が顕著であった。

爆裂試験後の供試体の破面を光学顕微鏡で観察した結果を図-5 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

表-4 フレッシュ試験結果と標準養生材齢 56 日の圧縮強度試験結果

実験シリーズ	NO.	記号	フレッシュ試験結果				圧縮強度試験結果 標準養生材齢 56 日 (N/mm ²)
			SP 添加率 (B×%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	
I	1	G 55-sf0-PP0	1.55	77.1	1.2	30.7	147
	2	G 55-sf0-PP3	1.85	67.5	1.5	27.8	143
	3	G 55-sf1.0-PP2	1.85	64.0	1.6	30.8	142
	4	G 55-sf1.0-PP1	1.85	67.4	1.3	31.1	145
	5	G 55-sf0.75-PP2	1.85	69.6	1.6	30.6	143
	6	G 55-sf0.5-PP2	1.75	70.9	1.5	31.3	149
	7	G 55-sf0.5-PP1	1.85	73.6	1.4	31.4	143
II	8	G 45-sf0.0-PP0	1.41	66.8	1.7	27.9	147
	9	G 45-sf1.0-PP2	1.71	62.5	2.5	29.5	139
III	10	G 35-sf0-PP0	1.41	72.4	1.7	27.7	152
	11	G 35-sf1.0-PP2	1.56	63.1	3.2	29.0	143

表-5 爆裂試験結果

実験シリーズ	NO.	記号	W/B (%)	実験水準				養生条件							
				単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位モルタル容積 (L)	鋼繊維混入率 (vol%)	PP繊維混入率 (vol%)	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
I	1	G 55-sf0-PP0	17.0	0.55	662	0.00	0.00	135	3.58	164	×	141	3.37	-	×
	2	G 55-sf0-PP3				0.00	0.33		3.55	153	○		3.20	-	○
	3	G 55-sf1.0-PP2				1.00	0.22		3.29	162	○		3.20	-	○
	4	G 55-sf1.0-PP1				1.00	0.11		3.26	162	×		3.16	-	×
	5	G 55-sf0.75-PP2				0.75	0.22		3.34	162	○		3.12	-	○
	6	G 55-sf0.5-PP2				0.50	0.22		3.35	162	○		3.14	-	○
	7	G 55-sf0.5-PP1				0.50	0.11		3.40	167	○		3.20	-	△
II	8	G 45-sf0.0-PP0	0.45	723	0.00	0.00	-	-	-	-	91	3.27	161	×	
	9	G 45-sf1.0-PP2			1.00	0.22		-	-	-		3.17	146	○	
III	10	G 35-sf0-PP0	0.35	785	0.00	0.00	-	-	-	-	91	3.22	156	×	
	11	G 35-sf1.0-PP2			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

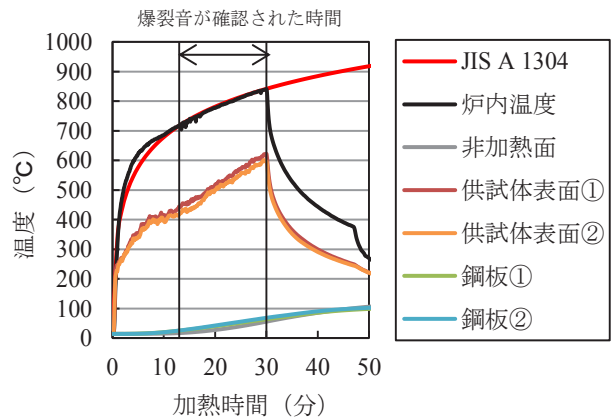


図-3 温度測定結果

られるり。

爆裂試験時の含水率と圧縮強度の関係を図-6に示す。G55シリーズ（養生条件20℃）を見ると、含水率は3.26～3.58%、圧縮強度は153～167N/mm²の範囲であった。G35、G45シリーズ（養生条件7dry）を見ると、含水率は3.14～3.27%、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。

PP繊維混入率と各種爆裂評価の関係を図-7に示す。なお、養生条件20℃の結果については、爆裂が発生した供試体のみプロットした。最大爆裂深さを見ると、PP繊維混入率の増加に伴い、小さくなる傾向が見られた。G55-sf1.0-PP1とG55-sf0.5-PP1を比較すると、鋼繊維混入率の増加により、最大爆裂深さが小さくなった。

また、単位モルタル容積の違いに着目すると、繊維を混入していない供試体は、単位モルタル容積が小さくなると最大爆裂深さが大きくなった。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供試体の爆裂面積率は100%であり、養生条件の違いによる各種爆裂評価の違いはなかった。

(3) 爆裂試験結果の考察

本試験においては、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、単位モルタル容積が662L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。

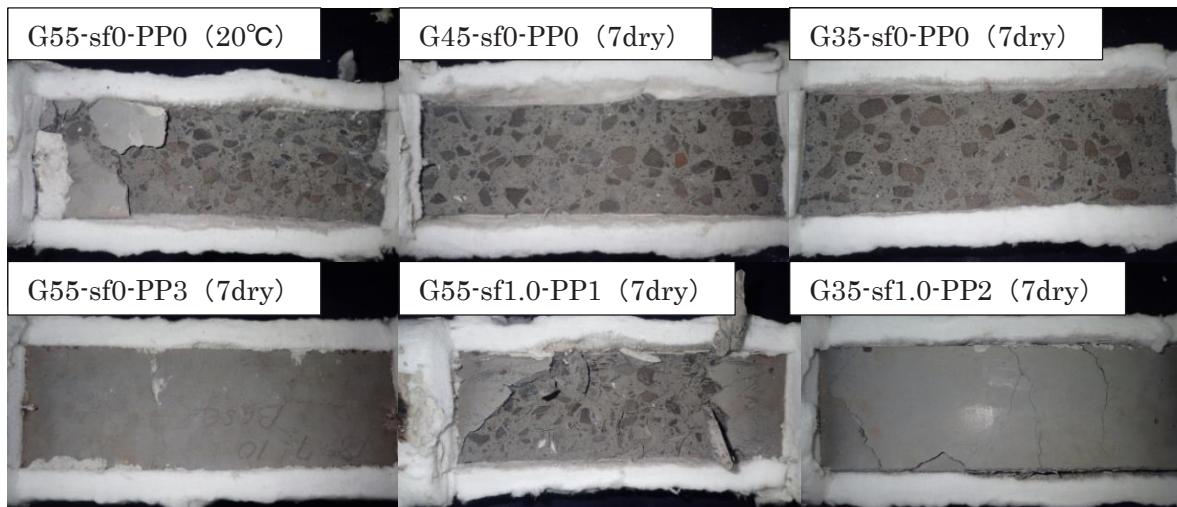


図-4 爆裂試験後の供試体の状況 () 内は養生条件を示す



図-5 光学顕微鏡による観察結果 (倍率20倍)

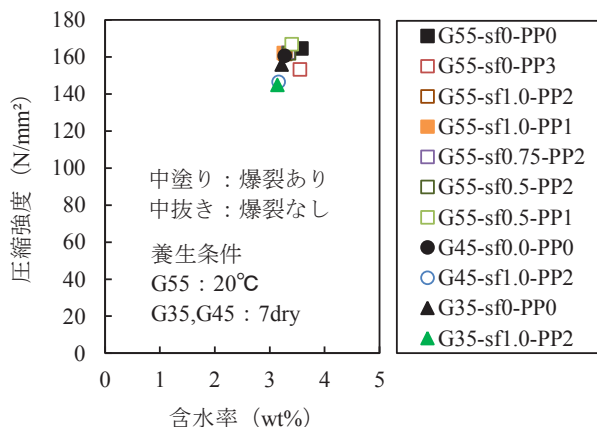
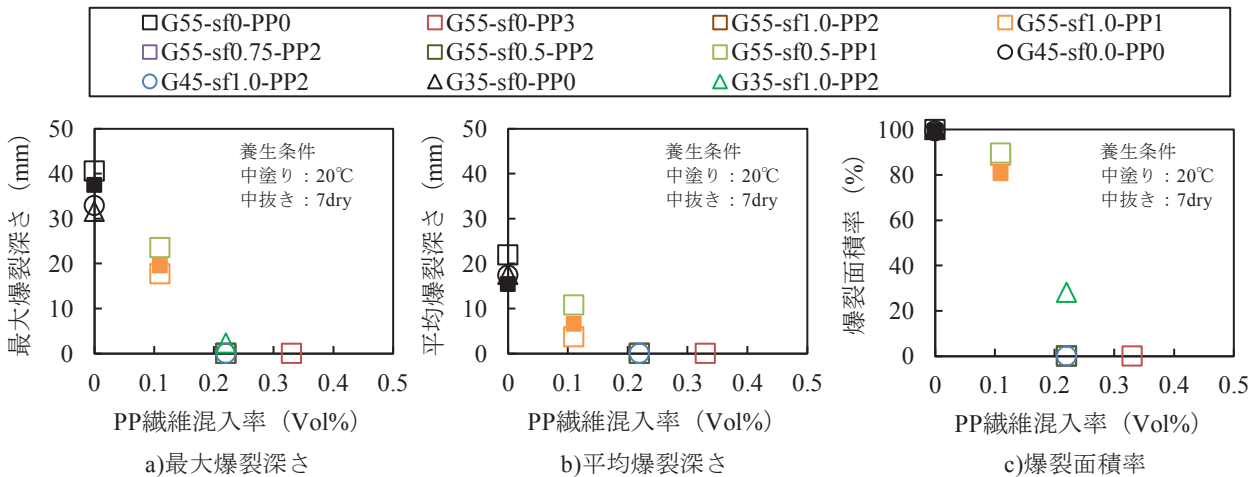


図-6 爆裂試験時の含水率と圧縮強度の関係



※養生条件 20℃については、爆裂が発生した供試体のみ記載した

図-7 PP 繊維混入率と各種爆裂試験評価の関係

単位モルタル容積の影響については、単位モルタル容積を 785L とした条件において、PP 繊維を 0.22vol% 混入しても爆裂が発生している。これは、単位モルタル容積が増加することで、コンクリート中のモルタルマトリックス部分の爆裂抑制に対して必要な PP 繊維混入率が増加するためと推察される。

また、繊維を混入していない供試体の単位モルタル容積が小さくなると最大爆裂深さが大きくなる原因として、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。

5. まとめ

本試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。単位モルタル容積の違いによる影響は明確でなかった。
- (3) 混入率を 0.33vol% とすれば、ポリプロピレン繊維のみで爆裂抑制できた。
- (4) 単位モルタル容積が 662~723L 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) 単位モルタル容積が 785L 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。

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試験的研究，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試験結果)，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