論文 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

百瀬晴基*1・桜本文敏*1・柳田克巳*2

要旨:Fc60N/mm²を越える超高強度域のコンクリートでは火災時における爆裂現象が問題となっており,その抑制対策としてポリプロピレン繊維を混入する事によって,火災時に水蒸気圧を抑える方法が有効であり,実物件にも適用されている。本報では, Fc150N/mm²の超高強度コンクリートに適切なポリプロピレン繊維の種類及び混入量を把握するため, 150×300mmの円柱供試体による耐火実験を行い,爆裂程度に与える実験要因の影響について考察した。

キーワード:高強度,コンクリート,爆裂,ポリプロピレン繊維,耐火

1. 目的

近年,高層の RC 造建築物が増えつつあり,今 後更なる高層化の需要が増加してくるものと思 われる。そこで,RC 造建築物の主要な材料であ るコンクリートの超高強度化を目指し, Fc150N/mm²の超高強度コンクリートの開発を行 った¹⁾。しかし,超高強度コンクリートの開発を行 った¹⁾。しかし,超高強度コンクリートには火 災時の爆裂発生の問題があり,かぶり厚さの減 少,鉄筋温度の上昇などによって起こる構造耐 力の低下が危惧されている。1997年に改定され たJASS5 にも,特に 60N/mm²を超える高強度コ ンクリートについては耐火性を事前に検討する 事が述べられている²⁾。爆裂の程度は,火災時 の温度上昇速度,骨材の種類,コンクリートの 含水率,部材の圧縮応力,部材の鉄筋量などに 関係していると言われている。爆裂防止の対策 としては,耐火被覆の適用やメッシュ配筋によ る飛散防止など様々なものがあるが,コンクリ ートにポリプロピレン繊維(以後 PP 繊維)を混 入する方法³⁾が施工性及び経済性に優れた最も 良い方法であると考えられる。

本報では,Fc150N/mm²の超高強度コンクリートに PP 繊維を混入し,火災時における爆裂を防止するため,適切な PP 繊維種類及び PP 繊維混入量を把握する事を目的とし,PP 繊維を混入した超高強度コンクリートについて,150 ×

NO	휘문	水結合材比	粗骨材吸水率	PP繊維混入量	PP繊維長さ	PP繊維径	
NO		(%)	(%)	(kg/m^3)	(mm)	(μm)	
1	15-D-0			0.0	—	_	
2	15-D-1.0-10-48				10	48	
3	15-D-1.0-10-18		約0.5	1.0	10	18	
4	15-D-1.0-5-48				5	48	
5	15-D-1.0-20-48				20	48	
6	15-D-2.0-10-48	15		2.0	10	48	
7	15-T-0	15	約1.0	0.0	_	_	
8	15-T-1.0-10-48			1.0	10	48	
9	15-T-2.0-10-48			2.0	10		
10	15-N-0			0.0	-	-	
11	15-N-1.0-10-48		約2.0	1.0	10	19	
12	15-N-2.0-10-48			2.0	10	70	
13	20-D-1.0-10-48	20	約0.5	1.0	10	19	
14	25-D-1.0-10-48	25	約0.5	1.0	10	0	

表 - 1 実験要因と水準

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ (正会員)

*2 鹿島建設(株) 本社 経営企画部 (正会員)

300mm の円柱供試体による耐火実験を行い,爆 裂に影響する要因について考察した。

- 2. 試験概要
- 2.1 実験要因

表 - 1 に実験要因と水準を示す。爆裂程度に 影響を及ぼすコンクリートの要因として,水結 合材比,粗骨材の吸水率に注目し,水結合材比 (15,20,25%)3 水準,粗骨材の吸水率(約0.5, 1.0,2.0%)3水準とした。粗骨材の岩種について は,石灰岩以外の岩種では,粗骨材の吸水率が 耐火性状に大きな影響を及ぼしているとの報告 ⁴⁾がある事から,石灰岩以外の岩種を用いた。ま た,PP繊維の要因として,適切な PP繊維種類と PP繊維混入量を把握するため,混入量(0.0,1.0, 2.0kg/m³)3水準,長さ(5,10,20mm)3水準,径 (18,48µm)2水準とし,計14 調合について検討 を行った。

2.2 使用材料及び調合

表 - 2 に使用材料,表 - 3 に調合表を示す。セ メントは,低熱ポルトランドセメントをベース

項目	種類等
セメント	シリカフュームセメント(密度:3.08g/cm ³)
	段戸産石英片岩(密度:2.62g/cm ³ ,吸水率0.63%)
粗骨材	蓼科産安山岩(密度:2.63g/cm ³ ,吸水率1.07%)
	西区平和産安山岩(密度:2.61g/cm ³ ,吸水率2.07%)
細骨材	小笠産山砂(密度:2.63g/cm ³ , 吸水率1.49%)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
PP繊維	10mm×48μm(標準), 20mm×48μm(長い),
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	5mm×48μm(短い), 10mm×18μm(細い)

表-2 使用材料

表 - 3 調合表

図-1 耐火試験体の詳細図

150 立面図 D38 異形鉄筋

150

平面図

		W/R	粗骨材	PP繊維		単位量(kg/m ³)			畄灾啠	高性能	
NO	記号	W/ D	の吸水率	雄雄の種類	混入量	水	セメント	細骨材	粗骨材	千石克	AE減水剤
		(%)	(%)	利以下EUノイ里天貝	(kg/m^3)	(W)	(C)	(S)	(G)	(kg/l)	(C×%)
1	15-D-0			_	-	150	1000	490	862	2502	2.5
2	15-D-1.0-10-48		0.63	10mm × 48 μ m	1.0	150	1000	490	862	2502	2.5
3	15-D-1.0-10-18	15		10 mm × 18 μ m	1.0	150	1000	490	862	2502	2.5
4	15-D-1.0-5-48	15		5mm × 48 μ m	1.0	150	1000	490	862	2502	2.5
5	15-D-1.0-20-48			20mm × 48 μ m	1.0	150	1000	490	862	2502	2.5
6	15-D-2.0-10-48			10 mm × 48 μ m	2.0	150	1000	490	862	2502	2.5
7	15-T-0		1.07	-	-	150	1000	425	930	2505	2.5
8	15-T-1.0-10-48	15		10 mm × 48 μ m	1.0	150	1000	425	930	2505	2.5
9	15-T-2.0-10-48			10 mm × 48 μ m	2.0	150	1000	425	930	2505	2.5
10	15-N-0		2.07	-	-	150	1000	528	821	2499	2.5
11	15-N-1.0-10-48	15		10 mm × 48 μ m	1.0	150	1000	528	821	2499	2.5
12	15-N-2.0-10-48			10mm × 48 μ m	2.0	150	1000	528	821	2499	2.5
13	20-D-1.0-10-48	20	0.63	10mm × 48 μ m	1.0	150	750	704	862	2466	1.3
14	25-D-1.0-10-48	25	0.03	10 mm \times 48 μ m	1.0	150	600	832	862	2444	1.0

とし,シリカフュームを 10%程度混入している シリカフュームセメント(以下 SFC)を使用した。 また,粗骨材は 2.1 で示した吸水率に近い粗骨 材 3 種を使用した。PP 繊維は表 - 2 に示す 4 種 類の PP 繊維を使用し,10mm × 48 µ m の PP 繊維 を基準とした。調合は単位水量 150kg/m³,空気 量 1.0%,単位粗骨材かさ容積 0.55m³/m³とし, PP 繊維は調合の外割りとした。

2.3 試験方法

温度上昇、 による膨張

温度の低い内部 による拘束

300

耐火実験は,ISO 834 に準じて行い,加熱時間 は1時間とした。耐火試験体の詳細を図-1に示 す。既往の研究において,円柱供試体の無筋の テストピースに比べて,中心部に鉄筋を配した テストピースの方が爆裂を起こしやすく,鉄筋 を配したテストピースより実大部材の方が爆裂 を起こしやすい事が報告されている⁴⁾⁵⁾。今回の 耐火試験体は,実大部材の条件に少しでも近づ けるため, 150×300mmの試験体の中心にD38 の異形鉄筋を配したものを作製した。耐火試験 体は1調合につき3体作製し,封緘養生し,材 齢91日で耐火実験に供した。 フレッシュコンクリートの試験項目は,スラ ンプフロー値(JASS5T-503),フロー到達時間 (JASS5T-503),空気量(JIS A 1101),温度(温度 計で計測)とした。また,1 調合につき, 100 ×200mmの試験体を6体作製し,封緘養生とし, 材齢28日,耐火試験時(91日)に,それぞれ3体 づつ圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。

2.4 爆裂損傷度合いの評価方法

爆裂による損傷度合いを評価するため,以下 の3つの方法で評価を行った。

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

		フレ	高性能			
NO	記号	フロー到達時間	フロー 平均値 (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	AE 減水剤 (C×%)
1	15-D-0	0分12秒(50cm) 2分48秒(終了)	73.0	1.5	19.3	2.5
2	15-D-1.0 -10-48	0分13秒(50cm) 3分15秒(終了)	70.5	2.0	20.1	2.5
3	15-D-1.0 -10-18	0分12秒(50cm) 3分3秒(終了)	69.5	1.9	21.2	2.5
4	15-D-1.0 -5-48	0分11秒(50cm) 3分16秒(終了)	73.0	1.7	21.6	2.5
5	15-D-1.0 -20-48	0分16秒(50cm) 2分48秒(終了)	67.5	1.5	20.8	2.5
6	15-D-2.0 -10-48	0分16秒(50cm) 3分24秒(終了)	67.5	1.9	20.8	2.5
7	15-T-0	0分12秒(50cm) 2分41秒(終了)	70.5	1.4	18.6	2.5
8	15-T-1.0 10-48	0分12秒(50cm) 2分40秒(終了)	71.5	1.7	19.4	2.5
9	15-T-2.0 -10-48	0分11秒(50cm) 2分47(終了)	69.5	1.6	19.6	2.5
10	15-N-0	0分9秒(50cm) 2分43秒(終了)	74.0	1.3	20.0	2.5
11	15-N-1.0 -10-48	0分8秒(50cm) 2分27秒(終了)	75.0	1.6	20.7	2.5
12	15-N-2.0 -10-48	0分16秒(50cm) 2分41秒(終了)	66.5	1.6	19.9	2.5
13	20-D-1.0 -10-48	0分13秒(50cm) 1分20秒(終了)	62.0	1.7	19.0	1.3
14	25-D-1.0 -10-48	-分秒(50cm) 0分11秒(終了)	30 17.5*	2.9	18.6	1.0

a) 目視による評価

耐火後の試験体を目視で確認し,0~5(数字が 大きいほど,損傷大)の6段階で評価した。その 評価基準を図-2に示す。

b) 質量減少率による評価

爆裂により損傷を受けた部分の体積を評価す るため,耐火実験前と耐火実験後の試験体の質 量を測定し,質量減少率を算定した。質量減少 率の算定は,試験体内部に埋め込んだ鉄筋の質 量を除くため,以下の通りとした。ただし,調 合ごとにコンクリートの含水率に差があるため, 今回は,蒸発した水分も質量減少率に含めてデ ータを整理した。

W= { (Wb-Wa)/ (Wb-Ws) } × 100(%) ここに,W: 質量減少率(%),Wb:耐火実験前 の試験体質量,Wa:耐火実験後の試験体質量, Ws: 埋め込んだ鉄筋の質量

		圧縮強度(N/mm ²)					
	ᇷ문	材齢					
110	дс <i>-</i> 5	28日	耐火実験時				
			(91日)				
1	15-D-0	156.2	193.3				
2	15-D-1.0-10-48	159.4	187.3				
3	15-D-1.0-10-18	157.1	181.1				
4	15-D-1.0-5-48	162.4	191.4				
5	15-D-1.0-20-48	154.9	190.6				
6	15-D-2.0-10-48	161.8	189.3				
7	15-T-0	151.5	176.2				
8	15-T-1.0-10-48	153.9	180.5				
9	15-T-2.0-10-48	158.8	180.7				
10	15-N-0	161.1	190.7				
11	15-N-1.0-10-48	167.7	182.0				
12	15-N-2.0-10-48	158.2	172.0				
13	20-D-1.0-10-48	142.0	158.2				
14	25-D-1.0-10-48	119.5	141.5				

表-5 圧縮強度試験結果

*試験体結果は3試験体の平均を示す



図 - 2 爆裂による損傷度合いの目視での評価基準 図 - 3 強度に与える PP 繊維の影響

c)破壊面積率による評価

爆裂により損傷を受けた部分の表面積を評価 するため,耐火実験後の試験体について,試験 体側面のトレースを行い,破壊面積率を算定し た。破壊面積率の算定は以下の通りとした。

A= { Ad/ As } × 100(%)

ここに,A:破壊面積率(%),Ad:損傷を受け た試験体の表面積,As:耐火試験前の試験体 の表面積

		耐火試験結果					
NO	記号	目視による	質量減少率	破壊面積率			
		評価	(%)	(%)			
1	15-D-0	4.0	51.5	90.4			
2	15-D-1.0-10-48	2.0	14.9	39.9			
3	15-D-1.0-10-18	0.0	7.4	0.0			
4	15-D-1.0-5-48	3.3	27.1	75.7			
5	15-D-1.0-20-48	0.0	7.3	0.0			
6	15-D-2.0-10-48	0.0	7.4	0.0			
7	15-T-0	5.0	99.9	100.0			
8	15-T-1.0-10-48	4.0	39.4	90.8			
9	15-T-2.0-10-48	0.3	7.9	1.6			
10	15-N-0	5.0	99.9	100.0			
11	15-N-1.0-10-48	4.0	45.0	97.5			
12	15-N-2.0-10-48	1.3	10.1	17.2			
13	20-D-1.0-10-48	0.7	8.2	6.2			
14	25-D-1.0-10-48	0.3	8.1	4.7			
		* 試験体結身	果は3試験体の	D平均を示す			

表-6 耐火実験結果一覧

3. 試験結果

3.1 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリート試験結果を表 - 4 に 示す。標準の PP 繊維(10mm × 48 µ m)の混入量の 増加と共に,フロー値は小さくなる傾向があり, PP 繊維無混入のものと,標準の PP 繊維2.0kg/m³ 混入したものとでは,フロー値の差は 50mm 程度 であった。 PP 繊維の長さの影響は,長い方が フロー値は小さくなる傾向があった。PP 繊維の 径の影響は,細い方が若干フロー値は小さくな るが大きな差はみられなかった。

3.2 圧縮強度試験試験結果

圧縮強度試験結果を表 - 5 に,強度に与える PP 繊維の影響を図 - 3 に示す。W/B15%のコンク リートは材齢 91 日で,圧縮強度は 180N/mm²前 後の値を示しており,Fc150N/mm² 相当の強度 (Fc+2)である事が確認できた。図 - 3 から,1 部強度の低いものもあるが,圧縮強度に与える PP 繊維の影響はほとんどみられなかった。

3.3 実験結果

耐火実験結果一覧を表 - 6 に示す。質量減少率については,目視による評価で損傷なしの調



図 - 4 爆裂時の損傷度(目視) に与える水結合材比の影響



図 - 7 爆裂時の損傷度(目視) に与える粗骨材吸水率の影響



に与える粗骨材吸水率の影響



0

合でも,質量減少率が7.0%~8.0%程度ある。これは,コンクリート内部の水分が蒸発したためと思われる。

- 4. 考察
- 4.1 水結合材比の影響

爆裂時の損傷度に与える水結合材比の影響 を図 - 4,図 - 5,図 - 6に示す。実験結果から, 水結合材比の増加と共に,爆裂による損傷が小 さくなる事が分かる。水結合材比が小さくなる と,ペーストがより緻密になり,水蒸気が抜け にくくなるためと思われる。

4.2 粗骨材吸水率の影響





爆裂時の損傷度に与える粗骨材の吸水率の影響を図-7,図-8,図-9に示す。実験結果から,粗骨材の吸水率の増加と共に,爆裂による損傷が大きくなる事が分かる。これは,粗骨材の吸水率が大きい方がコンクリートの含水率が大きくなり,火災時のコンクリート内部の水蒸気圧が大きくなるためだと考えられる。

4.3 PP 繊維混入量の影響

爆裂時の損傷度に与える PP 繊維混入量の影響を図 - 10,図 - 11,図 - 12に示す。実験結果から,PP 繊維混入量の増加と共に,爆裂による損傷が小さくなる事が確認できた。また W/B15%の調合において 標準の PP 繊維(10mm× 48 µm)





図 - 15 爆殺時の損傷度(面積) に与える PP 繊維長さの影響



を2.0kg/m³混入すれば,爆裂による損傷を概ね 抑える事ができる事が分かった。

4.4 PP 繊維種類の影響

爆裂時の損傷度に与える PP 繊維長さの影響 を図 - 13,図 - 14,図 - 15 に,PP 繊維径の影響 を図 - 16,図 - 17,図 - 18 に示す。実験結果か ら,PP 繊維は長く,細いものほど爆裂による損 傷度は小さくなる事が分かった。長い PP 繊維は コンクリート表層部に水蒸気の抜け道が到達し やすくなるため,損傷度が小さくなったものと 思われる。また細い PP 繊維は標準の PP 繊維の 断面積に対して9分の1の断面積であり,PP 繊 維本数は9倍となることから,水蒸気の抜け道 の数が増加し損傷度が小さくなったとものと思 われる。

4.4 適切な PP 繊維混入量及び種類

W/B15%の調合において,標準のPP繊維(10mm × 48µm)を 2.0kg/m³ 混入すれば,爆裂による 損傷を概ね抑える事はできたが,長い PP 繊維 (20mm × 48µm),細い PP 繊維(10mm × 18µm) を使用した場合,1.0kg/m³ 混入すれば爆裂を防 止できる結果となった。(図 - 13~図 - 18 参照)

長い PP 繊維,若しくは細い PP 繊維を使用す れば, PP 繊維混入量を減らす事ができる。一 方,PP 繊維を混入する事により,フレッシュ時 のフロー値は低下するが,フロー値の低下は細 い PP 繊維より長い PP 繊維の方が大きい。この 事から,爆裂防止及び施工性の点において細い PP 繊維を用いる事が有効であると考えられる。

ただし,PP 繊維を混入した超高強度コンクリ ートを実躯体に使用する場合,断面の温度分布 による熱応力,鉄筋の拘束等の影響からテスト ピースより爆裂しやすくなる⁴⁾⁵⁾事を考慮し, 今後,実躯体を模擬した実大試験体を用いた耐 火実験を行い,PP 繊維の適切な混入量の確認を 行う予定である。

- 5. まとめ
- (1)1 部強度の低いものもあるが,強度に与える PP 繊維の影響はほとんどみられなかった。

- (2) 水結合材比の増加と共に,爆裂による損傷 が小さくなる事が確認できた。
- (3) 粗骨材の吸水率の増加と共に,爆裂による 損傷が大きくなる事が確認できた。
- (4) PP 繊維混入量の増加と共に,爆裂による損 傷が小さくなる事が確認できた。
- (5) W/B15%の調合において 標準の PP 繊維(10mm x 48µm)を2.0kg/m³混入すれば,爆裂による損傷を概ね抑える事ができる事が分かった。
- (6) PP 繊維は長く,また細いものほど爆裂によ る損傷度は小さくなる事が分かった。
- (7) 長い PP 繊維(20mm× 48µm),細い PP 繊維
 (10mm× 18µm)を使用すれば,W/B15%の調
 合において, PP 繊維を 1.0kg/m³混入すれば
 爆裂を防止できる結果となった。

今後,実躯体を模擬した実大試験体を用いた 耐火実験を行い,PP 繊維の適切な混入量の確認 を行う予定である。

参考文献

- 1)百瀬晴基 他: Fc150の超高強度コンクリートの強度性状に関する実験的研究(その 1 調合による影響),日本建築学会大会学術講演 梗概集,pp.807~808,2002.8
- 2)建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コ ンクリート工事,日本建築学会,pp.422~450, 1997
- 3)山崎庸行他: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),日本建築学会大会 学術講演梗概集,pp.335~336,1994.9
- 4) 桜本文敏 他: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),日本建築学会大会学術講演梗概 集,pp.479~480,1992.8
- 5) 宮本圭一 他: 超高強度コンクリートに関す る開発研究(その6.実大 RC 柱試験体におけ る耐火性状),日本建築学会大会学術講演梗概 集,pp.481~482,1992.8