

# 超高強度コンクリート柱の耐火性能向上に関する研究

## Effect of Incorporating Hybrid Fiber on Fire Resistance of High Strength Concrete Columns

三井 健郎\*1      米澤 敏男\*2      小島 正朗\*3      三橋 博三\*4

### 梗概

設計基準強度80N/mm<sup>2</sup>から200N/mm<sup>2</sup>クラスまでの超高強度コンクリートの耐火性能向上を目的に有機繊維（ポリプロピレン繊維）を単独で混入したもの、および有機繊維と鋼繊維を複合したハイブリッド繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱の荷重加熱実験を行い、爆裂抑制効果と保有耐火時間について検討した。ポリプロピレン繊維単体の混入による爆裂の抑制は、150N/mm<sup>2</sup>クラスのコンクリートまでは有効であるが180N/mm<sup>2</sup>以上のコンクリートでは困難である。これに対し、ハイブリッド繊維の適量混入が、180N/mm<sup>2</sup>から200N/mm<sup>2</sup>においても柱部材の爆裂深さの抑制に有効であり、3時間以上の保有耐火時間の確保が可能となることを明らかにした。

キーワード：高強度コンクリート，耐火性能，爆裂，有機繊維，鋼繊維，荷重加熱試験

### Summary

Fire resistance of High strength reinforced concrete columns with specified design strength of 80N/mm<sup>2</sup> to 200N/mm<sup>2</sup> were conducted by loaded fire resistance tests. High strength concrete column without fiber showed explosive spalling and fire resistance period of columns were less than 2 hours. Incorporating polypropylene fiber to concrete of 150N/mm<sup>2</sup> or less was shown to be effective for preventing spalling of concrete and prolonging fire resisting period. For more than 180N/mm<sup>2</sup> columns, 0.33 vol% of polypropylene fiber were not sufficient for preventing explosive spalling. Incorporating both polypropylene and steel fiber was determined to be effective to maintain 3 hours of fire endurance.

Keywords: high strength concrete, fire resistance, spalling, hybrid fiber, loaded fire resistance test

## 1 はじめに

近年、超高層集合住宅を中心に鉄筋コンクリート（RC）造建築物の超高層化が進展し、設計基準強度（ $F_c$ ）が100N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートを用いた50階を超える超高層集合住宅も実現している。RC造は、建築基準法において所定の部材寸法及び鉄筋に対するコンクリートのかぶり厚さを確保すれば耐火構造として認められている。しかし、高強度コンクリートを用いたRC造建築物では、火災を受けるとコンクリートが爆裂し、かぶり部分が脱落して耐火性能が低下することが知られている。爆裂発生メカニズムは必ずしも明らかになってはいないが、加熱によるコンクリート表面近傍での水蒸気圧による破壊による説<sup>1)</sup>や表層部の熱応力による説<sup>2)</sup>およびこれらの複合とする説などがある。また既往の研究によれば、耐火性に影響する要因としてコンクリートの調合、含水率、骨材の種類、加熱温度上昇の速度、熱応力等が挙げられており<sup>例え(ば)3)~5)</sup>、特に高強度コンクリートを用いた場合、火災時における爆裂の危険性が增大することが指摘されている<sup>6)</sup>。また高温下での高強度コンクリートの力学特性の変化<sup>7)</sup>や、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の火災時の荷重支持能力についても実験的検討が成され、コンクリート強度、載荷荷重、鉄筋量、断面形状等の影響が検討されている<sup>例え(ば)8), 9)</sup>。

設計基準強度が概ね80N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートを用いる場合、爆裂が生じやすくなるため、学会指針<sup>10), 11)</sup>等でも火災時に爆裂を生じないように配慮が求められている。コンクリートの爆裂を抑制する対策として

\*1 技術研究所 マネージャー・博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Ph.D.

\*2 技術研究所 リサーチフェロー・Ph.D. Research Fellow, Research & Development Institute, Ph.D.

\*3 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

\*4 東北大学大学院 工学研究科 教授・工博 Professor, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

は耐火被覆や耐火塗料等の保護層を部材表層に設ける方法があるが、部材断面の増大やコスト増などの問題がある。コンクリート中にポリプロピレン短繊維を混入する技術<sup>12)</sup>が爆裂抑制に効果があることが確認され、部材の耐火性能向上に有効であることが報告されている<sup>例えば13)、14)</sup>。筆者らは設計基準強度が80N/mm<sup>2</sup>を超えるような高強度コンクリート部材の耐火性能を確保する目的で、コンクリートにポリプロピレンなどの有機短繊維を混入する方法を検討し実用化してきた<sup>15)~17)</sup>。

一方、設計基準強度が150N/mm<sup>2</sup>を超えるような超高強度コンクリート柱部材では耐火性能や有機繊維の有効性については十分な研究がなされておらず、また爆裂抑制に必要な有機繊維量の増大によりコンクリートの流動性や強度の低下などが懸念される。

以上のような観点から本論文は、設計基準強度80N/mm<sup>2</sup>から200N/mm<sup>2</sup>クラスまでの超高強度コンクリートの耐火性能向上を目的に有機繊維（ポリプロピレン繊維）を単独で混入したもの、および有機繊維と鋼繊維を複合したハイブリッド繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱の載荷加熱実験を行い、爆裂抑制効果と保有耐火時間について検討したものである。

## 2 実験の概要

### 2.1 載荷加熱実験試験体

Table 1に載荷加熱実験の組合せおよび試験体の概要を示す。実験は、想定する設計基準強度（Fc）のレベルを80N/mm<sup>2</sup>～210N/mm<sup>2</sup>とし、設計基準強度のレベルを80および100N/mm<sup>2</sup>としたシリーズⅠ、130および150N/mm<sup>2</sup>としたシリーズⅡ、180、200および210N/mm<sup>2</sup>としたシリーズⅢの3シリーズとした。各シリーズで爆裂抑制用の織

Table 1 実験シリーズ及び試験体

シリーズ	試験体記号	想定設計基準強度：Fc (N/mm <sup>2</sup> )	試験時の圧縮強度σ <sub>B</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	PP繊維混入率 (vol.%)	鋼繊維混入率 (vol.%)	柱試験体				載荷軸力比		試験材齢 (日)	含水率 (%)								
						断面寸法 (mm)	断面積 A <sub>c</sub> (cm <sup>2</sup> )	主筋	帯筋	N / (A <sub>c</sub> F <sub>c</sub> )	N / (A <sub>c</sub> σ <sub>B</sub> )										
Ⅰ	Fc80-00	80	93	0.00	-	400×400	1600	8-D19 (SD490) (pg=1.43%)	D10@100 (SD345) (pw=0.82%)	0.33	0.29	365~390	4.39								
	Fc80-06		91	0.055							0.29										
	Fc80-11		91	0.11							0.29										
	Fc100-00	100	113	0.00							-			350×350	1225	8-D16 (SD490) (pg=1.30%)	D10@100 (SD345) (pw=0.82%)	0.33	0.29	365~390	3.44
	Fc100-06		113	0.055															0.29		
	Fc100-11		112	0.11															0.30		
Ⅱ	Fc130-00	130	158	0.00	-	350×350	1225	8-D16 (SD490) (pg=1.30%)	D10@100 (SD345) (pw=0.82%)	0.31		0.25	180~205						4.10		
	Fc130-11		152	0.11								0.26									
	Fc130-33		153	0.33								0.26									
	Fc150-00	150	178	0.00							-	350×350		1225	8-D16 (SD490) (pg=1.30%)	D10@100 (SD345) (pw=0.82%)	0.27	0.22		180~205	3.02
	Fc150-11		175	0.11														0.23			
	Fc150-33		170	0.33														0.23			
Ⅲ	Fc180-00	180	189	0.00	-	350×350	1225	12-D16 (USD685) (pg=1.95%)	U6.4@50 (pw=0.73%)	0.25			0.21					180~200	2.99		
	Fc180-22		185	0.22									0.22								
	Fc180-33		185	0.33									0.22								
	Fc180-22-S10		187	0.22							1.0	0.21									
	Fc180-33-S10		185	0.33							1.0	0.22									
	Fc200-00	200	216	0.00							0.0	-	400×400	1600	12-D19 (USD685) (pg=2.15%)	U7.1@50 (pw=0.80%)	0.25			0.28	180~210
	Fc200-00-S05		201	0.00	0.5	0.30	0.30														
	Fc200-00-S10		197	0.00	1.0	0.30	0.31														
	Fc200-17-S05		200(228*)	0.17	0.5	0.30	0.30														
	Fc200-33		196	0.33	0.0	0.25	0.31														
	Fc200-33-S05		198	0.33	0.5	0.30	0.31														
Fc200-33-S10	201(220*)		0.33	1.0	0.30	0.30															
Fc210-11-S05	210	225(233*)	0.11	0.5	0.29	0.26	2.96														

(\*)：試験体と同一形状、同一養生した部材から採取したコアの圧縮強度

維としてポリプロピレン短繊維（以下PP繊維と略称）および鋼繊維の混入率をパラメータとして試験体を作製した。シリーズⅠ（Fc80, Fc100）ではPP繊維の混入率を0, 0.055および0.11vol.%とし、鋼繊維を0%とした6体、シリーズⅡ（Fc130, Fc150）ではPP繊維の混入率を0, 0.11, 0.33vol.%とし、鋼繊維を0%とした6体、シリーズⅢ（Fc180, Fc200, Fc210）はPP繊維量を0~0.33vol.%および鋼繊維を0~1.0vol.%とした11体、合計23体とした。試験体の断面寸法及び温度測定位置をFig.1に示す。試験体は長さ2400mm、加熱部分の長さ1800mmの柱部材とし、コンクリートのかぶり厚さは、Fc80~Fc180では30mm、Fc200およびFc210では35mmとした。断面寸法はTable 1およびFig.1に示すように350×350mmおよび400×400mmとした。

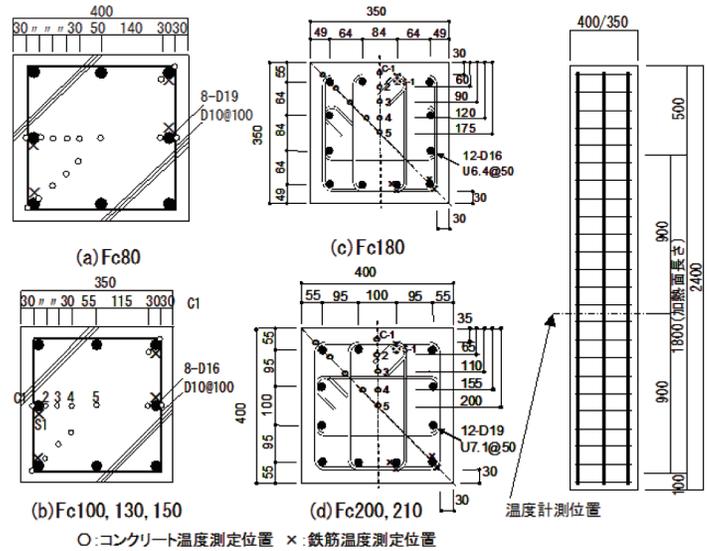


Fig.1 試験体の形状・寸法

配筋は超高層RC造の柱部材の配筋を参考に主筋（SD490, USD685）および帯筋（SD345, U6.4, U7.1）を配した。

## 2.2 コンクリートの材料と調合

コンクリートの使用材料をTable 2, 調合をTable 3に示す。調合強度は実際の超高層RC造建物に使用する調合を想定し、柱の構造体コンクリート強度が設計基準強度を満足するよう定めた。骨材は強度レベルに応じて所定の強度発現が得られるよう、また爆裂に対する影響が同程度であるものを選定した。火災時の爆裂抑制用のPP繊維の形状は、既往の実験結果<sup>13), 18)</sup>などから所定の範囲内で繊維径が小さく繊維長が長いほど爆裂抑制効果が高い傾向が認められるが、本実験では無載荷加熱予備実験を行い爆裂抑制効果が認められかつコンクリートのワーカビリ

Table 2 コンクリートの使用材料

材料	シリーズ	種類	品質
セメント	I	フライアッシュセメントB種+シリカフェューム内割10%混入	
	II	シリカフェュームプレミクスセメントA (密度3.08g/cm <sup>3</sup> , 比表面積5920cm <sup>2</sup> /g)	
	III	シリカフェュームプレミクスセメントB (密度3.01g/cm <sup>3</sup> , 比表面積6650cm <sup>2</sup> /g)	
細骨材	I	硬質砂岩砕砂	表乾密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.75%
	II, III	安山岩砕砂	表乾密度: 2.67g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.75%
粗骨材	I	硬質砂岩碎石	表乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.13%
	II, III	安山岩碎石	表乾密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.75%
化学混和剤	I, II, III	高性能AE減水剤	特殊ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 (I: SP1, II: SP2, III: SP3)
有機繊維	I, II, III	ポリプロピレン (PP) 繊維	繊維径 (Fc80~200: 48μm, Fc210: 19μm) 繊維長 (Fc80~100: 19mm, Fc130~210: 10mm)
鋼繊維	III	鋼繊維	繊維長30mm, 繊維径0.6mm

Table 3 コンクリートの調合

シリーズ	記号	水セメント比 (%)	スランプフロー値 (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
I	Fc80	32.0	60.0	2.0	165	515	731	952
	Fc100	25.0			160	650	673	913
II	Fc130	23.0	65.0	1.5	160	695	877	706
	Fc150	17.0			160	941	760	612
III	Fc180	15.0	67.5	2.0	175	1167	603	487
	Fc200	13.0			155	1192	417	707
	Fc210	11.0			155	1409	258	706

ティを損なわないものとしてTable 2に示す繊維を選定した。また鋼繊維は繊維長さ30mm、繊維径0.6mmのものを用了。

PP繊維および鋼繊維の混入率は既往の研究結果<sup>19)</sup>より、コンクリートの圧縮強度発現およびフレッシュコンクリートの性状に影響を及ぼさないような混入率とし、PP繊維は0~0.33vol.%、鋼繊維は0~1.0vol.%とした。

## 2.3 実験方法

### 2.3.1 試験体の養生方法および圧縮強度、含水率

柱試験体の養生方法は、シリーズⅠ、ⅡおよびシリーズⅢのFc180では材齢7日で型枠脱型後、所定の材齢まで屋内環境で気中養生とした。シリーズⅢのFc200、Fc210では、所定の圧縮強度を得る養生方法<sup>19)</sup>として材齢7日まで蒸気養生（前養生48時間後、15℃/hで昇温、最高温度90℃で72h保持後外気温まで10℃/hで降温）した後、所定材齢まで屋内環境で気中養生とした。

コンクリートの圧縮強度試験用の供試体の養生方法は、柱試験体の養生方法と同様の温度条件での養生とした。シリーズⅠ、Ⅱでは柱試験体の温度履歴と同様な温度条件で養生したφ10×20cm供試体を所定の試験材齢（シリーズⅠ：360日、シリーズⅡ：180日）で圧縮強度試験を行った。シリーズⅢでは柱試験体と同様な温度条件で蒸気養生を行った供試体の所定材齢（180日）での圧縮強度とともに柱部材と同一形状、同一養生した試験体から採取したコアの圧縮強度も確認した。含水率は圧縮強度試験と同様に柱試験体と同一の条件で養生した供試体を加熱試験時に105℃で定量となるまで乾燥させ、質量変化率から求めた。

### 2.3.2 荷重加熱試験

荷重加熱試験装置の概要をFig.2に示す。試験体は加熱炉内に鉛直に設置し上下端から鉛直荷重を加え荷重した。荷重荷重(N)は、軸力比 $[N/(A_c \times F_c)]$ が0.25~0.33となるように設定した。ここに $A_c$ は柱断面積、 $F_c$ は設計基準強度である。試験体の加熱部分は、試験体全長さ2400mmのうち1800mmの範囲とし、ISO-834「耐火試験-建築構造部材-」20（以下、ISO834）に規定されている(1)式に示す標準加熱温度曲線に沿って加熱した。

$$T = 345 \log(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

ここに、T：加熱温度（℃）、t：経過時間（分）

加熱は荷重が終了するまで行い、試験終了とともに自然冷却とした。温度測定はFig.1に示す位置で加熱温度の他、鉄筋（主筋）温度及びコンクリート内部温度をK型熱電対（線径が1.00mmまたは0.65mm）を用いて行った。各実験における所定の荷重荷重は、加熱前に加力し加熱開始後、試験体が破壊するまで一定に保持した。荷重は油圧ジャッキに取付けたロードセルにより測定した。試験体の軸方向伸縮変形は、加圧板の上面に設置した変位計で測定した。保有耐火時間はISO834の規定による軸力を受ける部材の荷重支持能力の限界として下式(2)、(3)の何れかに到達した時間より求めた。

$$\delta = h/100 \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

$$d\delta/dt = 3h/1000 \quad (\text{mm/分}) \quad (3)$$

ここに、 $\delta$ ：軸方向変形量、 $d\delta/dt$ ：軸方向変形速度

h：軸力を受ける部材の長さ（mm）試験体の加熱長さ（1800mm）

荷重加熱試験は式(2)、(3)のいずれかの限界条件に到達するまで継続した。ただし試験装置の安全上の配慮から、保有耐火時間に到達する以前であっても、加熱時間が4時間を超えた場合は試験を打ち切ることとした。

### 2.3.3 爆裂深さ

加熱試験終了後、試験体温度が常温まで低下した後、試験体を加熱炉から取出し、表層のコンクリートの爆裂深さを測定した。爆裂深さは試験体加熱面に@50mmのグリッドを切り、グリッドの各節点において、加熱を受けないコンクリート表面位置を原点として爆裂後のコンクリート面までの深さを測定し各点の爆裂深さとし、測定値の

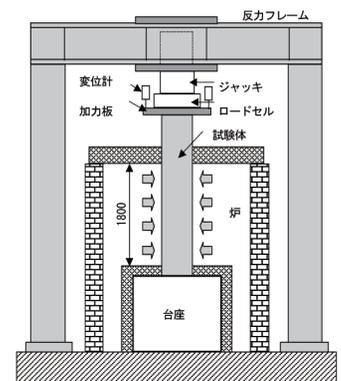


Fig.2 荷重加熱試験装置

最大値を最大爆裂深さ、平均値を平均爆裂深さとした。隅角部で測定面と直交する面のコンクリートが剥落し測定が不能な点は欠測値とした。また柱の崩壊により断面欠損が生じた箇所は加熱試験中の目視状況、剥落の状況から当該点の爆裂深さを推定した。

### 3 実験結果および考察

#### 3.1 爆裂性状

##### 3.1.1 爆裂の状況と爆裂深さ

Fig.3には、加熱実験後試験体の状況の例としてFc150試験体のPP繊維0%と0.33vol.%混入のもの、Fc200試験体のPP繊維0%、PP繊維0.33vol.%のもの、PP繊維0.33vol.%および鋼繊維0.5vol.%の試験体の外観を示す。Fc150-33で柱中央部のコンクリートが剥落しているのは破壊時に主筋の座屈により生じたものである。Fig.4には繊維混入率と最大爆裂深さの関係を、Fig.5には同様に平均爆裂深さとの関係を示す。

爆裂が発生した試験体では、いずれも加熱開始後10分頃より表層コンクリートが剥離・飛散する爆裂が始まる様子が観測され、加熱開始30分頃まで断続的に爆裂が継続した。爆裂は、圧縮強度レベルとPP繊維混入率、および鋼繊維混入の有無により大きく異なる性状を示した。PP繊維未混入の試験体の場合、いずれの強度レベルの試験体とも爆裂を生じており、爆裂の程度は圧縮強度が高い試験体ほど激しくなる傾向を示した。PP繊維未混入のFc80-00とFc100-00は、爆裂の大部分がコンクリートの平面部に集中して発生し、隅角部では比較的健全な形状を保持していた。Fig.4に示すように最大爆裂深さはPP繊維未混入でも30mm程度であり、かぶり部分のコンクリートが局所的に飛散する状況であった。Fc130以上の強度ではPP繊維未混入の場合、最大爆裂深さは70mm以上となり、Fig.3に示すように局所的に帯筋の内部まで爆裂が進展し主筋が露出するとともに、表面全体で帯筋が露出する激しい爆裂を生じた。Fc180、PP繊維未混入の場合、加熱面全面にわたり激しい爆裂が生じ帯筋および主筋の露出も顕著であった。

一方、PP繊維を混入した場合は、Fc80~Fc150ではPP繊維の混入率に応じて爆裂規模が大きく低減する傾向が見られた。Fc130およびFc150の場合、PP繊維混入率0.11vol.%ではPP繊維未混入のものに比較して平均爆裂深さで約60%程度に低減され、PP繊維混入率を0.33vol.%にしたものは爆裂はほとんど生じなかった。しかし、圧縮強度が180N/mm<sup>2</sup>を超えるFc180、Fc200ではPP繊維混入率を0.33vol.%としても爆裂が発生し、平均爆裂深さはFc180-33で16mm、Fc200-33で32.7mmとなった。これに対し、PP繊維

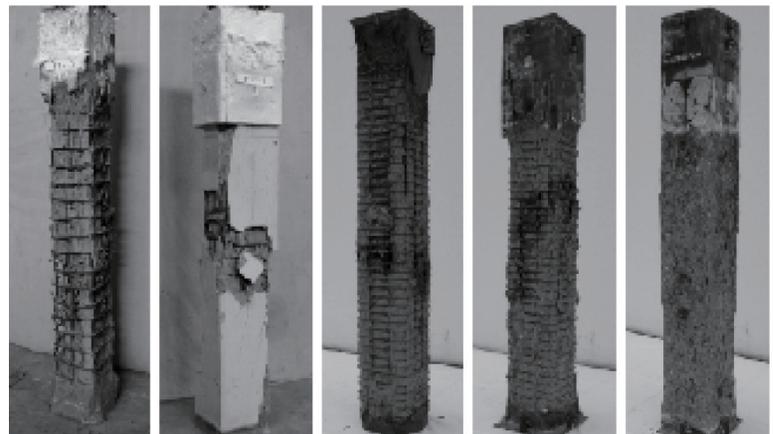


Fig.3 載荷加熱試験後の試験体の外観 (Fc150, Fc200)

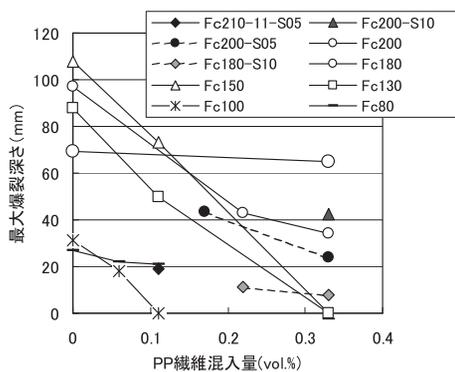
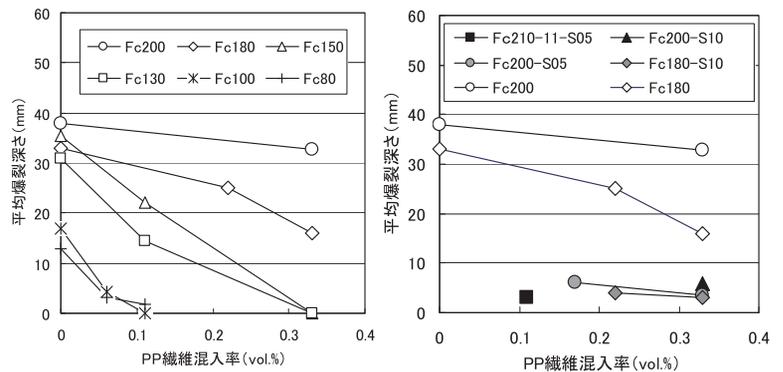


Fig.4 加熱後の試験体の最大爆裂深さと繊維混入率の関係 (シリーズI~III)



(a) シリーズI~III

(b) シリーズIII

Fig.5 加熱後の試験体の平均爆裂深さと繊維混入率の関係

維に加え鋼繊維を0.5~1.0vol.%混入した試験体では、PP繊維のみを混入した試験体に比べ爆裂深さは大きく低減されており、Fc180、Fc200とも平均爆裂深さは6mm~3mmとほぼ同程度となりPP繊維のみの場合に対する比は平均0.17と約1/6に低減された。

### 3.1.2 爆裂深さとPP繊維および鋼繊維混入率の関係

コンクリート部材の爆裂の程度に影響する因子としては、コンクリートの圧縮強度、含水率、骨材種類、部材形状、加熱条件、荷重軸力等の影響<sup>21)</sup>があるとされる。本実験結果では、爆裂は、局所的には帯筋内部まで至るが、Fig.5に示すように平均的にはかぶり部分のコンクリートで生じており、圧縮強度の増加に伴い増大している。またFig.5に示すようにPP繊維の混入による爆裂低減の大きさは圧縮強度レベルによって異なり、圧縮強度が高いほどPP繊維混入による爆裂の低減効果は小さくなる傾向が見られる。さらにFc180、Fc200では鋼繊維をPP繊維と併用することにより爆裂深さが大きく低減される。また既往の実験<sup>16)</sup>では圧縮強度が70N/mm<sup>2</sup>以下であればPP繊維を混入しない場合でも爆裂は生じにくい。以上の結果を考慮すると、平均爆裂深さをコンクリートの圧縮強度、かぶり厚さ、PP繊維および鋼繊維の混入率との関係式として(4)式のような近似式を導くことができる。

$$D_s = \alpha \left[ \frac{d_c}{16.2} (\sigma_B - 70)^{0.621} - V_f (232 - 0.883 \sigma_B) \right] \quad (4)$$

ここに、 $D_s$ :平均爆裂深さ (mm)、 $d_c$ :かぶり厚さ (mm)、 $\sigma_B$ :コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) で  $\sigma_B \geq 70$ 、 $V_f$ :PP繊維混入率 (vol.%)、 $\alpha$ :鋼繊維をPP繊維と併用する場合の低減係数(鋼繊維0.5vol.%以上:0.17, 鋼繊維未混入:1.0)

(4)式の第一項は、PP繊維0%の場合に、コンクリートの圧縮強度 $\sigma_B$ が70N/mm<sup>2</sup>を超えると爆裂が発生し、圧縮強度の増加とともに指数関数的に増加すること、およびかぶり厚さ $d_c$ に比例して増加するとしたものである。第2項は、PP繊維を混入した場合、爆裂深さはPP繊維の混入率 $V_f$ に比例して減少し、PP繊維の単位混入率当りの爆裂深さ低減率は $\sigma_B$ の増加にともない小さくなるとしたものである。また鋼繊維の混入による爆裂深さの低減係数は、Fig.5より鋼繊維0%の爆裂深さに対する鋼繊維混入の場合の爆裂深さの比の平均値として0.17とした。以上の仮定からFig.5に示す実測値を用いて回帰分析を行い(4)式を導いた。Fig.6にはPP繊維および鋼繊維未混入の場合の圧縮強度と平均爆裂深さの関係について、実測値および(4)式による推定値を示す。また、Fig.7には(4)式による平均爆裂深さの推定値と実験値の関係を示す。(4)式は本実験の含水率、荷重軸力などの条件におけるものであるが、(4)式の決定係数は0.908となり実験値とよく整合している。

爆裂の状況より、爆裂が生じないかあるいは局所的に剥落はあるものの爆裂の程度が軽微と判断されるものは、平均爆裂深さが概ね5mm程度以下のものと判断できる。これより、鋼繊維未混入の場合に平均爆裂深さを5mm以下とするためのPP繊維の所要混入率と圧縮強度の関係を(4)式より推定するとFig.8のようになる。Fig.8よりコンクリートの圧縮強度が概ね180N/mm<sup>2</sup>を超えるコンクリートでは、平均爆裂深さを5mm以下にするためのPP繊維量が0.4vol.%程度以上必要となる。

PP繊維の混入による爆裂の抑制メカニズムは十分には明らかにされていないが、火災の初期の高温加熱下でPP繊維が消失し、コンクリート中に空洞を生じるとともに、マイクロクラックを生じ、水蒸気圧の緩和や熱応力の緩和がなされるため<sup>12)</sup>と考えられる。しかしPP繊維の効果はマトリクスの強度や緻密性によって異なると考えられる。本実験結果ではPP繊維の単位混入率当りの爆裂深さの低減効果はコンクリートの圧縮強度の増加とともに小さくなっており、圧縮強度が180N/mm<sup>2</sup>クラス以上では、PP繊維量が0.33vol.%程度では爆裂を抑制することは困難である。また過剰なPP繊維の混入は高強度コンクリートの流動性や強度発現などを損なう<sup>9)</sup>、<sup>19)</sup>ことから実用上望ましくない。

これに対しFig.5に示すように鋼繊維を併用した試験体では爆裂がPP繊維のみの場合の1/6程度以下に抑制されており、平均爆裂深さは概ね5mm程度以下となっている。水セメント比66~32%程度の一般強度レベルの鋼

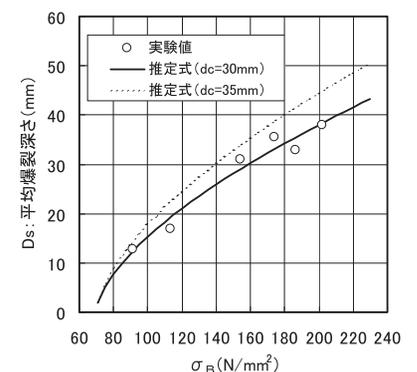


Fig.6 PP繊維、鋼繊維未混入の場合の圧縮強度と平均爆裂深さの関係

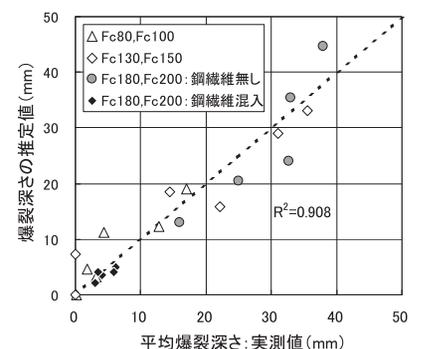


Fig.7 平均爆裂深さの推定値と実験値の関係

繊維補強コンクリート供試体の高温加熱実験では温度上昇時のマイクロクラックの伝播を鋼繊維未混入のものに比べ遅らせる効果が報告されている<sup>22)</sup>が激しいひび割れを抑制するには十分ではない。本実験のような $180\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートにおいて鋼繊維の混入が爆裂を抑制するのは、PP繊維による水蒸気圧や熱応力の緩和効果に加えて鋼繊維の補強効果により加熱時に発生するコンクリート中のクラックの進展を抑制し、表層のコンクリートの剥落を防止することや、鋼繊維によるコンクリートの拘束効果によるものと考えられ、鋼繊維とPP繊維を併用する相乗効果により爆裂を抑制する効果が向上すると考えられる。

以上よりFcが $80\sim 150\text{N/mm}^2$ レベルではPP繊維の混入のみにより爆裂を大きく低減することが可能であり、平均爆裂深さを $5\text{mm}$ 程度以下に抑制するのに必要なPP繊維の混入率はFc $100\text{N/mm}^2$ では約 $0.11\text{vol.}\%$ 、Fc $150\text{N/mm}^2$ では $0.33\text{vol.}\%$ 程度となる。またFc $180\text{N/mm}^2$ 以上ではPP繊維の混入のみでは、爆裂の抑制は困難であり、PP繊維を $0.33\text{vol.}\%$ 程度とし、鋼繊維を $0.5\sim 1.0\text{vol.}\%$ 程度混入することが有効であると言える。

### 3.2 柱試験体の内部温度

Fig.9には載荷加熱試験時のコンクリートおよび鉄筋の温度測定結果の例としてFc150のコンクリート内部および主筋の温度測定結果を示す。温度測定位置は、柱試験体加熱面高さの中央で平面部に直交する対称面上であり、加熱温度とともに加熱表面からの深さを $30, 60, 90, 120$ および $175\text{mm}$ としたコンクリート内部温度 (C1~C5) と主筋温度 (S1) を示している。PP繊維未混入のFc150-00では加熱開始後10分程度から激しい爆裂を生じ表層部のコンクリートおよび主筋の温度は急速に上昇し、加熱開始60分後の破壊時で主筋温度は $600^\circ\text{C}$ に達しているのに対し、PP繊維を $0.33\text{vol.}\%$ 混入し爆裂が生じていないFc150-33では温度上昇は緩やかであり3時間後でも主筋温度は $600^\circ\text{C}$ を下回っていた。激しい爆裂を生じるコンクリート部材ではPP繊維の有無により温度履歴に大きな差異を生じPP繊維の混入が部材の温度上昇の抑制に有効なことがわかる。

Fig.10には、Fc $80\sim 150$ の試験体における加熱開始後60分の時点での試験体内部の温度分布を示す。PP繊維未混入のものでは表層から $30\text{mm}$ の深さではいずれも $500^\circ\text{C}$ を超え、Fc150では深さ $60\text{mm}$ でも $500^\circ\text{C}$ を超えている。火災時のような高温加熱を受ける高強度コンクリートは加熱後の残存強度やヤング係数が $50\%$ 程度以下に低下する<sup>23)</sup>ことから、柱を再使用する場合は補修が必要となる。Fc $150\text{N/mm}^2$ クラスの高強度RC柱が1時間程度の火災を受けた場合、仮に柱が破壊に至らなかったとしても、再使用のための火災補修に対しては、無混入のものが主筋位置より深いコンクリートまでを含む大規模な補修となるのに対し、PP繊維を混入した場合にはかぶり部分程度の補修となり補修の程度が大きく軽減されることになる。

Fig.11にはFc $180\text{N/mm}^2$ の場合のPP繊維未混入のFc180-00、PP繊維を $0.33\text{vol.}\%$ 混入したFc180-33、PP繊維に加え鋼繊維を $1.0\text{vol.}\%$ 混入したFc180-33-S10のコンクリート温度履歴 (C1~C5) と主筋温度 (S1) の履歴を示す。PP繊維未混入のFc180-00では、Fc150と同様に加熱開始後10分程度から激しい爆裂を生じ温度上昇は急激であるが、PP繊維を $0.33\text{vol.}\%$ 混入したFc180-33においても、最大爆裂深さは $34\text{mm}$ 、平均爆裂深さは $16\text{mm}$ と中程度の爆裂を生じ、表面に近いコンクリート温度、鉄筋温度はとも急激に上昇しており、約70分後には表層から $30\text{mm}$ のコンクリートおよび主筋温度が $500^\circ\text{C}$ を超え、148分で破壊した。これに対し、PP繊維 $0.33\text{vol.}\%$ および鋼繊維 $0.10\text{vol.}\%$ を混入したFc180-33-S10では、最大爆裂深さは $8\text{mm}$ と軽微な剥離が生じた程度であり、表層部のコンクリートおよび鉄筋の温度上昇は緩慢であり、主筋温度が $500^\circ\text{C}$ を超えるのは加熱開始後約150分と極めて低い温度で推移し保有耐火時間は240分を超えることとなった。これはかぶり部分のコンクリートが破壊時まで概ね保持されたことによりコンクリート内部への熱伝導が抑制されたものである。鋼繊維を混入することにより、かぶり部分のコンクリートの熱応

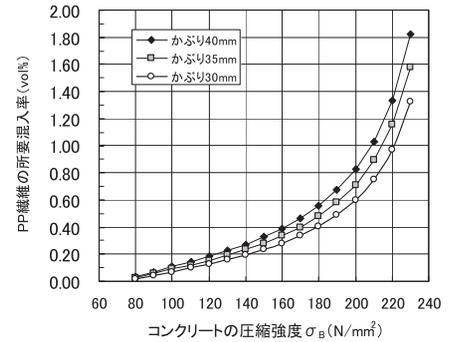


Fig.8 平均爆裂深さを $5\text{mm}$ 以下とするためのPP繊維所要混入率と圧縮強度の関係 (鋼繊維未混入の場合)

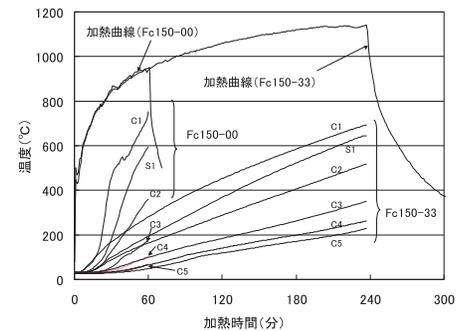


Fig.9 試験体内部の温度履歴 (Fc150)

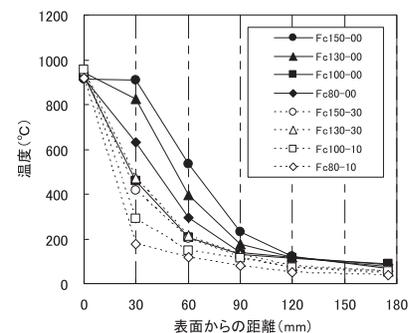


Fig.10 加熱開始60分後の試験体内部の温度分布 (シリーズ I, II)

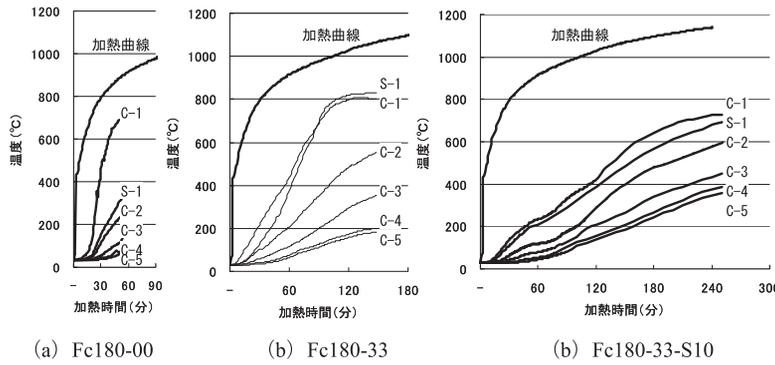


Fig.11 試験体内部の温度履歴 (Fc180)

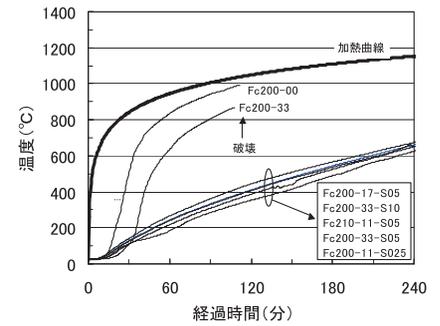


Fig.12 帯筋位置 (深さ35mm) の温度履歴 (Fc200, Fc210)

力による変形やひび割れの進展が拘束されコンクリートの剥落を抑制される。これによりかぶり部分コンクリートの厚さが確保されることとなり、部材内部への熱伝達を緩和し温度上昇を抑制する効果があると考えられる。

Fig.12にはFc200およびFc210試験体の帯筋位置の温度履歴を示す。Fc180と同様、PP繊維未混入のFc200-00では加熱開始後10分程度から爆裂が生じ、PP繊維0.33vol.%混入のFc200-33でも15分程度から爆裂により温度が急激に上昇している。これに対しPP繊維と鋼繊維を併用した試験体ではいずれも平均爆裂深さは6mm以下であり、鉄筋位置での温度上昇は緩やかで4時間でも破壊に至らなかった。Fc200N/mm<sup>2</sup>クラスにおいてもPP繊維と鋼繊維の併用は爆裂の抑制とコンクリートおよび鉄筋温度上昇の抑制に効果が高いと言える。

### 3.3 軸方向変形および保有耐火時間

#### 3.3.1 载荷加熱時間と軸方向変形

各試験体の軸方向変形測定結果を強度レベル別にFig.13からFig.16に示す。各試験体とも载荷加熱中の軸方向の伸び変形は見られず、载荷方向に圧縮変形を生じ、破壊に至るまで軸方向圧縮量が経過時間とともに徐々に増加している。

軸方向の圧縮変位量が増大する原因は、加熱によるコンクリートの強度およびヤング係数の低下、内部ひび割れの発生による軸剛性の低下、クリープの増大および爆裂による断面積の減少等の影響が考えられる。Fc180以上の

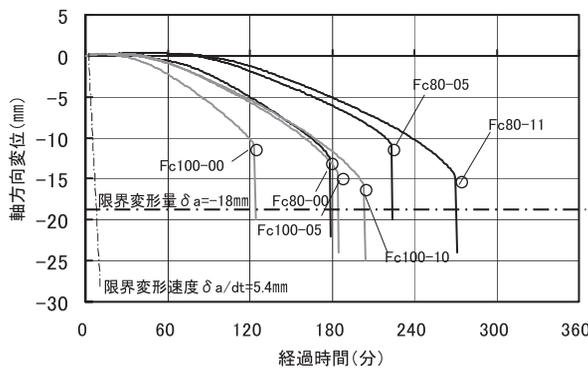


Fig.13 軸方向変位と保有耐火時間 (Fc80, Fc100)

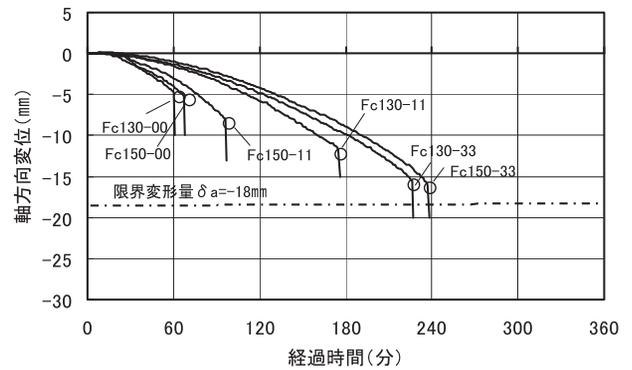


Fig.14 軸方向変位と保有耐火時間 (Fc80, Fc100)

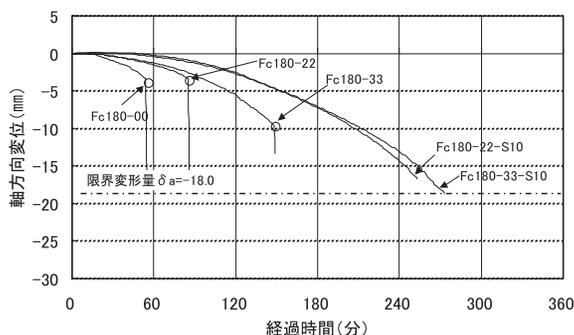


Fig.15 軸方向変位と保有耐火時間 (Fc180)

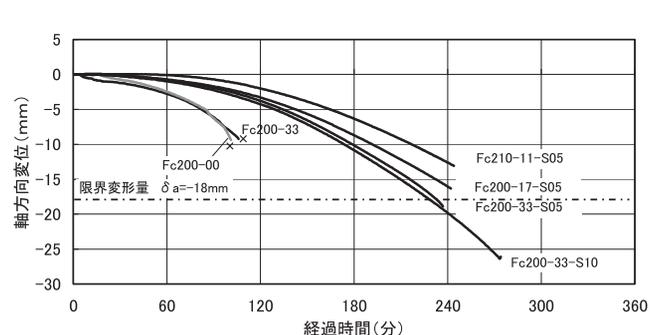


Fig.16 軸方向変位と保有耐火時間 (Fc200, Fc210)

鋼繊維を混入した試験体を除いてはいずれも限界変形量に到達する前に、急速に変形速度が増加し(3)式の許容変形速度条件を超え、主筋が局部座屈し破壊に至っている。また強度レベルが高い試験体ほど変形量が小さい段階で変形速度が急増し、崩壊に至る傾向が見られた。

一方、Fig.15, Fig.16に示すようにPP繊維と鋼繊維を併用したFc180以上の試験体では、軸方向変位は徐々に増加し、加熱時間が180分においても(3)式の許容変形速度条件に至らず鉄筋の局部座屈は生じていない。試験装置の安全上の配慮から加熱時間が概ね240分で試験を終了したが、Fc180, Fc200, Fc210とも鋼繊維を混入した試験体は、式(2)に示す変形量の限界値に到達するか、あるいは240分でも変形量は限界値まで達せず、220から240分以上の保有耐火時間が得られている。

### 3.3.2 保有耐火時間

Fig.17には、保有耐火時間とPP繊維、鋼繊維混入率の関係を示す。またFig.18, Fig.19にはそれぞれ最大爆裂深さ、平均爆裂深さと保有耐火時間の関係を示す。PP繊維未混入の試験体では試験体のコンクリート強度の増大により保有耐火時間は減少し、Fc80では約180分、Fc100では約120分であるのに対し、Fc130以上の強度レベルでは概ね60分程度の保有耐火時間に留まっている。これに対し、PP繊維の混入により同一強度レベルでの保有耐火時間は増加し、Fc80, Fc100では0.055vol.%から0.11vol.%のPP繊維混入により、また、Fc130, Fc150では0.33vol.%のPP繊維混入により、180分以上の保有耐火時間が得られている。これらのPP繊維混入率はFig.18, 19に示すように平均爆裂深さを10mm以下、最大爆裂深さを約20mm以下の軽微な段階に抑制する混入率と対応しており、Fc150N/mm<sup>2</sup>以下の高強度コンクリートではPP繊維を適量混入することにより爆裂を抑制することが保有耐火時間の増加に効果が高いことを示している。

一方、Fc180およびFc200ではPP繊維混入率を0.33vol.%としても保有耐火時間はそれぞれ148分、101分となり、180分を超える保有耐火時間は得られていない。Fc180からFc200N/mm<sup>2</sup>レベルの高強度コンクリートの場合、PP繊維混入率の増大により保有耐火時間をある程度まで増加させることはできるが、PP繊維混入率が0.33vol.%程度では十分ではないと言える。これに対し、PP繊維に加え鋼繊維を0.5vol.%から1.0vol.%混入した試験体では、Fig.18, 19に示すように平均爆裂深さが6mm以下に低減され、いずれも180分を超える保有耐火時間が得られている。これは鋼繊維によりかぶり部分のコンクリートの剥離や爆裂が生ぜず、コンクリートおよび鉄筋の急激な温度上昇が抑制されたことにより、部材断面の確保と、高温によるコンクリートおよび鉄筋の強度低下を抑制したためと考えられる。また鋼繊維補強したFc150N/mm<sup>2</sup>クラスの高強度鉄筋コンクリート柱部材の耐力は、常温条件では、横補強筋に加えて鋼繊維による拘束効果が増大し、耐力が増加する傾向がある<sup>24)</sup>が、高温時においても同様に鋼繊維による拘束効果により残存強度の低下が抑制され<sup>25)</sup>、見掛けの軸力比が低減し保有耐火時間が増加したことも考えられる。

超高強度コンクリートへの鋼繊維の混入は、火災時の保有耐火時間の増大に大きく寄与し、また常温時の部材の圧縮耐力や曲げ耐力の増大にも効果が高いことから極めて有効であると考えられる。

## 4 まとめ

高強度コンクリートを使用する部材の耐火性能を確保する目的として、設計基準強度が80N/mm<sup>2</sup>から210N/mm<sup>2</sup>

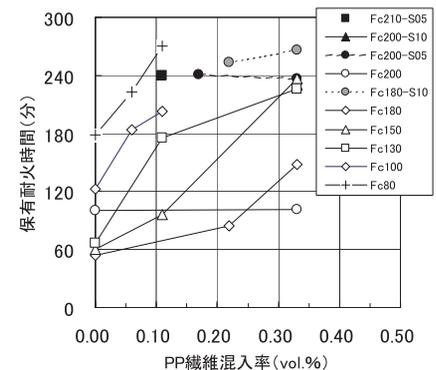


Fig.17 保有耐火時間とPP繊維混入率

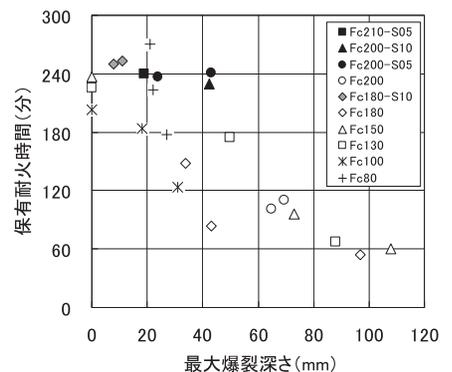


Fig.18 保有耐火時間と最大爆裂深さの関係

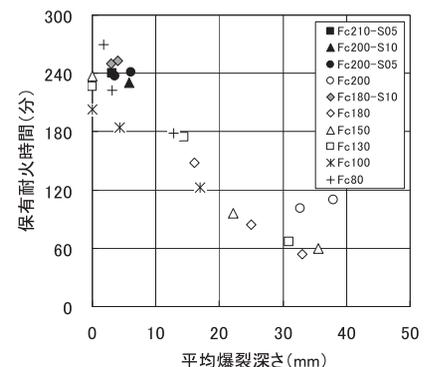


Fig.19 保有耐火時間と平均爆裂深さの関係

の範囲についてRC柱の荷重加熱実験を行い、PP繊維、鋼繊維の爆裂抑制効果と保有耐火時間について検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) Fc80~Fc200N/mm<sup>2</sup>クラスの高強度コンクリートでは繊維未混入の場合、火災時の加熱により激しい爆裂が発生する。爆裂の程度はコンクリート強度が高いほど大きく、加熱開始から10分程度で爆裂が始り、表層のコンクリートや鉄筋の急激な温度上昇を引き起こし、保有耐火時間は60~120分程度となる。
- 2) PP繊維による爆裂の低減は150N/mm<sup>2</sup>クラスのコンクリートまでは有効であり、0.11~0.33vol.%のPP繊維の混入により平均爆裂深さを5mm程度以下に抑制することが可能であり、爆裂深さの低減により保有耐火時間は大きく増大する。180分以上の保有耐火時間を満足するPP繊維混入率は、Fc80で0.055vol.%以上、Fc100で0.10vol.%以上、Fc130とFc150では0.33vol.%以上となる。
- 3) Fc180, Fc200N/mm<sup>2</sup>ではPP繊維混入率が0.33%では、爆裂の抑制は不十分であり、保有耐火時間は120分程度以下となる。これに対しPP繊維に加え鋼繊維を0.25%~1.0vol.%併用することにより、平均爆裂深さは6mm以下と著しく低減され、コンクリートや鉄筋の温度上昇を抑制し、180分以上の保有耐火時間を確保することが可能となる。

本研究では、Fc80N/mm<sup>2</sup>からFc210N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを用いたRC柱の保有耐火時間を荷重加熱実験の結果から評価し、限定された条件ではあるが、PP繊維および鋼繊維の混入により爆裂を抑制し、保有耐火時間の向上が可能なることを示した。高強度コンクリートを用いた部材の保有耐火時間の精度の高い評価には、コンクリートの含水率、高温条件下の高強度コンクリートの強度や弾性係数、クリープといった力学特性の評価や断面形状、配筋、荷重軸力等を考慮した検討が必要である。これらについては今後検討を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) Hermathy, T.Z.: Effect of moisture on the fire endurance of building materials. Moisture in Relation to Fire Tests. ASTM Special Technical Publication, No.385, ASTM, pp.74-95, 1965
- 2) Saito, H: Explosive spalling of prestressed concrete in fire, In Fire Resistance of Prestressed Concrete, Proceedings of a symposium at Braunschweig, June 1965, Brauersverlag GmbH, Wiesbaden, p.80, 1964
- 3) 齋藤光：プレストレストコンクリートの耐火性，日本火災学会論文集，Vol.16, No.2, pp.25-30, 1967.1
- 4) U.シュナイダー（森永，山崎，林 訳）：コンクリートの熱的性質，技報堂，1983
- 5) 井上明人，飛坂基夫，榊田佳寛：高強度コンクリートの耐火性の評価に関する研究 第2報 骨材の岩種および含水率の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，A1, pp.739-740, 1991.9
- 6) 齋藤光：高強度鉄筋コンクリート構造についての危惧，建材試験情報11, p.5, 1994.11
- 7) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温度における高強度コンクリートの力学特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第515号，pp.163-168, 1999.1
- 8) 宮本圭一，大内富夫，桜本文敏，鈴木清孝，閑田徹志：超高強度コンクリートに関する開発研究 その6 実大RC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，A, pp.481-482, 1992.8
- 9) 井上英之，山崎庸行，斉藤秀人，西田朗，熊谷仁志，渡部保：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1~4，日本建築学会大会学術講演梗概集，A, pp.331-338, 1994.9
- 10) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2003
- 11) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，2005.2
- 12) R. Breitenbucker: "High Strength Concrete C 105 with Increased Fire-Resistance due to Polypropylene Fibers", Proceedings-Volume 2, pp.B571-577, Utilization of High Strength/High Performance Concrete 29-31 May 1996, Paris, France
- 13) 森田武，山崎庸行，橋田浩，西田朗，米澤敏男，古平章夫，三井健郎：合成繊維を利用した高耐火・高強度コンクリート：セメント・コンクリート，No.648, pp.224-31, 2001.2
- 14) 森田武，西田朗，橋田浩，山崎庸行：火災時における高強度コンクリート部材の爆裂性状の改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第544号，pp.171-178, 2001.6
- 15) 井上孝之，三井健郎，米澤敏男，古平章夫，藤中英生：高強度コンクリートに対するポリプロピレン繊維の爆裂抑制作用に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-2, pp.251-252, 1997
- 16) 藤中英生，三井健郎，米澤敏男，古平章夫：ポリプロピレン繊維を混入した高強度RC柱の耐火性能，日本火災学会論文集，Vol.54, No.1, pp.17-23, 2004
- 17) 三井健郎，米澤敏男，藤中英生，古平章夫，辻大二郎：合成繊維を混入したFc150N/mm<sup>2</sup>超高強度コンクリート

- トRC柱の耐火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A1, pp.999-1000, 2003.3
- 18) 百瀬晴喜, 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/mm<sup>2</sup>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報告集, Vol.25, No.1, pp.995-1000, 2003
  - 19) 小島正朗, 三井健郎, 辻大二郎, 鴉越元紀: Fc200N/mm<sup>2</sup>超高性能コンクリートの開発(その1)フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の発現性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.1087-88, 2008.9
  - 20) ISO834: "Fire-resistance tests -Elements of building construction-", 1997.
  - 21) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, p.98, 2009.3
  - 22) Lau, A., Anson, M: Effect of high temperature on high performance steel fibre reinforced concrete, Cement and Concrete Research, No.36, pp.1698-1707, 2006
  - 23) 一瀬賢一, 長尾覚博, 川口徹: 高温加熱状態における高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.23-28, 2002.7
  - 24) 高津比呂人, 木村秀樹, 石川裕次, 三井健郎, 武田浩: 鋼繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱部材に関する実験的研究, 竹中技術研究報告, No.58, pp.1-10, 2002
  - 25) 出口嘉一, 三井健郎: 予熱したコンクリートを用いた高温圧縮試験方法の提案と結果, 日本火災学会論文集, Vol.59, No.1, pp.17-23, 2009