

# 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

安部弘康<sup>\*1</sup>・鈴木好幸<sup>\*1</sup>

高強度コンクリートの火災時の爆裂抑制には、ポリプロピレン繊維の混入が有効なことが知られている。しかし、コンクリートへの低収縮化などの要求から使用が増えている石灰石粗骨材を、高強度コンクリートへ用いた場合の耐火性能については、実験的な検討例も少ない。そこで、各種粗骨材を用いた設計基準強度 80 ~ 100N/mm<sup>2</sup> 級の高強度コンクリートにおいて、鉄筋コンクリート柱の耐火性能について実験的検討を行った。その結果、石灰石骨材を用いた高強度の鉄筋コンクリート柱においても、ポリプロピレン繊維を適切に混入することで、耐火性能を確保できることがわかった。

キーワード：高強度コンクリート、石灰石粗骨材、耐火性能、加熱実験

## 1. はじめに

高強度コンクリートは、普通強度のコンクリートと比較して、火災時に爆裂が発生しやすくなるが、ポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維）の混入により、爆裂の発生を抑制できることが知られている。<sup>1)</sup> 著者らも設計基準強度（以下、 $F_c$ ）100N/mm<sup>2</sup> を超える超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート（以下、RC）柱の耐火性能について確認し、既に報告<sup>2)</sup> している。

一方、近年では、コンクリートに対する低収縮化の要求などから、乾燥収縮率が他の岩石に比べ小さい石灰石粗骨材を標準的な調合に採用するレディーミクストコンクリート工場が増え、これまで、硬質砂岩など、比較的骨材強度の大きい粗骨材を主に用いてきた高強度コンクリートの領域でも使用例が増えている。しかしながら、骨材種類が爆裂性状や耐火性能に及ぼす影響は必ずしも明確ではなく<sup>3)</sup>、石灰石粗骨材を使用した RC 柱の載荷加熱実験報告<sup>4,5)</sup> もまだ少ないのが現状である。

そこで、本研究では、石灰石粗骨材および硬質砂岩粗骨材を使用した  $F_c=80 \sim 100\text{N/mm}^2$  級の高強度コンクリートを

対象に、供試体および実大規模の柱試験体を用いた加熱実験を行い、PP 繊維混入による爆裂抑制効果と RC 柱の耐火性能を確認した。

## 2. 実験全体の概要

### 2.1 実験シリーズ

本研究では、実験は3つのシリーズで行った。表-1に実験全体の試験体の組み合わせを示す。

[シリーズⅠ 供試体加熱実験]

供試体加熱実験は、実験に用いるコンクリートの物性確認と、載荷加熱実験および実大加熱実験における試験パラメータの設定を目的に、円柱供試体  $\phi 150 \times 300\text{mm}$  を用い、21 水準各 2 本で実施した。

[シリーズⅡ 載荷加熱実験]

載荷加熱実験は、PP 繊維を混入した RC 柱の耐火性能および爆裂性状の確認を目的に、断面  $400 \times 400\text{mm}$ 、長さ  $3000\text{mm}$ （加熱区間  $2000\text{mm}$ ）の試験体 6 体で行った。

[シリーズⅢ 実大加熱実験]

実大加熱実験は、既往の文献<sup>6)</sup>で、爆裂は部材断面が大

表-1 実験全体の試験体組み合わせ

$F_c(\sigma_B)$ (N/mm <sup>2</sup> )	セメント 種類	粗骨材	PP 繊維混入率 (×vol%)					
			0.000	0.050	0.075	0.085	0.100	0.150
60(80)	中庸熱ポルトランドセメント	石灰石	ベース	10mm	—	—	10mm	10mm
80(100)	中庸熱ポルトランドセメント	石灰石	ベース	10mm 20mm	—	10mm 20mm	10mm 20mm	10mm 20mm
		硬質砂岩	ベース	10mm	—	10mm	10mm	10mm
100(120)	シリカフェーム混入セメント	硬質砂岩	ベース	—	—	—	10mm	10mm

注) 混入量の数字は供試体加熱実験の繊維長を示す。   は載荷加熱実験を実施。   は載荷加熱、実大加熱実験の双方を実施。

\*1 建築研究第二部

きいほど激しくなることが報告されていることから、実大サイズの柱における爆裂性状の確認を目的に、シリーズⅡと同一調合のコンクリートで作製した、断面1000×1000mm、長さ1500mm（加熱区間1100mm）の試験体4体で実施した。

コンクリートはいずれのシリーズも $F_c=80 \sim 100N/mm^2$ 級の高強度コンクリートを対象とし、シリーズⅠのみ比較用に $F_c=60N/mm^2$ 級も追加した。表中の $F_c$ に併記した $\sigma_B$ は、実強度の目標値である。また、PP繊維混入率の数字は供試体加熱実験に使用したPP繊維の長さを示しており、10mmを基本とし、比較用に20mmを用いた。荷重加熱実験および実大加熱実験では、PP繊維長は10mmのみとした。セメントおよび粗骨材は、 $F_c=60N/mm^2$ では中庸熟ポルトランドセメントと石灰石、 $F_c=80N/mm^2$ では中庸熟ポルトランドセメントに石灰石と硬質砂岩、 $F_c=100N/mm^2$ ではシリカフェーム混入セメントに硬質砂岩とした。

### 2.2 コンクリートの使用材料および調合

表-2にコンクリートの使用材料を、表-3にコンクリートの調合を示す。粗骨材は、主に東京湾岸地区で多く使用されている産地のものを選択した。また、粗骨材に硬質砂岩を使用した $F_c=100N/mm^2$ の調合は、供試体加熱実験

表-2 コンクリートの使用材料

セメント	M	中庸熟ポルトランドセメント ：密度 3.21g/cm <sup>3</sup>
	SFC	シリカフェーム混入セメント ：密度 3.08g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	混合砂，混合比(質量比) ①：②=60：40 ①千葉県富津市鶴岡産山砂 ：表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> ②青森県八戸市松館産 ：表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup>
	S2	千葉県富津市鶴岡産山砂 ：表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	山口県美祢市伊佐産砕石（石灰石） ：表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup>
	G2	青森県八戸市松館産砕石（石灰石） ：表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup>
	G3	茨城県桜川市富谷産砕石（硬質砂岩） ：表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup>
混和剤	SP1	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸系
	SP2	高性能減水剤 ポリカルボン酸系
有機繊維	PP	ポリプロピレン繊維 ：繊維径 48μm，繊維長 10・20mm

表-3 コンクリートの調合

調合 No.	$F_c(\sigma_B)$ (N/mm <sup>2</sup> )	水セメント比 (%)	粗骨材 種類	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						混和剤 種類		
				W	M	SFC	S1	S2	G1		G2	G3
63-60-20M-LS	60(80)	32.8	石灰石	170	519	-	825	-	608	261	-	SP1
83-60-20M-LS	80(100)	25.7		170	662	-	710	-	608	261	-	
83-60-20M-SS			硬質砂岩	170	662	-	-	723	-	-	840	SP2
100-60-20SFC-SS-1*1)	100(120)	20.0		155	-	775	-	668	-	-	840	
100-60-20SFC-SS-2*2)		22.0		155	-	705	-	728	-	-	840	

\*1) 供試体加熱実験の調合 \*2) 荷重加熱実験および実大加熱実験の調合

では水セメント比 20.0%としたが、圧縮強度が実強度の目標値を上回っていたため、荷重加熱実験および実大加熱実験では水セメント比を 22.0%とした。

### 2.3 加熱実験の概要

図-1に荷重加熱実験時の耐火炉および荷重装置の概要を示す。供試体加熱実験および実大加熱実験では、同じ耐火炉内に試験体を配置して実験を行った。図-2に加熱実験に用いた、ISO834に規定される標準加熱温度曲

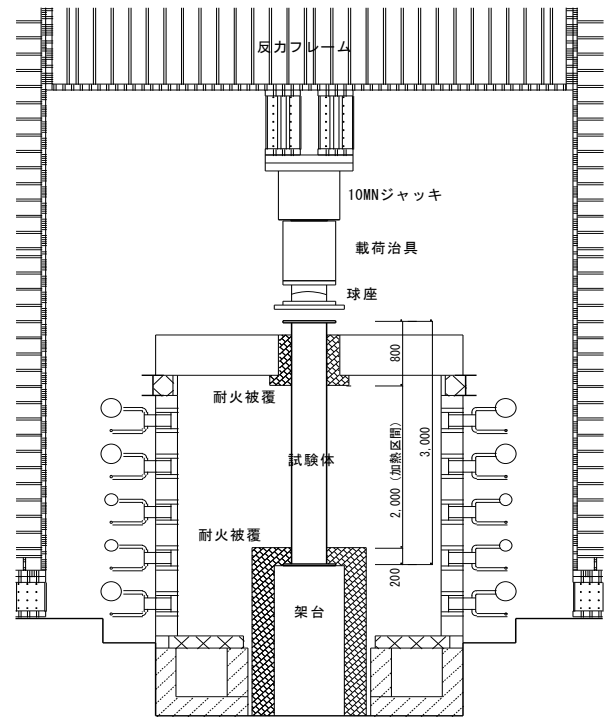


図-1 加熱装置図（荷重加熱実験）

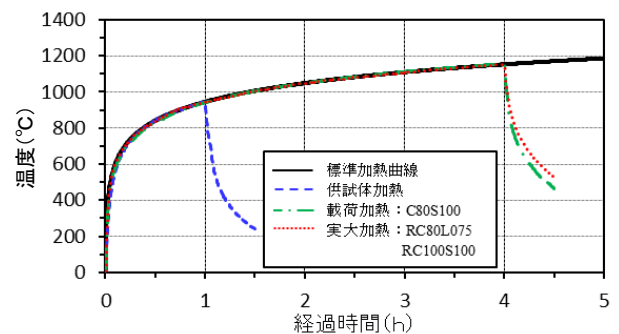


図-2 標準加熱曲線および平均炉内温度図

線と各シリーズの炉内温度測定結果の一例を併せて示す。加熱時の平均炉内温度は、すべての試験において、標準加熱温度曲線をほぼ満足した。

### 3. 供試体加熱実験 (シリーズ I)

#### 3.1 実験条件

表-4に実験条件を示す。シリーズ I のパラメータは、 $F_c$  ( $\sigma_B$ ) の対象を、 $60\text{N/mm}^2$  ( $80\text{N/mm}^2$ ),  $80\text{N/mm}^2$  ( $100\text{N/mm}^2$ ),  $100\text{N/mm}^2$  ( $120\text{N/mm}^2$ ) の3水準とし、粗骨材は石灰石、硬質砂岩の2水準とした。PP 繊維の長さは 10, 20mm の2水準、および混入率をコンクリート体積の 0.000, 0.050, 0.085, 0.100 および 0.150vol% の5水準とした。PP 繊維を混入する場合はベース調合を練混ぜ後、5分静置した後に所定量のPP 繊維を外割で混入し、再度練り混ぜて供試体を作製した。フレッシュコンクリートのスランプフロー目標値は、ベースコンクリートで  $65 \pm 10\text{cm}$ , PP 繊維混入後で  $60 \pm 10\text{cm}$  とし、空気量の目標値は、 $F_c=60\text{N/mm}^2$  では 3.0 (+1.5, -1.0)%,  $F_c=80$  および  $100\text{N/mm}^2$  では 2.0 (+1.5, -1.0)% とした。なお、各コンクリートのフレッシュ性状は、目標品質となるように混和剤使用量で調整した。

#### 2.1 試験項目および試験方法

##### (1) 物性試験

表-5に試験項目および方法を示す。圧縮強度およびヤング係数は、加熱実験用供試体と同条件で採取・養生し

表-4 供試体加熱実験の実験条件

供試体名	$F_c(\sigma_B)$ ( $\text{N/mm}^2$ )	粗骨材 種類	繊維 長さ (mm)	PP 繊維 混入率 (vol%)	調合 No.
60L000	60 (80)	石灰石	-	0.000	63-60- 20M-LS
60L050-10			10	0.050	
60L100-10			10	0.100	
60L150-10			10	0.150	
80L000	80(100)	石灰石	-	0.000	83-60- 20M-LS
80L050-10			10	0.050	
80L050-20			20		
80L085-10			10	0.085	
80L085-20			20		
80L100-10			10	0.100	
80L100-20			20		
80L150-10			10	0.150	
80L150-20	20				
80S000	80(100)	硬質 砂岩	-	0.000	83-60- 20M-SS
80S050-10			10	0.050	
80S085-10			10	0.085	
80S100-10			10	0.100	
80S150-10			10	0.150	
100S000			100(120)	硬質 砂岩	
100S100-10	10	0.100			
100S150-10	10	0.150			

表-5 試験項目および方法

試験項目	試験方法	供試体
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠	円柱 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ , 1 調合につき 3 体
ヤング係数	JIS A 1149 に準拠	
乾燥収縮 ひずみ	JIS A 1129-3(ダイヤルゲージ法)附属書 A の方法	$\square 100 \times 100 \times 400\text{mm}$ , 1 調合につき 3 体
自己収縮 ひずみ	超流動コンクリート研究委員会報告書 <sup>7)</sup> の方法	$\square 100 \times 100 \times 400\text{mm}$ , 1 調合につき 2 体
水分率	加熱前に供試体加熱実験用の供試体の表面の任意の測定点を押当型静電容量式市販品により測定	円柱 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ , 1 調合につき 2 体
含水率	JASS 5N T-602 に準拠	円柱 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ , 1 調合につき 2 体

た供試体で試験を行った。また、乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみの測定は、PP 繊維混入無しのベース調合に対してのみ行った。

##### (2) 供試体加熱実験

加熱実験用の供試体は、各ケースにつき  $\phi 150 \times 300\text{mm}$  の円柱を 2 体ずつ作製した。打設後 7 日間の封かん養生後、加熱時 (材齢 91 日) まで気中養生 ( $20^\circ\text{C}$ , RH60%) とした。加熱は、図-2 に示す IS0834 の標準加熱温度曲線に従い 60 分加熱し、加熱終了後は自然冷却とした。測定項目は、加熱中の目視観察、加熱後の目視観察、爆裂の評価とした。

### 3.3 実験結果

##### (1) 物性試験結果

表-6に、各種物性の測定結果一覧 (材齢 91 日: 加熱時) を示す。圧縮強度およびヤング係数は、PP 繊維を混入しても、ベースコンクリートとほぼ同等の値であった。

表-6 各種物性の測定結果一覧

供試体名	圧縮 強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング 係数 ( $\text{N/mm}^2$ )	水分率 (%)	含水率 (%)
60L000	66.7	$3.34 \times 10^4$	4.3	3.83
60L050-10	65.1	$3.41 \times 10^4$	4.3	-
60L100-10	63.6	$3.30 \times 10^4$	4.3	
60L150-10	61.2	$3.12 \times 10^4$	4.2	
80L000	88.4	$4.05 \times 10^4$	4.4	
80L050-10	88.0	$3.95 \times 10^4$	4.4	-
80L050-20	91.1	$4.01 \times 10^4$	4.5	
80L085-10	92.4	$3.87 \times 10^4$	4.4	
80L085-20	88.7	$3.97 \times 10^4$	4.4	
80L100-10	91.9	$4.01 \times 10^4$	4.4	
80L100-20	91.6	$3.96 \times 10^4$	4.3	
80L150-10	89.2	$4.01 \times 10^4$	4.4	
80L150-20	87.8	$3.93 \times 10^4$	4.3	
80S000	91.1	$3.93 \times 10^4$	4.3	3.63
80S050-10	92.3	$3.85 \times 10^4$	4.3	-
80S085-10	91.0	$3.87 \times 10^4$	4.2	
80S100-10	94.2	$3.80 \times 10^4$	4.2	
80S150-10	91.5	$3.86 \times 10^4$	4.3	
100S000	133	$4.49 \times 10^4$	4.0	3.93
100S100-10	123	$4.37 \times 10^4$	3.9	-
100S150-10	131	$4.36 \times 10^4$	3.9	

図-3に乾燥収縮ひずみの測定結果を、図-4に自己収縮ひずみの測定結果を示す。乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみは、同一Fc（水セメント比）のコンクリートで比較すると、硬質砂岩粗骨材よりも石灰石粗骨材を使用したコンクリートの方が小さくなる傾向となった。

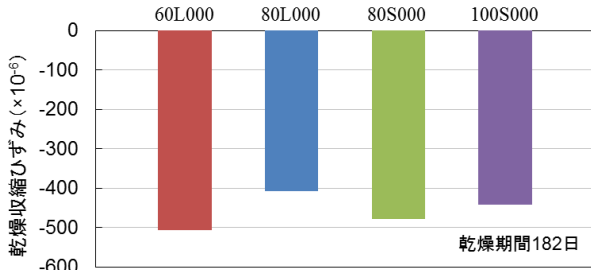


図-3 乾燥収縮ひずみ

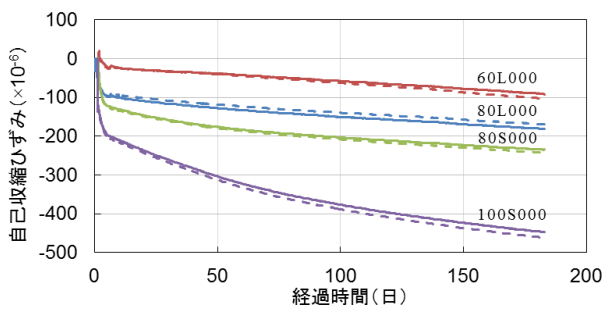


図-4 自己収縮ひずみ

(2) 供試体加熱実験結果

写真-1に、代表的な加熱後の供試体状況および試験結果を示す。爆裂の評価は、文献<sup>2)</sup>を参考にして写真-2に示すような6段階の評価とした。100S000では、1体は加熱開始8分頃から爆裂が始まり、12分で激しくなり、31分頃に爆裂が収束した。もう1体は、加熱途中に生じた爆裂の影響で、加熱開始37分頃に供試体上部が剥落し、新たな断面が露出して加熱されたことにより、50分頃まで爆裂が継続した。最終的には、2体とも崩壊しほぼ原形を留めなかった。一方、100S000以外の供試体では、表層部に亀甲状のひび割れが生じたが爆裂は発生せず、コンクリート片の剥落などは認められなかった。

3. 4 供試体加熱実験のまとめ

石灰石粗骨材を用いたコンクリートの各種物性および供試体レベルでの加熱実験による爆裂性状の確認を行った。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみともに、硬質砂岩粗骨材よりも石灰石粗骨材を使用したコンクリートの方が小さいことを確認した。
- (2) Fc=60 ~ 80N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートでは、PP 繊維が無混入であっても爆裂は生じないことを確認した。また、Fc=100N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートでは、長さ10mmの

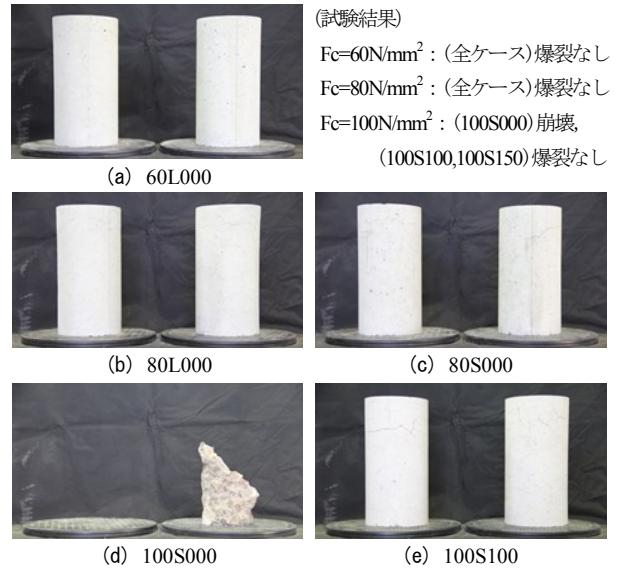


写真-1 加熱後の供試体状況

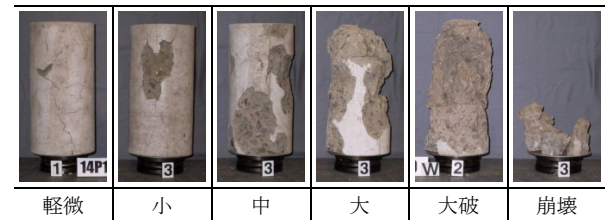


写真-2 爆裂の評価基準

PP 繊維を 0.100vol%混入することにより、爆裂の発生を抑制できることを確認した。

4. 載荷加熱実験 (シリーズII)

4.1 実験条件

表-7に実験条件を示す。シリーズIIの試験体は6体とし、パラメータは、コンクリートの強度はFc=80, 100N/mm<sup>2</sup>の2水準、粗骨材の種類は石灰石、硬質砂岩の2水準とした。PP 繊維は、繊維長さ10mmとし、混入率は供試体加熱実験の結果をもとに、Fc=80N/mm<sup>2</sup>の石灰石粗骨材の場合で、0.000, 0.075, 0.100vol%, Fc=80N/mm<sup>2</sup>の硬質砂岩粗骨材の場合で0.000, 0.050vol%, Fc=100N/mm<sup>2</sup>の

表-7 供試体加熱実験の実験条件

試験体名	Fc (N/mm <sup>2</sup> )	実強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材種類	繊維混入率 (vol%)	載荷軸力 (kN)	軸力比	調合 No
C80L000	80	107	石灰石	0.000	4,267	0.248	83-60
C80L075		102		0.075		0.259	-20M
C80L100		104		0.100		0.254	-LS
C80S000	80	114	硬質砂岩	0.000	4,267	0.234	83-60
C80S050		123		0.050		0.217	-20M -SS
C100S100	100	137		0.100	5,333	0.242	100-60 -20FC-SS-2

硬質砂岩粗骨材の場合で0.100vol%とした。載荷軸力は、長期許容応力度（コンクリートの断面積× $F_c / 3$ ）とした。実強度 $\sigma_B$ は、載荷加熱用試験体製作時に同一のコンクリートより採取した供試体を材齢4週まで簡易断熱養生した後、封かん養生を行い、実験前に圧縮強度試験により測定した。軸力比は、実強度に対する載荷軸力の比率である。

試験体形状及び配筋を図-5に示す。試験体は、断面を400mm×400mm、高さを3,000mm、帯筋に対するかぶりを35mmとした。主筋と帯筋の鉄筋量は、実際の建築物に合せた。また、温度測定用の熱電対を図-5に示すコンクリート内部と主筋、帯筋に取り付けた。

コンクリートの材料および調査は、表-2および表-3に示すものとし、ホッパーによりコンクリートを型枠

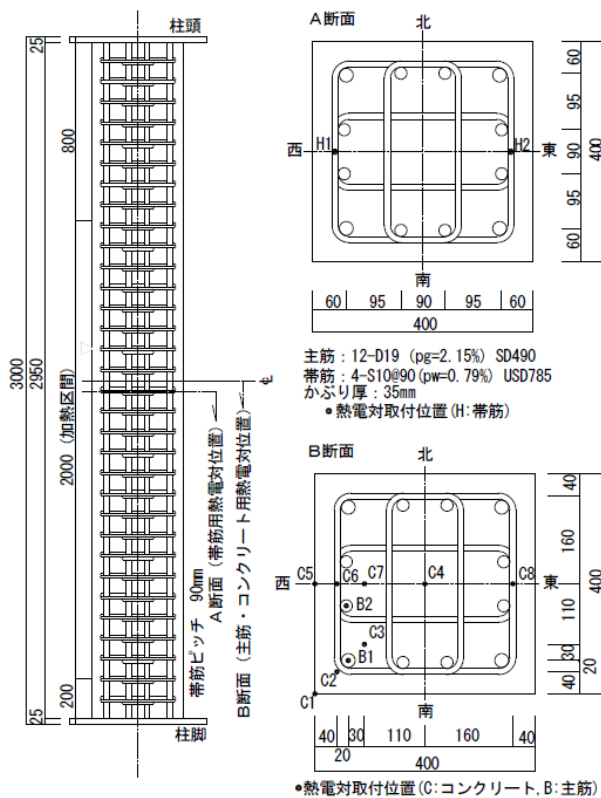


図-5 試験体形状および配筋図

表-10 爆裂状況と爆裂時の温度

試験体名	有無		加熱開始からの時間(分)			爆裂開始時の温度(°C)					最高温度(°C)				
	爆裂発生	鉄筋露出	爆裂開始まで	爆裂終了まで	軸力保持	炉内	表面(C1)	表面(C5)	主筋(B2)	帯筋(H1)	主筋(B2)	帯筋(H1)	コンクリート内部		
													表面からの深さ(mm)		
													40(C6)	90(C7)	200(C4)
C80L000	有	有	8	25	222	638	394	247	21.6	32.8	848	979	1052	516	427
C80L075	有	有	9	24	終了まで	673	499	353	18.8	33.6	532	617	650	431	397
C80L100	無	無	-	-	終了まで	-	-	-	-	-	506	583	650	396	374
C80S000	有	有	7	21	231	617	383	241	20.9	31.4	755	972	1025	578	493
C80S050	有	有	10	25	終了まで	665	×*	335	33.4	54.0	663	772	698	499	472
C100S100	有	無	11	18	終了まで	685	310	370	28.5	54.3	659	899	898	449	437

\*測定不能

内に打込み後、3日間の湿潤養生を行った。その後、型枠を解体し、加熱実験当日まで気中養生を行った。

表-8にコンクリートの力学的性質および水分率を、表-9に鉄筋の機械的性質を示す。水分率は、市販の押当型静電容量式水分計を用いて、加熱試験直前に測定した。

表-8 コンクリートの力学的性質と水分率

試験体名	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	水分率(%)	試験材齢(日)
C80L000	107	4.69×10 <sup>4</sup>	4.8	236
C80L075	102	4.66×10 <sup>4</sup>	4.9	216
C80L100	104	4.50×10 <sup>4</sup>	4.8	250
C80S000	114	4.31×10 <sup>4</sup>	4.6	215
C80S050	123	4.44×10 <sup>4</sup>	4.7	218
C100S100	137	4.58×10 <sup>4</sup>	4.4	222

表-9 鉄筋の機械的性質

鉄筋	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )
主筋 D19 (SD490)	534	177500	708
帯筋 S10 (USD785)	853	201000	1031

## 4.2 実験方法

実験は、図-5に示すRC柱に中心圧縮力を与える載荷加熱実験とし、加熱区間を2000mmとした。加熱はIS0834の標準加熱曲線を用い、原則として4時間加熱とし、その後は、自然冷却による温度曲線下で加熱終了から12時間、載荷を継続した。軸力の載荷は、着火15分前には完了することとし、崩壊、あるいは実験終了まで荷重を一定に保持した。崩壊は原則として軸力を保持できなくなる時点とした。測定項目は炉内温度、部材温度、載荷軸力、試験体軸変形および爆裂深さとし、加熱中は目視による観察も行った。

## 4.3 実験結果

### (1) 実験経過

表-10に爆裂状況を、図-6に加熱開始から40分間の試験体の温度履歴を示す。加熱時の各試験体の爆裂発

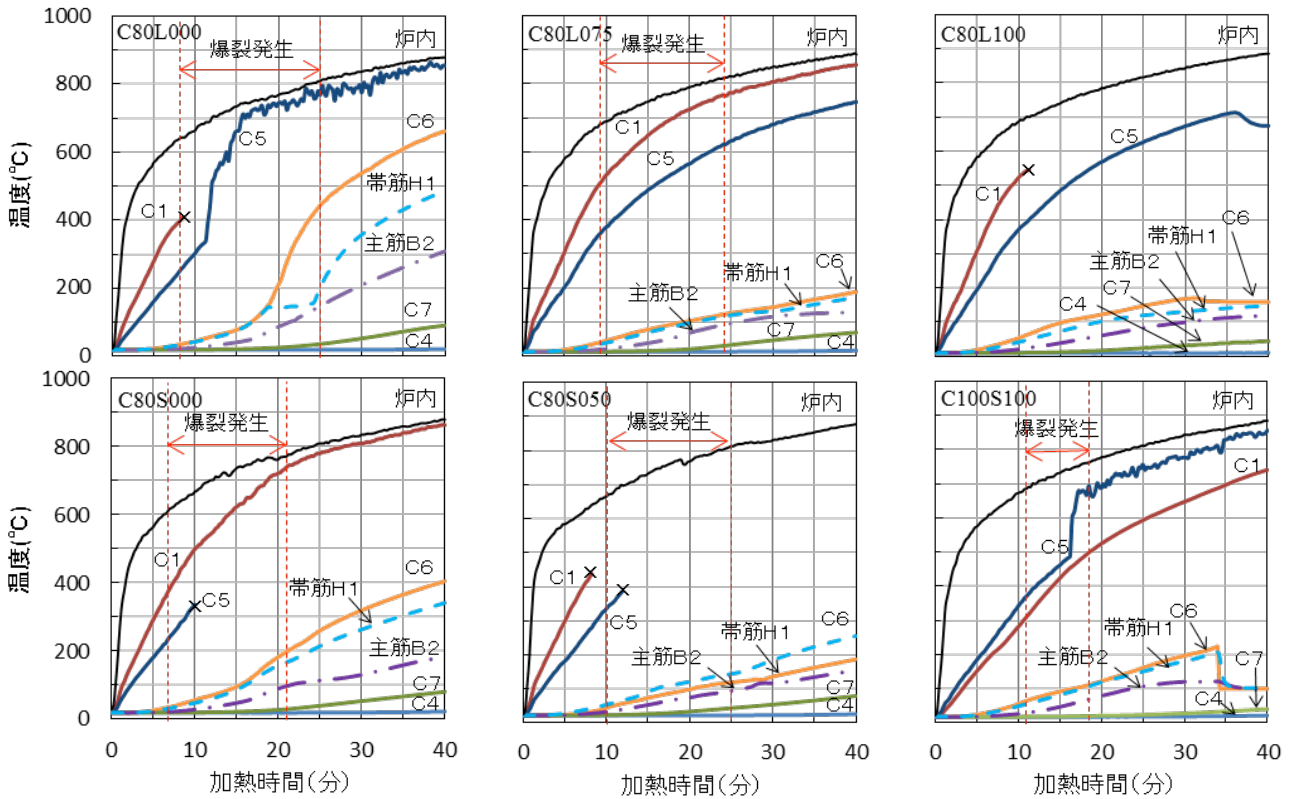


図-6 試験体の温度履歴 (加熱開始後40分まで)

生状況は、C80L000では加熱開始後8分で爆裂が発生し、25分過ぎまで激しい爆裂が続いた。C80L075では、加熱開始9分で爆裂が発生し、24分過ぎまで小規模の爆裂が断続的に発生した。C80L100では、表層部に若干のひび割れが生じたが、爆裂は生じなかった。C80S000では、加熱開始7分で爆裂が発生し、21分過ぎまで激しい爆裂が続き、それ以降も小規模な爆裂が断続的に発生した。C80S050では、加熱開始10分から爆裂が発生し、25分過ぎまで続いた。また、C100S100では、加熱開始11分で爆裂が生じ、18分過ぎまで小規模な爆裂が発生した。

爆裂開始時の温度は炉内で617～685℃、柱出隅部分(C1)では383～499℃、柱中央部分(C5)で241～370℃であった。C80L000とC80S000の比較より、粗骨材の違いによる爆裂開始時の温度の違いは見られなかった。繊維混入率が高くなるに連れ、爆裂開始温度は高くなった。試験終了時まで軸力保持できなかった試験体の温度は、軸力保持できた試験体の温度より、表面から深さ40mmのコンクリート(C6)と帯筋(H1)で最大約400℃、主筋(B2)で最大約340℃高くなっていた。逆に、深さ90mm(C7)での温度差は、最大で180℃程度であった。

(2) 爆裂性状

写真-3に荷重加熱実験終了後の試験体状況を、図-7に爆裂深さの測定結果を、表-11に各試験体の平均爆裂深さを、図-8に平均爆裂深さとPP繊維混入率の関

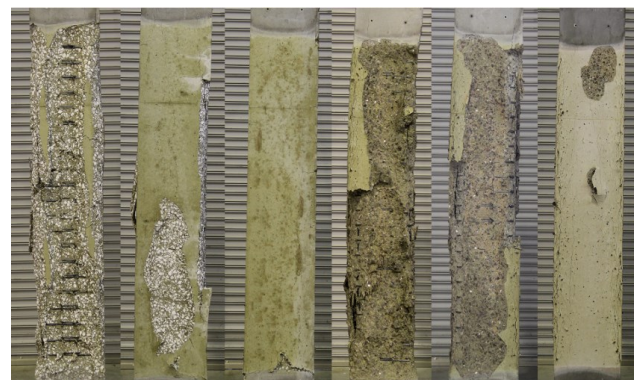


写真-3 荷重加熱実験終了後の試験体状況

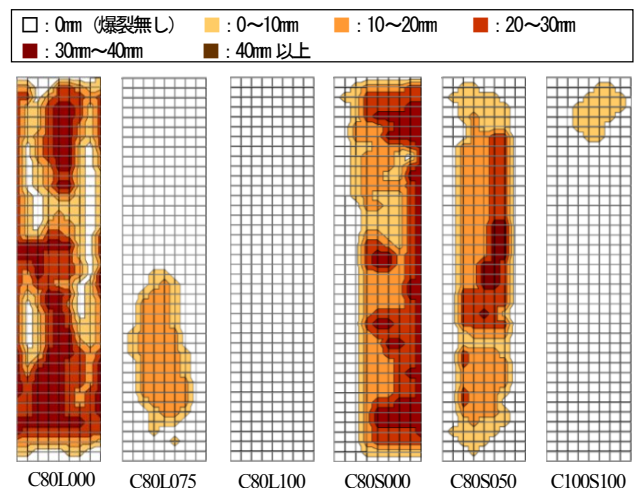


図-7 爆裂深さの測定結果

係を示す。爆裂深さは、試験体加熱区間の側面を50mmメッシュでデジタルノギスを用いて測定した。

加熱終了後の爆裂状況は、C80L000では、ほぼ全面にわたって爆裂が生じており、中央部の広範囲で帯筋(かぶり厚さ35mm)が露出していた。C80L075では、爆裂範囲、爆裂深さともに小規模にとどまった。C80S000では、広範囲で深さ10mm～30mm程度の爆裂が生じており、帯筋の露出も散見された。PP繊維無混入の80L000とC80S000を比較すると、爆裂の程度はC80S000の方が小規模であった。これは、使用している骨材の違いによると考えられる。C80S050については、中央付近で数か所、帯筋が露出していたが、C80S000と比べて、爆裂範囲、深さ共に小規模であった。また、C100S100では、爆裂範囲は狭く、深さも平均で1mm程度であった。

以上の結果より、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ のRC柱については、骨材種類にかかわらず、PP繊維を混入することで爆裂の発生を抑制でき、0.100vol%以上混入することで、爆裂を完全に抑制できると考えられた。また、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ のRC柱については、PP繊維を0.100vol%以上混入することで、爆裂の発生を軽微に抑えることができると考えられた。さらに、図-8より、PP繊維混入率と平均爆裂深さに線形な関係が存在すると確認できた。

(3) 耐火性能

表-12に崩壊時間および軸変位を、図-9に加熱時間と軸変位の関係を示す。図中の×印は、荷重中に崩壊に至った時点を示している。

PP繊維無混入の試験体はいずれも加熱終了時間前に崩壊に至った。C80L000は加熱開始から56分で膨張が止まり、220分で崩壊に至り、崩壊時の変位は-19.9mmであった。また、C80S000は加熱開始59分で膨張が止まり、230分で崩壊に至り、崩壊時の変位は-16.5mmであった。その他の試験体については、荷重終了まで崩壊には至らず、荷重終了時の各試験体の変位は、C80L075で-21.4mm、C80L100で-16.9mm、C80S050で-28.6mm、C100S100で-23.7mmであった。また、全ての試験体が3時間耐火柱の目安となる216分の耐火時間を満足した。

図-10に平均爆裂深さと加熱終了時の軸変位(加熱終了前に崩壊に至った試験体については崩壊時の軸変位)との関係を示す。平均爆裂深さが大きくなるにつれ、軸変位も収縮側に大きくなる傾向となった。

4.4 荷重加熱実験のまとめ

PP繊維を混入した高強度RC柱を用いた荷重加熱実験を行い、以下の結果が得られた。

(1) 粗骨材の種類に関わらず、爆裂開始時間とその時の

表-11 爆裂状況と爆裂時の温度

試験体	爆裂深さ (mm)				平均
	東面	西面	北面	南面	
C80L000	22.1	20.8	14.4	21.5	19.7
C80L075	3.3	0.0	16.6	2.1	5.5
C80L100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C80S000	17.7	21.3	33.0	10.0	20.5
C80S050	11.0	8.3	18.3	8.8	11.6
C100S100	0.6	2.7	0.9	0.3	1.1

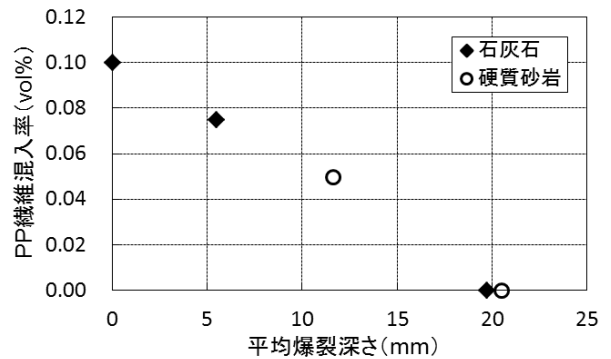


図-8 平均爆裂深さとPP繊維混入率の関係

表-12 軸変形および崩壊時間

試験体	繊維混入率 (vol%)	平均爆裂深さ (mm)	軸変位(mm)		崩壊時間 (分)
			加熱終了時	荷重終了時	
C80L000	0.000	19.7	-19.9	-	220
C80L075	0.075	5.5	-5.4	-21.4	-
C80L100	0.100	0.0	-3.7	-16.9	-
C80S000	0.000	20.5	-16.5	-	230
C80S050	0.050	11.6	-7.1	-28.6	-
C100S100	0.100	1.1	-5.6	-23.7	-

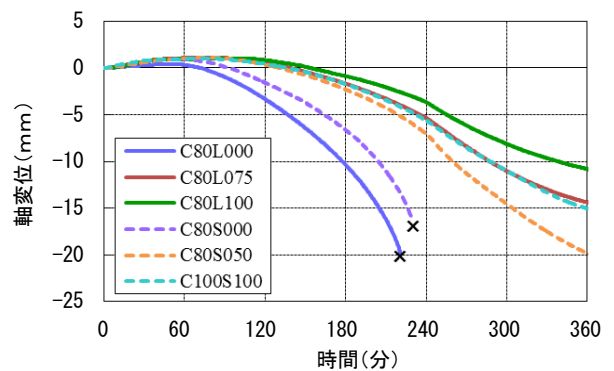


図-9 加熱時間と軸変位の関係

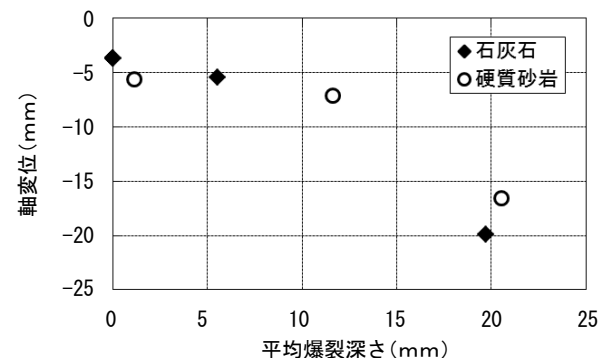


図-10 平均爆裂深さと軸変位の関係

試験体の内部温度は概ね同じであることを確認した。

- (2) かぶり部分と帯筋、主筋の温度は、爆裂による影響を受けやすい。それに対し、試験体表面から 90mm 以上の深さでは、爆裂による温度への影響は小さいことを確認した。
- (3)  $F_c=80\text{N/mm}^2$  級の高強度コンクリートでは、粗骨材の種類によらず爆裂は生じるものの、3 時間の耐火性能を有することを確認した。また、PP 繊維を 0.100vol% 混入することにより、爆裂を完全に抑制できることを確認した。

## 5 実大加熱実験（シリーズⅢ）

### 5.1 実験概要

表-13 に実験条件を、図-11 に実大試験体の概要を、表-14 に試験材齢と実大試験体の水分率を示す。試験体は粗骨材の種類、コンクリート強度、PP 繊維混入率をパラメータに計 4 体とした。コンクリートの材料および調査は、表-2 および表-3 に示すものとし、PP 繊維は繊維長さ 10mm を使用した。試験体形状は、断面を 1000mm × 1000mm、高さを 1500mm (加熱区間 1100mm)、最小かぶり厚さは 40mm とした。試験体は、コンクリート打設後、室内で気中養生とし、材齢約 9 ヶ月で試験に供した。水分率

表-13 実大加熱実験の実験条件

試験体名	$F_c (\sigma_B)$ ( $\text{N/mm}^2$ )	粗骨材 種類	繊維 混入率 (vol%)	調査 No.
RC80L000	80 (100)	石灰石	0.000	83-60-20M-LS
RC80L075			0.075	
RC80S050			0.050	
RC100S100	100 (120)	硬質 砂岩	0.100	100-60- 20SFC-SS-2

表-14 試験材齢と試験体の水分率

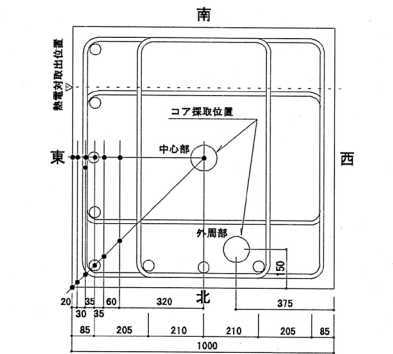
試験体名	試験材齢 (日)	水分率 (%)
RC80L000	285	4.7
RC80L075	278	4.9
RC80S050	285	4.7
RC100S100	278	4.9

の測定には、市販の押当型静電容量式水分計を用いた。加熱は、IS0834 の標準加熱曲線に従った 4 時間加熱とした。測定項目は、炉内温度、試験体温度、爆裂深さとし、加熱時には目視観察を行った。

### 5.2 実験結果

#### (1) 実験経過および爆裂深さ

写真-3 に加熱終了約 1 日後の試験体状況を示す。加熱中の目視観察結果は、RC80L000 では加熱 7 分後から爆裂が生じ、25 分前後まで各面で爆裂が継続した。加熱終了



平断面図及び熱伝対位置図  
主筋：16-D41  $\rho_g=2.14\%$  帯筋：4-D16@100  $\rho_w=0.80\%$   
かぶり厚さ：40mm

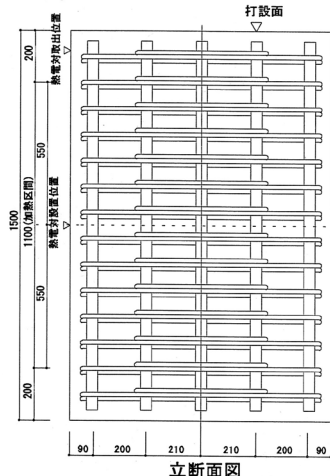


図-11 実大試験体概要

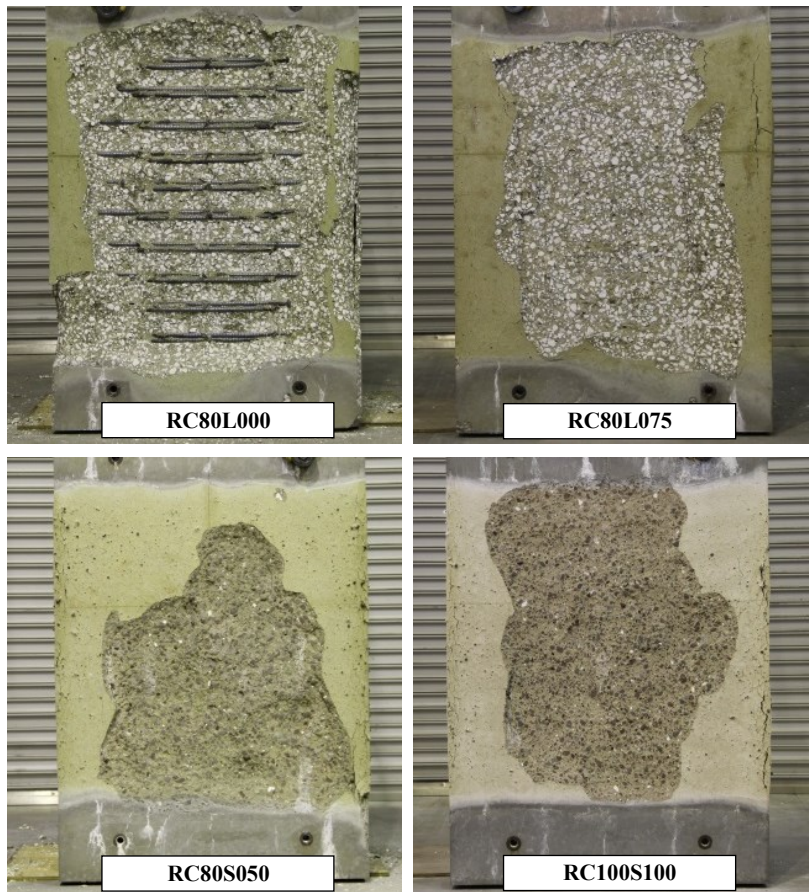


写真-3 載荷加熱実験終了後の試験体状況



後の爆裂状況は、全面において中央部で帯筋が露出し、角部分にも爆裂がみられた。これに対し、RC80L075は同じく加熱開始7分から爆裂が生じ、15分程度まで継続して柱中央部の爆裂範囲が広がったが、帯筋の露出には至らなかった。RC80S050は、加熱開始後7分から25分ごろまで3面の表層において爆裂が継続したが、1面において表層に若干ひび割れが見られものの、爆裂は生じなかった。RC100S100は、加熱開始10分前後に中央表層部に広範囲な爆裂が生じ、小規模な爆裂が散発的に見られたが、20分前後で収束した。

載荷加熱実験の結果と比較すると、RC80L075とRC80S050で爆裂程度が逆転したが、他の2体は同程度の爆裂であり、RC80S050の帯筋が露出しなかったことからみても、試験体寸法の大きい実大加熱実験の爆裂が著しいという結果は認められなかった。

図-12に爆裂深さの測定結果として、高さ方向の平均爆裂深さと平均断面を示す。爆裂深さは、加熱区間を縦横50mmグリッドに分割し、レーザー変位計で測定した。4面において帯筋が露出したRC80L000の爆裂深さは、平均で26.2mm、最大54.5mmであった。これに対し、RC80L075では平均8.6mm、最大40.6mmであり、PP繊維混入の効果が現れたが、計測時に目視では帯筋の露出は認められなかったものの、部分的には帯筋近傍まで爆裂が達していた。RC80S050とRC100S100は平均値がそれぞれ、3.3mmと3.6mmであり、コンクリート強度は異なるが、それぞれの強度において、同程度の爆裂抑制効果があるPP繊維混入率であったと考えられる。

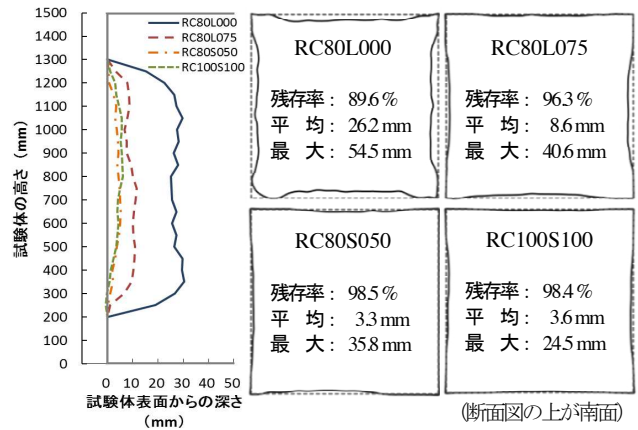


図-12 爆裂深さの測定結果

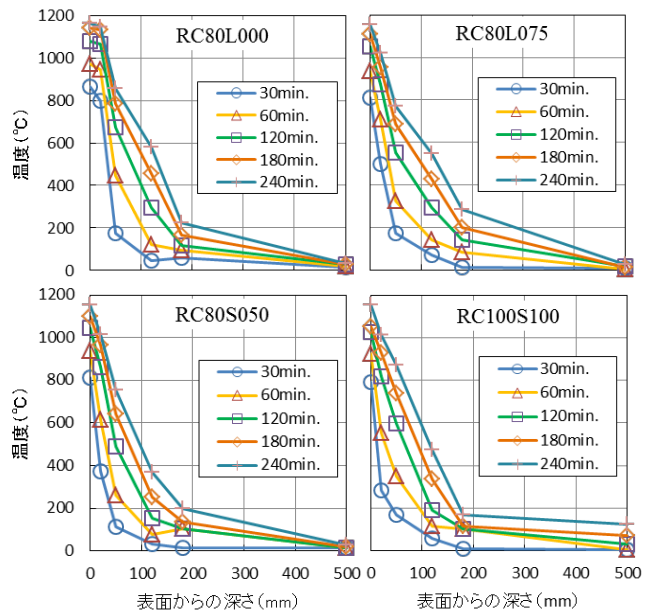


図-13 温度分布の推移

(2) 温度履歴

図-13に試験体中央対角方向の部材温度分布の推移を示す。RC80L000とRC80L075は、表面から120mmまでの温度が高く推移し、爆裂の影響が現れたと考えられる。1面で爆裂が生じなかったRC80S050は、他の3体と比較して表面から50~120mmまでの温度が低く推移した。

(3) 加熱後のコア圧縮強度

加熱実験終了後、図-11に示す試験体の中心および外周部で高さ方向にコアを採取した。加熱後のコア供試体の圧縮強度試験を表-15に示す。コア供試体圧縮強度は、表-8で示した同調合の圧縮強度と比較すると、外周部では比較的健全な供試体においても、7~8割程度に低下した。中心部では、4面で爆裂が確認された3試験体では8~9割程度に低下したが、1面で爆裂が生じなかったRC80S050では、ほぼ同等となっており、中心部の圧縮強度には個々の爆裂状況が大きく影響すると考えられた。

表-15 加熱後のコア圧縮強度試験結果

試験体名	平面位置	コア供試体圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )						
		打設面		供試体位置			底面	
		1	2	3	4	5	6	7
RC80L000	中心	102	-	89.3	86.6**	-	103.4	90.0
	外周	-	36.9*	62.3*	-	63.6	-	-
RC80L075	中心	101	-	94.2	70.6**	-	102.6	105*
	外周	-	69.4*	-	-	46.7*	-	-
RC80S050	中心	128	125*	127	116**	81.1*	126.6	123*
	外周	-	-	83.4	-	55.4	-	-
RC100S100	中心	104	116*	126*	-	130*	127.8	121
	外周	-	-	95.0	-	116	-	-

■ は非加熱部, \* ひび割れ有り, \*\* セパ有り

5.3 実大加熱実験のまとめ

PP繊維を混入した実大レベル(1000×1000×1500mm)のRC柱を用いた加熱実験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 載荷加熱実験と実大加熱実験の爆裂性状は、ばらつきはあるものの、概ね同等であり、400×400mm断面の縮小試験体を用いて載荷加熱実験(シリーズII)

を行うことにより、爆裂する RC 柱の耐火性能を適切に評価できることを確認した。

- (2) 加熱後のコンクリート圧縮強度は、個々の爆裂状況が大きく影響すると考えられる。

## 6. 実験全体の結果およびまとめ

本研究では、石灰石粗骨材および硬質砂岩粗骨材を用いた  $F_c=80 \sim 100\text{N/mm}^2$  級の高強度コンクリートを対象に、供試体加熱実験、載荷加熱実験および実大加熱実験を行い、PP 繊維混入による爆裂抑制効果と RC 柱の耐火性能を確認した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1)  $F_c=80\text{N/mm}^2$  級の RC 柱は、骨材種類に関わらず、爆裂は生じるものの、3 時間の耐火性能を有している。また、PP 繊維を 0.100vol% 以上混入することで、爆裂を完全に抑制できる。
- (2) 硬質砂岩粗骨材を用いた  $F_c=100\text{N/mm}^2$  の RC 柱については、PP 繊維を 0.100vol% 以上混入することで、爆裂を軽微に抑えることができる。

なお、本研究は、安藤ハザマと熊谷組、佐藤工業、戸田建設、西松建設、フジタ、前田建設工業の共同研究として実施したものである。

**謝辞:** 本研究に当たり、実験にご協力いただいた関東宇部コンクリート工業技術センター、同豊洲工場、BASF ジャパンに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば森田 ほか：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，pp. 171-178, No. 544, 2001. 6
- 2) 澤田 ほか：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究（その 8～その 12），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 99-108, 2004. 8
- 3) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp. 99-100, 2009
- 4) 黒岩 ほか：ポリプロピレン繊維を用いた高強度 RC 柱の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 35-36, 2001. 9
- 5) 森田 ほか：高強度鉄筋コンクリートの耐火性に関する実験的検討，日本火災学会研究発表会概要集，pp. 118-119, 2014. 5
- 6) 宮本 ほか：超高強度コンクリートに関する開発研究（その 6），日本建築学会大会学術講演梗概集 pp. 481-482, 1992. 8
- 7) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），1994

---

## Study on Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Limestone Coarse Aggregate

Hiroyasu ABE, Yoshiyuki SUZUKI

The inclusion of polypropylene fiber is effective for suppressing the explosion of high-strength concrete caused by fire. However, few experiments have examined the fire resistance of high-strength concrete using limestone coarse aggregate.

Therefore in the design strength of 80 to 100N/mm<sup>2</sup> high-strength concrete using various coarse aggregate, we experimentally investigated the fire resistance of reinforced concrete columns. As a result, it was confirmed that the fire resistance in a column of high-strength concrete using limestone coarse aggregate is secured by mixing polypropylene fiber appropriately.

---