

石灰石粗骨材を用いた超高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性能に関する研究

三谷和裕 * 金森誠治 * 野中英 *

超高強度コンクリートは、通常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いがポリプロピレン繊維を混入することで爆裂の発生を抑制できることが実験的に多く示されている。しかし、コンクリートの低収縮化の要求から石灰石粗骨材を超高強度コンクリートに使用した場合の耐火性能について実験的に検討を行った例は少ない。本研究では、石灰石粗骨材を使用した設計基準強度 80~100N/mm²級の超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に検討を行った。

キーワード：超高強度コンクリート、石灰石粗骨材、耐火性能、加熱実験、ポリプロピレン繊維

1. はじめに

超高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート(以下、RC と略記)柱は、通常強度のコンクリートを使用した RC 柱に比べて、火災時に表面が爆裂しやすくなると言われており¹⁾、合成繊維であるポリプロピレン繊維(以下、PP 繊維と略記)を混入することで、爆裂の発生を抑制できることが知られている²⁾。筆者らも、設計基準強度(以下、Fc と略記)が 100N/mm²を超える RC 柱の耐火性能について、既に報告している³⁾。

一方、近年ではコンクリートに対する低収縮化の要求等により、硬質砂岩粗骨材より乾燥収縮が小さくなる石灰石粗骨材の使用が多くなり、60N/mm²を超える超高強度コンクリートの領域においても石灰石粗骨材の使用が増えている。しかしながら、骨材種類が爆裂性状や耐火性能に与える影響は必ずしも明確ではなく⁴⁾、石灰石粗骨材を使用した載荷加熱実験報告^{5,6)}もまだ少ないのが現状である。

本報告では、PP 繊維を混入した石灰石粗骨材を使用し

Table1 実験シリーズの概要

シリーズ	実験要因	試験体寸法(mm)
I	供試体加熱実験 Fc (60,80,100N/mm ²), PP 繊維長・混入率	φ150×300
II	載荷加熱実験 Fc (80,100N/mm ²), PP 繊維混入率	400×400×3000
III	実大加熱実験	1000×1000×1500

Table2 実験全体の試験体の組み合わせ

Fc(σ _B) (N/mm ²)	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)	シリカフェウム 混入セメント	硬質砂岩	ベース	—	—	—	10mm	10mm

注) PP 繊維混入率の数字はシリーズ I の供試体加熱実験の PP 繊維の長さを示す。

* 技術研究所 建設材料研究グループ

■ は載荷加熱実験を実施、□ は実大加熱実験も実施。

た Fc=80N/mm²級の超高強度コンクリートについて、3 種類の加熱実験を行い、耐火性能および爆裂性状に関して検討した。また、比較のため硬質砂岩粗骨材を使用した Fc=80~100N/mm²級の超高強度コンクリートについても同様の実験により検討を行った。

2. 実験全体の概要

2.1 実験シリーズ

本研究では、実験を 3 つのシリーズで行った。Table1 に実験シリーズの概要を示す。3 シリーズとも Fc=80~100N/mm²級の超高強度コンクリートを対象に行い、シリーズ I のみ比較用に Fc=60N/mm²級の高強度コンクリートも追加した。

シリーズ I の供試体加熱実験では、円柱供試体 φ150×300mm を用い、供試体は 21 水準各 2 本とした。シリーズ II の載荷加熱実験では、断面 400×400mm、高さ 3000mm(加熱区間 2000mm)の柱試験体を 6 体、シリーズ III の実大加熱実験では、断面 1000×1000mm、高さ 1500mm(加熱区間 1100mm)の柱試験体 4 体を実施した。

Table2 にシリーズ実験全体の試験体の組み合わせを示す。Fc に併記した σ_B は、実強度の目標値である。また、PP 繊維混入率の欄の数字は、シリーズ I の供試体加熱実験に

使用した PP 繊維の長さで、10mm を基本とし、20mm を比較用とした。シリーズⅡの荷重加熱実験およびシリーズⅢの実大加熱実験では、PP 繊維の長さは10mmのみとした。セメントおよび粗骨材は、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ で中庸熟ポルトランドセメントと石灰石、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ で中庸熟ポルトランドセメントと石灰石および硬質砂岩、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ でシリカフェーム混入セメントと硬質砂岩とした。

2.2 コンクリートの使用材料および割合

Table3 にコンクリートの使用材料を、Table4 にコンクリートの割合を示す。粗骨材は、主に東京湾岸地区で多い産地のものを選択した。また、硬質砂岩粗骨材を使用した $F_c=100\text{N/mm}^2$ の割合は、供試体加熱実験では水セメント比 20.0% (割合記号 100-60-20SFC-SS-1) としたが、実強度が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変更し、22.0% (割合記号 100-60-20SFC-SS-2) とした。

2.3 加熱炉、荷重装置および加熱曲線

各シリーズの加熱実験は、同一の加熱炉を使用して実施した。Fig.1 に加熱炉および荷重装置の概念図を示す。供試体加熱実験および実大加熱実験では、加熱炉内に試験体を設置し、実験を行った。荷重加熱実験では、加熱炉内に試験体を設置し、荷重装置を用いて荷重を行った状態で実験を行った。Fig.2 に加熱実験に用いた ISO834 に準拠した標準加熱曲線を示す。全ての加熱実験において加熱時の平均炉内温度は概ね標準加熱曲線を満たした。

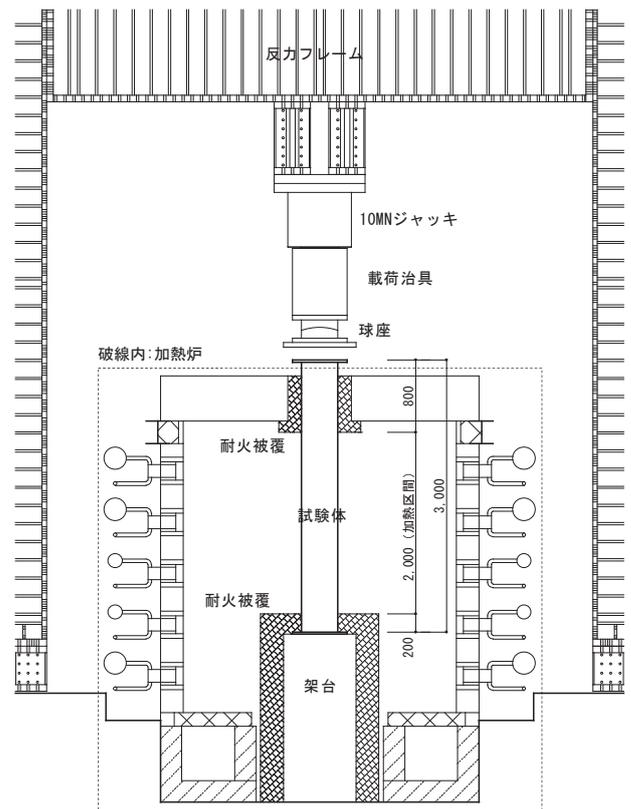


Fig.1 加熱炉および荷重装置の概念図

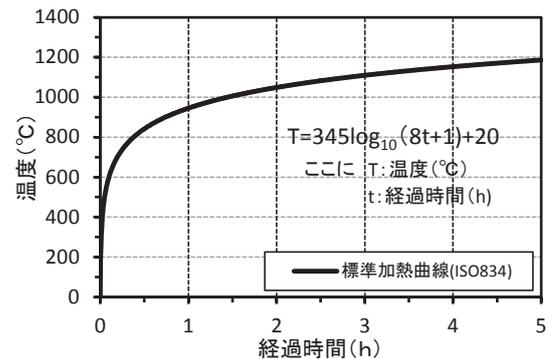


Fig.2 ISO834 に準拠した標準加熱曲線

3. 供試体加熱実験 (シリーズⅠ)

3.1 目的

石灰石粗骨材および硬質砂岩粗骨材を使用した $F_c=60 \sim 100\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートにおいて、荷重加熱実験および実大加熱実験の試験パラメータ設定の参考とするため、 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ の供試体レベルでの加熱実験により爆裂性状を確認した。また、加熱実験に用いたコンクリートの物性の確認も行った。

3.2 実験概要

3.2.1 実験条件

Table5 に実験条件を示す。シリーズⅠのパラメータは、設計基準強度 $F_c(\sigma_b)$ の対象を、 60N/mm^2 (80N/mm^2)、 80N/mm^2 (100N/mm^2)、 100N/mm^2 (120N/mm^2) の3水準とし、粗骨材の種類を石灰石、硬質砂岩の2水準とした。PP 繊維の長さを 10, 20mm の2水準、および混入率を 0.000, 0.050, 0.085, 0.100 および

Table3 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^3
	SFC	シリカフェーム混入セメント：密度 3.08g/cm^3
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^3
	S2	千葉県富津市鶴岡産山砂：表乾密度 2.62g/cm^3
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^3
	G2	青森県八戸市松館産砕石(石灰石)：表乾密度 2.69g/cm^3
	G3	茨城県桜川市富谷産砕石(硬質砂岩)：表乾密度 2.64g/cm^3
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
合成繊維	PP	ポリプロピレン繊維：繊維径 $48\mu\text{m}$ ，繊維長 $10 \cdot 20\text{mm}$

Table4 コンクリートの割合

割合記号	$F_c(\sigma_b)$ (N/mm^2)	水セメント比 (%)	粗骨材 種類	単位量 (kg/m^3)							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			170	662	-	-	723	-	-	840	SP2	
100-60-20SFC-SS-1	100(120)	20.0	硬質砂岩	155	-	775	-	668	-	-		840
100-60-20SFC-SS-2		22.0		155	-	705	-	728	-	-	840	

Table5 供試体加熱実験の実験条件

供試体名	Fc(σ _B) (N/mm ²)	粗骨材 種類	繊維 長さ (mm)	PP 繊維 混入率 (vol%)	調査 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)		-	0.000	83-60- 20M-LS
80L050-10			10	0.050	
80L050-20			20	0.085	
80L085-10			10		
80L085-20		20	0.100		
80L100-10		10			
80L100-20	20	0.150			
80L150-10	10				
80L150-20	20	硬質 砂岩	-	0.000	83-60- 20M-SS
80S000	10		0.050		
80S050-10	10		0.085		
80S085-10	10		0.100		
80S100-10	10		0.150		
80S150-10	10		0.150		
100S000	100(120)	-	0.000	100-60- 20SFC- SS-1	
100S100-10		10	0.100		
100S150-10		10	0.150		

Table6 物性試験および水分率, 含水率の測定方法の概要

試験項目	試験方法	供試体
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠	円柱 φ100×200mm,
ヤング係数	JIS A 1149 に準拠	1 調査につき 3 体
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	□100×100×400mm, 1 調査につき 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 ⁷⁾ の方 法	□100×100×400mm, 1 調査につき 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 φ150×300mm, 1 調査につき 2 体
含水率	JASS 5N T-602 に準拠	円柱 φ150×300mm, 1 調査につき 2 体

Table7 コンクリートの力学的性質, 水分率および含水率

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

0.150vol%の5水準とした。なお、PP 繊維を混入した供試体は、Table4 に示す調査に対して所定量のPP 繊維を混入して作製した。また、フレッシュコンクリートのスランブフロー目標値は、ベースコンクリートで 65±10cm, PP 繊維混入後で 60±10cm とし、空気量の目標値は、Fc=60N/mm²では 3.0+1.5, -1.0%, Fc=80, 100N/mm²で 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は混和剤使用量の調整により目標品質を満足した。

3. 2. 2 試験項目および試験方法

(1) 物性試験

Table6 に物性試験および水分率, 含水率の測定方法の概要を示す。圧縮強度およびヤング係数は、加熱実験用

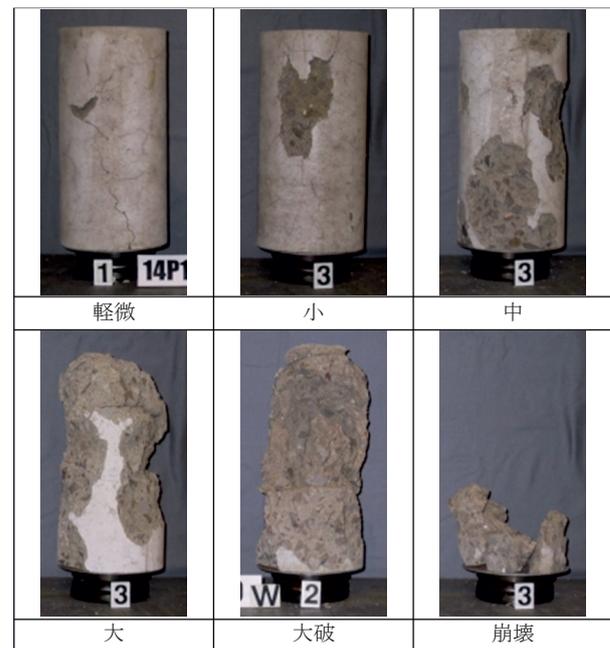


Photo. 1 爆裂の評価基準

供試体と同条件で採取・養生し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査に対してのみ行った。

(2) 供試体加熱実験

供試体は、Table3 に示す材料を使用し、Table4 に示す調査で、1 調査につき φ150×300mm の円柱供試体を 2 体作製した。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℃, 60%RH)とした。加熱は、標準加熱曲線に従い 60 分加熱し、加熱終了後は自然冷却とした。測定項目は、①加熱中の目視観察、②加熱後の目視観察、③爆裂の評価とした。また、爆裂の状態は、文献⁸⁾を参考にして Photo. 1 に示す 6 段階で評価した。

3. 3 実験結果

3. 3. 1 物性試験結果

Table7 に、供試体加熱実験時(材齢 91 日)の圧縮強度およびヤング係数を示す。圧縮強度およびヤング係数は、PP 繊維を混入しても影響はみられず、ベースコンクリートとほぼ同等の値であった。

Fig.3に長さ変化率の測定結果を、Fig.4に自己収縮ひずみの測定結果を示す。長さ変化率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。

3.3.2 供試体加熱実験結果

100S000 以外は、爆裂は生じなかった。一方、100S000 では、加熱開始 8 分頃から爆裂が始まり、12 分で激しくなり、1 体は 31 分頃、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。

Photo.2 に、代表的な加熱後の供試体の状況を示す。100S000 以外の供試体では、表層部に亀甲状のひび割れが生じていたがコンクリート片の剥落などは生じなかった。一方、100S000 は、崩壊しほぼ原形を留めていなかった。

3.4 供試体加熱実験のまとめ

石灰石粗骨材および硬質砂岩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り爆裂性状の確認を行い、以下の知見を得た。

- (1) 乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみは、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) $F_c=60\sim 80\text{N/mm}^2$ 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、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートでは、長さ 10mm の 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 目的

載荷加熱実験では、石灰石粗骨材で $F_c=80\text{N/mm}^2$ 、硬質砂岩粗骨材で $F_c=80\text{N/mm}^2$ 及び 100N/mm^2 の場合の超高強度 RC 柱を対象として、PP 繊維を混入した場合に 3 時間

以上の耐火性能を有することと、その爆裂性状を確認することを目的とした。

4.2 実験概要

4.2.1 試験体

Table8 に実験条件を示す。試験体は 6 体とし、 F_c 、粗骨材種類および PP 繊維混入率をパラメータとした。コンクリートの強度は $F_c=80, 100\text{N/mm}^2$ の 2 水準、粗骨材は、石灰石、硬質砂岩の 2 水準とした。PP 繊維混入率は、供試体加熱実験の結果をもとに、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ の石灰石粗骨材の場合で、0.000, 0.075, 0.100vol%, $F_c=80\text{N/mm}^2$ の硬質砂岩粗骨材の場合で 0.000, 0.050vol%, $F_c=100\text{N/mm}^2$ の硬質砂岩粗骨材の場合で 0.100vol% とした。載荷軸力は、

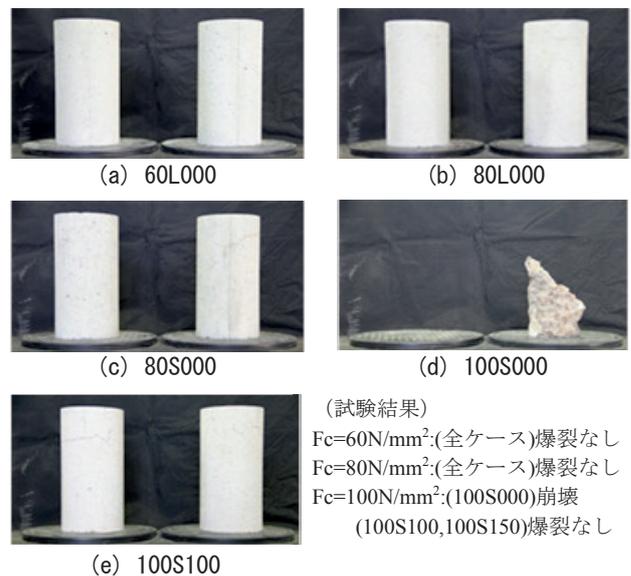


Photo.2 加熱後の供試体の状況

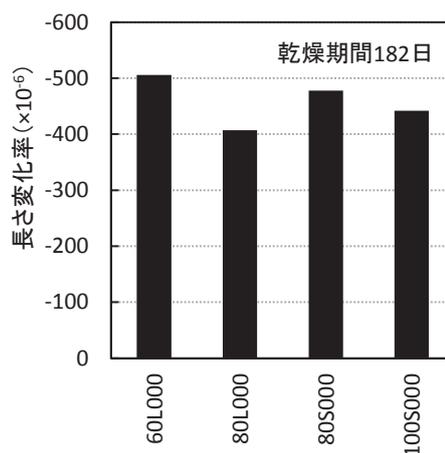


Fig.3 長さ変化率

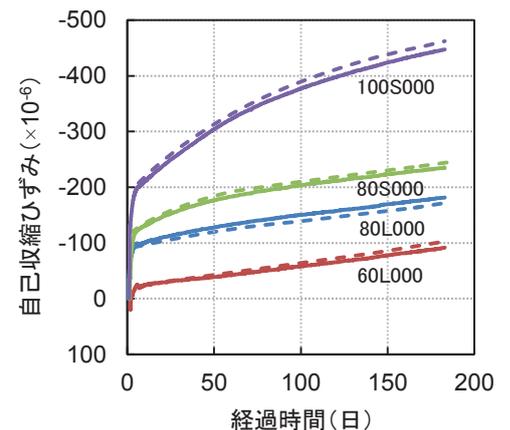


Fig.4 自己収縮ひずみ

Table8 載荷加熱実験の実験条件

試験体名	$F_c(\sigma_B)$ (N/mm^2)	実強度 (N/mm^2)	粗骨材 種類	PP 繊維 混入率 (vol%)	載荷 軸力 (kN)	軸力比	試験 材齢 (日)	調査記号
C80L000	80(100)	107	石灰石	0.000	4267	0.248	236 日	83-60-20M-LS
C80L075		102		0.075		0.259	216 日	
C80L100		104		0.100		0.254	250 日	
C80S000		114	硬質 砂岩	0.000		0.234	215 日	83-60-20M-SS
C80S050		123		0.050		0.217	218 日	
C100S100	137	0.100		5333	0.242	222 日	100-60-20SFC-SS-2	

長期許容応力度($A_c \cdot F_c / 3$)とした。実強度は、試験体製作時に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荷重軸力の比率である。

試験体形状および配筋を Fig.5 に示す。試験体は、実際の柱断面の 1/2.5 スケールを想定して、断面を 400×400mm、高さを 3,000mm、帯筋に対するかぶり厚さを 35mm とした。また、温度測定用の熱電対については、Fig.5 に示すコンクリート内部と主筋、帯筋に取り付けた。

Table4 にコンクリートの調合を、Table9 にコンクリートの力学的性質および水分率を、Table10 に鉄筋の機械的性質を示す。コンクリートの使用材料は、Table3 に記載のものを使用した。なお、PP 繊維は、施工性を考慮して長さ 10mm を使用した。水分率は、押当型静電容量式市販品により、試験直前に試験体表面を測定した。

4. 2. 2 実験方法

実験は、Fig.5 に示す RC 柱に中心圧縮力を与える荷重加熱実験とし加熱区間を 2000mm とした。加熱は標準加熱曲線に従い、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、荷重を継続した。軸力の荷重は、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った時点とした。測定項目は炉内温度、部材温度、荷重軸力、試験体軸変位および爆裂深さとし、加熱中は目視による観察も行った。なお、軸変位は、試験体全長での変位を測定した。

爆裂評価は、原則として爆裂が最も激しい面を基準として評価した。表層のごく一部分が剥離している場合を爆裂無し、表層に小規模の爆裂が生じている場合を軽微、爆裂がかぶり部分のみで帯筋が露出していない場合を小、帯筋が露出している場合を中、帯筋内部まで爆裂が生じている場合を大とした。

4. 3 実験結果

4. 3. 1 実験経過および温度履歴

Fig.6 に加熱開始から 40 分間の試験体の温度履歴、Table11 に爆裂状況と試験体の温度を示す。なお、Fig.6 中の×印は、爆裂により熱電対が破損し、温度測定が不能になった点を示している。各試験体の爆裂発生状況に

ついては、C80L000 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 については、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 については、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 については、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く、それ以降も小規模な爆裂が断続的に発生した。C80S050 については、加熱開始 10 分から爆裂

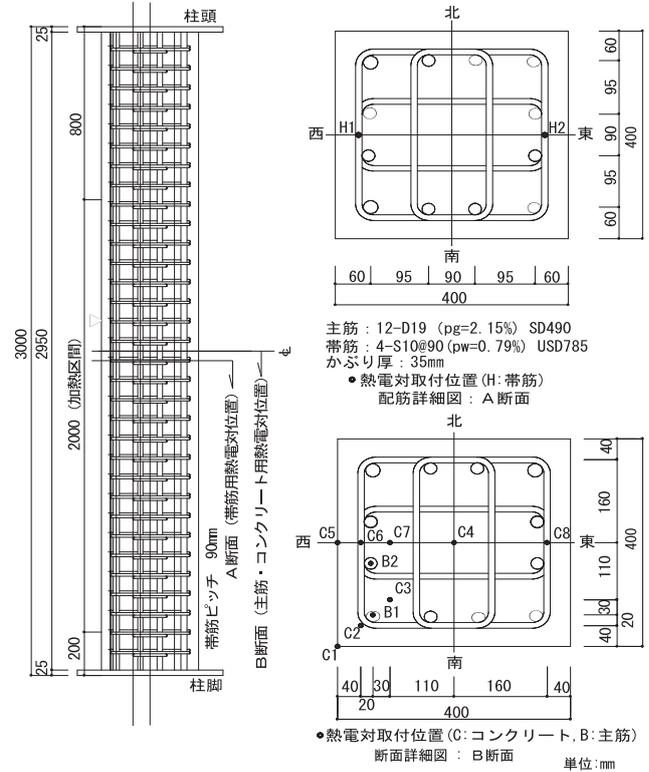


Fig.5 試験体形状および配筋図

Table9 コンクリートの力学的性質、水分率および含水率

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	水分率 (%)	含水率 (%)	試験材齢 (日)
C80L000	107	4.69×10 ⁴	4.8	3.16	236
C80L075	102	4.66×10 ⁴	4.9	3.49	216
C80L100	104	4.50×10 ⁴	4.8	3.43	250
C80S000	114	4.31×10 ⁴	4.6	3.57	215
C80S050	123	4.44×10 ⁴	4.7	3.31	218
C100S100	137	4.58×10 ⁴	4.4	3.82	222

Table10 鉄筋の機械的性質

鉄筋	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
主筋 D19(SD490)	534.4	17.75×10 ⁴	708.9
帯筋 S10(USD785)	853.2	20.10×10 ⁴	1031.9

Table11 爆裂状況と試験体の温度

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	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

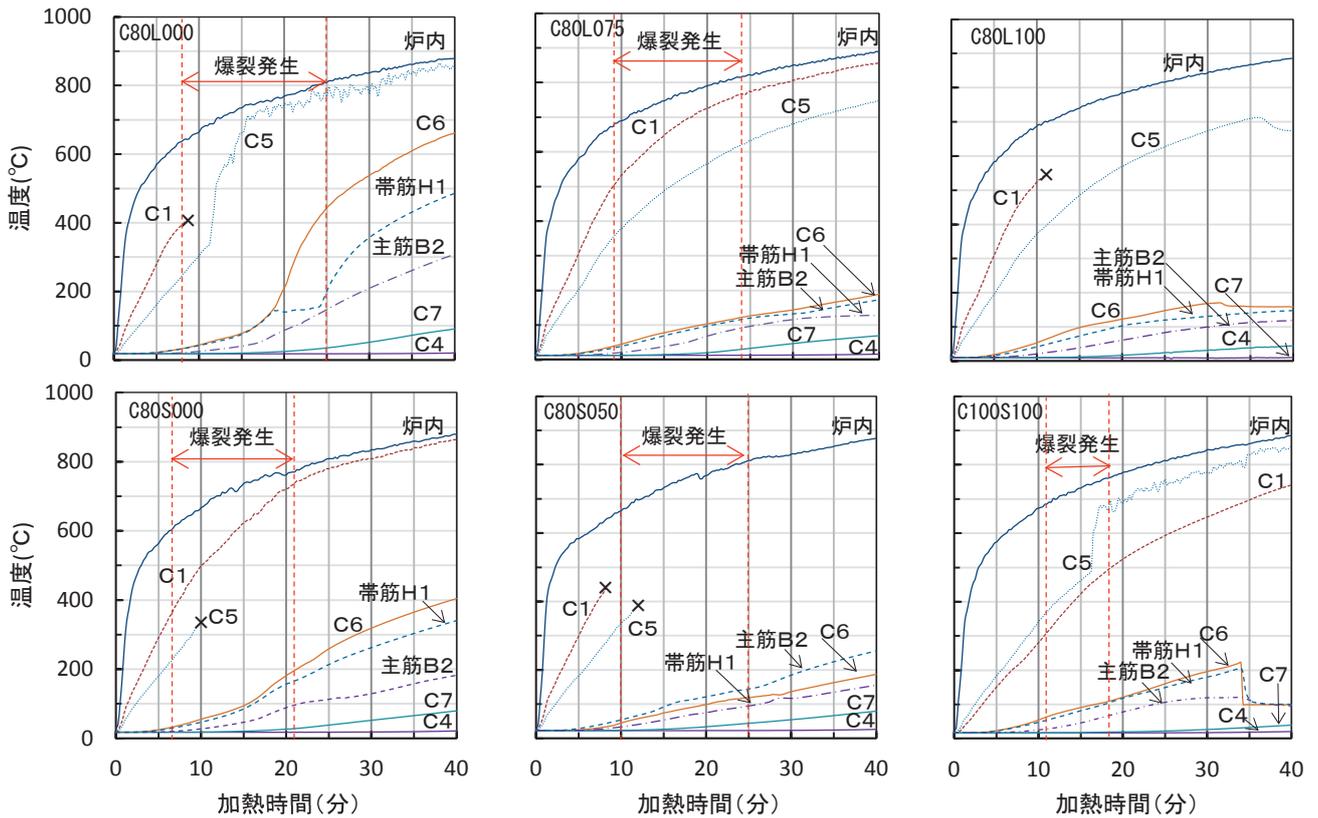


Fig. 6 加熱開始から 40 分間の試験体の温度履歴

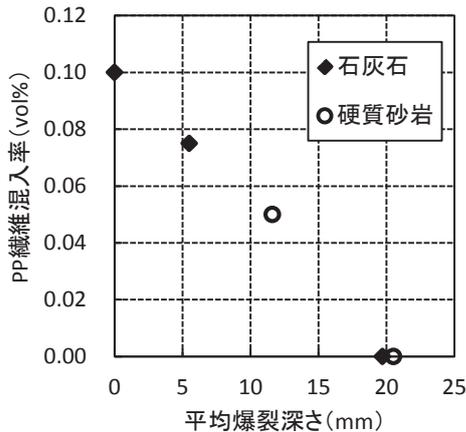


Fig. 7 平均爆裂深さと PP 繊維混入率の関係 (Fc=80N/mm² 級の調査のみ)

が発生し、25 分過ぎまで続いた。C100S100 については、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 381～499℃、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従い、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。

Table12 平均爆裂深さと爆裂評価

試験体名	平均爆裂深さ (mm)					爆裂評価
	東面	西面	北面	南面	全平均	
C80L000	22.1	19.3	14.4	21.5	19.3	中
C80L075	3.3	0.0	16.6	2.1	5.5	小
C80L100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	無し
C80S000	17.7	21.3	33.0	10.0	20.5	中
C80S050	11.0	8.3	18.3	8.8	11.6	中
C100S100	0.6	2.7	0.9	0.3	1.1	軽微

4. 3. 2 爆裂性状

Table12 に各試験体の平均爆裂深さおよび爆裂評価を、Fig. 7 に Fc=80N/mm² 級の調査のみの平均爆裂深さと PP 繊維混入率の関係を、Photo. 3 に加熱実験後の試験体の状況 (加熱炉から取り出す際に一部コンクリート片が剥落した) を、Fig. 8 に爆裂深さの測定結果を示す。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 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 については、爆裂範囲、爆裂深さともに小規模にとどまった。C80S000 については、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。C100S100 については、爆裂範囲は狭く、深さも平均で 1mm 程度であった。また、Fig. 7 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ことを確認した。

以上のことから、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ 級の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る。また、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ 級のRC柱について、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る。

4. 3. 3 耐火性能

Table13 に平均爆裂深さ、崩壊時間および軸変位を、Fig. 9 に加熱時間と軸変位の関係を示す。図中の×印は、

Table13 平均爆裂深さ、崩壊時間および軸変位

試験体名	PP 繊維混入率 (vol%)	平均爆裂深さ (mm)	崩壊時間 (分)	軸変位(mm)	
				加熱終了時	実験終了時
C80L000	0.000	19.3	220	-19.9	—
C80L075	0.075	5.5	—	-5.4	-21.4
C80L100	0.100	0.0	—	-3.7	-16.9
C80S000	0.000	20.5	230	-16.5	—
C80S050	0.050	11.6	—	-7.1	-28.6
C100S100	0.100	1.1	—	-5.6	-23.7

載荷中に崩壊に至った時点を示している。

PP 繊維無混入のC80L000, C80S050 は、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、載荷終了まで崩壊には至らず、載荷終了時の各試験体の軸変位は、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時間耐火柱の大臣認定取得の目安となる216分(3時間×1.2倍)の耐火時間を満足した。

Fig. 10 に平均爆裂深さと加熱終了時の軸変位(加熱終了前に崩壊し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った。

4. 4 載荷加熱実験のまとめ

PP 繊維を混入した超高強度 RC 柱を用いた載荷加熱実験を行い、以下の知見を得た。

(1)粗骨材の種類に関わらず、爆裂開始時間とその時の試験体の内部温度は概ね同じであることを確認した。

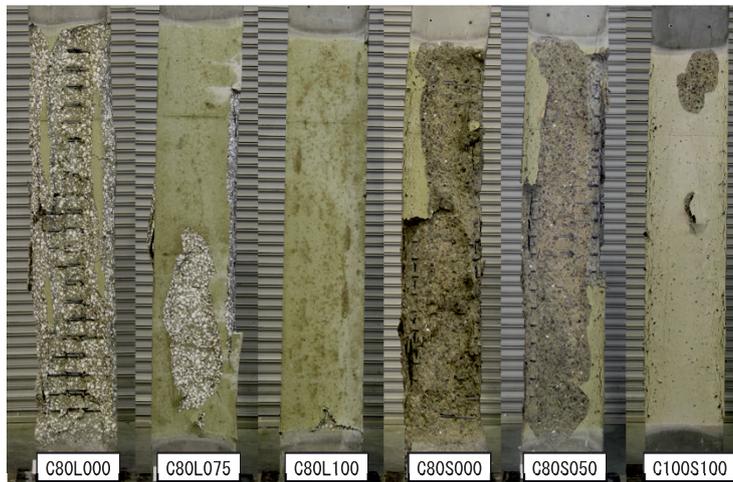


Photo. 3 載荷加熱実験後の試験体の状況

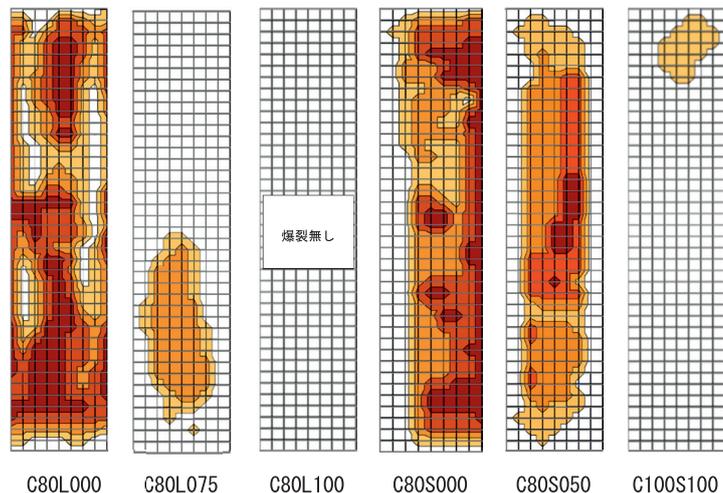


Fig. 8 爆裂深さ測定結果

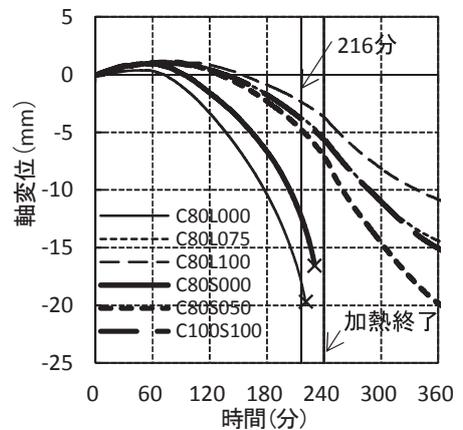


Fig. 9 加熱時間と軸変位の関係

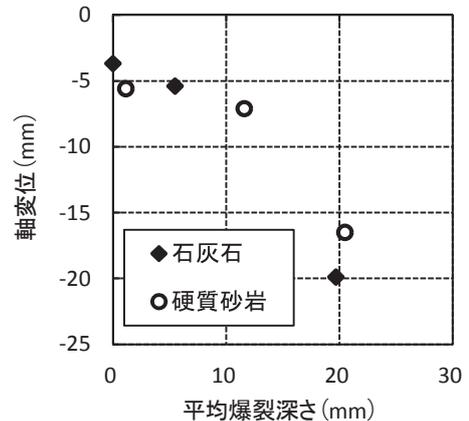


Fig. 10 平均爆裂深さと軸変位の関係

- (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 RC 柱では，爆裂は生じるが，3 時間の耐火性能を有していることを確認した．PP 繊維を 0.100vol% 混入することで，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 目的

石灰石粗骨材および硬質砂岩粗骨材を使用した超高強度 RC 柱の耐火性能を確認するため，供試体による加熱実験および縮小断面 RC 柱による載荷加熱実験を実施した．しかしながら，RC 柱の耐火性能を低下させる一要因である爆裂現象は，試験体が大きいほど著しくなることが報告されている⁹⁾．そこで，載荷加熱実験と同一の調合のコンクリートで製作した実大規模の超高強度 RC 柱の加熱実験を行い，その性状を確認した．

5. 2 実験概要

Table14 に実験条件を，Table4 にコンクリートの調合

を，Table15 に試験材齢と試験時の水分率を，Fig.11 に試験体の概要を示す．コンクリートの使用材料は，Table3 に示すものとした．なお，PP 繊維は，載荷加熱実験と同じ長さ 10mm を使用した．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．

試験体は，断面を 1000×1000mm，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，試験体を上下に 2 体重ねた状態で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

Table14 実大加熱実験の実験条件

試験体名	$F_c(\sigma_B)$ (N/mm^2)	粗骨材 種類	PP 繊維 混入率 (vol%)	調査記号
RC80L000	80(100)	石灰石	0.000	83-60-
RC80L075			0.075	20M-LS
RC80S050	100(120)	硬質砂岩	0.050	83-60-
RC100S100			0.100	100-60- 20SFC-SS-2

Table15 実大加熱実験の試験材齢と試験時の水分率

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

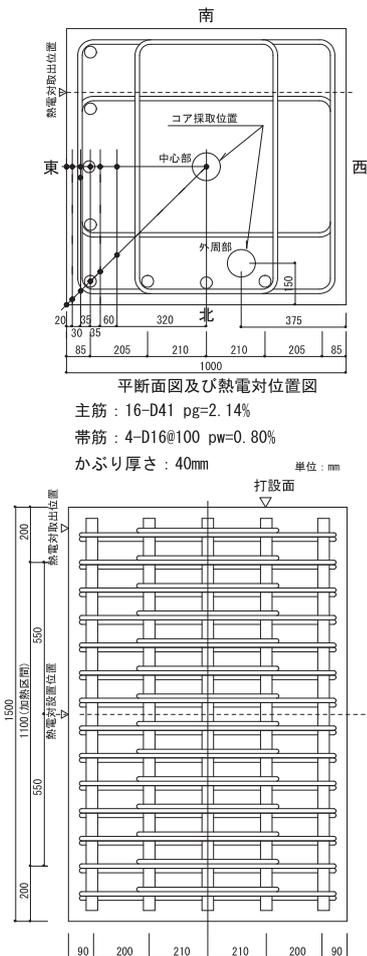


Fig. 11 試験体概要

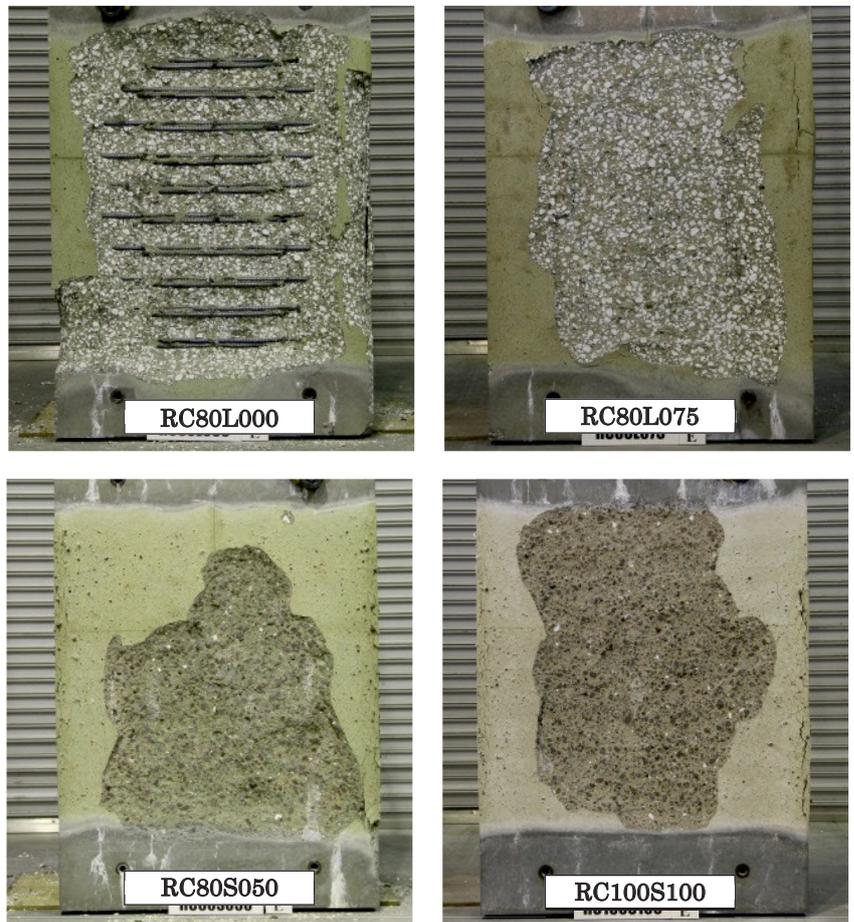


Photo. 4 実大加熱実験後の試験体の状況

時には目視観察を行った。爆裂の状態は、
 載荷加熱実験と同一の基準で評価した。

5. 3 実験結果

5. 3. 1 実験経過および爆裂深さ

Photo. 4 に加熱実験後の試験体の状
 況を示す。RC80L000 は加熱開始後 7 分
 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 は同じく加熱開始後 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、10~20 分の間に 3 面で表層部に
 広範囲な爆裂が生じたが、単発的なもの
 で、1 面においては表層に若干ひび割れ
 がみられたが、爆裂は生じなかった。
 RC100S100 は、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
 という結果にはならなかった。

Fig. 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、コンクリート強度に比して同
 程度の効果の PP 繊維混入率であ
 ったと考えられる。

5. 3. 2 温度履歴

Fig. 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

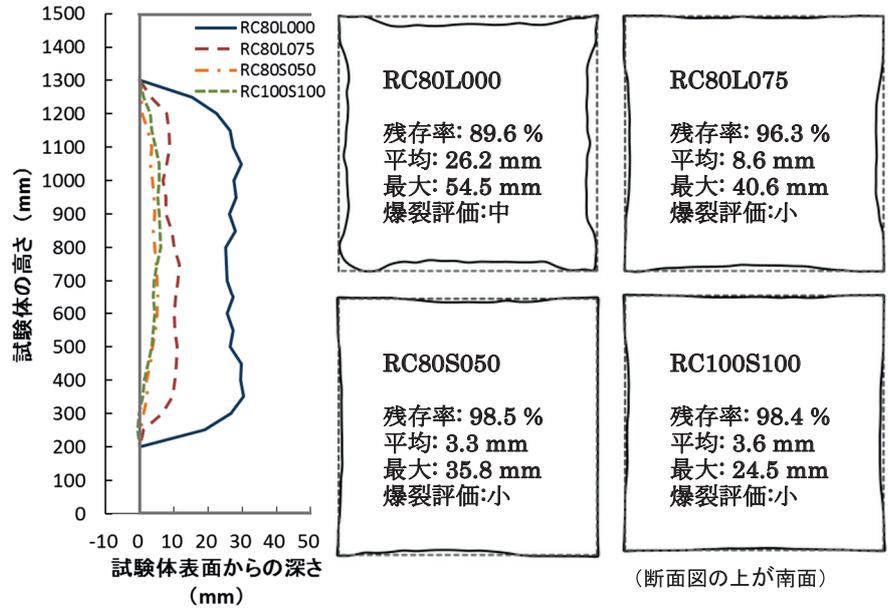


Fig. 12 爆裂深さの測定結果

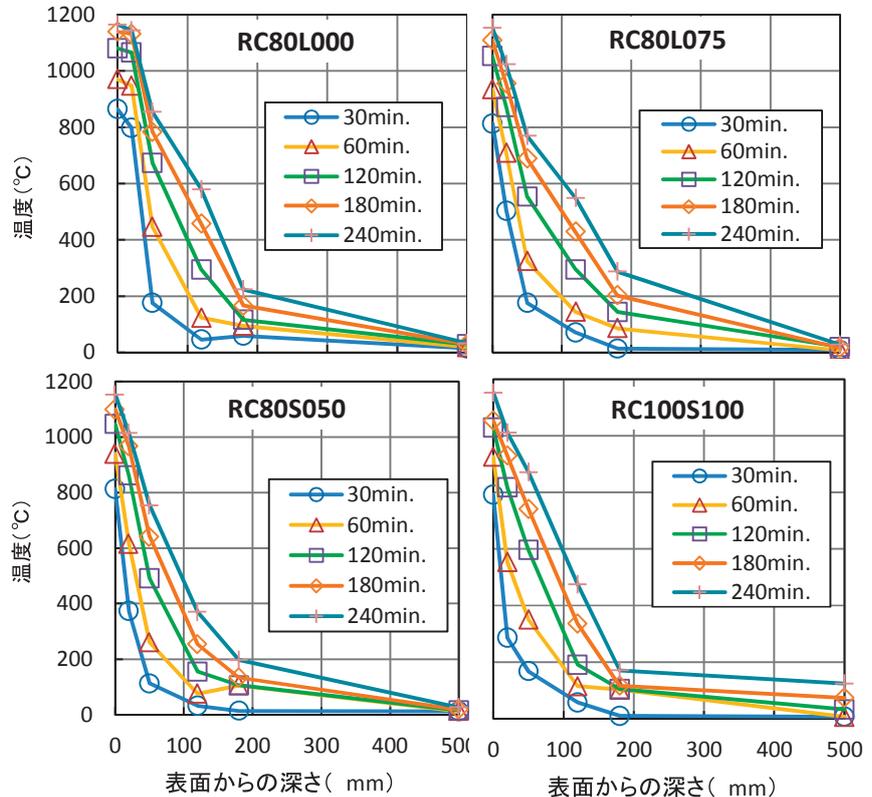


Fig. 13 温度分布の推移

で爆裂が生じなかった RC80S050 は、
 爆裂面側に温度測定位置があったが、
 角部においては他の 3 体に比して表
 面から 50~120mm までの温度が低
 く推移した。

5. 3. 3 加熱後のコア供試体圧縮強度

加熱実験後、Fig. 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 Table 16 に示す。
 コア供試体圧縮強度は、載荷加熱
 実験の供試体と同時に作製したため、
 Table 9 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、中心部では個々の爆裂状況が大きく影響すると考えられた。

5.4 実大加熱実験のまとめ

PP 繊維を混入した実大レベル（断面寸法 1000×1000mm）の RC 柱を用いた加熱実験により、以下の知見を得た。

- (1) 荷重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、断面寸法 400×400mm の縮小試験体を用いた荷重加熱実験により、爆裂する柱の耐火性能を評価出来ることを確認した。
- (2) 爆裂は表層部を中心にコンクリート温度に大きな影響を及ぼすことを確認した。
- (3) 加熱後のコンクリートの圧縮強度は、爆裂の状況が大きく影響することを確認した。

6. 研究全体のまとめ

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 $F_c=80\sim 100\text{N/mm}^2$ 級の超高強度 RC 柱について供試体加熱実験、荷重加熱実験および実大加熱実験により耐火性能の確認を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (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ことを確認した。
- (2) 石灰石粗骨材を用いた $F_c=100\text{N/mm}^2$ 級の RC 柱について、骨材種類に関わらず、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ことを確認した。

Table16 加熱実験後のコア供試体圧縮強度

試験体名	平面位置	コア供試体圧縮強度 (N/mm ²)						
		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	-	-

非加熱部。*ひび割れ有り、**セパ有り

本報告は安藤ハザマ、佐藤工業、戸田建設、西松建設、フジタ、前田建設工業との共同研究として実施した成果をまとめたものである。

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、BASF ジャパンに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針・同解説，pp. 59-61，2013
- 2) 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
- 3) 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 A-2 防火，pp. 99-108，2004. 8
- 4) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp. 99-100，2009
- 5) 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 防火，pp. 35-36，2001. 9
- 6) 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
- 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
- 8) 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），日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 防火，pp. 99-100，2004
- 9) 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 A 材料施工，pp. 481-482，1992

Study on fire resistance of ultra-high-strength reinforced concrete columns with limestone coarse aggregate

Kazuhiro MITANI, Seiji KANAMORI and Akira NONAKA

Abstract

Ultra-high-strength concrete is likely to occur spalling at the time of fire in comparison with normal strength concrete. It has been shown by many experiments that ultra-high-strength concrete could be suppressed the occurrence of explosion by mixing polypropylene fibers. However, experiments for examining the fire resistance of ultra-high-strength concrete using the limestone coarse aggregate for the reason of the requirement of the shrinkage reducing of the concrete is rare. In this study, we experimentally investigated fire resistance of reinforced concrete columns in the design strength 80~100N/mm² class ultra-high-strength concrete using the limestone coarse aggregate.

Key words: Ultra-high-strength concrete, Limestone coarse aggregate, Durability, Fire resistance test, Polypropylene fiber