

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

樋口 優香^{*1}・梶田 秀幸^{*2}

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

Yuka HIGUCHI, Hideyuki KAJITA

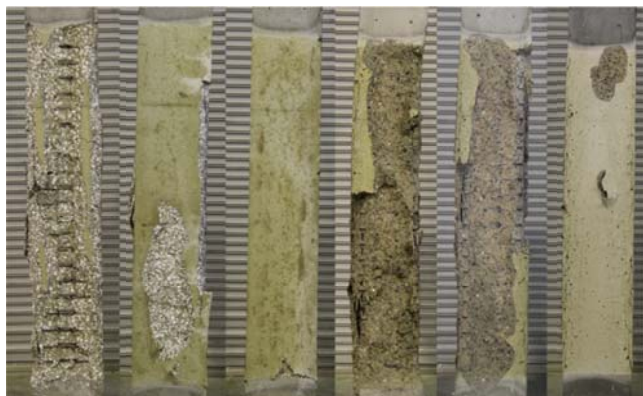


写真-1 載荷加熱実験終了後の試験体状況

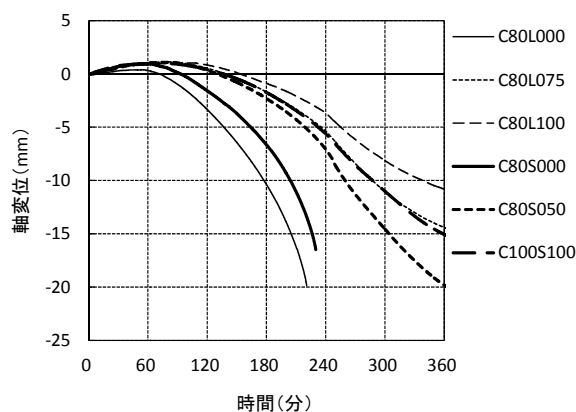


図-1 加熱時間と軸変位の関係（載荷加熱実験）

研究の目的

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くなるが、合成繊維を混入することによって、爆裂の発生を抑制できることが知られており、著者らも $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性能について確認し、既に報告している。

一方、コンクリートに対する低収縮化の要求から、高強度コンクリートの領域でも石灰石粗骨材の使用例が増えており、安価な収縮低減技術として、今後も使用が増えてくものと考えられる。しかしながら、粗骨材種類が爆裂性状や耐火性能に与える影響はかならずしも明確ではない。

そこで、本研究では、石灰石粗骨材を使用した設計基準強度 $80\text{N}/\text{mm}^2$ 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および爆裂性状について確認した。また、硬質砂岩粗骨材を使用した設計基準強度 $80\sim 100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の高強度コンクリートにおいても、同様の確認を行った。

技術の説明

石灰石または硬質砂岩を粗骨材として使用した設計基準強度 $80\sim 100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の高強度コンクリートを用いた高強度鉄筋コンクリート柱において、適用するコンクリートの設計基準強度と要求される収縮低減および耐火性能向上に応じた対策の選定を可能にする。

主な結論

- 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。
- 設計基準強度 $80\text{N}/\text{mm}^2$ 級の鉄筋コンクリート柱について、粗骨材種類によらず、3時間の耐火性能を有することを確認した。また、ポリプロピレン繊維を $0.100\text{vol}\%$ 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。
- 硬質砂岩粗骨材を使用した設計基準強度 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の鉄筋コンクリート柱について、ポリプロピレン繊維を $0.100\text{vol}\%$ 以上混入することで、3時間の耐火性能を有し、かつ、爆裂を軽微に抑えることができることを確認した。

*1 本店 技術研究所

*2 本店 技術研究所 材料研究室

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

樋口 優 香^{*1} 梶田 秀 幸^{*2}

要 旨

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くなるが、合成繊維を混入することによって、爆裂の発生を抑制できることが知られており、著者らも100N/mm²を超える超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性能について確認し、既に報告している。

一方、コンクリートに対する低収縮化の要求から、高強度コンクリートの領域でも石灰石粗骨材の使用例が増えており、安価な収縮低減技術として、今後も使用が増えてくるものと考えられる。しかしながら、粗骨材種類が爆裂性状や耐火性能に及ぼす影響はかならずしも明確ではない。そこで、石灰石粗骨材を使用した設計基準強度80N/mm²級の高強度コンクリートを用いた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、前記コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の3時間の耐火性能および爆裂防止性能は、合成繊維を適切に利用することにより確保できることがわかった。

キーワード 石灰石粗骨材／高強度コンクリート／耐火性能／爆裂性状／加熱実験／載荷加熱実験／ポリプロピレン繊維

目 次

- | | |
|-------------------|------------------|
| 1. はじめに | 5. 実大加熱実験 |
| 2. 実験全体の概要 | 6. 実験全体の結果およびまとめ |
| 3. 物性試験および供試体加熱実験 | 7. おわりに |
| 4. 載荷加熱実験 | |

STUDY ON FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH LIMESTONE COARSE AGGREGATE

Yuka HIGUCHI

Hideyuki KAJITA

Synopsis:

High-strength concrete tends to explode by fire compared with the ordinary strength concrete, and it is known that synthetic fiber will restrain the explosion of concrete caused by the fire. Authors have also reported about the fire resistance performance of RC pier made with ultra-high-strength concrete which strength exceeds 100MPa.

On the other hand, usage of limestone aggregate is on the increase to satisfy the requirement of low shrinkage, not only for ordinary concrete but also for high-strength concrete. However, the influence of limestone on the fire resistance performance is not clarified.

Therefore the authors have researched the fire resistance performance of reinforced high-strength concrete pier which strength of 80MPa made with limestone aggregate.

As the result of loaded fire resistance tests, it was clarified that the 3 hours fire resistance of those piers could be satisfied the requirement by using synthetic fiber.

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 技術研究所 材料研究室

1. はじめに

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、普通強度の RC 柱と比較して、火災時に爆裂が発生しやすくなる。この爆裂の抑制技術として、コンクリートへの合成繊維の混入が有効とされている¹⁾。著者らも設計基準強度（以下、 F_c と略記） 100N/mm^2 を超える超高強度材料を用いた RC 柱の耐火性能について確認し、既に報告²⁾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等により、硬質砂岩等の骨材と比較してコンクリートの乾燥収縮率が小さくなる石灰石を粗骨材として採用するレディーミクストコンクリート工場が増加傾向にある。

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かならずしも明確ではなく³⁾、石灰石粗骨材を使用した RC 柱の載荷加熱実験報告^{4,5)}もまだ少ないのが現状である。これらのことから、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ を超える調合のコンクリートには、石灰石粗骨材を使用しないのが一般的であったが、今後は上記のような背景より、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートにおいても、粗骨材に石灰石を採用する事例が増えると予測される。

そこで、本研究では、石灰石粗骨材を使用した $F_c=80\text{N/mm}^2$ 級の高強度コンクリートにおいて、爆裂抑制用の合成繊維としてポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維と略記）を混入したコンクリートの供試体および実大規模の RC 柱について爆裂性状および耐火性能を確認した。また、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についても、PP 繊維を混入したコンクリートの供試体および実大規模の RC 柱について爆裂性状および耐火性能を確認した。

本研究の加熱実験は、以下の 3 つのシリーズを行った。

シリーズⅠ 供試体加熱実験

シリーズⅡ 載荷加熱実験

シリーズⅢ 実大加熱実験

加熱実験に先立ち、石灰石粗骨材を用いたコンクリートの収縮性状を始めとする各種物性の確認を行った。シリーズⅠの供試体加熱実験では、シリーズⅡ、Ⅲの試験パラメータを設定するため、供試体レベルでの加熱実験を行い爆裂性状を確認した。シリーズⅡの載荷加熱実験では、PP 繊維を混入した RC 柱の耐火性能および爆裂性状を確認した。また、RC 柱の断面が大きくなるに従い爆裂も激しくなるという報告⁶⁾もある。そこで、シリーズⅡと同一調合のコンクリートで実大規模の RC 柱を作製し、爆裂性状を確認した（シリーズⅢ）。

本報告では、これらの実験結果⁷⁾をまとめて報告する。

2. 実験全体の概要

2.1 実験シリーズ

表-1 に実験シリーズの概要を示す。3 シリーズとも $F_c=80\sim 100\text{N/mm}^2$ 級の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 $F_c=60\text{N/mm}^2$ 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 $\phi 150\times 300\text{mm}$ を用い、試験体は 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 $400\times 400\text{mm}$ で長さ 3000mm （加熱区間 2000mm ）の試験体 6 体、シリーズⅢの実大加熱実験では、断面 $1000\times 1000\text{mm}$ で長さ 1500mm （加熱区間 1100mm ）の試験体 4 体に対して実験を行った。

表-1 実験シリーズの概要

シリーズ		実験要因	試験体断面
Ⅰ	供試体	$F_c=60,80,100\text{N/mm}^2$, PP 繊維長・混入率	円柱 $\phi 150\text{mm}$
	加熱実験		
Ⅱ	載荷	$F_c=80,100\text{N/mm}^2$, PP 繊維混入率	$\square 400\times 400\text{mm}$
Ⅲ	実大		$\square 1000\times 1000\text{mm}$
	加熱実験		

表-2 実験全体の試験体組合せ

F_c (σ_B) (N/mm^2)	セメント 種類	粗骨材 種類	PP 繊維の混入率 (×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)	10,20mm	-	10,20mm	10,20mm	10,20mm
				-			10mm	-
				-			-	-
		硬質 砂岩	(ベース)	10mm	-	10mm	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
							10mm	-
							10mm	-

注) 混入率の枠内の数字は使用した PP 繊維の繊維長を示す。

上段：供試体加熱実験，中段：載荷加熱実験，下段：実大加熱試験

表-2 に、3 シリーズ実験全体の試験体組合せを示す。

表中の F_c に記載した () 内の数値 σ_B は、実強度の目標値である。また、PP 繊維混入率の各枠内の数字は各シリーズの実験に使用した PP 繊維長である。供試体加熱実験では、PP 繊維長は 10mm を基本に比較用の 20mm も一部のケースで用いた。
 荷重加熱実験および実大加熱実験では 10mm のみとした。また、コンクリートに用いるセメントおよび粗骨材は、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ では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、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ ではシリカフェウ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査

表-3 にコンクリートの使用材料を、表-4 にコンクリートの調査を示す。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、100-60-20SFC-SS の調査は、供試体加熱実験では水セメント比 20.0%とし、荷重加熱実験および実大加熱実験では水セメント比 22.0%とした。

表-3 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	シリカフェウム混入セメント： 密度 3.08g/cm^3
細骨材	S1	混合砂，混合比（重量比）①：②＝60：40 ①千葉県富津市鶴岡産山砂： 表乾密度 2.58g/cm^3 ②青森県八戸市松館産砕砂（石灰石）： 表乾密度 2.69g/cm^3
		千葉県富津市鶴岡産山砂： 表乾密度 2.62g/cm^3
	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
粗骨材	G3	茨城県桜川市富谷産砕石（硬質砂岩）： 表乾密度 2.64g/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 SP8S
	SP2	高性能減水剤 ポリカルボン酸系 SP8HU
合成繊維	PP	ポリプロピレン繊維： 繊維径 48μ ，繊維長 10, 20mm

*石灰石粗骨材は、G1：G2＝70：30（容積比）で使用

2.3 加熱実験の概要

図-1 に荷重加熱実験での加熱装置図を示す。供試体加熱実験および実大加熱試験では、同図に示す耐火炉で試験を実施した。図-2 に加熱実験に用いた加熱温度曲線と

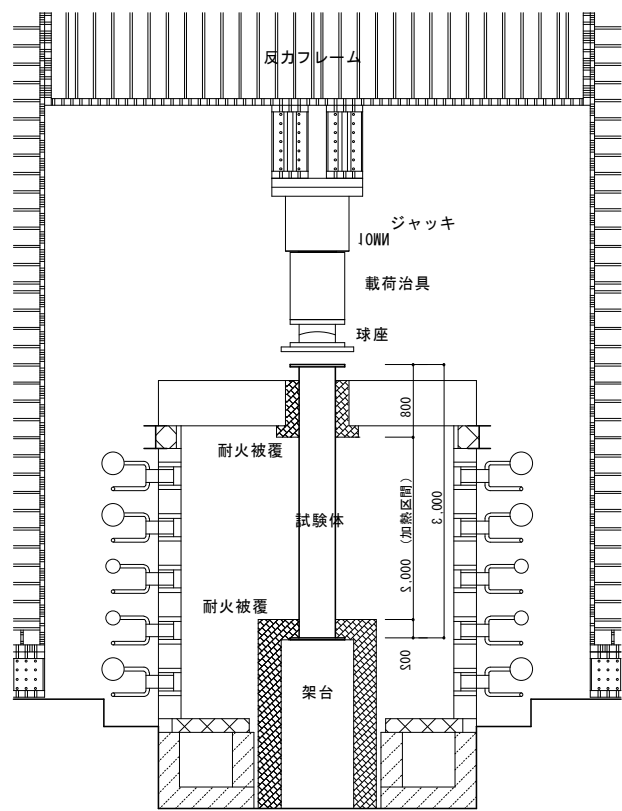


図-1 加熱装置図（荷重加熱実験）

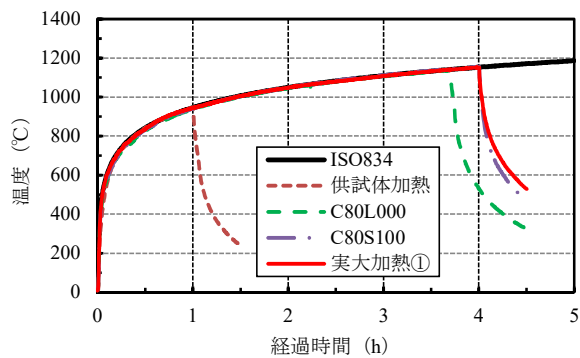


図-2 標準加熱曲線および平均炉内温度図

表-4 コンクリートの調査

調査 No.	Fc (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	32.8	石灰石	170	519	-	825	-	608	261	-	SP1
83-60-20M-LS	80	25.7		170	662	-	710	-	608	261	-	
83-60-20M-SS				170	662	-	-	723	-	-	840	
100-60-20SFC-SS ^{*1)}	100	20.0	硬質 砂岩	155	-	775	-	668	-	-	840	SP2
100-60-20SFC-SS ^{*2)}		22.0		155	-	705	-	728	-	-	840	

*1)供試体加熱実験用の調査，*2)荷重加熱実験および実大加熱試験用の調査

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、すべての試験体において、ISO834 の標準加熱温度曲線をほぼ満足した。

3. 物性試験および供試体加熱実験 (シリーズ I)

3.1 実験概要

表-5 に実験条件を示す。シリーズ I のパラメータは、 F_c (実強度 σ_B) の対象を、 60N/mm^2 ($\sigma_B=80\text{N/mm}^2$), 80N/mm^2 ($\sigma_B=100\text{N/mm}^2$), 100N/mm^2 ($\sigma_B=120\text{N/mm}^2$) 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。また、PP 繊維の長さを 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。また、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 $60\pm 10\text{cm}$ とした。また、空気量の目標値は、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ では 3.0%とし、管理値を $2.0\%\leq \text{Air}\leq 4.5\%$ 、 $F_c=80$ および 100N/mm^2 では 2.0%とし、管理値を $1.0\%\leq \text{Air}\leq 3.5\%$ 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。

表-6 に測定項目および方法を示す。加熱実験用供試体と同条件で採取・養生した供試体で、圧縮強度およびヤング係数を測定した。また、乾燥収縮ひずみ、自己収縮ひずみおよび含水率の測定は、PP 繊維混入無しのベース調合に対してのみ行った。

表-5 実験条件

供試体名	Fc (N/mm ²)	粗骨材 種類	纖維 長さ (mm)	纖維 混入率 (vol%)	調合 No.	
60L000	60	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		-	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		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	-	0.000	100-60- 20SFC- SS-1		
100S100-10		10	0.100			
100S150-10		10	0.150			

表-6 測定項目および方法

測定項目	測定方法	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(ガイヤルゲージ 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 ⁸⁾ の方法	$\square 100\times 100\times 400\text{mm}$, 1 調合につき 2 体
水分率	加熱直前に供試体表面 の任意の測定点を押当 型静電容量式市販品に より測定	加熱用試験体： 円柱 $\phi 150\times 300\text{mm}$, 1 調合につき 2 体
含水率	JASS5N T-602 に準拠	円柱 $\phi 150\times 300\text{mm}$ 1 調合につき 2 体

表-7 各種物性の測定結果一覧

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	-
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	3.69
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	3.63
80S000	91.1	3.93×10^4	4.3	
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	

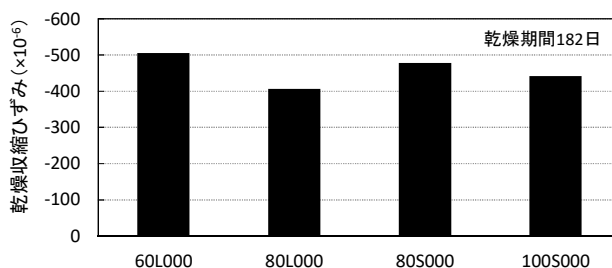


図-3 乾燥収縮ひずみの測定結果

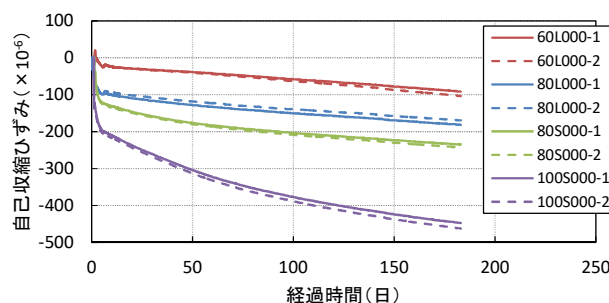


図-4 自己収縮ひずみの測定結果

加熱実験用供試体は、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°C 、 $\text{RH}60\%$ ）とした。加熱は、図-2 に示す ISO834 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、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。

3.2 実験結果

(1) 物性試験結果

表-7 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。

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 F_c （水セメント比）のコンクリートと比較すると、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。

(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²⁾を参考にして写真-2 に

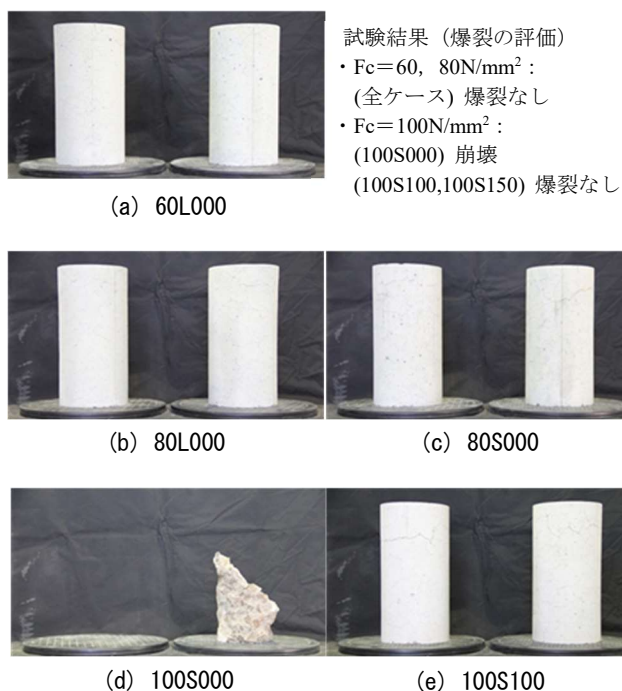


写真-1 加熱後の供試体状況

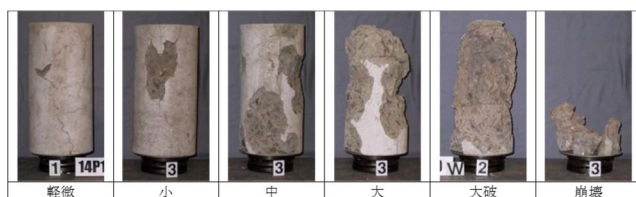


写真-2 爆裂の評価基準

示すような 7 段階の評価とした。100S000 の 1 体では、加熱開始 8 分頃から爆裂が始まり、12 分で激しくなり、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ていたが爆裂は発生せず、また、コンクリート片の剥落などは認められなかった。

3.3 物性試験および供試体加熱実験のまとめ

本章では、石灰石粗骨材を用いたコンクリートの収縮性状を始めとする各種物性の確認を行い、供試体レベルでの加熱実験により爆裂性状を確認した。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) 供試体加熱実験における爆裂性状について、 $F_c=60 \sim 80\text{N/mm}^2$ 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 実験概要

(1) 実験条件

表-8 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 F_c が 80N/mm^2 、 100N/mm^2 の 2 水準、粗骨材の種類が石灰石、硬質砂岩の 2 水準とした。また、PP 繊維の混入率は、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、柱に作用する圧縮応力度が長期許容応力度（コンクリートの断面積 $\times F_c / 3$ ）となるよう設定した。実強度 σ_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

表-8 載荷加熱実験の実験条件

試験体名	F_c (N/mm^2)	実強度 (N/mm^2)	粗骨材 種類	繊維* 混入率 (vol%)	載荷 軸力 (kN)	軸力比
C80L000	80	107	石灰石	0.000	4,267	0.248
C80L075		102		0.075		0.259
C80L100		104		0.100		0.254
C80S000		114	硬質 砂岩	0.000		0.234
C80S050		123		0.050		0.217
C100S100	100	137		0.100	5,333	0.242

*繊維長：10mm

週まで簡易断熱養生し、その後、封かん養生を行い、載荷加熱実験前に圧縮強度試験を行った結果である。また、軸力比（載荷軸力 / (圧縮強度×コンクリート断面積)）は、実強度に対する載荷軸力の比率である。

図-5 に試験体形状及び配筋を示す。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合は、表-3 および表-4 に示すものとし、ホッパーによりコンクリートを型枠内に打込み後、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-9 にコンクリートの力学的性質および水分率を、表-10 に鉄筋の機械的性質を示す。水分率は、表-6 に示す方法で加熱試験の直前に測定した。

(2) 実験方法

実験は、図-1 に示す載荷加熱装置を用い、図-5 の RC 柱の中心に圧縮力を与える載荷加熱実験とし、耐火炉の構成寸法により試験体の加熱区間を 2,000mm とした。加熱は ISO834 の標準加熱温度曲線を用い、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（図-2 参照）。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。崩壊の判定は、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、載荷軸力および試験体軸変位とし、加熱中は目視による観察も行った。

4.2 実験結果

(1) 実験経過

表-11 に爆裂状況を示す。加熱中の目視観察結果は、

表-9 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 ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	水分率 (%)	試験材齢 (日)
C80L000	107	4.69×10 ⁴	4.8	236
C80L075	102	4.66×10 ⁴	4.9	216
C80L100	104	4.50×10 ⁴	4.8	250
C80S000	114	4.31×10 ⁴	4.6	215
C80S050	123	4.44×10 ⁴	4.7	218
C100S100	137	4.58×10 ⁴	4.4	222

表-10 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	177500	708
帯筋 S10 (USD785)	853	201000	1031

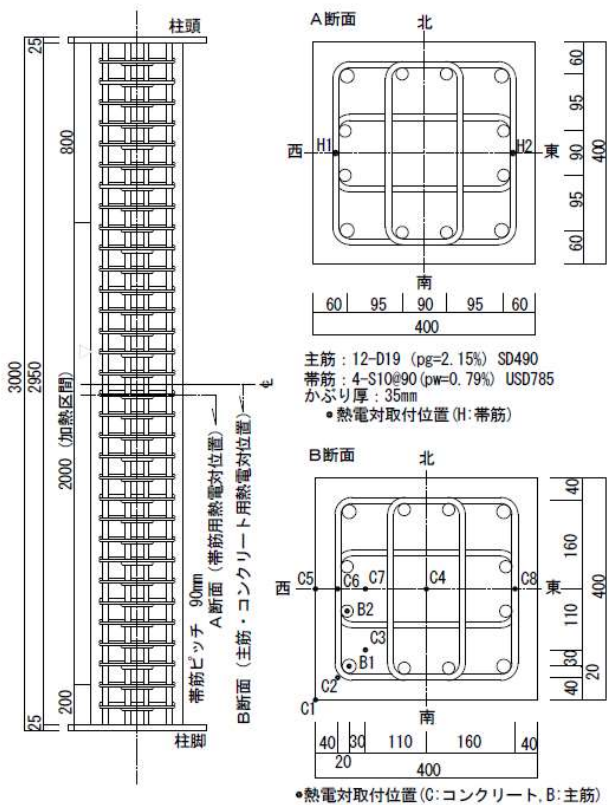


図-5 試験体形状および配筋図

表-11 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(℃)					最高温度(℃)				
	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

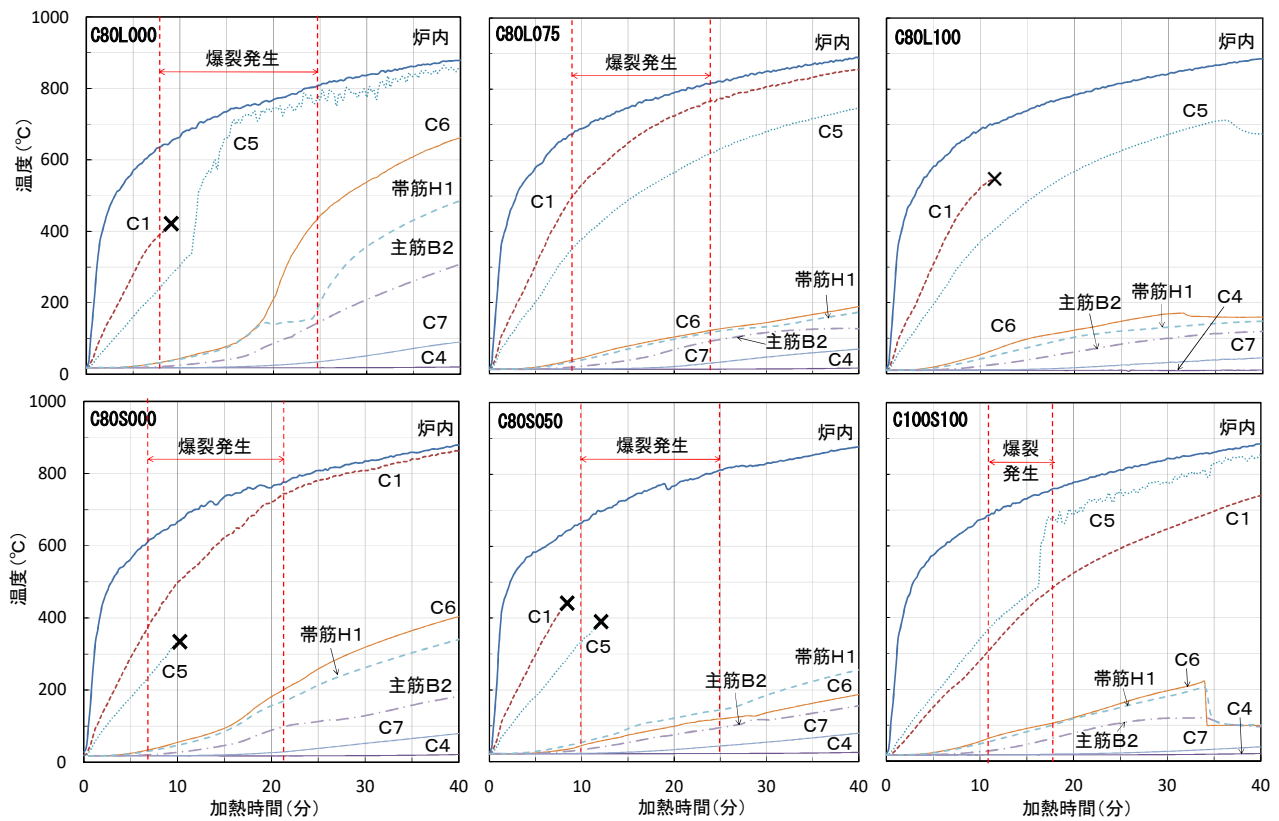


図-6 試験体の温度履歴（加熱開始後 40 分まで）

表-12 平均爆裂深さと爆裂評価

試験体	爆裂深さ (mm)					爆裂評価※
	東面	西面	北面	南面	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

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

6 試験体のうち C80L100 では、表層部に若干のひび割れが生じたが爆裂は発生しなかった。一方、爆裂が発生した試験体のうち C100S100 以外の試験体は、早いもので加熱後 7 分頃から爆裂が始まり、25 分頃には爆裂が終了した。各試験体の爆裂発生の詳細は、C80L000 では激しい爆裂が発生し、C80L075 では小規模の爆裂が断続的に発生した。C80S000 では、加熱後 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。C100S100 では、加熱後 11 分から 7 分間で小規模な爆裂が発生した。

(2) 温度履歴

表-11 に爆裂時の試験体の温度を、図-6 に加熱開始から 40 分間の試験体の温度履歴を示す。なお、図-6 の×印



写真-3 載荷加熱実験終了後の試験体状況

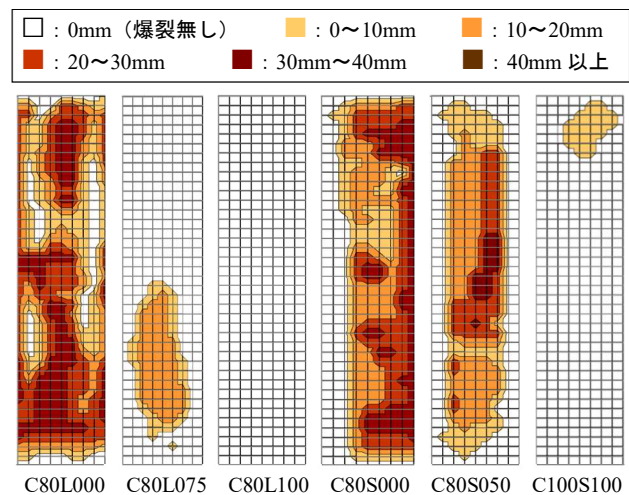


図-7 爆裂深さの測定結果

は、爆裂により熱電対が破損し、温度が測定不能になった点を示している。同表および同図より、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。また、繊維混入率が多くなるにしたがい、爆裂開始温度は高くなった。試験終了時まで軸力を保持できなかった試験体の温度は、軸力を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。一方、深さ 90mm（C7）での温度差は、最大で 180℃程度であった。

(3) 爆裂深さ

表-12 に各試験体の平均爆裂深さおよび爆裂評価を、写真-3 に載荷加熱実験終了後の写真を、図-7 に爆裂深さの測定結果を、図-8 に平均爆裂深さと PP 繊維混入率の関係（ $F_c=80\text{N/mm}^2$ のみ）を示す。なお、爆裂深さは、試験体加熱区間の側面を 50mm 間隔でデジタルノギスを用いて測定した。

各試験体の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、中央部では広範囲に帯筋（かぶり厚さ 35mm）が露出していた。C80L075 では、打設面である北面の爆裂が激しく帯筋の露出も確認されたが、その他 3 面では爆裂範囲、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 C80L000 と C80S000 を比較すると、爆裂の平均深さは、ほぼ同程度であったが、目視による観察では C80L000 の方が帯筋の露出が多く確認された。C80S050 では、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 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、本実験の範囲では、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ 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により爆裂の発生を抑制でき、0.100vol%以上混入することによって、爆裂を完全に抑制できることを確認した。また、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ の RC 柱については、PP 繊維を 0.100vol%以上混入することにより、爆裂の発生を軽微に抑えることができると考えられる。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ことを確認した。

(4) 軸力保持性能

表-13 に軸変位および崩壊時間を、図-9 に加熱時間と軸変形の関係を示す。図中の×印は、載荷中に崩壊に至った時点を示している。

PP 繊維無混入の試験体は、いずれも加熱終了時間前に

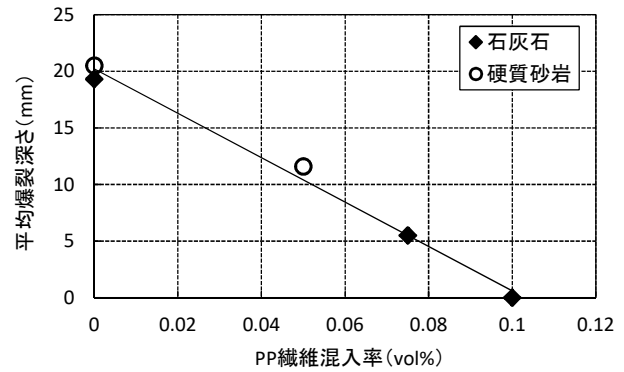


図-8 PP 繊維混入率と平均爆裂深さの関係
($F_c=80\text{N/mm}^2$ のみ)

表-13 軸変形および崩壊時間

試験体	繊維混入率 (vol%)	爆裂深さ (mm)		軸変位(mm)		崩壊時間 (分)
		最大	平均	加熱終了時	載荷終了時	
C80L000	0.000	22.1	19.3	-19.9	-	220
C80L075	0.075	16.6	5.5	-5.4	-21.4	-
C80L100	0.100	0.0	0.0	-3.7	-16.9	-
C80S000	0.000	33.0	20.5	-16.5	-	230
C80S050	0.050	18.3	11.6	-7.1	-28.6	-
C100S100	0.100	2.7	1.1	-5.6	-23.7	-

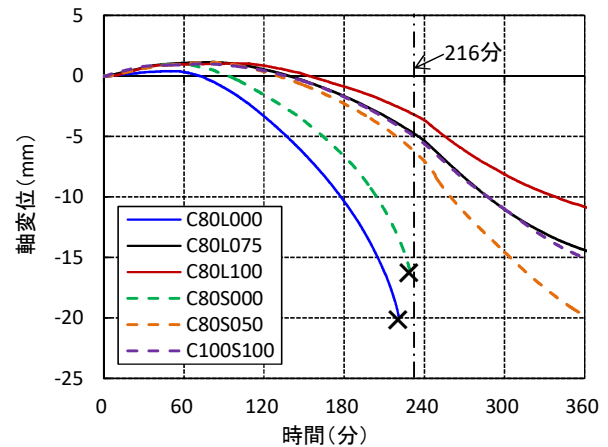


図-9 加熱時間と軸変形の関係

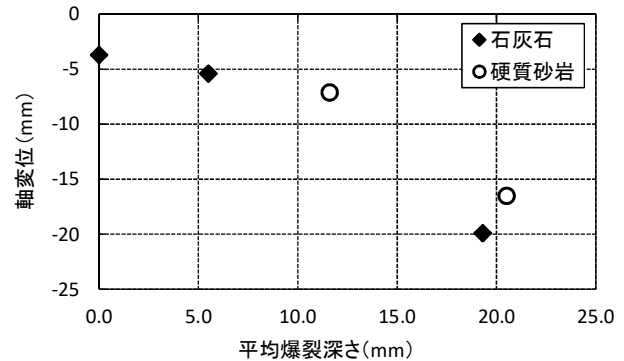


図-10 平均爆裂深さと軸変位の関係

崩壊に至った。C80L000 では加熱開始から 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 では加熱開始 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、载荷終了まで崩壊には至らず、载荷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、日本建築総合試験所が定める 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との関係を示す。なお、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で整理している。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。

4.3 载荷加熱実験のまとめ

PP 繊維を混入した高強度 RC 柱を用いた载荷加熱実験を行い、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試験体の内部温度は概ね同じであった。
- (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. 実大加熱試験（シリーズⅢ）

5.1 実験概要

表-14 に実験条件を、表-15 に試験材齢と実大試験体の水分率を、図-11 に実大試験体の概要を示す。シリーズⅢのパラメータは、粗骨材の種類、 F_c 、PP 繊維混入率とし、試験体は計 4 体作製した。

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。試験体は表-4 に示す調査とし、型枠にコンクリ

ートを打込み後、室内で気中養生し、材齢約 9 ヶ月で試験に供した。水分率は、表-6 に示す方法で加熱試験の直前に測定した。

加熱は、ISO834 の標準加熱曲線に従った 4 時間加熱とした（図-2 参照）。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。爆裂深さは、加熱区間を縦横 50mm 間隔に分割し、レーザー変位

表-15 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

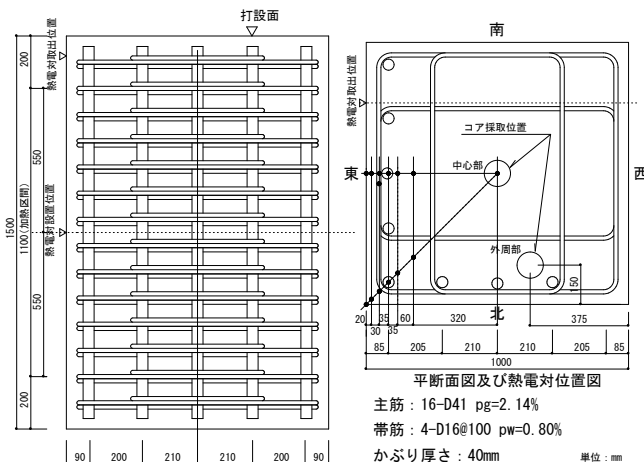


図-11 実大試験体の概要

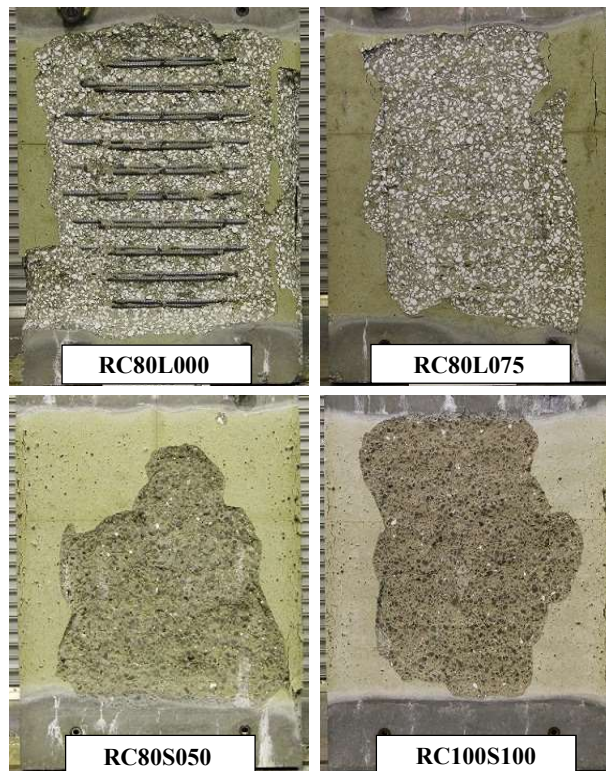


写真-4 加熱後の試験体状況

表-14 载荷加熱実験の実験条件

試験体名	F_c (σ_B) (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	83-60-20M-SS
RC100S100	100 (120)	硬質 砂岩	0.100	100-60- 20SFC-SS-2

*繊維長：10mm

計で測定した。

5.2 実験結果

(1) 実験経過

写真-4 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 面においては表層に若干ひび割れが見られたが、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。

前項の載荷加熱実験結果と比較すると、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載荷加熱実験（シリーズⅡ）の試験体に比べて顕著であるという結果は認められなかった。

(2) 温度履歴

図-12 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) 爆裂深さ

図-13 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。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。

(4) 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。表-16 にコア供試体の圧縮強度試験結果を示す。同表の試験結果を前項で示した同調合の圧縮強度（表-9 参照）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 割程度に圧縮強度が低下した。中心部では、4 面で爆裂が確認された 3 つの試験体では 8～9 割程度に圧縮強度が低下した。一方、1 面で爆裂が生じなかった RC80S050 では、ほぼ同等の圧縮強度となっており、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る。

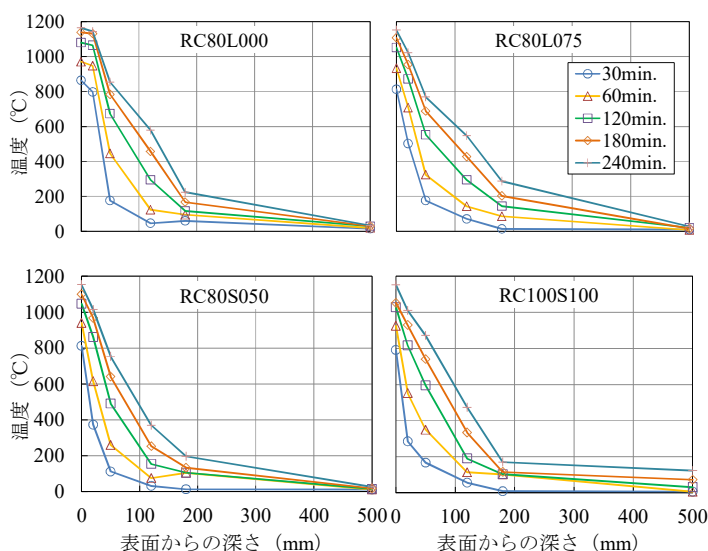


図-12 温度分布の推移

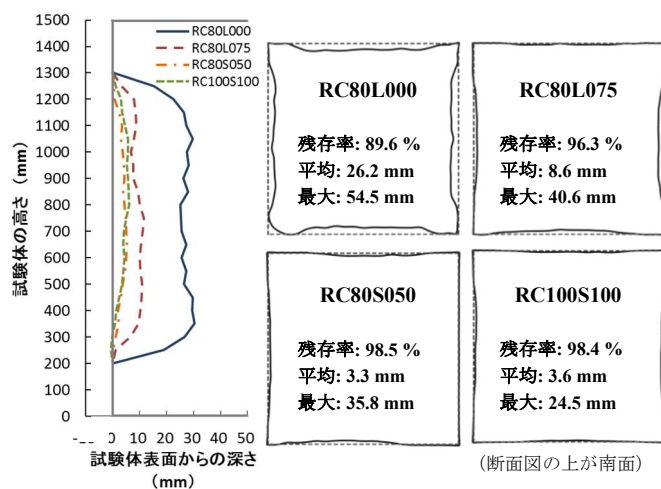


図-13 爆裂深さ測定結果

表-16 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 ²)						
		打設面		供試体位置				底面
		1	2	3	4	5	6	7
RC80	中心	102	-	89.3	86.6**	-	103.4	90.0
L000	外周	-	36.9*	62.3*	-	63.6	-	-
RC80	中心	101	-	94.2	70.6**	-	102.6	105*
L075	外周	-	69.4*	-	-	46.7*	-	-
RC80	中心	128	125*	127	116**	81.1*	126.6	123*
S050	外周	-	-	83.4	-	55.4	-	-
RC100	中心	104	116*	126*	-	130*	127.8	121
S100	外周	-	-	95.0	-	116	-	-

は、非加熱部。*ひび割れ有り、**セパ有り

表-17 各実験の試験体（繊維長 10mm のみ）爆裂状況一覧

Fc (σ _B) (N/mm ²)	セメント 種類	粗骨材 種類	PP 繊維の混入率 (×vol%)						爆裂状況
			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	60L000	60L050	-	-	60L100	60L150	爆裂なし
			C60L000	-	-	-	-	-	軽微
			-	-	-	-	-	-	小
80 (100)	中庸熱 ポルトランド セメント	石灰石	80L000	80L050	-	80L085	80L100	80L150	中
			C80L000	-	C80L075	-	C80L000	-	大
			RC80L000	-	RC80L075	-	-	-	大破
		硬質 砂岩	80S000	80S050	-	80S085	80S100	80S150	崩壊
			C80S000	C80S050	-	-	-	-	
			-	RC80S050	-	-	-	-	
100 (120)	シリカ フェーム 混入セメント	硬質 砂岩	100S000	100S050	-	-	100S100	100S150	
			-	-	-	-	C100S100	-	
			-	-	-	-	RC100S100	-	

※上段：供試体加熱実験，中段：載荷加熱実験，下段：実大加熱実験

要求性能		Fc（設計基準強度）N/mm ²					
		80 以下		100 以下	120 以下	150 以下	
収縮低減		石灰石骨材の使用 or 膨張材・収縮低減剤の使用		膨張材・収縮低減剤の使用			
耐火性能 向上	軸力保持 (3 時間)	無対策			PP 繊維* L=10mm 以上 0.05vol%以上		PP 繊維* L=20mm 以上 0.15vol%以上
	爆裂防止	PP 繊維* L=10mm 以上 0.10vol%以上		PP 繊維* L=10mm 以上 0.20vol%以上		PP 繊維* L=20mm 以上 0.20vol%以上	
		鋼板巻き					
		火災後の 補修軽減	FIRECC 工法				

*PP 繊維径:48μm

図-14 超高強度鉄筋コンクリート柱の収縮低減および耐火性能向上メニュー

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

表-17 に，長さ 10mm の PP 繊維を混入した場合の各実験における試験体の爆裂状況一覧を示す。

本研究では，石灰石粗骨材または硬質砂岩粗骨材を用いた Fc=80～100N/mm² 級の超高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性能について確認した。その結果，Fc=80N/mm² 級の鉄筋コンクリート柱については，骨材種類にかか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ことを確認した。また，PP 繊維を 0.100vol%以上混入する

ことにより，爆裂を完全に抑制できることを確認した。硬質砂岩粗骨材を用いた Fc=100N/mm² 級の鉄筋コンクリート柱については，PP 繊維を 0.100vol%以上混入することにより，爆裂の発生を軽微に抑えることができることを確認した。

本研究の結果および既往の共同研究の成果より，超高強度コンクリート柱の収縮低減および耐火性能向上に関する要求性能には，適用するコンクリートの設計基準強度によって，図-14 に示すようなメニューで対応することができる。

7. おわりに

石灰石粗骨材を使用した設計基準強度 80N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の収縮低減および耐火性能向上メニューを提案した。また，硬質砂岩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を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性能向上メニューについても提案した。

謝辞：本研究に当たり，実験に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。

なお、本研究は、前田建設工業と、安藤ハザマ、熊谷組、佐藤工業、戸田建設、西松建設、フジタの共同研究成果である。多大なご協力を頂いた関係各位の皆様および本実験にご協力いただいた関係各社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば森田 他：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，No.544，2001.6
- 2) 澤田 他：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 他：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 他：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 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
- 7) 梅本 他：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 1～その 5），日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.53-62，2015.9
- 8) 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