

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

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

右田周平*¹, 梅本宗宏*¹
Shuhei MIGITA, Munehiro UMEMOTO

Reinforced Concrete Columns using high-strength concrete, which are at risk of spalling in fire, it is known that can suppress the spalling by mixing polypropylene fibers in concrete. In addition, from the request of the low shrinkage of the concrete, example of the use of limestone coarse aggregate in the field of high-strength concrete is increasing. However, the influence of the effect of coarse aggregate gives to spalling is not clear. In this study, we carried out the heating experiment to target the 80~100N/mm² class high-strength concrete that was using a variety of bone material, confirmed the fire resistance of reinforced concrete columns. As a result, by appropriately mixed with polypropylene fibers, it was confirmed that it is possible to ensure the fire resistance of reinforced concrete columns with limestone coarse aggregate.

Keywords : High-Strength Concrete, Limestone Coarse Aggregate, Fire Resistance, Fire Resistance Test Under Load, Spalling

高強度コンクリート, 石灰石粗骨材, 耐火性能, 載荷加熱実験, 爆裂

1. はじめに

近年, 建築物の高層化や大型化が進み, 高強度コンクリートの需要が高まっている。しかしながら, 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, 火災時に表層コンクリートが飛散または剥落する, 爆裂現象が生じやすいという問題がある。爆裂の抑制方法としては, コンクリートにポリプロピレン繊維 (以下, PP 繊維と略記) を混入することが知られており¹⁾, 100 N/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も既に報告されている²⁾。

一方, コンクリートをより低収縮にする要求に対応するためには, 石灰石骨材の採用が有効であり, 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かならずしも明確ではなく³⁾, 石灰石粗骨材を使用した載荷加熱実験報告

^{4,5)}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砕石を使用した設計基準強度 (以下, F_c と略記) 80 ~ 100N/mm² 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や載荷加熱実験を実施し, PP 繊維混入による爆裂抑制効果や鉄筋コンクリート柱の耐火性能を確認した。

2. 実験概要

2.1 実験シリーズ

表-1 に実験全体の試験体組合せを示す。本研究では, シリーズ I ~ III の 3 種類の実験を行った。

シリーズ I では, 実験に用いるコンクリート物性の確認と, 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, $\phi 150 \times 300$ mm の円柱供試体を用い, 21 水準 (各水準で供試体 2 本) で加熱実験を実施した。

シリーズ II では, PP 繊維を混入した RC 柱の耐火

表-1 実験全体の試験体組合せ

Fc(σ_B) (N/mm ²)	セメント 種類	粗骨材	PP 繊維混入率 (xvol%)					
			0.000	0.050	0.075	0.085	0.100	0.150
60(80)	中庸熟ポルトランドセメント	石灰石	ベース	10mm	—	—	10mm	10mm
80(100)	中庸熟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 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

性能および爆裂性状の確認を目的に、断面 400×400mm、長さ 3000mm（加熱区間 2000mm）の試験体 6 体で荷重加熱実験を行った。

シリーズⅢでは、既往の文献⁶⁾で、爆裂は部材断面が大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）の実大試験体 4 体で加熱実験を実施した。

コンクリートは、3 シリーズとも Fc80~100N/mm² 級の高強度コンクリートを対象としたが、シリーズⅠのみ、比較用に Fc60N/mm² 級のコンクリートも追加した。表中の Fc に記載した σ_B は、実強度の目標値である。また、PP 繊維混入量の数字は供試体加熱実験に使用した PP 繊維長で、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。コンクリートに用いるセメントおよび粗骨材は、Fc60N/mm² で中庸熟ポルトランドセメントと石灰石、Fc80N/mm² では中庸熟ポルトランドセメントに石灰石または硬質砂岩、Fc100N/mm² 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 コンクリート使用材料および調合

表-2 に、コンクリートの使用材料を示す。粗骨材は、主に東京湾岸地区で使用が多い産地のものを選択した。

2.3 実験装置

図-1 に加熱実験に使用する耐火炉および荷重装置の概要を示す。各加熱実験では、耐火炉内に試験体を設置し実験を行った。

図-2 に加熱実験で採用した ISO834 標準加熱時間温度

表-2 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 ②青森県八戸市松館産 ：表乾密度 2.69g/cm ³
	S2	千葉県富津市鶴岡産山砂 ：表乾密度 2.62 g/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
有機繊維	PP	ポリプロピレン繊維 ：繊維径 48 μ m，繊維長 10・20mm

度曲線と、各シリーズでの炉内温度測定結果の一例を示す。全ての試験において、標準加熱時間温度曲線を満足する結果となった。

3. 供試体加熱実験

3.1 実験概要

表-3 にコンクリート調合および実験条件を示す。シリーズⅠのパラメータは、設計基準強度 Fc（実強度 σ_B ）の対象を、60N/mm² ($\sigma_B=80$ N/mm²)，80N/mm² ($\sigma_B=100$ N/mm²)，100N/mm² ($\sigma_B=120$ N/mm²) の 3 水準とし、粗骨材の種類は石灰石、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、PP 繊維混入量を 0.000，0.050，0.085，0.100 および 0.150vol% の 5 水準とした。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。

3.2 試験項目および試験方法

表-4 に物性試験の概要を示す。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

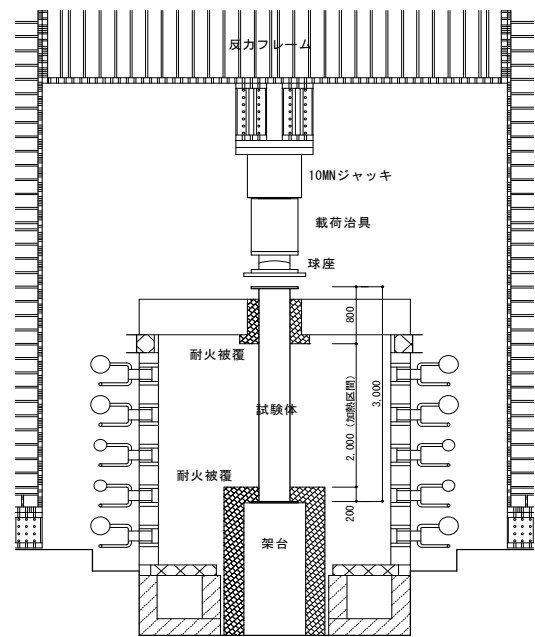


図-1 実験装置

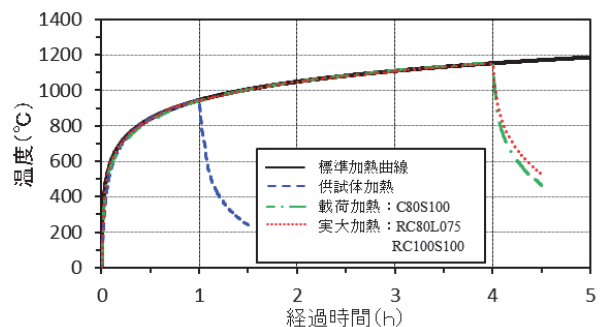


図-2 標準加熱時間温度曲線および平均炉内温度

のベース調合に対してのみ行った。

供試体加熱実験では、供試体は 1 調合につき φ150×300mm の円柱を 2 体ずつ作製した。供試体は打設後 7 日間封かん養生とし、その後加熱時(材齢 91 日)まで気中養生(20℃, RH60%)とした。加熱は、ISO834 の標準加熱時間温度曲線に従い 60 分加熱した。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、爆裂の評価の 3 項目とした。また、爆裂の評価は、文献²⁾を参考にして写真-1 に示すような 6 段階の評価とした。

3.3 実験結果

(1) 物性試験結果

表-3 に、力学的性質(材齢 91 日:加熱時)を合わせて示す。圧縮強度およびヤング係数は、PP 繊維を混入しても、ベース調合のコンクリートとほぼ同等の値であった。

図-3 に自己収縮ひずみの測定結果を、図-4 に乾燥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) 加熱実験結果

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。また、100S000 以外は、表層にひび割れは生じたものの、爆裂は生じなかった。

写真-2 に、代表的な加熱後の供試体状況を示す。100S000 は、崩壊しほぼ原形を留めていなかった。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、コンクリート片の剥落などは生じなかった。

3.4 まとめ

供試体による加熱実験を実施し、以下の結果を得られた。

- 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くなる。
- 供試体加熱実験における爆裂性状について、Fc60~80N/mm²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。また、Fc100N/mm²

表-4 物性試験概要

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, 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	□100×100×400mm, 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会報告書 ⁷⁾ の方法	□100×100×400mm, 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 φ150×300mm, 1 調合につき 2 体
含水率	JASS 5N T-602 に準拠	円柱 φ150×300mm, 1 調合につき 2 体

表-3 実験条件・コンクリート調合・力学的性質

供試体名	Fc (N/mm ²)	σ _B (N/mm ²)	水セメント比 (%)	粗骨材の種類	PP 繊維長さ (mm)	PP 繊維混入量 (vol%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤使用量 (C×%)		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	水分率 (%)	含水率 (%)													
							W	M	SFC	S1	S2	G1	G2	G3					SP1	SP2											
60L000	60	80	32.8	石灰石	—	0.000	170	519	—	825 (混合砂)	608	261	—	0.800	—	66.7	33.4	4.3	3.83												
60L050-10					10	0.050								0.800		65.1	34.1	4.3													
60L100-10					10	0.100								0.800		63.6	33.0	4.3													
60L150-10					10	0.150								0.800		61.2	31.2	4.2													
80L000	80	100	25.7		石灰石	—	0.000	170	662	—	710 (混合砂)	608	261	—	0.975	—	88.4	40.5	4.4	3.69											
80L050-10						10	0.050								0.950		88.0	39.5	4.4												
80L050-20						20	0.100								1.000		91.1	40.1	4.5												
80L085-10						10	0.085								1.025		92.4	38.7	4.4												
80L085-20						20	0.150								1.025		88.7	39.7	4.4												
80L100-10						10	0.100								1.025		91.9	40.1	4.4												
80L100-20						20	0.150								1.025		91.6	39.6	4.3												
80L150-10						10	0.150								1.025		89.2	40.1	4.4												
80L150-20				20		0.150	1.025								87.8		39.3	4.3													
80S000				100		120	20.0								硬質砂岩		—	0.000	170	662	—	723*	—	—	—	0.925	—	91.1	39.3	4.3	3.63
80S050-10																	10	0.050								0.900		92.3	38.5	4.3	
80S085-10																	10	0.085								0.900		91.0	38.7	4.2	
80S100-10	10	0.100	0.925		94.2			38.0	4.2																						
80S150-10	10	0.150	0.925		91.5			38.6	4.3																						
100S000	—	0.000	—		0.725			133.8	44.9	4.0	3.93																				
100S100-10	10	0.100	155	—	775	668*	—	—	—	840	—	0.750	123.1	43.7	3.9	—															
100S150-10	10	0.150	10	—	775	668*	—	—	—	840	—	0.750	131.4	43.6	3.9	—															

◆コンクリートのフレッシュ性状
 ・目標スランプフロー (ベ-スコンクリート) 65cm±10cm, (PP 繊維混入後) 60cm±10cm
 ・目標空気量 (Fc60N/mm²) 3.0+1.5, -1.0%, (Fc80,100N/mm²) 2.0+1.5, -1.0%

◆水分率および含水率の測定 (水分率) 押当型静電容量式コンクリート・モルタル水分計による測定 (含水率) φ150×300mm の供試体による測定

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

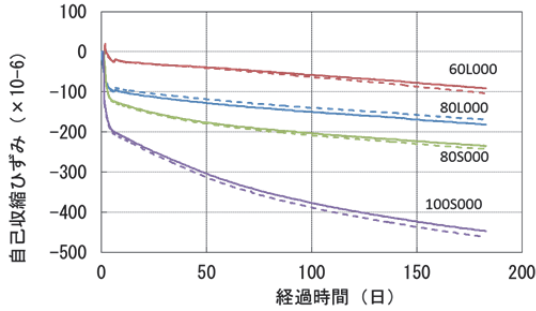


図-3 自己収縮ひずみの測定結果

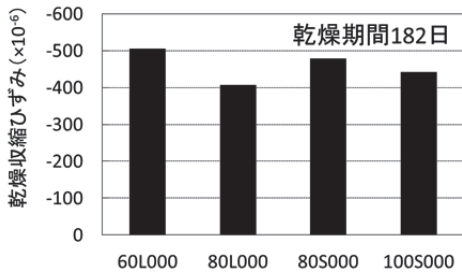


図-4 乾燥収縮ひずみ測定結果

4. 載荷加熱実験

4.1 実験概要

載荷加熱実験の実験条件を表-5 に、試験体形状及び配筋を図-5 に示す。シリーズⅡでは、試験体は 6 体とし、コンクリート強度と粗骨材をパラメータとした。コンクリートの強度は $Fc80$, $100N/mm^2$ の 2 水準、粗骨材は石灰石、硬質砂岩の 2 水準とした。PP 繊維は、繊維長さは 10mm とし、混入量は供試体加熱実験の結果をもとに、 $Fc80N/mm^2$ の石灰石粗骨材の場合で、0.000, 0.075, 0.100vol%, $Fc80N/mm^2$ の硬質砂岩粗骨材の場合で 0.000, 0.050vol%, $Fc100N/mm^2$ の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 (柱断面積 $\times Fc/3$) 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、その後、封かん養生を行い、実験前に圧縮強度試験を行い測定した。なお表中の軸力比とは、実強度に対する載荷軸力の比率である。

表-5 載荷加熱実験の実験条件

試験体名	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	調合 No
C80L000	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	114	硬質砂岩	0.000	4,267	0.234	83-60
C80S050	123		0.050		0.217	-20M
C80S100	137		0.100		5,333	0.242

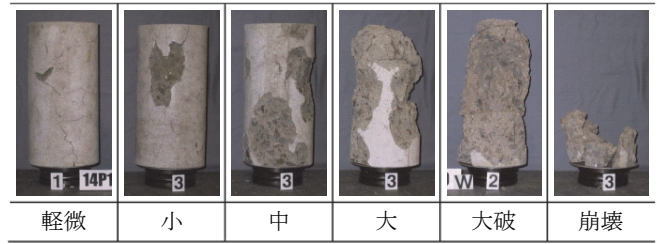
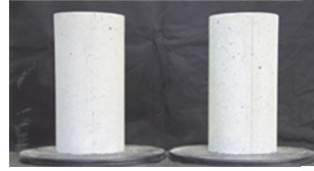
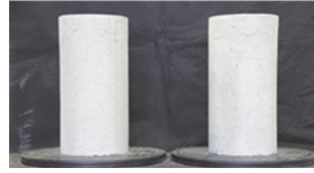


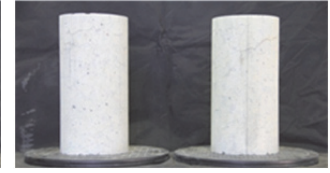
写真-1 爆裂の評価基準



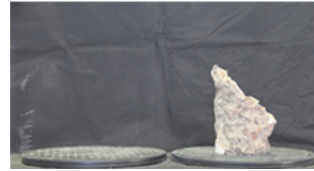
(a) 60L000



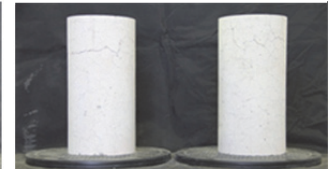
(b) 80L000



(c) 80S000



(d) 100S000



(e) 100S100

写真-2 加熱後の供試体状況

(試験結果)

$Fc60N/mm^2$: (全ケース) 爆裂なし
 $Fc80N/mm^2$: (全ケース) 爆裂なし
 $Fc100N/mm^2$: (100S000) 崩壊,
(100S100,100S150) 爆裂なし

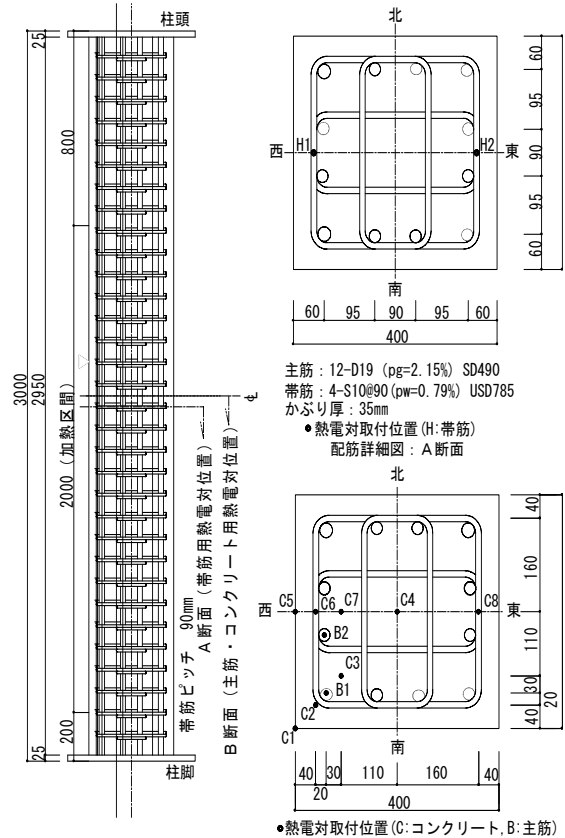


図-5 試験体形状および配筋図

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、実際の建築物に合わせた。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。

コンクリートの力学的性質及び鉄筋の機械的性質をそれぞれ表-6、表-7 に示す。コンクリートの材料および調合は表-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。

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 2,000mm とした。加熱は ISO834 の標準加熱時間温度曲線を用い、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。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、載荷軸力及び試験体軸変形とし、加熱中は目視による観察についても行った。

4.3 温度履歴

爆裂の状況と試験体の温度を表-8 に、加熱開始から 40 分間の試験体の温度履歴を図-6 に示す。6 体の試験体のうち、C80L100 の試験体だけ爆裂が生じなかった。爆裂した試験体のうち、C100S100 以外の試験体は、加熱後 7 分頃から爆裂が始まり、25 分頃に終了した。C80S000 では、21 分頃に爆裂はおさまっ

たものの 60 分頃まで断続的に小規模な爆裂が見られた。C100S100 は加熱後 11 分から爆裂が始まり、18 分に終了した。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。一方、深さ 90mm (C7) での温度差は、最大で 180℃程度であった。

4.4 爆裂性状

写真-3 に載荷加熱実験終了後の試験体状況を、図-7 に爆裂深さ測定結果を、表-9 に平均爆裂深さを、図-8 に平均爆裂深さと PP 繊維混入量の関係を示す。

各試験体の爆裂発生状況について、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。加熱終了後の爆裂状況は、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、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。加熱終了後の爆裂状況は、爆裂範囲、爆裂深さともに小規模にとどまった。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き、それ以降も小規模な爆裂が断続的に発生した。加熱終了後の爆裂状況は、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、骨材の種類は違

表-6 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-7 鉄筋の機械的性質

鉄筋	降伏強度 (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

表-8 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

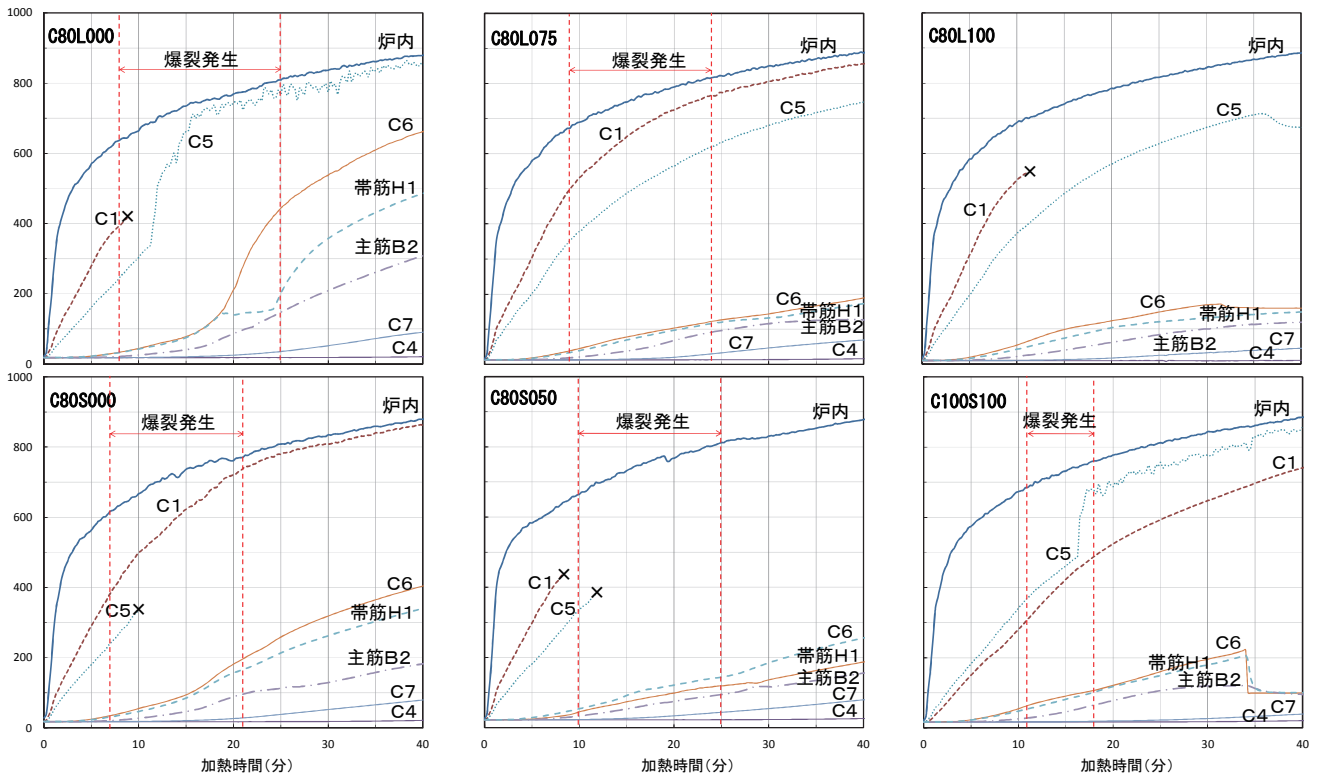


図-6 試験体の温度履歴（加熱開始後40分まで）

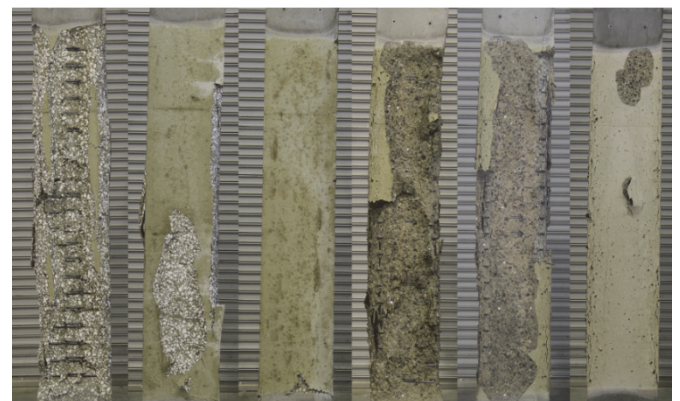
うものの、爆裂の程度はあまり変わらない結果となった。C80S050については、加熱開始10分から爆裂が発生し、25分過ぎまで続いた。加熱終了後の爆裂状況は、中央付近で数か所、帯筋が露出していたが、C80S000と比べて、爆裂範囲、深さ共に小規模であった。C100S100については、加熱開始11分で爆裂が生じ、18分過ぎまで小規模な爆裂が発生した。加熱終了後の爆裂状況は、爆裂範囲は狭く、深さも平均で1mm程度であった。

以上のことから、 $Fc80N/mm^2$ 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、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、 $Fc100N/mm^2$ の鉄筋コンクリート柱について、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。また、図-8より、PP繊維混入量と平均爆裂深さに線形な関係が存在するのが確認できる。

4.5 耐火性能

表-10に実験結果一覧を、図-9に加熱時間と軸変形の関係を示す。図中の×印は、载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、



C80L000 C80L075 C80L100 C80S000 C80S050 C100S100

写真-3 载荷加熱実験終了後の試験体状況

□ : 0mm (爆裂無し) ■ : 0~10mm ■ : 10~20mm ■ : 20~30mm

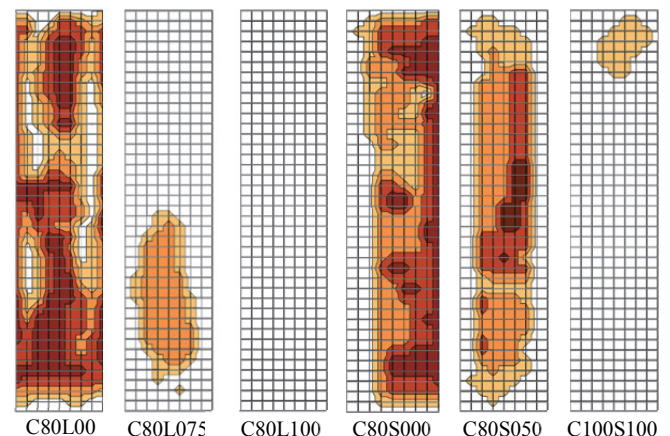


図-7 爆裂深さの測定結果

載荷終了まで崩壊には至らず、載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 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っている。

4.6 まとめ

PP 繊維を混入した高強度 RC 柱の載荷加熱実験を実施し、以下の結果を得られた。

- 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。
- 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。
- Fc80N/mm² 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。

5. 実大加熱実験

5.1 実験概要

表-11 に実験条件を、図-11 に試験体の概要を、表-12 に試験材齢と実大試験体の水分率を示す。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 繊維は長さ 10mm とした。試験体は粗骨材の種類、コンクリート強度、PP 繊維混入量をパラメータに計 4 体とした。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、ISO834 の標準加熱時間温度曲線に従った 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

写真-4 に加熱終了後の試験体状況を示す。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 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見られたが、爆裂は生じなかった。RC100S100 は、10

表-9 各面の平均爆裂深さ

試験体	爆裂深さ (mm)				
	東面	西面	北面	南面	全体
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

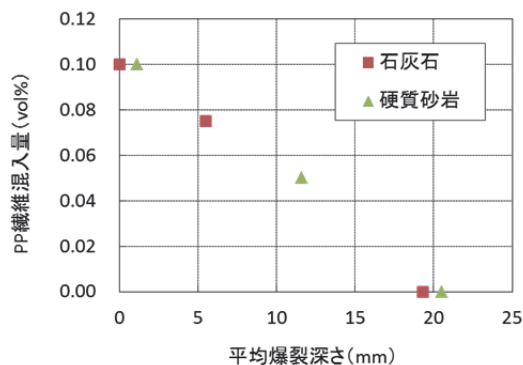


図-8 平均爆裂深さと PP 繊維混入量の関係

表-10 実験結果一覧

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	載荷終了時	
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	-

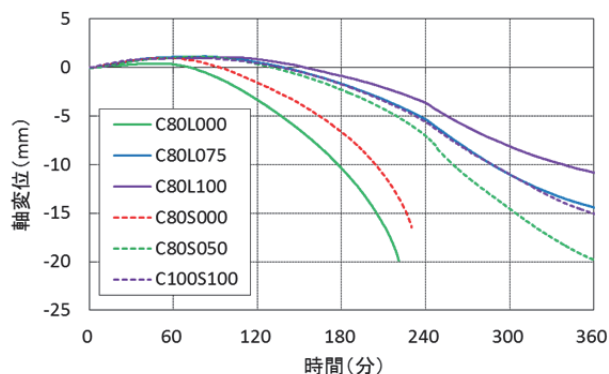


図-9 加熱時間と軸変位の関係

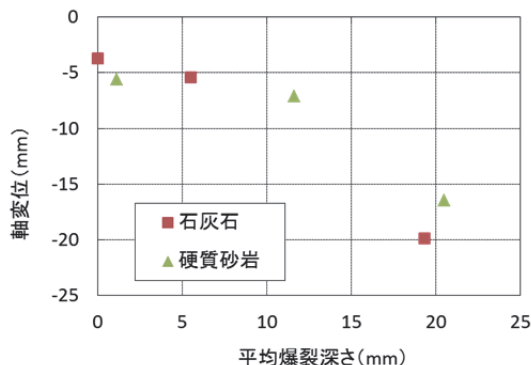


図-10 平均爆裂深さと軸変位の関係

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。

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、コンクリート強度に比して同程度の効果のPP繊維混入量であったと考えられる。

表-11 実大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%)	調合 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

表-12 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

5.3 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、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。

5.4 加熱後のコア圧縮強度

実験終了後、図-10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。コア供試体の圧縮強度試験結果を表-13に示す。試験結果を表-6で示した同調合コンクリート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

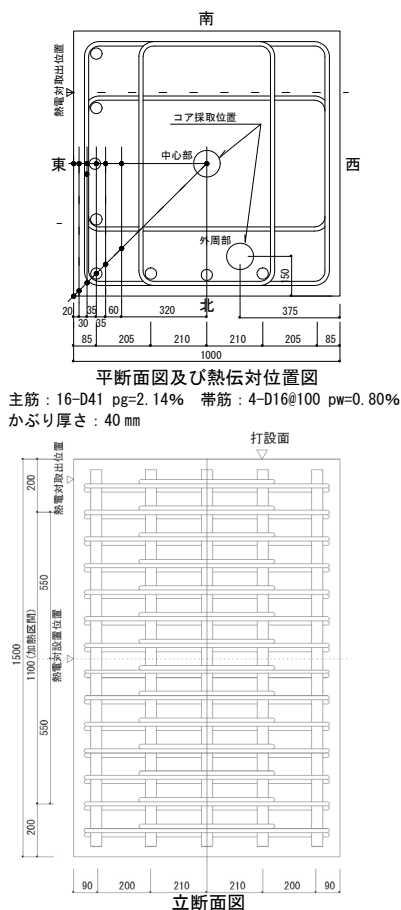


図-11 実大試験体概要

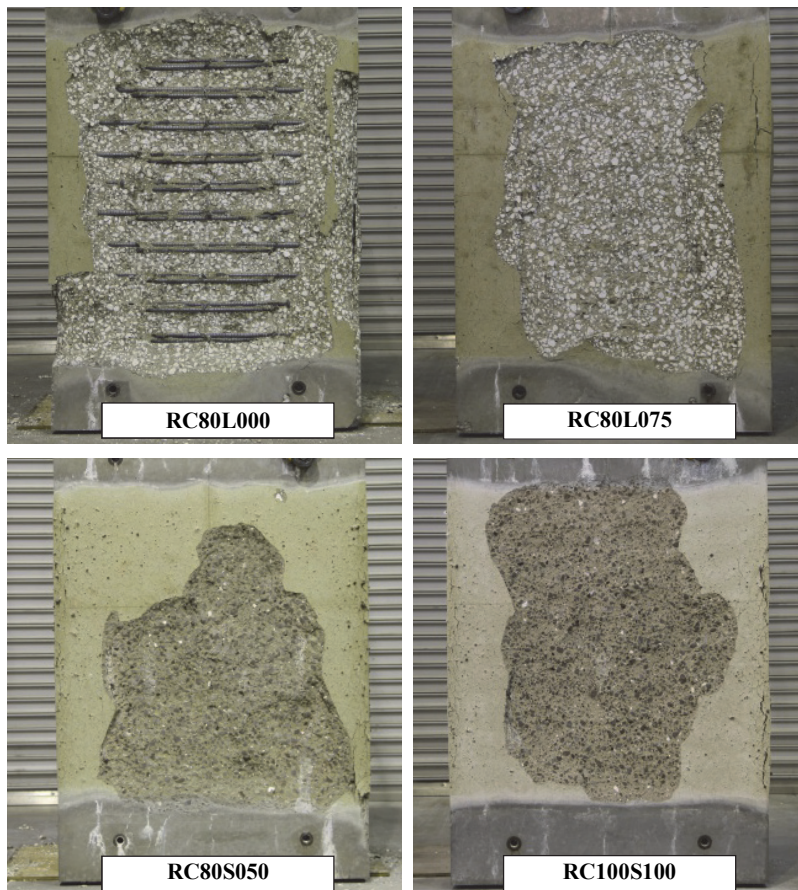


写真-4 載荷加熱実験終了後の試験体状況

が低下したが、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た。

5.5 まとめ

PP 繊維を混入した実大 RC 柱の加熱実験を行い、以下の結果を得られた。

- ・ 载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、概ね同等である。
- ・ 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. おわりに

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 Fc80~100N/mm² 級の高強度コンクリートを対象に、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のため、供試体加熱実験、载荷加熱実験および実大加熱実験を実施し、以下の結果を得られた。

- ・ Fc80N/mm² 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。
- ・ 硬質砂岩粗骨材を用いた Fc100N/mm² 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、戸田建設と安藤ハザマ、熊谷組、佐藤工業、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。

【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

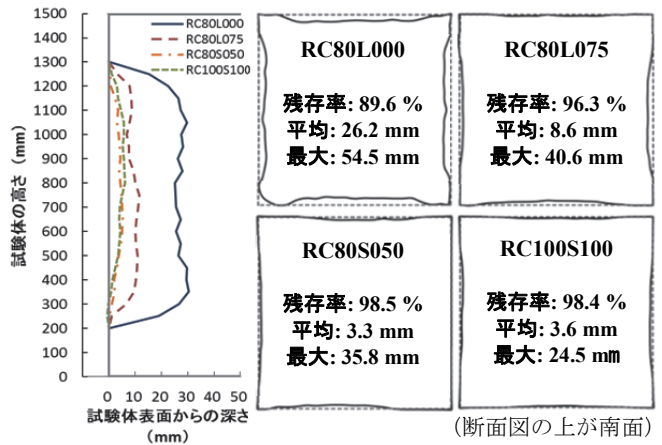


図-12 爆裂深さの測定結果

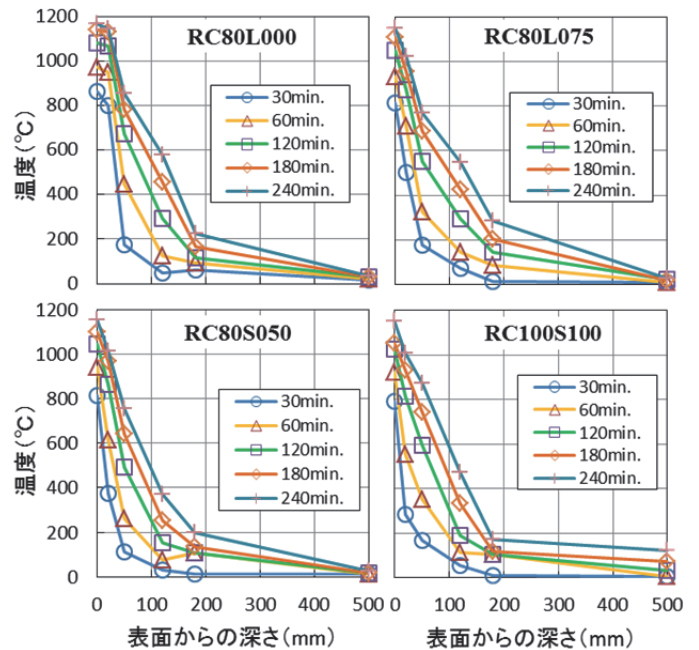


図-13 温度分布の推移

表-13 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 L000	中心	102	-	89.3	86.6**	-	103.4	90.0
	外周	-	36.9*	62.3*	-	63.6	-	-
RC80 L075	中心	101	-	94.2	70.6**	-	102.6	105*
	外周	-	69.4*	-	-	46.7*	-	-
RC80 S050	中心	128	125*	127	116**	81.1*	126.6	123*
	外周	-	-	83.4	-	55.4	-	-
RC100 S100	中心	104	116*	126*	-	130*	127.8	121
	外周	-	-	95.0	-	116	-	-

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。