

超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火対策技術に関する研究

宮野 和樹・中込 昭・梶田 秀幸・吉野 茂^{*1}

Fire Resistance Technology of Reinforced Concrete Columns with Ultra High Strength Material

Kazuki MIYANO, Akira NAKAGOME, Hideyuki KAJITA, Shigeru YOSHINO

表 超高強度鉄筋コンクリート柱の耐火対策

要求される柱の耐火性能	設計基準強度(F_c)		
	100N/mm ² 以下	120N/mm ² 以下	150N/mm ² 以下
①3時間耐火を有する(軸力保持性能)	無対策	ポリプロピレン繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=10\text{mm}$ 以上 0.05vol%以上	ポリプロピレン繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下
②爆裂を抑制する(かぶりコンクリートのみ)		ポリプロピレン繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=10\text{mm}$ 以上 0.10vol%以上	$L=20\text{mm}$ 以上 0.10vol%以上
③爆裂を防止する		ポリプロピレン繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=10\text{mm}$ 以上 0.20vol%以上	ポリプロピレン繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=20\text{mm}$ 以上 0.20vol%以上
④コンクリートへの受熱温度を抑制する	鋼板巻き工法 耐火被覆工法 (ケイカル板, セルローズ, セラミック, モルタル)		

部は火災後の補修軽減工法

写真 載荷加熱実験終了後の試験体状況

研究の目的

近年、超高層住宅の更なる高層化に伴い、設計基準強度 150N/mm² 級のコンクリートに関する研究開発が多方面で行われている。高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造は、火災加熱を受けると表層部分が爆裂しやすく、部材の耐力低下を起こす可能性がある。この爆裂を抑制する対策として、コンクリートへの合成繊維の混入が有効であると報告されている。一方、コンクリートは受熱温度が 500℃程度であれば、ある程度の期間が経過すると強度は回復するといわれてきたが、高強度コンクリートは、強度回復があまり期待できないという報告がある。

そこで、本研究では、設計基準強度 100～150N/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について火災後の補修軽減工法を含めた耐火対策技術の開発を目的とした。

技術の説明

超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱において、設計基準強度と要求される耐火性能に応じた耐火対策の選定を可能にする。

主な結論

設計基準強度 100～150N/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 3 時間以上の耐火性能(軸力保持性能)を有する工法および火災後の補修を軽減することができる耐火工法を開発することができた。

*1 本店 リニューアル事業部

超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の 耐火対策技術に関する研究

宮 野 和 樹 中 込 昭
梶 田 秀 幸 吉 野 茂^{*1}

要 旨

高強度コンクリートを用いたRC造は、火災加熱を受けると表層部分が爆裂しやすく、部材の耐力低下を起こす可能性がある。この爆裂現象の抑制対策として、合成繊維の混入が有効であることが報告されている。しかし、コンクリート強度が高くなると、合成繊維の必要混入量は増大し、合成繊維によるコンクリートの施工性の悪化や圧縮強度の低下が懸念される。一方、コンクリートは受熱温度が500 程度であれば、ある程度の期間が経過すると圧縮強度は回復するといわれてきたが、高強度コンクリートは、強度回復があまり期待できないという報告がある。そこで、超高強度コンクリートを用いたRC柱の耐火対策技術の開発を目的に各種の加熱実験を行った。

その結果、 $F_c=100 \sim 150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを用いたRC柱の3時間以上の耐火性能（軸力保持性能）を有する工法および火災後の補修を軽減することができる耐火工法を開発することができた。

キーワード 超高強度コンクリート / 鉄筋コンクリート柱 / 耐火対策技術 / 製造技術 / ポリプロピレン繊維

目 次

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1 . はじめに | 3 . 超高強度RC柱の耐火対策技術 |
| 2 . 超高強度コンクリートの製造技術 | 4 . まとめ |

FIRE RESISTANCE TECHNOLOGY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH ULTRA HIGH STRENGTH MATERIAL

Kazuki MIYANO Akira NAKAGOME
Hideyuki KAJITA Shigeru YOSHINO

Synopsis:

Recently, demand for construction of ultra-highrise condominiums has risen significantly, leading to increased research and development in the field of ultra high strength concrete. Reinforced concrete construction with high strength concrete may cause strength fall of framework because concrete tend to be spalling when concrete are affected fire heating. There are studies that, if concrete temperature received fire heat is about 500 degrees centigrade, compressive strength recover through a certain amount of period. But there are studies that high strength concrete can't expect strength recovery. In this study, the high temperature exposure test about fire resistance technology of reinforced concrete columns with ultra high strength concrete was conducted.

Results of the tests, it was developed that method can ensure fire resistance over three hours of reinforced concrete columns used ultra high strength concrete (with design strengths from 100 to 150N/mm^2). The measure against repair mitigation after a fire was developed.

* 1 本店 リニューアル事業部

1. はじめに

近年，超高層住宅の更なる高層化に伴い，設計基準強度（以下 F_c と略記） 130N/mm^2 の高強度コンクリートを超高層住宅に実施工したとの報告¹⁾がある中で， $F_c=150\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートに関する研究開発が多方面で行われている．

既往の研究によれば， $F_c=100\text{N/mm}^2$ 以上の鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）柱では耐火時間が 3 時間以下になる例^{2),3)}が， $F_c=150\text{N/mm}^2$ 級の RC 柱では耐火時間が 1 時間程度となる⁴⁾と報告されている．この原因の一つと考えられているのが，加熱時に生じるコンクリートの爆裂現象である．これを抑制する対策として，コンクリートへの合成繊維の混入が有効であると報告されている⁵⁾．しかし，コンクリート強度が高くなると，合成繊維の必要混入量は増大し，合成繊維によるコンクリートの施工性の悪化や強度の低下が懸念される．

一方，コンクリートは受熱温度が 500 程度であれば，ある程度の期間が経過すると圧縮強度が回復するといわれてきた⁶⁾．しかしながら，高強度コンクリートは強度回復があまり期待できないという報告もある^{7),8),9)}．

これらのことから， $F_c=100\sim 150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性能を確認するとともに，3 時間以上の耐火性能（軸力保持性能^{注 1)}）を有する工法および火災後における補修軽減工法などの耐火対策技術の開発を目的に，以下のシリーズの実験（実験 3～6）を行った．また，併せて， $F_c=120\sim 150\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートを対象に，爆裂防止用のポリプロピレン繊維（以下，PP 繊維と略記）を混入した超高強度コンクリートの製造技術に関する実験（実験 1,2）を行った．

・超高強度コンクリートの製造技術

実験 1：試験室内で実施した「室内試験」

実験 2：生コン工場の実機ミキサを用いた「実機試験」

・超高強度 RC 柱の耐火対策技術

実験 3：実大規模柱を用いた「実大規模載荷加熱実験」

実験 4：供試体を用いた「供試体加熱実験」

実験 5：縮小試験体を用いた「縮小柱載荷加熱実験」

実験 6：実大柱を想定した「実大加熱実験」

本報告は，これらの実験結果^{10),11),12),13),14)}をまとめ，超高強度 RC 柱の耐火対策技術を整理したものである．

2. 超高強度コンクリートの製造技術

2.1 実験概要

(1) 室内試験練り（実験 1）

室内試験練りにおいて，PP 繊維の種類・混入量が，フレッシュコンクリート性状および強度発現性状に及ぼす影響について比較検討を行った．また，その他の使用材料（結合材，骨材，混和剤）および水結合材比（以下 W/B と略記）についても比較検討を行った．表 - 1 に要因と水準を，表 - 2 に使用材料を，表 - 3 に試験項目を，

表 - 4 に調合を示す．

室内試験練りは 20 の恒温室内で実施した．練混ぜには二軸強制練りミキサ（公称容量 100l）を使用した．粗骨材かさ容積は $0.51\text{m}^3/\text{m}^3$ ，目標スランプフローは 65 または $70\pm 7.5\text{cm}$ ，目標空気量は $1.5\pm 1.0\%$ とした．コンクリートの練混ぜはモルタル先練り方式とし，細骨材，結合材および混和剤を混入した水をミキサに投入して 90 秒～8 分間練混ぜ，その後，粗骨材を投入して 90～120 秒間練混ぜた．PP 繊維の混入は，練り上がったブレンコンクリートをトラックアジテータ車のドラム内部を模擬した傾胴型ミキサに移して行った．回転速度は，トラックアジテータ車の高速回転と同程度となるように 15 回転/分とし，PP 繊維混入量に応じて 2～3 分間練混ぜた．

(2) 実機試験練り（実験 2）

W/B13～20%の超高強度コンクリートをレディーミキストコンクリート工場の実機バッチャープラントを用いて練上げ，トラックアジテータ車に排出後，PP 繊維を投入・攪拌し，PP 繊維の混入がフレッシュコンクリート性

表 - 1 要因と水準（室内試験）

要因	水準
PP繊維の種類・混入量	a社製：0.00，0.24，0.36vol% b社製：0.00，0.30vol%
結合材	シリカフューム混入セメント(SFC) 低熱ポルトランドセメント(LC) +シリカフューム(SF) } (LSF) 三成分セメント(VKC)
骨材	岩瀬産砕石・砕砂(G1,S1) 大月産砕石・砕砂(G2,S2)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤 (A社製，B社製，C社製，D社製，E社製)
水結合材比	24，20，16，14，13，12%

表 - 2 使用材料（室内試験）

材料	特性・主成分
水(W)	上水道水
結合材(B)	シリカフューム混入セメント(SFC)：密度 3.08g/cm^3 低熱ポルトランドセメント(LC)：密度 3.22g/cm^3 粉体シリカフューム(SF)：密度 2.20g/cm^3 三成分セメント(VKC)：密度 2.99g/cm^3
細骨材(S)	岩瀬産砕砂(硬質砂岩)(S1)：表乾密度 2.58g/cm^3 大月産砕砂(安山岩)(S2)：表乾密度 2.62g/cm^3
粗骨材(G)	岩瀬産砕石(硬質砂岩)(G1)：表乾密度 2.65g/cm^3 大月産砕石(安山岩)(G2)：表乾密度 2.62g/cm^3
混和剤(SP)	ポリカルボン酸系高性能減水剤 (A社製，B社製，C社製，D社製，E社製)
合成繊維	PP繊維：密度 0.91g/cm^3 ，繊維径 $48\mu\text{m}$ ，繊維長 10mm (a社製，b社製)

表 - 3 試験項目・方法

試験項目	試験方法	備考
スランプフロー	JIS A 1150	-
50cmフロー時間	JIS A 1150	-
空気量	JIS A 1128	-
コンクリート温度	温度計	-
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生

表 - 4 コンクリートの調合 (室内試験)

要因	W/B (%)	単位量(kg/m ³)								SP 使用 量 (B×%)	PP 纖維 混入量 (vol%)		
		W	B				S		G				
			SFC	LC	VKC	SF	S1	S2	G1	G2			
PP 纖維	13	155	1192	-	-	-	328	-	837	-	3.00	0.00 ^{*1} 0.24 ^{*1}	
			3.20	0.00 ^{*1} 0.36 ^{*1}									
	13	155	1192	-	-	-	328	-	837	-	3.20	0.00 ^{*2} 0.30 ^{*2}	
結合 材	24	155	646	-	-	-	784	-	837	-	1.30	-	
			-	581	-	65					1.55	-	
		20	155	775	-	-	-	676	-	837	-	1.55	-
				-	698	-	78					1.70	-
	16	155	969	-	-	-	513	-	837	-	2.00	-	
			-	872	-	97					2.10	-	
		-	-	969	-	490	-	3.00	-				
		13	155	1192	-	-	-	328	-	837	-	2.90	-
	-			1073	-	119	2.70					-	
	-		-	1192	-	297	-	4.30	-				
	骨 材		20	155	775	-	-	-	676	-	837	-	1.55
		-							723	-	791	1.45	-
16		155	969	-	-	-	513	-	837	-	2.10	-	
							-	558	-	791	2.10	-	
13		155	1192	-	-	-	328	-	837	-	2.90	-	
							-	409	-	791	2.80	-	
混 和 剤	13	155	1192	-	-	-	-	369	-	791	2.00 ^{*3} ~ 3.00 ^{*3}	-	
水 結 合 材 比	24	155	646	-	-	-	784	-	837	-	1.30	-	
	20		775	-	-	-	676	-			1.55	-	
	16		969	-	-	-	513	-			2.10	-	
	14		1107	-	-	-	400	-			2.60	-	
	13		1192	-	-	-	328	-			2.90	-	
	12		1292	-	-	-	245	-			3.50	-	

*1:a社製,*2:b社製,*3:A~E社製

状および強度性状に及ぼす影響について確認した。また、各種模擬柱試験体を作製して、構造体コンクリート強度についても確認した。

表 - 5 に使用材料を、表 - 6 に調合を示す。調合の目標スランプフローは、W/B20%を 65±7.5cm、W/B16~13%を 70±7.5cm とし、目標空気量はすべて 1.5±1.0%とした。粗骨材のかさ容積はすべて 0.51m³/m³とし、混和剤の固形分は単位水量によって補正した。また、W/B20,14%の一部において爆裂防止用の PP 繊維を用いた。

図 - 1 に、各試験体の形状を示す。試験体は、一つが断面寸法 1000×1000mm、高さ 1000mm (以下□1000 と略記) の実大模擬柱とし、もう一つが耐火実験の試験体との整合を確認するため、断面寸法 400×400mm、高さ 1000mm (以下□400 と略記) の縮小模擬柱とした。また、試験体の上下はそれぞれ発泡スチロールで断熱し、無筋とした。コア供試体は、図中に示す□1000 試験体では垂直方向に内部および端部、□400 試験体では端部で採取し、各 3 個の供試体を作製した。

表 - 7 に、打込みを行った試験体の実験時期と W/B の組合せを示す。実験は 3 シーズンで行い、夏期を 8 月、

標準期を 5 月、冬期を 12 月に実施した。

コンクリートの製造は、東京都中央区のレディーミクス トコンクリート工場で行った。コンクリートは二軸強制練りミキサ (公称容量 6.0m³) を用い、1 バッチの練混ぜ量は 2.0~4.0m³ とした。練混ぜは、モルタルの練上りをモニターで確認後、粗骨材を投入してコンクリートを練混ぜた。夏期・冬期は、工場内において練上がり後 60 分で試験体に打込み、標準期は、神奈川県厚木市 (輸送時間約 90~120 分) において打込みを行った。また、標準期の W/B20,14%において、試験体打込み終了後のアジテータ車に PP 繊維を投入 (3 回に分けて投入)・攪拌し、PP 繊維の分散性を測定した。

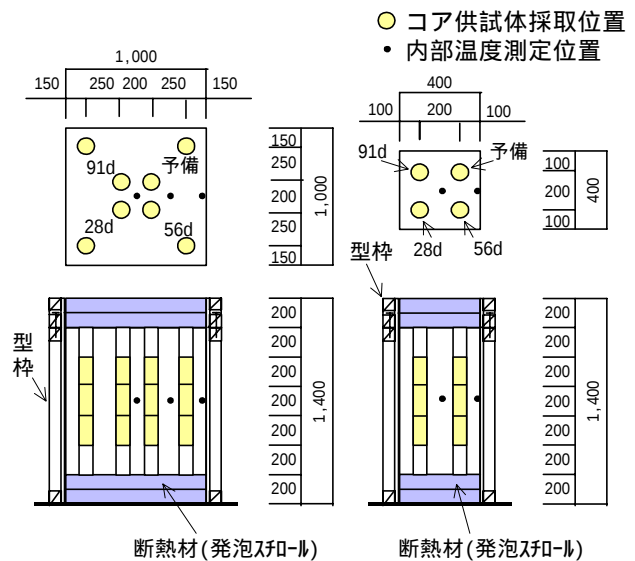


図 - 1 試験体形状

表 - 5 使用材料 (実機試験)

材料	特性・主成分
水(W)	上水道水
結合材(B)	シリカフェーム混入セメント: 密度3.08g/cm ³
細骨材(S)	岩瀬産砕砂(硬質砂岩): 表乾密度2.59g/cm ³
粗骨材(G)	岩瀬産砕石(硬質砂岩): 表乾密度2.65g/cm ³
混和剤(SP)	ポリカルボン酸系高性能減水剤(A社製)
合成繊維	PP繊維: 密度0.91g/cm ³ , 繊維径48μm, 繊維長10mm(a社製)

表 - 6 コンクリートの調合 (実機試験)

W/B (%)	単位量(kg/m ³)				SP使用量 (B×%)
	W	B	S	G	
20	155	775	704	824	1.4~1.7
16		969	541		1.75~2.5
14		1107	414		2.25~3.0
13		1192	369		2.4~3.2

表 - 7 試験体の組合せ

実験時期	試験体	
	□1000mm	□400mm
夏期	W/B=20, 16, 13%	W/B=20, 16, 14, 13%
標準期	W/B=20, 16, 14%	W/B=20, 14%
冬期	W/B=20, 16, 13%	-

2.2 室内試験練り結果（実験 1）

各調合のフレッシュコンクリート試験の結果は、全て目標値を満足した。

(1) PP 繊維混入の影響

図 - 2 に、PP 繊維の種類及び混入量の違いによる、繊維混入前後のスランプフローを示す。a 社製のほうが、b 社製よりも繊維混入によるスランプフローの低下量が少ない結果となった。PP 繊維混入量の影響に関しては、a 社製の場合、0.24vol%までは繊維混入によるスランプフローの低下量は少なかったが、0.36vol%まで混入すると非常に大きくなった。図 - 3 に、PP 繊維の種類及び混入量の違いによる、繊維混入前後の 50cm フロー時間を示す。a 社製の方が、b 社製よりも繊維混入によるフロー時間の変化量は同等もしくは少ない結果となった。また、フロー時間の絶対値では、繊維混入後のフロー時間が非常に長くなった。これは、スランプフロー値が小さくなったことにもよるが、繊維が絡んでいるためフローが遅くなっている影響が大きく、粘性が著しく高くなったようには見受けられなかった。図 - 4 に、PP 繊維の種類および混入量の違いによる、標準養生供試体の圧縮強度を示す。いずれの PP 繊維を使用しても、繊維混入による強度低下は小さく、材齢 91 日においても最大 5%程度であった。

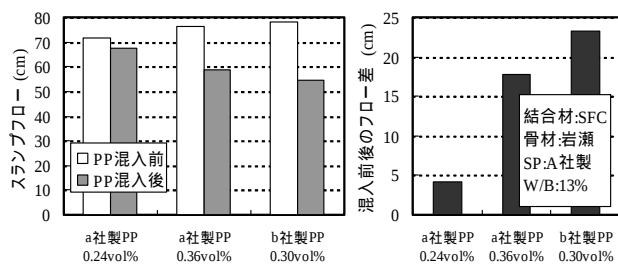


図 - 2 PP 繊維の違いによるスランプフロー

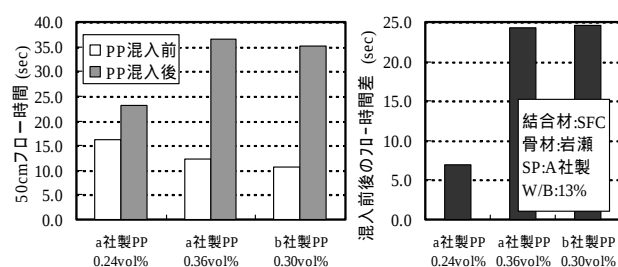


図 - 3 PP 繊維の違いによる 50cm フロー時間

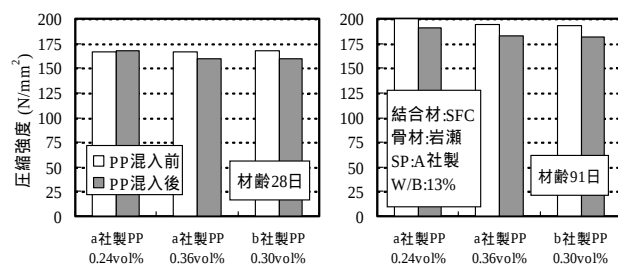


図 - 4 PP 繊維の違いによる
標準養生供試体の圧縮強度

(2) 結合材の影響

図 - 5 に、各種結合材を使用したコンクリートの混和剤使用量を示す。SFC を使用したコンクリート（以下 SFC コンと略記）と、LC に SF を別添加したものを使用したコンクリート（以下 LSF コンと略記）は、いずれの W/B においてもほぼ同量の使用量となったが、VKC を使用したコンクリート（以下 VKC コンと略記）は、より低 W/B になる程、使用量が増加する傾向がみられた。特に、W/B13%においては、SFC コンと LSF コンの 1.5 倍程度の使用量となった。図 - 6 に、各種結合材を使用したコンクリートの 50cm フロー時間を示す。50cm フロー時間はコンクリートの粘性と相関性があるとされており¹⁵⁾、50cm フロー時間が長い程、粘性が高いと評価できる。いずれの結合材を使用したコンクリートも、W/B16%まではフロー時間に大差はみられないが、LSF コンは W/B13%において非常に長いフロー時間を示しており、他の結合材を使用したコンクリートに比べて粘性が高いといえる。図 - 7 に、各種結合材を使用したコンクリートの、標準養生供試体の圧縮強度を示す。いずれの結合材を使用したコンクリートも、結合材水比（以下 B/W と略記）が高くなる程、強度は直線的に高くなる傾向がみられた。ただし、VKC コンは、SFC コンや LSF コンに比べてその傾向が顕著でない。また、強度の絶対値は SFC コンが高く、材齢 91 日の W/B13%（B/W7.69）では、LSF コンより 20N/mm² 程度、VKC コンより 35N/mm² 程度高い結果となった。

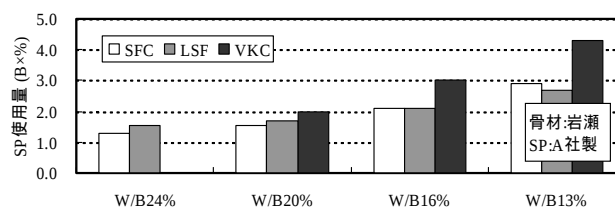


図 - 5 結合材の違いによる混和剤の使用量

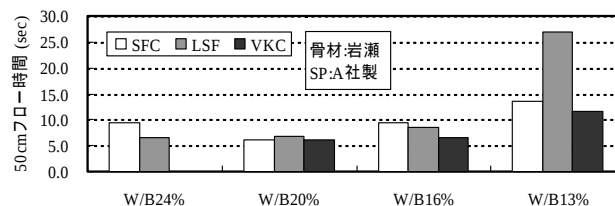


図 - 6 結合材の違いによる 50cm フロー時間

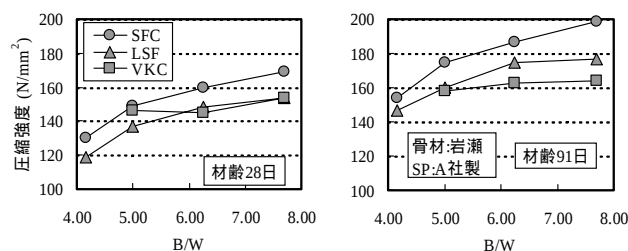


図 - 7 結合材の違いによる
標準養生供試体の圧縮強度

(3) 骨材の影響

図 - 8 に、岩瀬産硬質砂岩及び大月産安山岩の砕石・砕砂を使用したコンクリートの混和剤使用量を示す。どちらの骨材を使用しても、使用量に大差は認められなかった。図 - 9 に、両骨材を使用したコンクリートの 50cm フロー時間を示す。岩瀬産の骨材を使用したコンクリートの方がフロー時間は長く、大月産の骨材を使用したコンクリートよりも粘性が高かったと思われる。図 - 10 に、両骨材を使用したコンクリートの、標準養生供試体の圧縮強度を示す。いずれの骨材を使用したコンクリートも、B/W が高くなる程、強度は直線的に高くなる傾向がみられた。また、強度の絶対値でみると、材齢 28 日において大きな差はみられないが、材齢 91 日では岩瀬産の骨材を使用したコンクリートの方が高い強度結果が得られた。

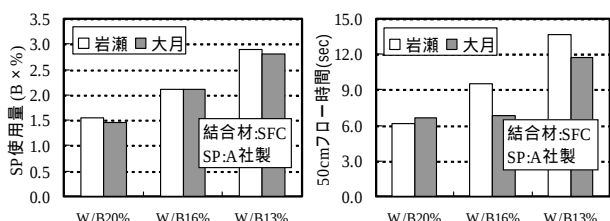


図 - 8 骨材の違いによる 混和剤の使用量

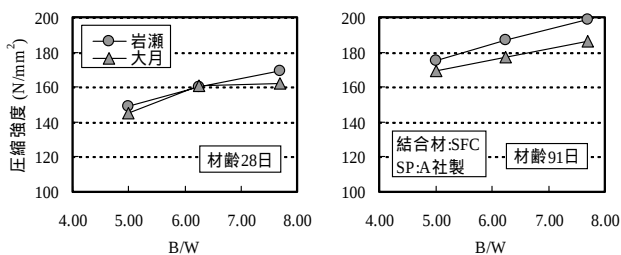


図 - 10 骨材種類と標準養生供試体の圧縮強度

(4) 混和剤の影響

表 - 8 に、混和剤種類を比較した場合の実験結果を示す。混和剤種類の違いにより使用量の差異が確認されたが、いずれも所要の品質のコンクリートを得ることができた。練り上がり時の性状では、スランブフローに大きな差はみられないが、粘性に若干の差が認められた。圧縮強度の発現は、初期材齢においては差があったものの 7 日以降での差は少ない。材齢 28 日における圧縮強度の 5 種類平均は 158N/mm²、標準偏差は 3.2N/mm²、変動係数は 2.0%であった。

表 - 8 実験結果(混和剤種類の比較)

SP 種類	SP 使用量 (B×%)	スランブ フロー (cm)	50cm フロー 時間(s)	空気 量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		
					1日	7日	28日
A	3.0	76.0	13.5	1.9	1.4	124	162
B	3.0	67.5	27.8	2.0	1.3	113	155
C	3.0	70.0	17.3	2.0	3.3	111	156
D	2.7	69.5	23.9	1.9	4.6	113	155
E	2.0	72.0	13.9	1.5	17	121	160

(5) 水結合材比とフレッシュコンクリート性状・強度性状の関係

図 - 11 に、W/B と混和剤使用量の関係を示す。W/B が低くなる程、使用量は直線的に増える傾向がみられた。図 - 12 に、W/B と 50cm フロー時間の関係を示す。W/B が低くなる程、フロー時間はほぼ直線的に長くなる傾向がみられ、同様にコンクリートの粘性も高くなっていると思われる。これは、目視観察の結果と一致する。図 - 13 に、B/W と標準養生供試体の圧縮強度を示す。B/W が高くなる程、W/B13% (B/W7.69) まで強度はほぼ直線的に高くなる傾向がみられたが、W/B13% (B/W7.69) を境に、W/B12% (B/W8.33) では逆に強度が低下した。この傾向は、材齢が進む程、顕著になっている。図 - 14 に、材齢と標準養生供試体の圧縮強度の関係を示す。材齢が進む程、強度は増進しているが、材齢 28-56 日及び 91-182 日の強度増進に関しては非常に緩慢であった。

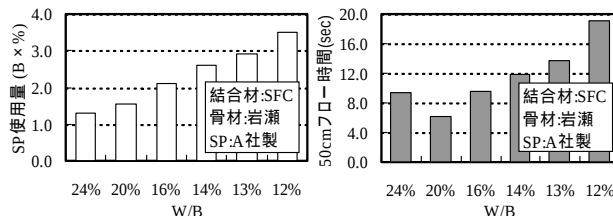


図 - 11 W/B と 混和剤の使用量

図 - 12 W/B と 50cm フロー時間

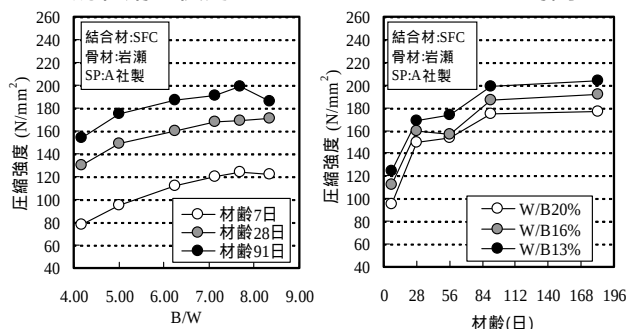


図 - 13 B/W と標準養生供 試体の圧縮強度

図 - 14 材齢と標準養生 供試体の圧縮強度

2.3 実機試験練り結果 (実験 2)

(1) コンクリートの製造

各調合のフレッシュコンクリート試験の結果は、概ね目標値を満足した。

図 - 15 に、PP 繊維混入前後のスランブフローの一例を示す。PP 繊維混入量に関しては、0.10vol%までは W/B が 20%, 14%のいずれもスランブフローの低下量は少なかったが、0.20vol%まで混入すると非常に大きくなった。図 - 16 に、PP 繊維混入前後の 50cm フロー時間の一例を示す。いずれも繊維混入後のフロー時間は長くなった。これは、室内試験と同様に、スランブフロー値が小さくなったことにもよるが、繊維が絡んでいるためフローが遅くなっている影響が大きく、粘性が著しく高くなったよ

うには見受けられなかった。

図 - 17 に、PP 繊維の混入率測定結果の一例を示す。PP 繊維の混入率は、トラックアジテータ車からコンクリートを採取し、水洗いならびにふるいにより採取した後、乾燥させて繊維量を測定し算出した。W/B20,14%とも、コンクリート排出開始時、中間時、排出終了時のいずれにおいても大差なく均一で、ほぼ計画値に等しかった。

図 - 18 に W/B と混和剤の使用量の関係を、図 - 19 に W/B と練混ぜ時間の関係を示す。混和剤の使用量ならびに練混ぜ時間は W/B が小さくなると増大し、特に混和剤の使用量はコンクリート温度の高い夏期において顕著だった。また、練混ぜ時間は、温度の低い冬期ほど長く、特にモルタルの練混ぜ時間が増大した。

(2) 構造体コンクリート強度

図 - 20 に、PP 繊維混入前後の□400 試験体のコア強度の一例を示す。繊維混入による強度低下は、材齢 28 日および 91 日ともに認められなかった。

図 - 21 に、標準養生供試体の B/W と圧縮強度の関係を示す。材齢 28 日強度ならびに 91 日強度とも、B/W が高くなるほど、標準養生供試体の圧縮強度は増大する傾向があり、冬期の 91 日強度は他の季節に比べて強度増進が大きかった。この強度結果からも、W/B13%までは実機

パッチャープラントでの製造が十分可能と考えられる。

図 - 22 に、□1000 試験体と□400 試験体のコア強度の関係（材齢 91 日）を示す。本実験では、断面寸法にかかわらずコア強度は同程度であった。なお、□400 試験体の中心部の最高温度は□1000 試験体の表層部の温度に近かった。

図 - 23 に、91 日コア強度と強度補正值（以下 S 値と略記）の関係を示す。今回の実験結果では、全体の傾向として、コア強度が増大するほど S 値が小さくなる傾向があり、季節の違いがみられなかった。また、S 値_(28S₉₁)は最大で 5N/mm²を超えるものはなかった。

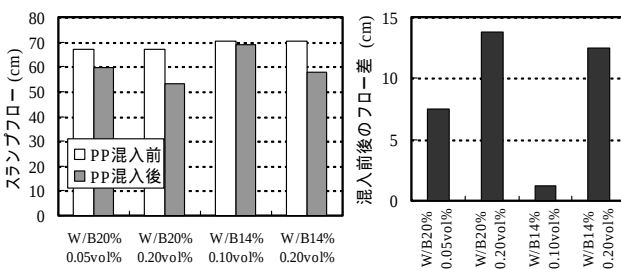


図 - 15 PP 繊維混入前後のスランプフロー

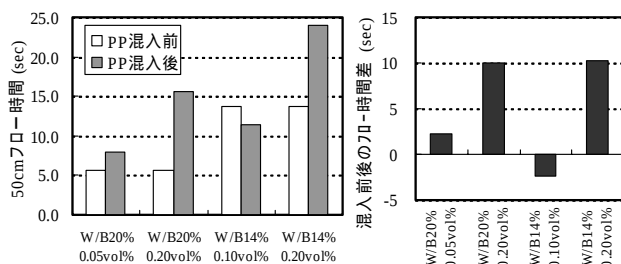


図 - 16 PP 繊維混入前後の 50cm フロー時間

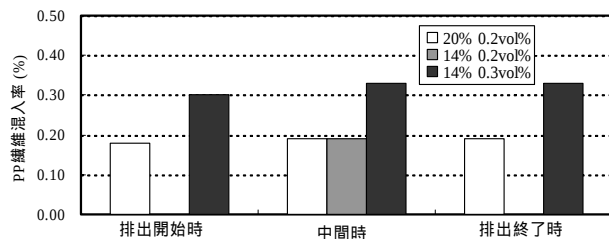


図 - 17 PP 繊維の混入率

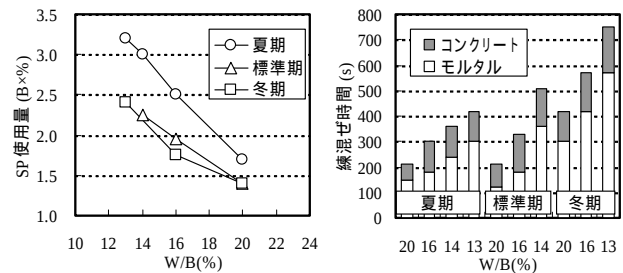


図 - 18 W/B と
混和剤使用量の関係

図 - 19 W/B と
練混ぜ時間の関係

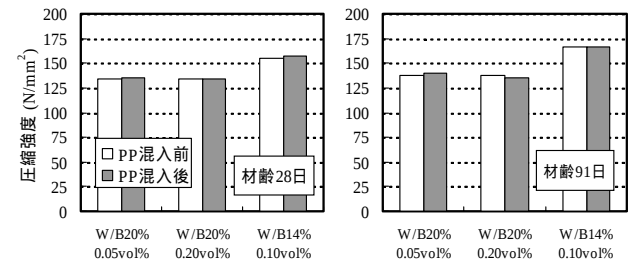


図 - 20 PP 繊維混入前後の□400 試験体のコア強度

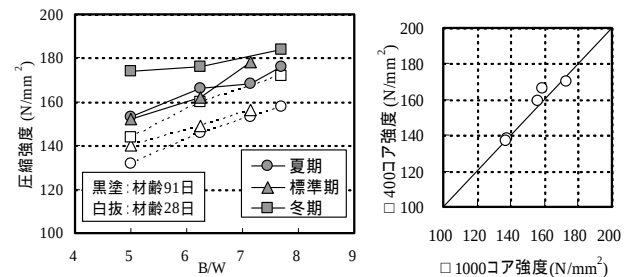


図 - 21 標準養生供試体の B/W と圧縮強度の関係

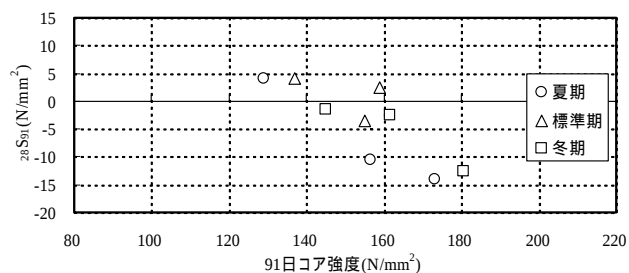


図 - 23 91 日コア供試体強度と S 値_(28S₉₁)の関係

2.4 製造技術のまとめ

PP 繊維を混入した超高強度コンクリートの製造技術に関する室内試験および実機試験により，以下のことが明らかとなった．

- 1) PP 繊維を混入したフレッシュコンクリートの性状は，W/B が低く，PP 繊維混入率が大きくなるほど，スランプフローは低下する傾向にあるが，施工性が著しく低下するものではなかった．
- 2) 標準養生供試体強度および模擬柱試験体コア強度では，PP 繊維の混入による強度低下はほとんど認められなかった．
- 3) PP 繊維はトラックアジテータ車の攪拌により，ドラム内でほぼ均一に分散した．

また，PP 繊維を混入していないブレンの超高強度コンクリートに関しては，以下の知見が得られた．

- 1) 混和剤の使用量および練り混ぜ時間は W/B が小さくなるほど増大し，練り混ぜ時間は温度の低い冬期ほど長くなった．
- 2) 標準養生供試体の圧縮強度は，W/B13%まで B/W が高くなるほど，増大する傾向がある．
- 3) 模擬柱試験体のコア強度は，試験体断面寸法にかかわらず，同程度であった．
- 4) S 値は，コア強度が増大するほど，小さくなる傾向がある．

3. 超高強度 RC 柱の耐火対策技術

3.1 実験概要

(1) 実験条件

表 - 9～12 に，各実験の実験条件をそれぞれ示す．試験体は，RC 柱を模擬した実験 3，5，6 で，それぞれ 4，15，2 体であり，供試体は実験 4 で 42 体とした．実験要因は，コンクリート強度，爆裂対策および軸力比（軸力比は実験 3，5 のみ）とした．コンクリートは $F_c=80\sim150\text{N/mm}^2$ を対象とした．

実験 3 では爆裂対策として，耐火塗料，耐火シート，せっこうボード，繊維混入けい酸カルシウム板（以下ケイカル板と略記），セルローズ繊維混入モルタル（以下セルローズと略記），セラミック系硬質耐火被覆（以下セラミックと略記），モルタルに対して 2 種類ずつの仕様（主に厚さ）を用い，加熱時の爆裂防止および部材温度の上昇を抑制する効果の確認を行った．

実験 4 では，PP 繊維の長さを 10，20mm の 2 水準，混入率を 0.00，0.10，0.20 および 0.30vol% の 4 水準とし，直径 150mm×長さ 300mm の供試体の加熱実験により，PP 繊維の爆裂抑制効果の確認を行った．

実験 5 では，無対策試験体の軸力保持性能の確認と，爆裂対策としてケイカル板やセラミックの被覆工法，PP 繊維混入工法，鋼板巻き工法の軸力保持性能の確認を行った．

表 - 9 実験条件(実験3:実大規模載荷加熱実験)

試験体名	調合名	施工位置		爆裂対策呼称 (mm:厚さ)	載荷軸力 (kN)	推定軸力比
		高さ方向	断面方向			
A	K20-1	上	東北面	耐火塗料3mm	5625	0.10
			西南面	耐火塗料1mm		
		下	4面	無対策		
B	K20-2	上	東北面	耐火シート3mm	5807	
			西南面	耐火シート1.5mm		
		下	東北面	せっこうボード2枚張		
			西南面	せっこうボード1枚張		
C	K20-3	上	東北面	ケイカル板LGS25mm	5924	
			西南面	ケイカル板直張25mm		
		下	東北面	セルローズ20mm		
			西南面	セルローズ15mm		
D	K20-4	上	東北面	セラミック20mm	5983	
			西南面	セラミック10mm		
		下	東北面	モルタル25mm		
			西南面	モルタル20mm		

表 - 10 実験条件(実験4:供試体加熱実験)

供試体名 (調合名)	供試体寸法 (mm)	対象 F_c (N/mm^2)	W/B (%)	繊維径 (μm)	繊維長さ (mm)	PP繊維混入率 (vol%)
23N0000	$\phi 150 \times 300$	120	23	48	10	0.00
23P1010						0.10
23P1020						0.20
23P1030						0.30
23P2010				20	20	0.10
23P2020						0.20
23P2030						0.30
14N0000		150	14	48	10	0.00
14P1010						0.10
14P1020						0.20
14P1030						0.30
14P2010				20	20	0.10
14P2020						0.20
14P2030						0.30

表 - 11 実験条件(実験5:縮小柱載荷加熱実験)

試験体名	調合名	対象 Fc (N/mm ²)	爆裂対策 (t:厚さ,L:長さmm)	載荷軸力 (kN)	推定軸力比
C08N30	S35	80	なし	3710	0.30
C08N44				5443	0.44
C11N30	S24	80		5443	0.30
C11N35		100		6104	0.35
C13N27	S18	100			5443
C13CA25			ケイカル板直張(t25)	6072	0.30
C13CE20			セラミック(t20)		
C15P00	S20-1	120	なし	6400	0.27
C15P05	S20-2		PP繊維0.05vol%(L10)		0.27
C15P10	S20-3		PP繊維0.10vol%(L10)		0.27
C15P20	S20-4		PP繊維0.20vol%(L10)		0.27
C17S00	S14-1	150	鋼板巻き	8000	0.28
C17P10	S14-2		PP繊維0.10vol%(L20)		0.29
C17P20	S14-3		PP繊維0.20vol%(L20)		0.29
C17P30	S14-4			9067	0.34

表 - 12 実験条件(実験6:実大加熱実験)

試験体名	調合名	対象 F_c (N/mm^2)	PP繊維		
			長さ (mm)	径 (μm)	混入率 (vol%)
RC12P10	S20-3	120	10	48	0.10
RC15P20	S14-3	150	20		0.20

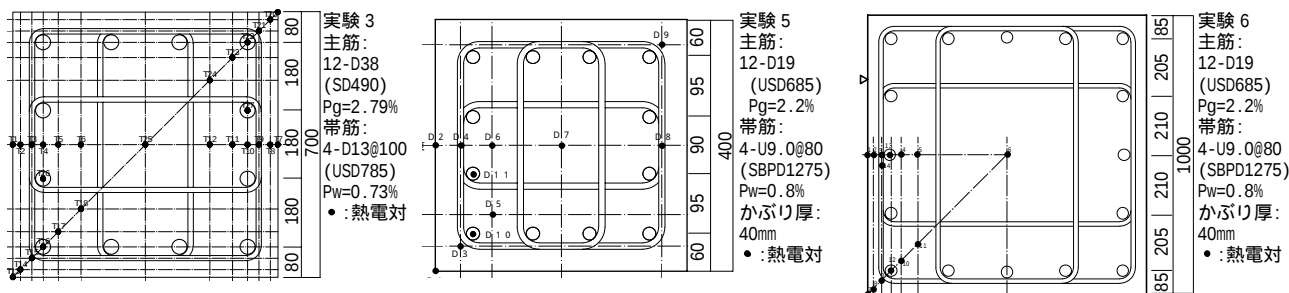


図 - 24 試験体断面および熱電対配置位置

実験 6 では、爆裂対策として PP 繊維を混入した実大試験体を作製し、縮小試験体との爆裂性状の比較検討を行った。

(2) 試験体

図 - 24 に、各実験の試験体断面および熱電対配置位置を示す。試験体断面は、実験 3 が 700×700mm、実験 5 が 400×400mm、実験 6 が 1000×1000mm とした。

実験 3 では試験体を上下かつ対角方向に 4 分割し、1 つの試験体に対して図 - 25 に示す方法で 4 種類の爆裂対策を施した。試験体の全長は 4300mm とし、上下それぞれの加熱区間は 1300mm とした。実験 5 では、加熱区間を 2000mm とし、主筋および帯筋は実状の建築物に合わせて配筋した。実験 6 では、試験体の全長を 1500mm とし、加熱区間は 1100mm とした。

表 - 13 に使用材料を、表 - 14, 15 に各実験の調合を示す。載荷軸力を設定するための試験体強度は、耐火試験体と同断面の模擬試験体を耐火試験体と同時に作製し、その模擬試験体からコア抜きした供試体の圧縮強度の平

	試験体A	試験体B	試験体C	試験体D	
断熱材	耐火塗料	耐火シート	ケイカル板	セラミック	700
	耐火塗料	耐火シート	ケイカル板	セラミック	1300
	耐火塗料	耐火シート	ケイカル板	セラミック	300
	耐火塗料	耐火シート	ケイカル板	セラミック	1300
	無対策	せっこうボード	セルローズ	モルタル	700

図 - 25 爆裂対策の施工位置 (実験 3)

表 - 13 使用材料(耐火試験)

材料	特性・主成分
水(W)	上水道水
結合材(B)	低熱ポルトランドセメント(LC):密度3.22g/cm ³ シリカフューム混入セメント(SFC):密度3.08g/cm ³ 粉体シリカフューム(SF):密度2.20g/cm ³
細骨材(S)	岩瀬産砕砂(S1):表乾密度2.58g/cm ³ 市原産山砂(S3):表乾密度2.57g/cm ³ 相模川水系陸砂(S4):表乾密度2.60g/cm ³
粗骨材(G)	岩瀬産砕石(G1):表乾密度2.65g/cm ³ 青梅産砕石(G3):表乾密度2.65g/cm ³
混和剤(SP)	高性能減水剤(ポリカルボン酸系)
合成繊維	PP繊維:密度0.91g/cm ³ , 繊維径48μm, 繊維長10mm

均値とした。

(3) 実験方法

加熱は、ISO 834 の標準加熱温度曲線に従い、実験 3 は 3 時間、実験 4 は 90 分、実験 5 と 6 は 4 時間 (C13CA25, C13CE20 は 3 時間) とし、その後は、自然冷却による温度曲線で実験を継続した。実験 3, 5 は、試験体の支持条

表 - 14 コンクリートの調合(実験3, 5, 6)

調合名	W/B (%)	単位量(kg/m ³)									SP 使用 量 (B× %)	試験体 強度 推定値 (N/ mm ²)
		W	B			S			G			
			SFC	LC	SF	S1	S3	S4	G1	G3		
K20-1	20	160	-	720	80	-	186	437	-	848	2.10	115
K20-2												119
K20-3												121
K20-4												122
S18	18	160	-	800	89	-	164	385	-	848	1.50	127
S24	24	160	-	600	67	-	218	517	-	848	1.80	113
S35	35	165	-	424	47	-	265	621	-	848	1.40	77
S20-1	20	155	775	-	-	676	-	-	837	-	1.40	148
S20-2											1.40	148
S20-3											1.45	148
S20-4											1.45	147
S14-1	14	155	1107	-	-	400	-	-	837	-	2.25	178
S14-2											2.30	174
S14-3											2.30	170
S14-4											2.30	165

表 - 15 コンクリートの調合(実験4)

調合名	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				SP 使用量 (B×%)	繊維 長さ (mm)	PP 繊維 混入率 (vol%)	供試体 強度 (N/mm ²)
		W	C	S	G				
			SFC	S1	G1				
23N0000	23	155	674	761	837	1.65	-	0.00	135
23P1010						1.70	10	0.10	136
23P1020						1.75		0.20	133
23P1030						1.85		0.30	129
23P2010							20	0.10	134
23P2020								0.20	129
23P2030								0.30	129
14N0000	14	155	1107	400	837	1.70	-	0.00	187
14P1010							10	0.10	192
14P1020								0.20	188
14P1030								0.30	179
14P2010						20	0.10	179	
14P2020							0.20	178	
14P2030							0.30	177	

件を柱脚固定・柱頭ピンとし、軸力は加熱開始 15 分前に
 載荷し、実験終了まで保持した。実験の終了は、軸力を
 保持できなくなる時点、あるいは加熱終了から加熱時間
 の 3 倍を経過した時点とした。

3.2 実大規模載荷加熱実験の結果（実験 3）

(1) 実験経過および爆裂状況

写真 - 1 に、加熱終了後の試験体の状況を示す。無対策
 の試験体は、加熱開始より 10 分経過した頃から爆裂がは
 じまり、同 40 分頃まで継続した。加熱終了後の試験体状

況は、全体的に帯筋が一部露出する程度の爆裂で、特に
 柱幅中央での爆裂が顕著であった。爆裂対策を施した試
 験体は、被覆材が加熱の影響により剥落あるいは脱落し
 て柱に爆裂が生じたものと被覆材が脱落せず柱に爆裂が
 生じなかったものに分類できる。前者は、耐火塗料が 30
 分弱、セルローズ（15mm）、セラミック（10mm）が 60
 分頃、せっこうボードと耐火シートが 120 分過ぎに被覆
 材が脱落し、爆裂が生じた。爆裂は柱幅中央が激しく、
 帯筋が露出した。後者は、ケイカル板、セルローズ
 （20mm）、セラミック（20mm）、モルタルが該当する。

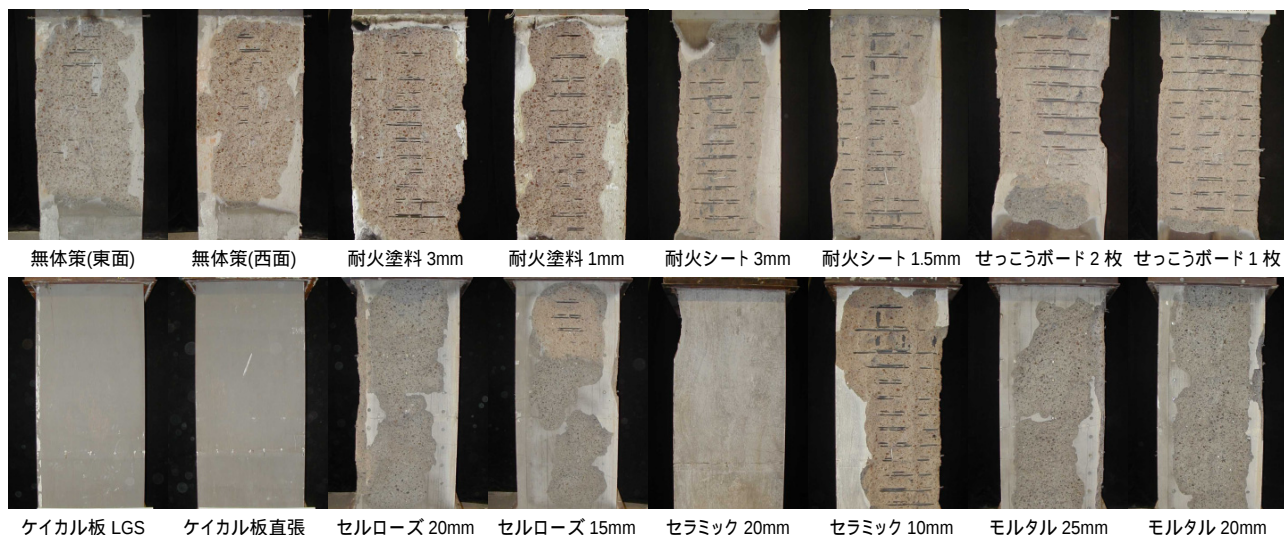


写真 - 1 加熱終了後の試験体状況（実験 3）

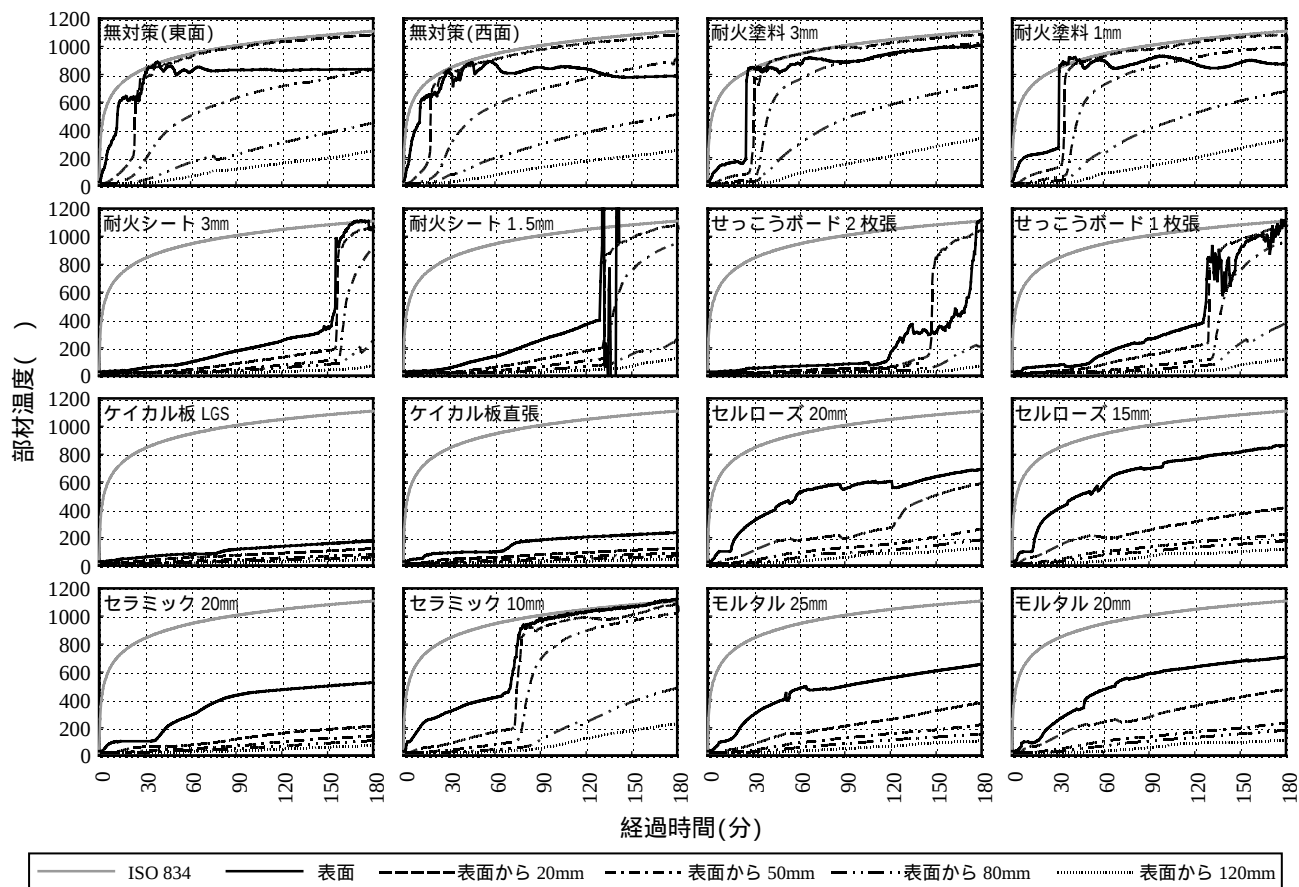


図 - 26 各試験体の内部温度履歴（実験 3）

モルタルは加熱後、柱幅中央部において熱劣化と思われるコンクリートの剥落がみられた。

(2) 試験体の内部温度履歴

図 - 26 に、各試験体の代表的な位置における内部温度履歴を示す。爆裂を生じた試験体は、爆裂とともに部材温度が急激に上昇し、爆裂開始から 30 分以内に鉄筋の温度が 350 を超えた。一方、爆裂が生じなかった試験体は、鉄筋の温度が 350 を超えなかった。したがって、被覆材が脱落しなければ、部材温度を抑制できることがわかる。また、早期に爆裂を生じた無対策と耐火塗料を除き、表面から 120mm 以上の部分はほぼ 200 以下であり、試験体内部はほとんど熱影響を受けていないと考えられる。

3.3 供試体加熱実験の結果（実験 4）

(1) 加熱後の状況

写真 - 2 に、加熱終了後の供試体状況の一例を示す。W/B14%では、混入率 0.1vol%の場合、繊維長さ 20mm の方が 10mm よりも爆裂抑制効果の高いことが確認できた。一方、W/B23%では、PP 繊維を 0.1vol%混入することにより爆裂を防止することができた。

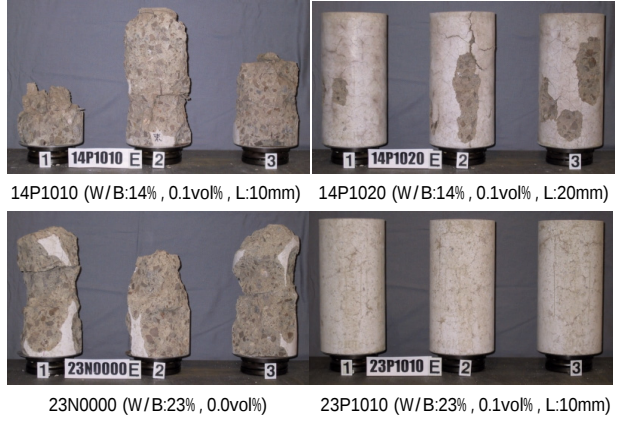


写真 - 2 加熱終了後の供試体状況（実験 4）

(2) 爆裂面積および深さ測定結果

表 - 16 に、爆裂面積率と最大爆裂深さの測定結果を示す。ここで、爆裂が供試体断面の全体に達する場合は、(全)と表示した。なお、爆裂面積率は加熱前後の供試体の表面積の比率によって求めた。図 - 27 に W/B14%の供試体における繊維混入率と爆裂面積率の関係を、図 - 28 に W/B14%の供試体における繊維混入率と最大爆裂深さの関係を示す。繊維無混入および繊維の長さ 10mm・混入率 0.1vol%の場合、崩壊または大破したため、直接的には比較できないが、繊維混入率が高くなるほど、また繊維長さが長くなるほど、爆裂面積率および最大爆裂深さは小さくなる傾向がみられ、混入率 0.3vol%では爆裂面積率がほぼ 0%になった。同じ混入率において繊維長さの影響を比較をすると、爆裂面積率の場合は混入率 0.2vol%以下に

おいて差がみられた。また、最大爆裂深さは、混入率 0.1vol%において大差となったものの、0.2vol%以上ではほとんど差が認められなかった。

表 - 16 爆裂面積率と最大爆裂深さ

供試体名 (調合名)	対象 Fc (N/mm ²)	纖維 長さ (mm)	PP纖維 混入率 (vol%)	爆裂面積率 (%)		最大爆裂深さ (mm)	
23N0000	120	-	0.00	100	100	(全)	-
23P1010		10	0.10	0	0	0	0
23P1020			0.20	0	0	0	0
23P1030			0.30	0	0	0	0
23P2010		20	0.10	0	0	0	0
23P2020			0.20	0	0	0	0
23P2030			0.30	0	0	0	0
14N0000		150	-	0.00	100	100	(全)
14P1010	10		0.10	95.1	88.6	(全)	-
				77.3		(全)	
				93.5		(全)	
14P1020			0.20	7.4	14.9	10.5	10.9
				19.6		10.0	
				17.7		12.1	
14P1030	0.30		2.0	1.3	12.3	6.6	
			0.8		4.5		
			1.1		3.1		
14P2010	20		0.10	58.8	55.5	37.8	71.9
				59.6		88.7	
				48.2		89.3	
14P2020			0.20	6.1	5.2	8.3	15.5
				4.4		28.2	
				5.2		10.1	
14P2030	0.30		0	0	0	0	

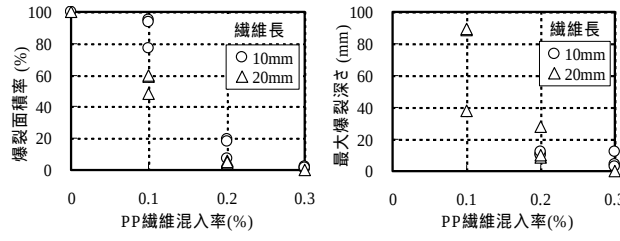


図 - 27 PP 繊維混入率と爆裂面積率の関係

3.4 縮小柱載荷加熱実験の結果（実験 5）

(1) 実験経過

写真 - 3 に加熱終了後の試験体の状況を、表 - 17 に実験結果を示す。

爆裂を生じた試験体は 8 体で、C08N44 を除いては、いずれも加熱開始 10 分前後から爆裂が始まった。爆裂は、加熱開始 30 分前後まで継続し、その後の爆裂はみられなかった。それ以外の試験体は、加熱開始から終了まで爆裂は生じず、熱膨張により主筋に沿ったひび割れがみられる程度であった。

なお、爆裂対策として PP 繊維を混入した試験体では、爆裂が生じた試験体中、PP 繊維を 0.05vol% 混入した C15P05 は加熱中に帯筋が露出したが、PP 繊維を 0.1vol%



写真 - 3 加熱終了後の試験体状況（実験 5）

以上混入した C15P10, C17P10, C17P30 は、加熱中に帯筋が露出しなかった。これより、PP 繊維を 0.10vol%以上混入すると、爆裂を抑制することができると考えられる。

(2) 耐火性能

コンクリートの実強度が 120N/mm^2 を超え、爆裂対策を施していない C13N27 および C15P00 試験体は、加熱中（3 時間前後）に軸力を保持できなくなった。それ以外の試験体は、4 時間の加熱中、軸力を保持していたが、爆裂を生じた C15P05, C15P10, C17P10, および軸力比が 0.3 を超える C08N44, C11N35, C17P30 は、冷却中に軸力を保持できなくなった。以上より、超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性能に関しては、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ 以下では、爆裂対策を施さなくても概ね 3 時間の耐火性能を保有し、 $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級では PP 繊維を 0.05vol%以上混入することで、 $F_c=150\text{N/mm}^2$ 級では鋼板巻きとすることまたは PP 繊維を 0.10vol%以上混入することで 4 時間以

表 - 17 実験結果(実験5)

試験体名	対象 Fc	試験 体 強度 (N/mm^2)	爆裂対策 (t:厚さ,L:長さmm)	載荷 軸力 (kN)	推定 軸力 比	爆裂 開始 時間 (分)	終了 時間 (分)
C08N30	80	77	なし	3710	0.30	-	-
C08N44				5443	0.44	35	281
C11N30	80	113		5443	0.30	14	-
C11N35	100	113		6104	0.35	13	288
C13N27				5443	0.27	9	206
C13CA25	100	127	ケイカル板直張(t25)	6072	0.30	-	-
C13CE20			セラミック(t20)			-	-
C15P00		148	なし	6400	0.27	7	177
C15P05	120	148	PP繊維0.05vol%(L10)		0.27	7	241
C15P10		148	PP繊維0.10vol%(L10)		0.27	8	270
C15P20		147	PP繊維0.20vol%(L10)		0.27	-	-
C17S00		178	鋼板巻き	8000	0.28	-	-
C17P10	150	174	PP繊維0.10vol%(L20)		0.29	7	305
C17P20		170	PP繊維0.20vol%(L20)		0.29	-	-
C17P30		165	PP繊維0.30vol%(L20)	9067	0.34	-	309

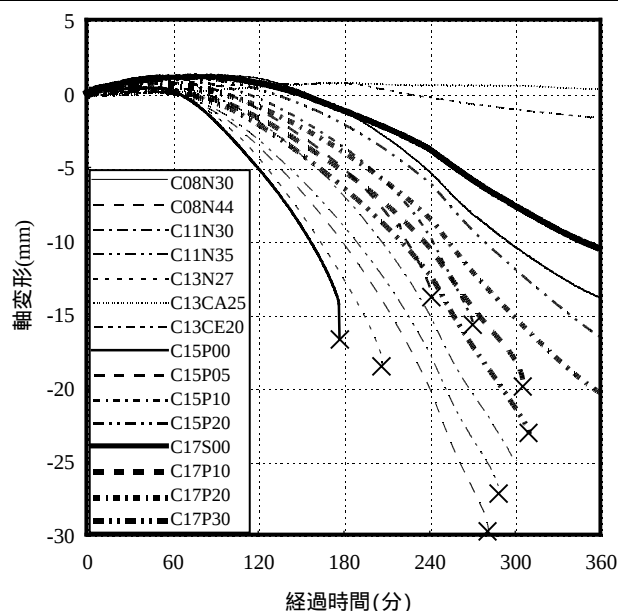


図 - 29 各試験体の軸変形の推移（実験 5）

上の耐火性能を有すると考えられる。

(3) 軸変形

図 - 29 に、各試験体の軸変形の推移を示す。図中の×印は、加熱中あるいは 4 時間の加熱を終了した後、軸力のみを継続載荷した状態で軸力を保持できなくなった時点を示している。いずれの試験体とも加熱開始とともに熱膨張し、被覆材を施した C13CA25, C13CE20 を除いては、60～120 分頃に伸び変形から反転して収縮変形となった。実験終了後の試験体の最終軸変形は、15.7mm～29.8mm であった。一方、加熱終了後 12 時間経過時まで軸力を保持した試験体の、軸変形の最大値は 29.8mm であり、軸力保持性能は軸変形のみでは決まらないと考えられる。

被覆材を施した C13CA25, C13CE20 は, 加熱終了(3 時間)まで伸び変形を示し, 冷却とともに収縮を始めた。これは, 被覆材により部材の温度上昇が著しく抑えられたためと考えられる。また, 鋼板巻き(C17S00)は, 他の試験体と比較して軸変形の推移が緩慢であった。これは, 鋼板により, 横方向(断面方向)への膨張が拘束されたためと考えられる。

3.5 実大加熱実験の結果(実験 6)

(1) 実験経過

写真 - 4 に, 加熱終了後の試験体状況を示す。

RC12P10 は, 加熱開始 6 分頃から爆裂を生じ, 25 分頃

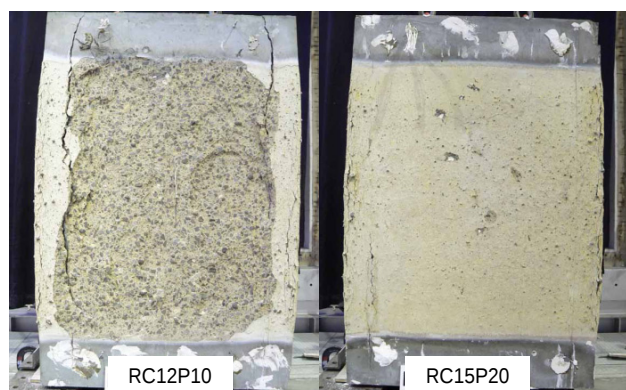


写真 - 4 加熱終了後の試験体状況(実験 6)

まで爆裂が継続した。コンクリートの爆裂は, 柱幅中央部付近に発生し, 隅角部には生じなかった。なお爆裂の程度は帯筋が露出するほどではなかった。また, RC15P20 では加熱開始から加熱終了まで爆裂は確認されなかった。

(2) 爆裂深さ

図 - 30 に, 爆裂深さの測定結果(断面欠損の高さ方向の分布と中央平断面図)を示す。RC12P10 における爆裂

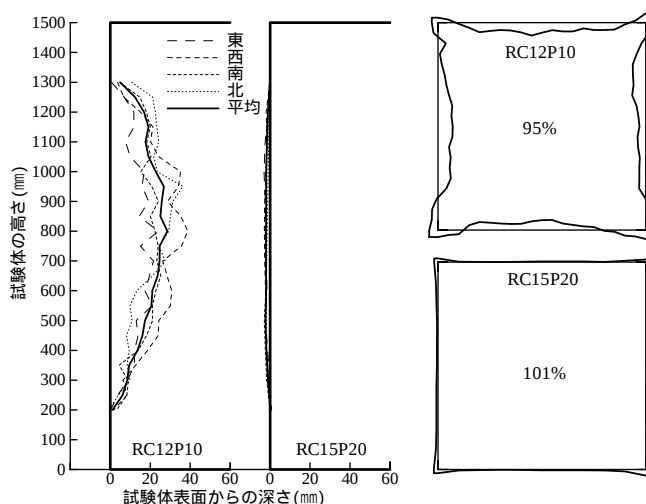


図 - 30 爆裂深さの測定結果(実験 6)

表 - 18 爆裂性状の比較

Fc=120N/mm ² , PP繊維 φ=48mm, L=10mm						
0.0vol%		0.1vol%		0.2vol%		
実験4	実験5	実験4	実験5	実験6	実験4	実験5
爆裂あり	爆裂あり	爆裂なし	爆裂あり	爆裂あり	爆裂なし	爆裂なし
Fc=150N/mm ² , PP繊維 φ=48mm, L=20mm						
0.1vol%		0.2vol%		0.3vol%		
実験4	実験5	実験4	実験5	実験6	実験4	実験5
爆裂あり	爆裂あり	軽微な爆裂	爆裂なし	爆裂なし	爆裂なし	爆裂なし

深さの平均の最大値は 24.4mm で、実験時の目視観察と同様に帯筋まで達していなかった。また、爆裂による断面欠損率は 5%程度であった。

(3) 爆裂性状の比較

表 - 18 に、実験 4～6 において同様のコンクリートを用いた試験体の爆裂性状の比較を示す。

$F_c=120\text{N/mm}^2$ のコンクリートを対象とした実験において、PP 繊維混入率が 0.0vol%と 0.2vol%の場合は供試体加熱実験（実験 4）と縮小柱載荷加熱実験（実験 5）の爆裂性状がほぼ一致した。しかし、PP 繊維混入率が 0.1vol%の場合は供試体加熱実験（実験 4）では爆裂せず、縮小柱載荷加熱実験（実験 5）と実大加熱実験（実験 6）では爆裂し、爆裂性状が異なった。

$F_c=150\text{N/mm}^2$ のコンクリートを対象とした実験において、PP 繊維混入率が 0.1vol%と 0.3vol%の場合は供試体加熱実験（実験 4）と縮小柱載荷加熱実験（実験 5）の爆裂性状がほぼ一致した。しかし、PP 繊維混入率が 0.2vol%の場合は供試体加熱実験（実験 4）ではわずかに爆裂し、縮小柱載荷加熱実験（実験 5）と実大加熱実験（実験 6）では爆裂せず、爆裂性状が若干異なった。

以上の結果から、供試体を用いた加熱実験では爆裂発生を精度良く判定できないものの、大まかに判定できるものと考えられる。また、縮小試験体を用いた載荷加熱実験は実大試験体を用いた加熱実験と爆裂性状が一致していることから、爆裂する柱の耐火性能を適切に評価できると考えられる。

3.6 耐火対策技術のまとめ

各種耐火対策を施した超高強度 RC 柱の耐火性能確認実験の結果から、以下のことが明らかとなった。

- 1) コンクリートの F_c が 100N/mm^2 以下の場合、無対策でも 3 時間耐火（軸力保持性能）を確保できる。
- 2) 爆裂対策として被覆材を用いる場合、被覆材の脱落を抑えることができれば、爆裂防止および部材温度上昇の抑制に対して非常に有効である。
- 3) コンクリートの F_c が 100N/mm^2 を超える場合、 $F_c120\text{N/mm}^2$ では 0.05vol% 以上、 $F_c150\text{N/mm}^2$ では 0.10vol%以上の PP 繊維を混入することにより、4 時間以上の軸力保持性能を確保できる。
- 4) コンクリートの F_c が 150N/mm^2 以下の場合、PP 繊維を 0.10vol%以上混入すると、爆裂が生じた場合でも加熱中に帯筋が露出することはなく、爆裂を抑制することができ、0.20vol%以上混入すると、爆裂を防止することができる。
- 5) 縮小試験体は、実大加熱試験体とほぼ爆裂性状が一致しており、縮小試験体を用いた耐火実験で鉄筋コンクリート柱の耐火性能を概ね評価できる。

本実験の結果より、超高強度 RC 柱の耐火対策は、 F_c

表 - 19 超高強度RC柱の耐火対策

要求される柱の耐火性能	設計基準強度(F_c)		
	$F_c=100$ N/mm^2 以下	$F_c=120$ N/mm^2 以下	$F_c=150$ N/mm^2 以下
3時間耐火を有する (軸力保持性能)	無対策	PP繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=10\text{mm}$ 以上 0.05vol%以上	PP繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下
爆裂を抑制する (かぶりコンクリートのみ)		PP繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=10\text{mm}$ 以上 0.10vol%以上	$L=20\text{mm}$ 以上 0.10vol%以上
爆裂を防止する		PP繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=10\text{mm}$ 以上 0.20vol%以上	PP繊維混入工法 $\phi=48\mu\text{m}$ 以下 $L=20\text{mm}$ 以上 0.20vol%以上
コンクリートへの受熱温度を抑制する		鋼板巻き工法 耐火被覆工法 (ケイカル板、セルローズ、セラミック、モルタル)	

■ 部は火災後の補修軽減工法

と要求される耐火性能に応じて、表 - 19 に示す通りに分類することができる。

4. まとめ

超高強度材料を用いた RC 柱の耐火対策技術に関する研究の結果、 $F_c=100 \sim 150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを用いた RC 柱において 3 時間以上の耐火性能（軸力保持性能）を有する工法および火災後の補修を軽減することができる耐火工法を開発することができた。

謝辞

本研究において、千葉大学 齋藤光名誉教授、千葉大学大学院自然科学研究科 上杉英樹教授、財団法人日本建築総合試験所 吉田正友博士、千葉大学工学部デザイン工学科建築系 平島岳夫博士には貴重なご意見をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

なお、本研究は、前田建設工業と、熊谷組、佐藤工業、戸田建設、西松建設、ハザマ、フジタの共同研究成果の一部である。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連各社に謝意を表します。

注

注 1) 本報告における「軸力保持性能」とは、建築基準法施行令第 108 条の 3 に規定される「火災による火熱が加えられた場合に、構造耐力上支障のある変形、溶融、破壊その他の損傷を生じないものであること」（いわゆる「非損傷性」）を意味する。

参考文献

- 1) 黒岩秀介，河合邦彦，小田切智明，嵐山正樹：
 $F_c130\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた超高層集

- 合住宅の施工，コンクリート工学，Vol.42，No.10，pp.44-49，2004.10
- 2) 谷田貝健，西垣太郎，黒羽健嗣，水野敬三，黒岩秀介，道越真太郎，齋藤光，上杉英樹，中村賢一：高強度($F_c=1000\text{kgf/cm}^2$)RC 柱の耐火性能に関する研究(その 2: 載荷加熱実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，A-2，pp.75-76，1995.8
- 3) 茂木武，遊佐秀逸，臼井信行，近藤英之，阿部道彦，鹿毛忠継，福山洋：鉄筋コンクリート柱の耐火実験，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，A-2，pp.85-86，2000.9
- 4) 辻大二郎，三井健郎，米澤敏男，藤中英生，古平章夫：合成繊維を混入した $F_c150\text{N/mm}^2$ 超高強度コンクリート RC 柱の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，A-1，pp.999-1000，2003.9
- 5) 森田武，西田朗，橋田浩，山崎康行：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，No.544，pp.171-178，2001.6
- 6) 原田有：高熱を受けたコンクリートの強度と弾性的変化，日本建築学会論文報告集，No.56，pp.1-7，1957.6
- 7) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温時における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.515，pp.163-168，1999.1
- 8) 西田浩和，横須賀誠一，松戸正士，片寄哲務：超高強度コンクリートの構造体強度と高温加熱後の力学的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.393-398，2004.7
- 9) 宮本圭一，安部武雄：超高強度コンクリートの高温加熱後の力学的性質，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，A-2，pp.53-54，2005.9
- 10) 西田浩和，梶田秀幸，梅本宗宏，佐藤孝一，濱田真，野中英，大内一之，菊田繁美，西山直洋，高橋孝二，小林利充，山田人司，増田隆行，松戸正士，片寄哲務，中込昭，吉野茂： $F_c=150\text{N/mm}^2$ 級超高強度コンクリートの製造技術に関する実験的研究(その 1～3)，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，A-1，pp.327-332，2005.9
- 11) 松戸正士，吉野茂，若松高志，近藤悟，佐々木仁，菊田繁美，高橋孝二，井上超，平島岳夫，吉田正友，上杉英樹，齋藤光：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 1,2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，A-2，pp.21-24，2002.8
- 12) 梶田秀幸，野中英，近藤悟，小林利充，井上超，西田浩和，平島岳夫，吉田正友，上杉英樹：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 3)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，A-2，pp.241-242，2003.9
- 13) 梶田秀幸，西田浩和，増田隆行，松戸正士，澤田由美子，濱田真，野中英，杉野英治，浦川和也，菊田繁美，梅本宗宏，高橋孝二，小林利充，井上超，吉野茂，平島岳夫，吉田正友，上杉英樹，齋藤光：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 4～8)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，A-2，pp.91-100，2004.8
- 14) 松戸正士，濱田真，増田隆行，吉野茂，菊田繁美，高橋孝二，山田人司，西田浩和，梶田秀幸：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 9～12)，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，A-2，pp.75-81，2005.9
- 15) 日本コンクリート工学協会：品質評価試験方法研究委員会報告書，1998.12