

超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の 耐火性能に関する研究



梅本 宗宏*

菊田 繁美*

概 要

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、部材の耐力低下を引き起こす可能性がある。本報では、 $F_c=100\text{N/mm}^2 \sim 150\text{N/mm}^2$ 級の高強度コンクリートに関して、爆裂防止対策を構築するとともに、部材の耐火性能について検討した結果について報告する。また、爆裂防止対策として最も有効であるとされている有機繊維は、高温時に熔融し、爆裂の要因のひとつとされる水蒸気圧を緩和するという利点があるものの、コンクリート強度が高くなると必要繊維混入量も増大し、施工性・強度低下を招くなどの欠点もある。これらのことから、 $F_c=120\text{N/mm}^2 \sim 150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを対象に、適切な材料・調合の検討を行うとともに、爆裂防止用のポリプロピレン繊維を混入した高強度コンクリートの製造技術に関する一連の検討もあわせて報告する。

Study on Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Ultra High Strength Material

Munehiro UMEMOTO*

Shigemi KIKUTA*

The reinforced concrete column made with the high-strength concrete has the surface part easily to spalling when the fire heating is received, and has the possibility to cause the power decrease of the material. In this paper, the results of spalling control and examining a fire resistance technology of the material for the high-strength concrete of the $F_c=100\text{N/mm}^2$ - 150N/mm^2 class were reported. Moreover, the organic fiber assumed to be the most effective as the spalling control has the advantage of melting at the high temperature, and easing the steam pressure assumed to be one of factors of the explosion. However, when concrete strength rises, the organic fiber also has the amount of the necessary fiber mixing, and has the fault by which the decrease in strength and workability are invited. From these, an appropriate material and the mix proportion were examined for a super-high-strength concrete of the $F_c=120\text{N/mm}^2$ - 150N/mm^2 class, also the results of study of production technology for high strength concrete using polypropylene fibers were reported.

* 戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

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関する研究

梅本 宗宏*
菊田 繁美*

1. はじめに

近年、超高層集合住宅のさらなる高層化にともない、設計基準強度（以下、Fcと略記）130N/mm²の高強度コンクリートの実施工が報告¹⁾されており、Fc=150N/mm²級の超高強度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、Fc=100N/mm²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)}や、Fc=150N/mm²級のRC柱では耐火時間が1時間程度となる例⁴⁾が報告されている。この原因のひと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、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⁵⁾されている。しかしながら、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流動性、施工性の悪化や強度の低下を生ずる可能性がある。また、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が⁶⁾、高強度コンクリートでは強度回復があまり期待できないという報告⁷⁻⁹⁾もある。

これらのことから、本研究ではFc=100～150N/mm²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）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、以下のシリーズの耐火対策技術に関する実験（実験3～6）を行った。また、あわせて、Fc=120～150N/mm²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。

I. 超高強度コンクリートの製造技術に関する実験

実験1：試験室内で実施した「室内実験」

実験2：生コン工場の実機ミキサを用いた「実機実験」

II. 超高強度RC柱の耐火対策技術に関する実験

実験3：実大規模柱を用いた「実大規模荷重加熱実験」

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「縮小柱荷重加熱実験」

実験6：実大柱を想定した「実大加熱実験」

本報では、これらの実験結果¹⁰⁻¹⁴⁾をまとめ、超高強度RC柱の耐火対策技術を整理し報告する。

2. 超高強度コンクリートの製造技術に関する実験

2.1 実験概要

(1) 室内実験（実験1）

室内における試し練りによって、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に調合をそれぞれ示す。

表-1 要因と水準（室内実験）

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	シリカフェウム混入セメント(SFC) 低熱ポルトランドセメント(LC) +シリカフェウム(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（室内実験）

材料	特性・主成分
水(W)	上水道水
結合材(B)	シリカフェウム混入セメント(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 粉体シリカフェウム(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48μm, 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
スランブフロー	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

* 戸田建設(株) 技術研究所

表-4 コンクリートの調合 (室内実験)

要因	W/B (%)	単位量(kg/m ³)										SP 使用量 (Bx%)	PP 繊維 混入量 (vol%)
		W	B				S		G				
			SFC	LC	VKC	SF	S1	S2	G1	G2			
PP 繊維	13	155	1192	-	-	-	328	-	837	-	-	3.00	0.00 ^{*1}
	13	155	1192	-	-	-	328	-	837	-	-	3.20	0.24 ^{*1} 0.00 ^{*1} 0.36 ^{*1}
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	-
			-	-	775	-	658	-	-	-	-	2.00	-
	16	155	969	-	-	-	513	-	837	-	-	2.10	-
			-	872	-	97	-	-	-	-	-	2.10	-
			-	-	969	-	490	-	-	-	-	3.00	-
	13	155	1192	-	-	-	328	-	837	-	-	2.90	-
			-	1073	-	119	-	-	-	-	-	2.70	-
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		646	-	-	-	784	-	-	-	-	1.30	-
	20		775	-	-	-	676	-	-	-	-	1.55	-
	16		969	-	-	-	513	-	-	-	-	2.10	-
	14	155	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

試し練りは、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 0.51m³/m³、目標スランプフローは 65 または 70 ± 7.5cm、目標空気量は 1.5 ± 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 分間練り混ぜ、その後、粗骨材を投入して 90 ～ 120 秒間練り混ぜた。PP 繊維の混入は、練り上がったプレー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) 実機実験 (実験 2)

W/B13 ～ 20% の超高強度コンクリートをレディーミク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り混ぜ、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% が 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加えて補正した。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 の組み合わせを示す。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。

表-5 使用材料 (実機実験)

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 (実機実験)

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

表-7 試験体の組み合わせ

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%	-

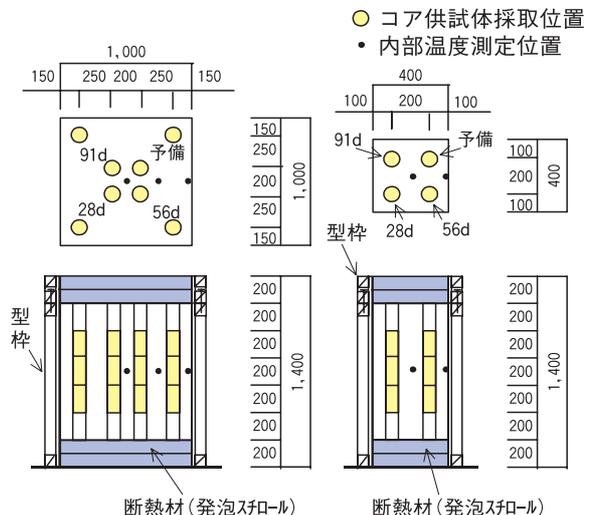


図-1 試験体形状

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
上上がりモニターを確認後、粗骨材を投入してコンクリ
ートを練り混ぜた。夏期・冬期は、工場内において練上
がり後 60 分で試験体に打ち込み、標準期は、神奈川県厚
木市（輸送時間約 90～120 分）において打ち込みを行っ
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。

2.2 室内実験結果（実験 1）

各調査のフレッシュコンクリート試験の結果は、すべ
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 社製のほうが、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

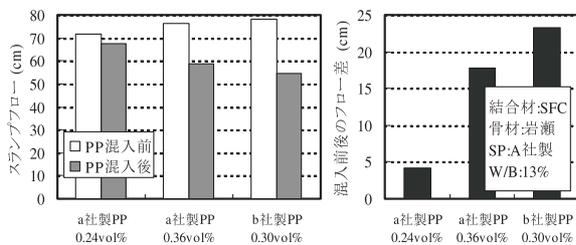


図-2 PP 繊維の違いによるスランプフロー

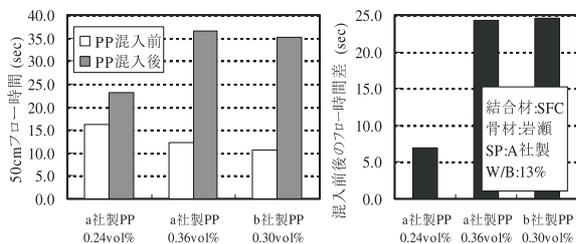


図-3 PP 繊維の違いによる 50cm フロー時間

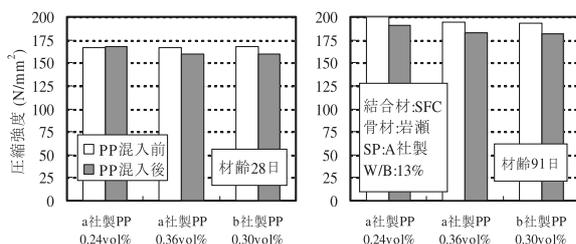


図-4 PP 繊維の違いによる標準養生供試体の圧縮強度

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みうけられなかった。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。

(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）が高くなるほど、
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

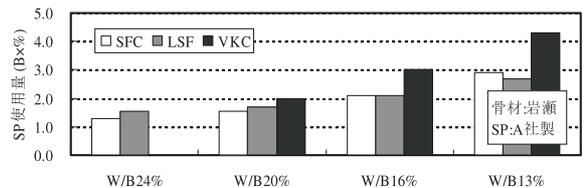


図-5 結合材の違いによる混和剤の使用量

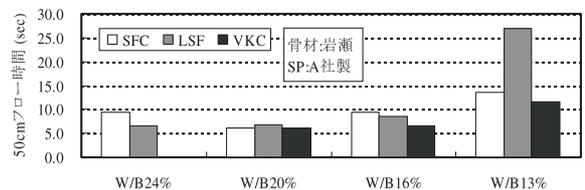


図-6 結合材の違いによる 50cm フロー時間

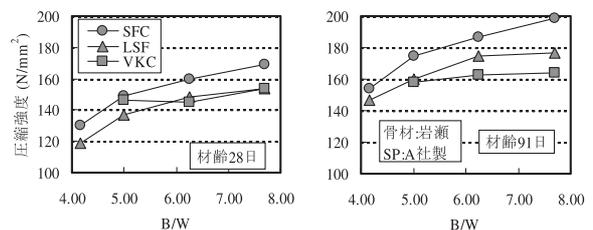


図-7 結合材の違いによる標準養生供試体の圧縮強度

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。

(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碎石・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が高くなるほど、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。

(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。練上がり時の性状では、スランプ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。

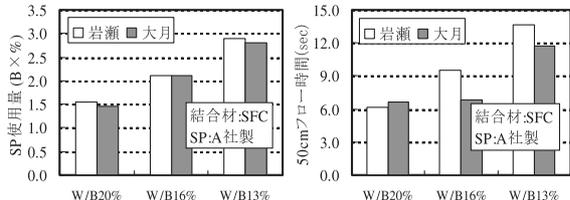


図-8 骨材の違いによる混和剤の使用量 図-9 骨材の違いによる50cmフロー時間

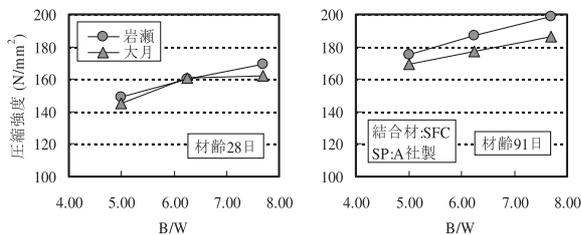


図-10 骨材種類と標準養生供試体の圧縮強度

表-8 実験結果 (混和剤種類の比較)

SP種類	SP使用量 (Bx%)	スランプフロー (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が低くなるほど、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が低くなるほど、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が高くなるほど、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、材齢が進むほど、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。材齢が進むほど、強度は増進しているが、材齢28-56日および91-182日の強度増進に関しては非常に緩慢であった。

2.3 実機実験結果 (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、おおむね目標値を満足した。

図-15に、PP繊維混入前後のスランプ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%のいずれもスランプ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

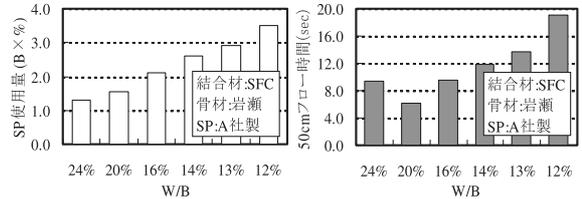


図-11 W/Bと混和剤の使用量 図-12 W/Bと50cmフロー時間

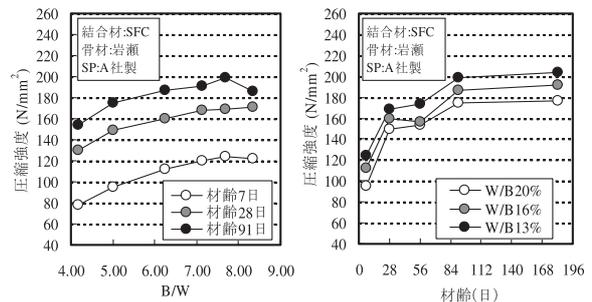


図-13 B/Wと標準養生供試体の圧縮強度 図-14 材齢と標準養生供試体の圧縮強度

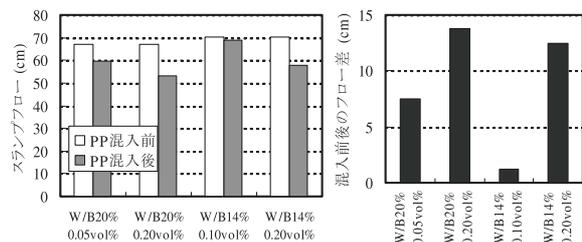


図-15 PP繊維混入前後のスランプフロー

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みうけられなかった。

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、

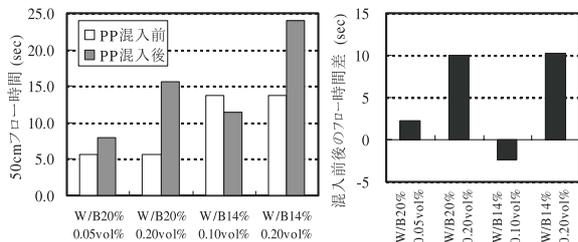


図-16 PP 繊維混入前後の 50cm フロー時間

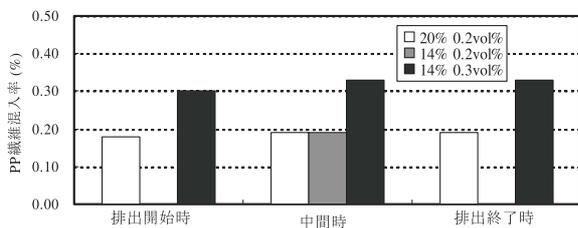


図-17 PP 繊維の混入率

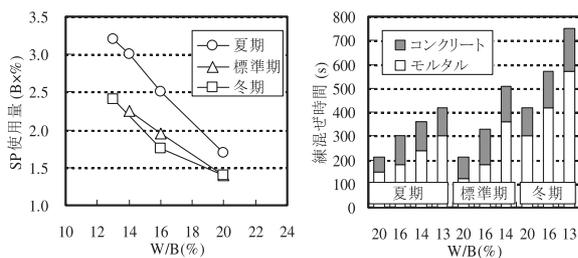


図-18 W/B と混和剤使用量の関係

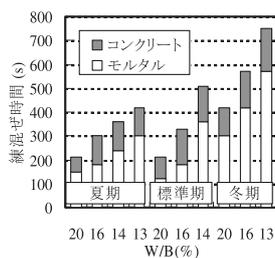


図-19 W/B と練混ぜ時間の関係

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($_{28}S_{91}$)は最大で5N/mm²を超えるものはなかった。

2.4 製造技術に関する実験のまとめ

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実験および実機実験をまとめると、以下の通りである。

- 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ったが、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、ドラム内ではほぼ均一に分散した。

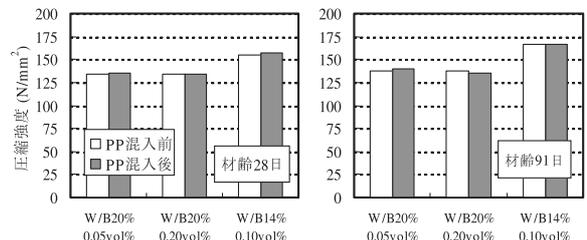


図-20 PP 繊維混入前後の□400 試験体のコア強度

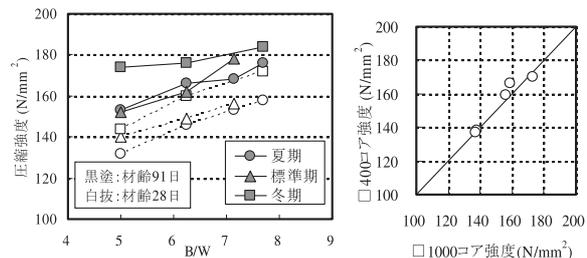


図-21 標準養生供試体の B/W と圧縮強度の関係

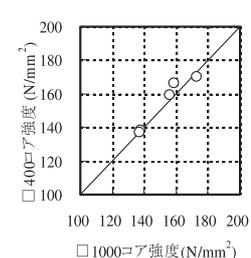


図-22 □1000 と □400 試験体のコア強度の関係

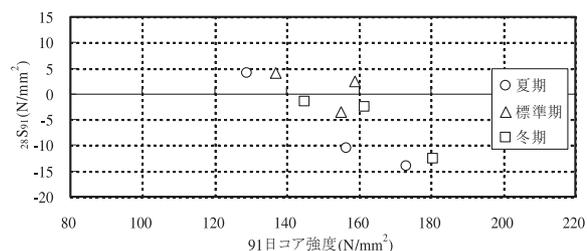


図-23 91日コア供試体強度と S 値 ($_{28}S_{91}$) の関係

- 4) 超高強度コンクリートにおける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。
- 5) 標準養生供試体の圧縮強度は、W/B13%まで結合材水比が高くなるほど、増大する傾向がある。
- 6) 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。
- 7) 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 $F_c=80 \sim 150\text{N/mm}^2$ 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。

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あわせて配筋した。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に各実験の調査を示す。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

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	—	0.00
23P1010						0.10
23P1020						0.20
23P1030						0.30
23P2010					20	0.10
23P2020						0.20
23P2030						0.30
14N0000						0.00
14P1010		150	14	48	—	0.10
14P1020						0.20
14P1030						0.30
14P2010						0.10
14P2020					20	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 F_c (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				5443	0.30
C11N35	S24	100	なし	6104	0.35
C13N27				5443	0.27
C13CA25	S18	100	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		鋼板巻き		8000
C17P10	S14-2	150	PP繊維0.10vol%(L20)	8000	0.29
C17P20	S14-3		PP繊維0.20vol%(L20)		0.29
C17P30	S14-4		PP繊維0.30vol%(L20)		9067

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

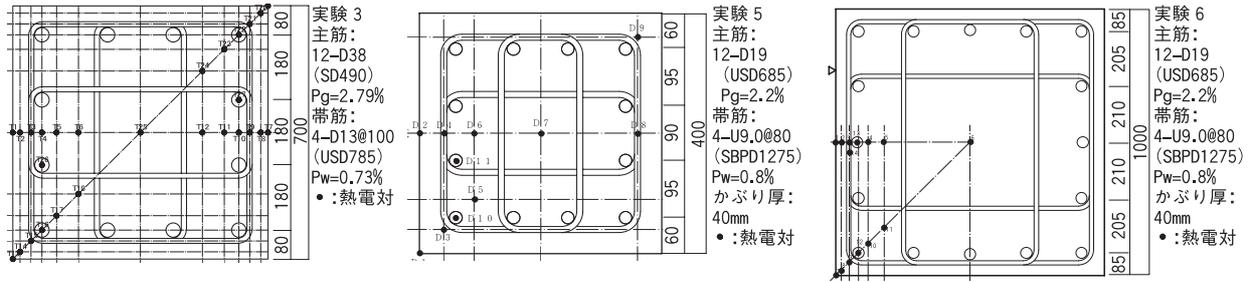


図-24 試験体断面および熱電対配置位置

断熱材	試験体A	試験体B	試験体C	試験体D	厚さ
	耐火塗料	耐火シート	ケイカル板	セラミック	
無対策	せっこうボード	セルローズ	モルタル	1300	
				300	
				1300	
				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
	シリカフェーム混入セメント(SFC):密度3.08g/cm ³
	粉体シリカフェーム(SF):密度2.20g/cm ³
細骨材 (S)	岩瀬産砕石(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)
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

の平均値とした。

(3) 実験方法

加熱は、ISO 834 の標準加熱温度曲線にしたがい、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始まり、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

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 (Bx%)	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											115		
K20-2	20	160	—	720	80	—	186	437	—	848	2.10	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												1.40	148
S20-2	20	155	775	—	—	676	—	—	837	—		1.40	148
S20-3												1.45	148
S20-4												1.45	147
S14-1												2.25	178
S14-2	14	155	1107	—	—	400	—	—	837	—		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 (Bx%)	繊維長さ (mm)	PP 繊維混入率 (vol%)	供試体強度 (N/mm ²)
		W	C	S	G	G				
23N0000							1.65	—	0.00	135
23P1010							1.70	—	0.10	136
23P1020							1.75	10	0.20	133
23P1030	23	155	674	761	837				0.30	129
23P2010							1.85	—	0.10	134
23P2020								20	0.20	129
23P2030									0.30	129
14N0000								—	0.00	187
14P1010								10	0.10	192
14P1020									0.20	188
14P1030	14	155	1107	400	837	1.70			0.30	179
14P2010								20	0.10	179
14P2020									0.20	178
14P2030									0.30	177

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。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。

(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

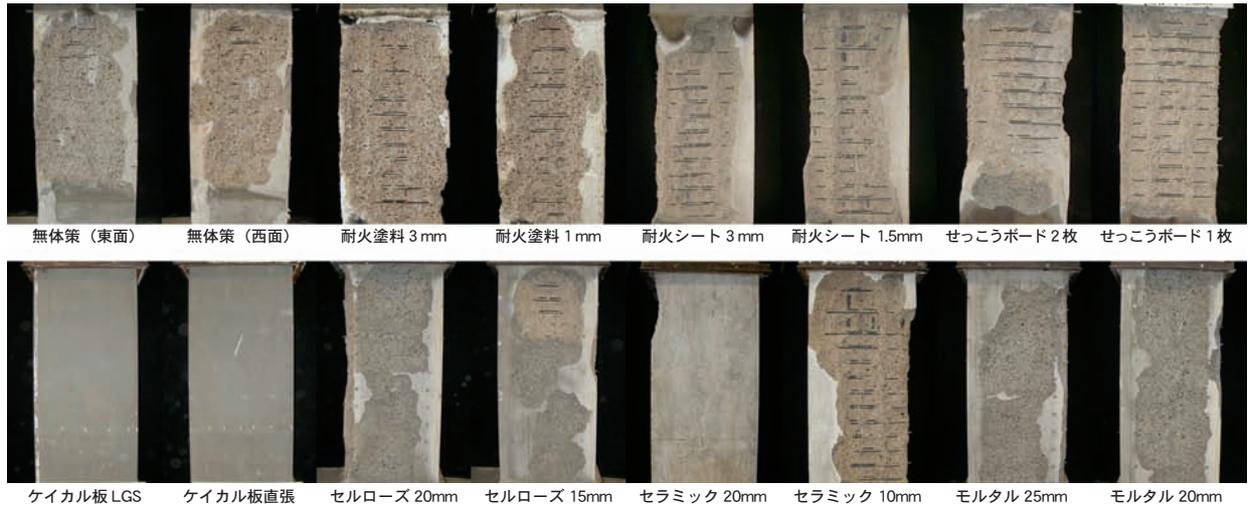


写真-1 加熱終了後の試験体状況（実験3）

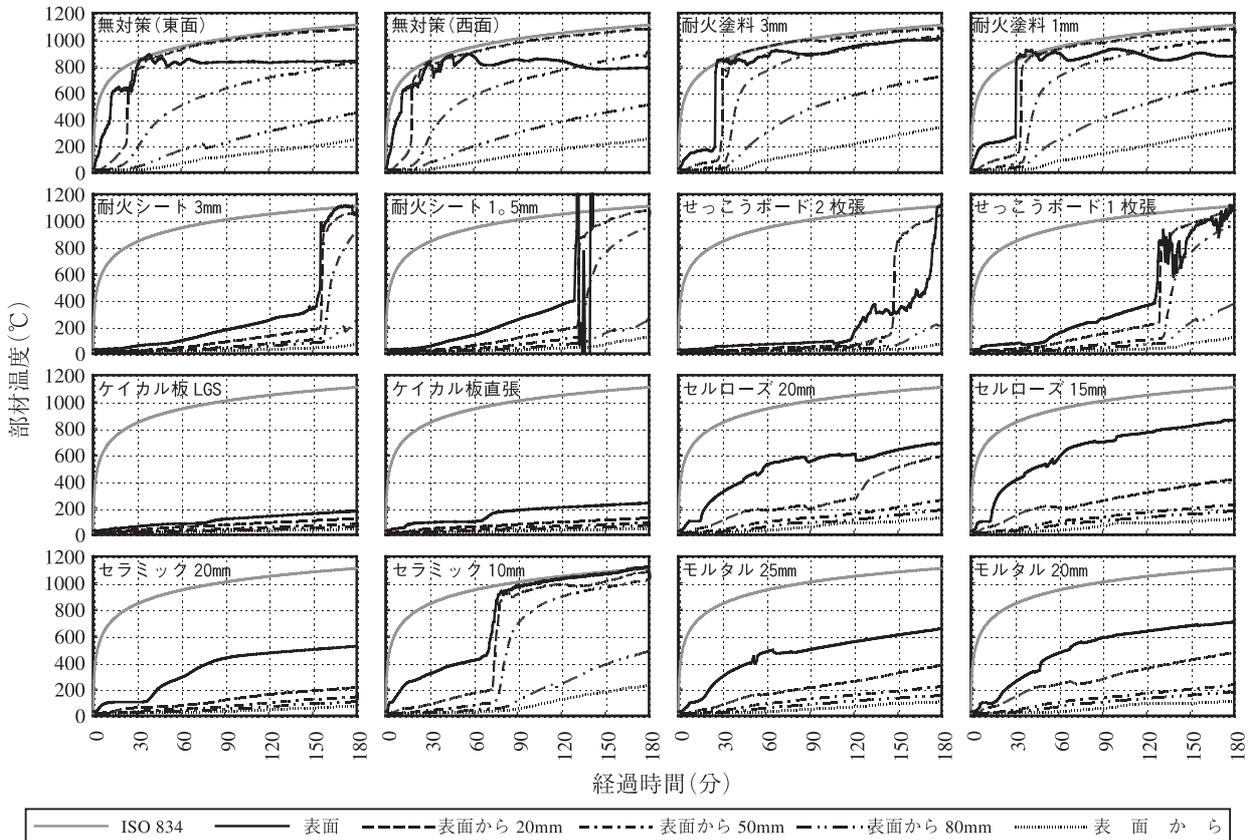


図-26 各試験体の内部温度履歴（実験3）

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すると、爆裂面積率の

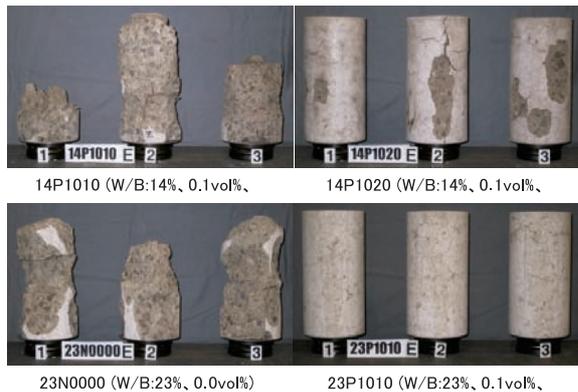


写真-2 加熱終了後の供試体状況 (実験4)

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)	繊維 長さ (mm)	PP繊維 混入率 (vol%)	爆裂面積率 (%)		最大爆裂深さ (mm)		
				100	100	(全)	—	
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		0.10		0	0	0	0	
23P2020		20		0.20	0	0	0	0
23P2030				0.30	0	0	0	0
14N0000				—	0.00	100	100	(全)
14P1010		150	—	0.10	95.1	88.6	(全)	—
14P1020					77.3		(全)	
	93.5				(全)			
14P1030	10		7.4	10.5				
			19.6	10.0				
	20		17.7	12.1				
			2.0	12.3				
14P2010	0.10		0.8	4.5				
			1.1	3.1				
			58.8	37.8				
14P2020	0.20	59.6	55.5					
		48.2	89.3					
		6.1	8.3					
14P2030	0.30	4.4	5.2					
		5.2	10.1					
14P2030	0.30	0	0	0	0			

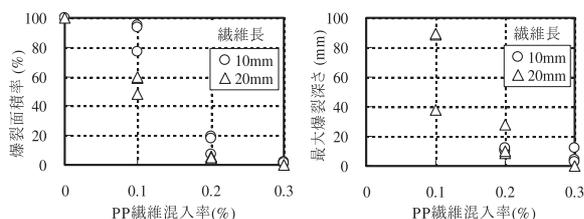


図-27 PP 繊維混入率と爆裂面積率の関係
図-28 PP 繊維混入率と最大爆裂深さの関係

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。

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0.10vol%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。

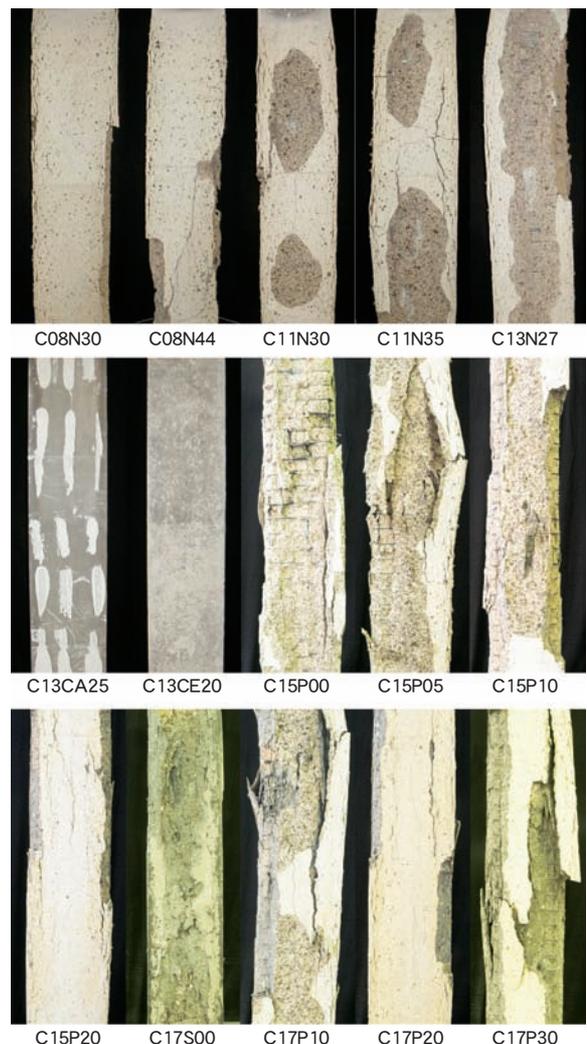


写真-3 加熱終了後の試験体状況 (実験5)

(2) 耐火性能

コンクリートの実強度が 120N/mm² 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、Fc=100 N/mm² 以下では、爆裂対策を施さなくてもおおむね 3 時間の耐火性能を保有し、Fc=120N/mm² 級では PP 繊維を 0.05vol% 以上混入することで、Fc=150N/mm² 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

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)
	(N/mm ²)						
C08N30	80	77	なし	3710	0.30	—	—
C08N44	80	113		5443	0.44	35	281
C11N30	80	113		5443	0.30	14	—
C11N35	100	113		6104	0.35	13	288
C13N27	100	127		5443	0.27	9	206
C13CA25	100	127	ケイカル板直張(t25)	6072	0.30	—	—
C13CE20	100	127	セラミック(t20)			—	—
C15P00	148	148	なし	6400	0.27	7	177
C15P05	148	148	PP繊維0.05vol%(L10)		0.27	7	241
C15P10	148	148	PP繊維0.10vol%(L10)		0.27	8	270
C15P20	147	147	PP繊維0.20vol%(L10)		0.27	—	—
C17S00	178	178	鋼板巻き		0.28	—	—
C17P10	150	174	PP繊維0.10vol%(L20)	8000	0.29	7	305
C17P20	150	170	PP繊維0.20vol%(L20)		0.29	—	—
C17P30	150	165	PP繊維0.30vol%(L20)		0.34	—	309

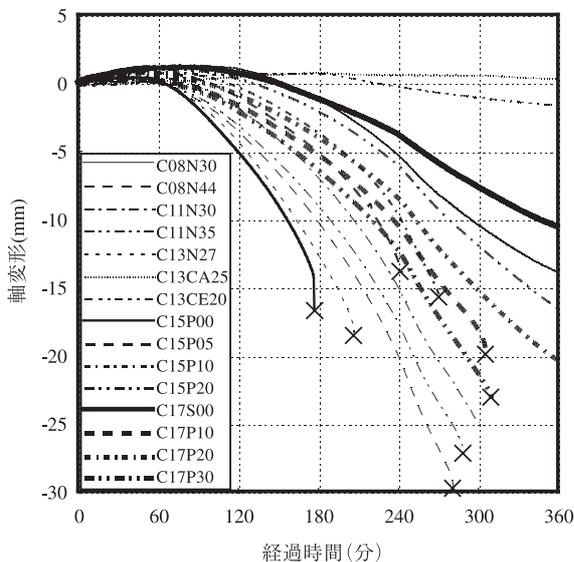


図-29 各試験体の軸変形の推移 (実験 5)

力のみを継続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ると考えられる。

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、コンクリートへの入熱が抑制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

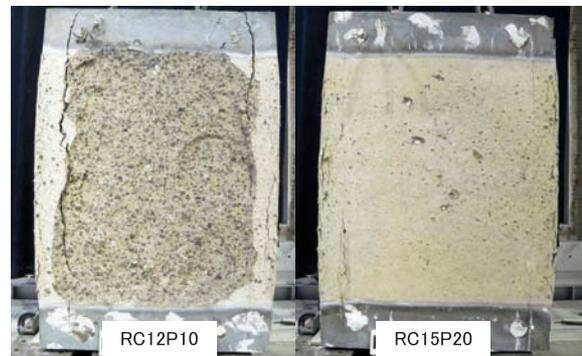


写真-4 加熱終了後の試験体状況 (実験 6)

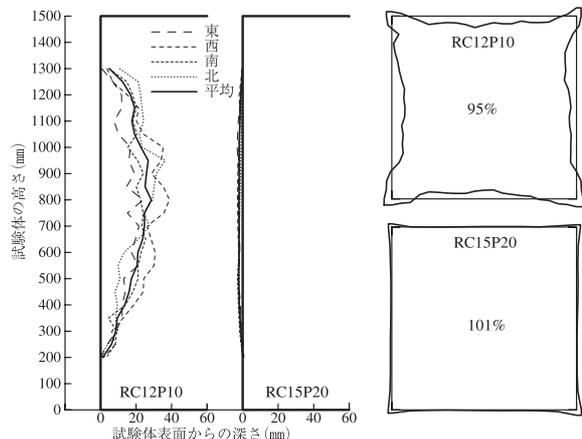


図-30 爆裂深さの測定結果 (実験 6)

爆裂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。

Fc=120N/mm²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0.00vol%と0.20vol%の場合は供試体加熱実験(実験4)と縮小柱载荷加熱実験(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0.10vol%の場合は供試体加熱実験(実験4)では爆裂せず、縮小柱载荷加熱実験(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。

Fc=150N/mm²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0.10vol%と0.30vol%の場合は供試体加熱実験(実験4)と縮小柱载荷加熱実験(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0.20vol%の場合は供試体加熱実験(実験4)ではわずかに爆裂し、縮小柱载荷加熱実験(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载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 耐火対策技術に関する実験のまとめ

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結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) コンクリートのFcが100N/mm²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Fcが100N/mm²を超える場合、Fc120N/mm²では0.05vol%以上、Fc150N/mm²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Fcが150N/mm²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る。また、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おおむね評価することができる。

本実験の結果より、超高強度RC柱の耐火対策を、Fcと要求される耐火性能に応じて、表-19に示す通りに

表-18 爆裂性状の比較

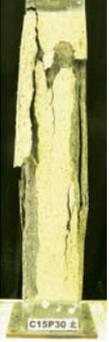
Fc=120N/mm ² , PP繊維 φ=48mm, L=10mm						
0.0vol%		0.1vol%			0.2vol%	
実験4	実験5	実験4	実験5	実験6	実験4	実験5
爆裂あり	爆裂あり	爆裂なし	爆裂あり	爆裂あり	爆裂なし	爆裂なし
						
Fc=150N/mm ² , PP繊維 φ=48mm, L=20mm						
0.1vol%		0.2vol%			0.3vol%	
実験4	実験5	実験4	実験5	実験6	実験4	実験5
爆裂あり	爆裂あり	軽微な爆裂	爆裂なし	爆裂なし	爆裂なし	爆裂なし
						

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(Fc)		
	Fc=100 N/mm ² 以下	Fc=120 N/mm ² 以下	Fc=150 N/mm ² 以下
①3時間耐火を有する (軸力保持性能)	無対策	PP繊維混入工法 φ=48μm以下 L=10mm以上 0.05vol%以上	PP繊維混入工法 φ=48μm以下 L=20mm以上 0.10vol%以上
②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 φ=48μm以下 L=10mm以上 0.10vol%以上	PP繊維混入工法 φ=48μm以下 L=20mm以上 0.10vol%以上
③爆裂を防止する		PP繊維混入工法 φ=48μm以下 L=10mm以上 0.20vol%以上	PP繊維混入工法 φ=48μm以下 L=20mm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

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一連の研究の結果、Fc=100～150N/mm² 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)を有する工法ならびに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。ここに付記して深謝の意を表します。

なお、本研究は、戸田建設と、熊谷組、佐藤工業、西松建設、ハザマ、フジタ、前田建設工業の共同研究成果の一部を取りまとめたものです。本実験にご協力いただいた関連各社ならびに多大なご協力をいただいた関係各位の皆様に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 黒岩秀介、河合邦彦、小田切智明、嵐山正樹：Fc130N/mm² 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(Fc=1000kgf/cm²) 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、白井信行、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Fc150N/mm² 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の変化、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：Fc=150N/mm² 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