

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

松 戸 正 士 西 田 浩 和
片 寄 哲 務

概 要

本報告は、超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性能を確認するために行った 3 シリーズの実験結果をまとめたものである。3 シリーズの実験結果から、以下のことが分かった。

1. 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非常に有効である。
2. コンクリート強度が 120N/mm^2 を超える場合、 140N/mm^2 では $0.05\text{vol}\%$ 、 170N/mm^2 では $0.10\text{vol}\%$ のポリプロピレン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。
3. 超高強度コンクリートには、 $0.20\text{vol}\%$ 以上ポリプロピレン繊維を混入することにより、ほぼ爆裂を防止できる。
4. 縮小試験体は、実大規模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と考えられる。

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

Abstract

This paper presents the results of three kinds of experiments to certify fire resistance for reinforced concrete columns made from ultra high strength material. The following results were obtained.

1. Using fire resistive covering material on concrete surface is effective for spalling control and suppression of temperature increase of members if detachment of covering materials from the concrete surface can be avoided.
2. Where compressive strength is over 120N/mm^2 , reinforced concrete column can ensure fire resistance over four hours when mixed with Polypropylene fibers more than $0.05\text{vol}\%$ for 140N/mm^2 and $0.10\text{vol}\%$ for 170N/mm^2 .
3. In ultra high strength concrete, spalling is largely prevented by mixing Polypropylene fibers at a concentration of at least $0.20\text{ vol}\%$.
4. Spalling properties obtained from small scale specimen largely agree with full scale examples, and fire resistance efficiency of reinforced concrete column can be closely estimated by fire resistance test under load with small scale specimen.

キーワード： 超高強度コンクリート, 載荷加熱実験,
鉄筋コンクリート柱, 耐火性能, 爆裂対策

§1. はじめに

近年、超高層住宅の更なる超高層化に伴い、設計基準強度(以下 F_c と略記)100N/mm²級あるいはそれを超える超高強度コンクリートの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柱は耐火時間が3時間以下になる例が^{1),2)}、 $F_c=150\text{N/mm}^2$ 級の柱では、耐火時間が1時間程度とも報告されている³⁾。この原因の一つと考えられているのが加熱時に生じる爆裂現象で、合成繊維の混入が爆裂低減に有効であることも報告されている⁴⁾。一方、コンクリートは500℃程度の受熱であれば、ある程度の期間が経過すると強度回復すると言われてきた⁵⁾。しかし、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^{6),7)}。以上より、本研究は、 $F_c=100\sim 150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート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)を有する工法及び火災後補修軽減対策の開発を目的とし、以下の3シリーズの実験を行った。

実験 1:実大規模柱を用いた「実大規模載荷加熱実験」

実験 2:縮小柱試験体を用いた「縮小柱載荷加熱実験」

実験 3:実大柱を想定した「実大加熱実験」

本報告は、これらの実験結果をまとめたものである⁸⁾。

表 1 実験条件(実験 1:実大規模載荷加熱実験)

試験 体名	調査 番号	施工位置		爆裂対策略称	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			
B	K20-2	下	4 面	無対策	5807		
			上	東北面			耐火シート 3mm
		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
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 2 実験条件(実験 2:縮小柱載荷加熱実験)

試験体名	調査 番号	対象 Fc N/mm ²	爆裂対策 (mm)	載荷軸力 kN	推定 軸力比
C08N30	S35	80	無し	3710	0.30
C08N44				5433	0.44
C11N30	S24	80		5433	0.30
C11N35	S24	100		6104	0.35
C13N27	S18	100		ケイカル直張(25)	5433
C13CA25	S18		6072		0.30
C13CE20	S18	セラミック(20)			
C15P00	S20-1	120	無し	6400	0.27
C15P05	S20-2		PP 繊維 0.05vol%(10)		0.27
C15P10	S20-3		PP 繊維 0.10vol%(10)		0.27
C15P20	S20-4		PP 繊維 0.20vol%(10)		0.27
C17S00	S14-1	150	鋼板巻き	8000	0.28
C17P10	S14-2		PP 繊維 0.10vol%(20)		0.29
C17P20	S14-3		PP 繊維 0.20vol%(20)		0.29
C17P30	S14-4		PP 繊維 0.30vol%(20)		9067

§2. 実験概要

2.1 実験条件

表 1～3 に各実験の実験条件をそれぞれ示す。試験体は各実験で 4,15,2 体である、パラメータは、コンクリート強度、爆裂対策および軸力比(実験 1, 2 のみ)とした。コンクリートは、 $F_c=80\sim 150\text{N/mm}^2$ を対象にした。実験 1 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(ケイカル板)、セルローズ繊維混入モルタル(セルローズ)、セラミック系硬質耐火被覆(セラミック)、モルタルに対して 2 種類ずつの仕様(主に厚さ)を用い、無対策に対して、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を確認することを目的とした。実験 2 では、無対策試験体の軸力保持性能を確認するとともに、爆裂対策として、ケイカル板、セラミック、ポリプロピレン繊維(以下 PP 繊維と略記)、鋼板巻きを用い、軸力保持性能を確認することを目的とした。実験 3 では、爆裂対策に PP 繊維を用い、縮小柱試験体との爆裂性状の比較検討を行うことを目的とした。

2.2 試験体

図 1 に各実験の試験体断面および熱電対配置図を示す。試験体断面は、実験 1 で 700×700mm、実験 2 で 400×400mm、実験 3 で 1,000×1,000mm とした。

実験 1 では、試験体を上下かつ対角方向に 4 分割し、1 つの試験体で 4 種類の爆裂対策を施せるようにした(図

表 3 実験条件(実験 3:実大加熱実験)

試験体名	調査番号	対象 F_c N/mm ²	PP 繊維		
			長さ(mm)	径(μ m)	混入率(vol%)
RC15P10	S20-3	120	10	48	0.10
RC17P20	S14-3	150	20	48	0.20

主筋:12-D19 (USD685) $P_g=2.2\%$ フープ:4-U9,0#80 (SBPD1275) $P_w=0.8\%$ かぶり厚:40mm	断面図(実験2)	主筋:16-D41 (SD490) $P_g=2.14\%$ フープ:4-D16#100 (SD490) $P_w=0.80\%$ かぶり厚:40mm	断面図(実験3)
主筋:12-D38 (SD490) $P_g=2.79\%$ フープ:4-D13#100 (USD785) $P_w=0.73\%$	断面図(実験1)		

単位: mm

図 1 試験体断面及び熱電対配置図

試験体 A	試験体 B	試験体 C	試験体 D	
耐火塗料	耐火シート	ケイカル板	セラミック	1,300
				300
無対策	せっこう ボード	セルローズ	モルタル	1,300

図 2 爆裂対策の施工位置(実験 1)

2 参照)。試験体の全長は、4,300mm とし、上下それぞれの加熱区間は、1,300mm とした。実験 2 では、加熱区間を 2,000mm とし、主筋およびフープは実状の建築物に合わせて配筋した。実験 3 では、試験体の全長を 1,500mm とし、加熱区間は 1,100mm とした。

表4にコンクリートの調合を示す。コンクリートの調合は、事前に実機試験練りを実施して決定した。載荷軸力比推定用のコア強度は、試験体と同断面の模擬試験体を試験体と同時に作製し、コア抜きした供試体を用いて圧縮強度試験を行いその平均値とした。

2.3 実験方法

加熱は、ISO834 の標準加熱温度曲線に従い、実験 1 で 3 時間、実験 2,3 では 4 時間(C13CA25, C13CE20 は 3 時間)とした。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 1,2 では、試験体の支持条件を柱脚固定・柱頭ピンとし、軸力の載荷は加熱開始 15 分前には完了させ、崩壊、あるいは実験終了まで保持し続けた。崩壊は軸力を保持できなくなる時点とし、冷却中でも崩壊しないものは、加熱時間の 3 倍をもって実験終了とした。

§3. 実大規模載荷加熱実験結果(実験 1)

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 10 分頃から爆裂が生じはじめ、同 40 分頃まで継続した。加熱終了後の状況は、フープがやや見える程度の爆裂で、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、大きく分けて 2 種類に分類できる。一方は、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を生じたケース、もう一方は、被覆材が脱落せず柱に爆裂を生じなかったケースである。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、耐火シートが 120 分

表 4 コンクリートの調合、使用材料およびコア強度

調合 番号	W/B (%)	単位量(kg/m³)						混和剤 使用量 (B×%)	推定コア 強度 (N/mm²)		
		W	B		S		G1			G2	
			C	SF	S1	S2					
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

[使用材料]水(W): 上水道水、セメント: 低熱ポルトランドセメント(C) 密度 3.22g/cm³、シリカフェューム混入セメント(B)密度 3.08g/cm³、細骨材: 市原産山砂 (S1) 表乾密度 2.57g/cm³、相模川水系陸砂(S2) 表乾密度 2.60g/cm³、岩瀬産 砕砂(S) 表乾密度 2.58g/cm³、粗骨材: 青梅産砕石((G1) 表乾密度 2.65g/cm³、 岩瀬産砕石(G2) 表乾密度 2.65g/cm³、混和材(SF): 粉体シリカフェューム 密度 2.20g/cm³、混和剤: 高性能減水剤(ポリカルボン酸系)、

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、フープ筋が露出した。一方、後者は、ケイカル板、セルローズ(20mm)、セラミック(20mm)、モルタルが該当し、モルタル系に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見られたが、加熱中の爆裂は認められなかった。

3.2 試験体の内部温度履歴

図 3 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℃を超えていた。一方、爆裂の生じない試験体においては、鉄筋の温度は 350℃を超えていなかった。従って、被覆材が脱落さえしなければ、かなりの時間部材温度を抑制できることが分かる。また、早期に爆裂を生じた無対策、耐火塗料を除くと、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。



写真 1 加熱終了後の試験体の状況(実験 1)

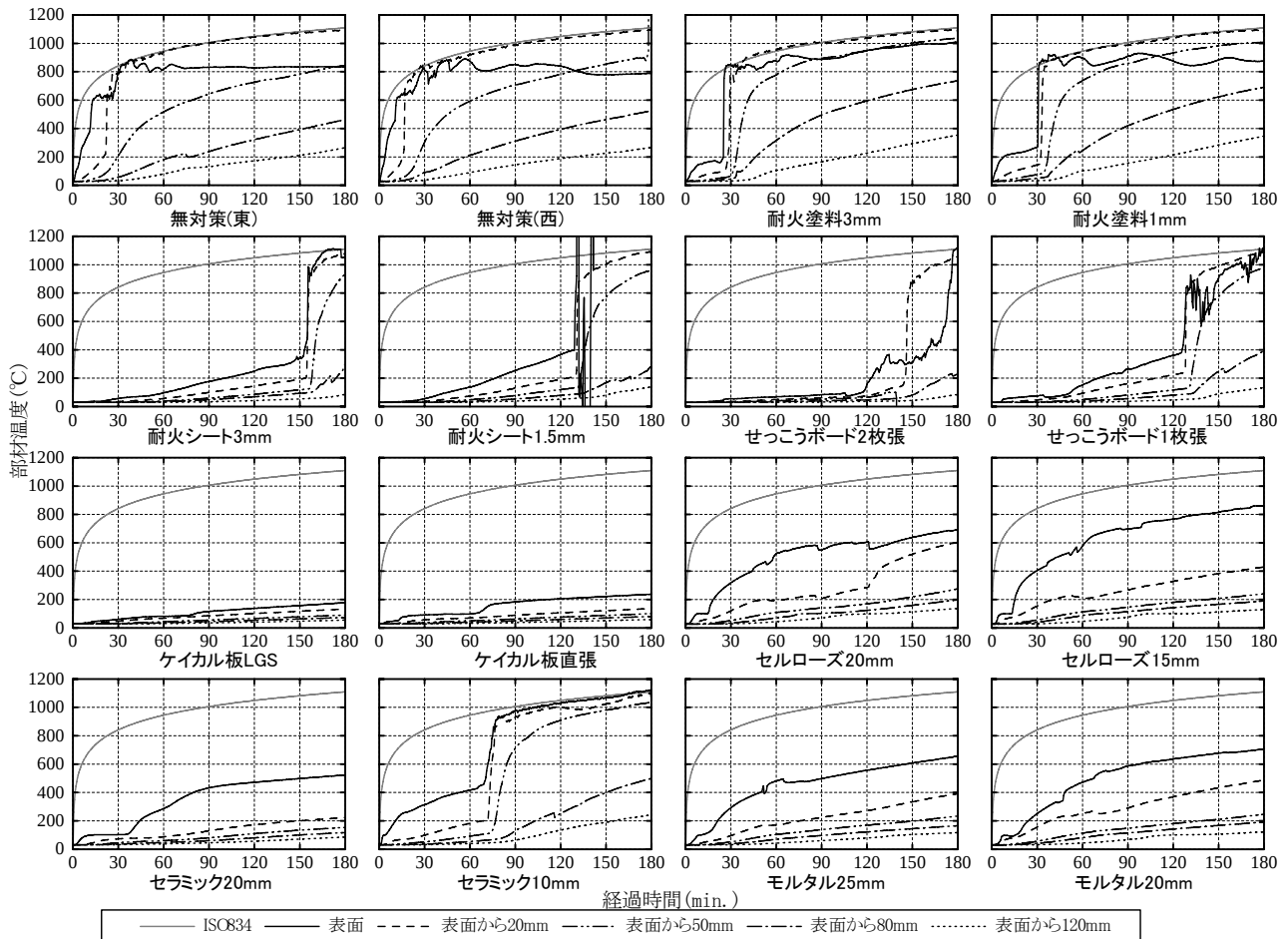


図 3 各試験体の内部温度履歴(実験 1)

§4. 縮小柱載荷加熱実験結果(実験 2)

4.1 実験経過

表 5 に実験結果一覧を、写真 2 に加熱終了後の試験体の状況をそれぞれ示す。

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、その後の爆裂は見られなかった。C08N44 の爆裂は加熱開始 35 分頃に開始しているが、熱劣化によるかぶり部分の崩落ともとれる。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見られる程度であった。写真 2 に見られる隅角部のコンクリートの剥落は、いずれの試験体とも加熱冷却後に生じたものである。

4.2 耐火性能

コンクリート強度が 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)で軸力を保持できなくなり崩壊に至った。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。その後、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 試験

体は、冷却中(載荷軸力は保持したままの状態)で軸力を保持できなくなり崩壊した。崩壊時間は、加熱開始 241～309 分の間であった。以上より、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に関しては、① $F_c=100\text{N/mm}^2$ 以下では、爆裂対策を施さなくとも概ね 3 時間の耐火性能を保有している。② $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級では PP 繊維を 0.05vol% 以上混入することによって、 $F_c=150\text{N/mm}^2$ 級では鋼板巻きまたは PP 繊維を 0.10vol% 以上混入することによって 4 時間以上の耐火性能を有すると考えられる。

表 5 実験結果一覧(実験 2)

試験体名	対象 F_c N/mm^2	爆裂対策 vol%(mm)	推定コア 強度 N/mm^2	推定 軸力比	爆裂開始 時間 (分)	崩壊 時間 (分)
C08N30	80	無し	77	0.30	—	—
C08N44			77	0.44	35	281
C11N30			113	0.30	14	—
C11N35			113	0.35	13	288
C13N27	100	ケイカル板直張(25)	127	0.27	9	206
C13CA25			127	0.30	—	—
C13CE20			127	0.30	—	—
C15P00			127	0.30	—	—
C15P00	120	無し	148	0.27	7	177
C15P05		PP 繊維 0.05(10)	148	0.27	7	241
C15P10		PP 繊維 0.10(10)	148	0.27	8	270
C15P20		PP 繊維 0.20(10)	147	0.27	—	—
C17S00	150	鋼板巻き	178	0.28	—	—
C17P10		PP 繊維 0.10(20)	174	0.29	7	305
C17P20		PP 繊維 0.20(20)	170	0.29	—	—
C17P30		PP 繊維 0.30(20)	165	0.34	—	309

4.3 軸変形

図 4 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、軸力のみを継続载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。崩壊した試験体の崩壊時の軸変形は、 -15.7mm ～ -29.8mm の範囲にあった。一方、実験終了(加熱終了後 12 時間経過時)まで軸力を保持した試験体の、その時点での軸変形の最大値は -29.8mm であり、軸力保持性能は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かなり抑えられたためと考えられる。また、鋼板巻きは、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。

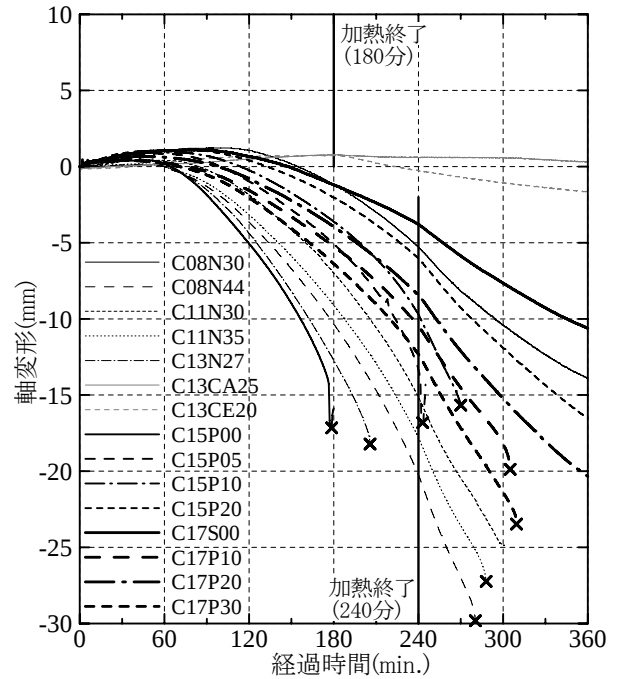


図 4 軸変形の推移(実験 2)

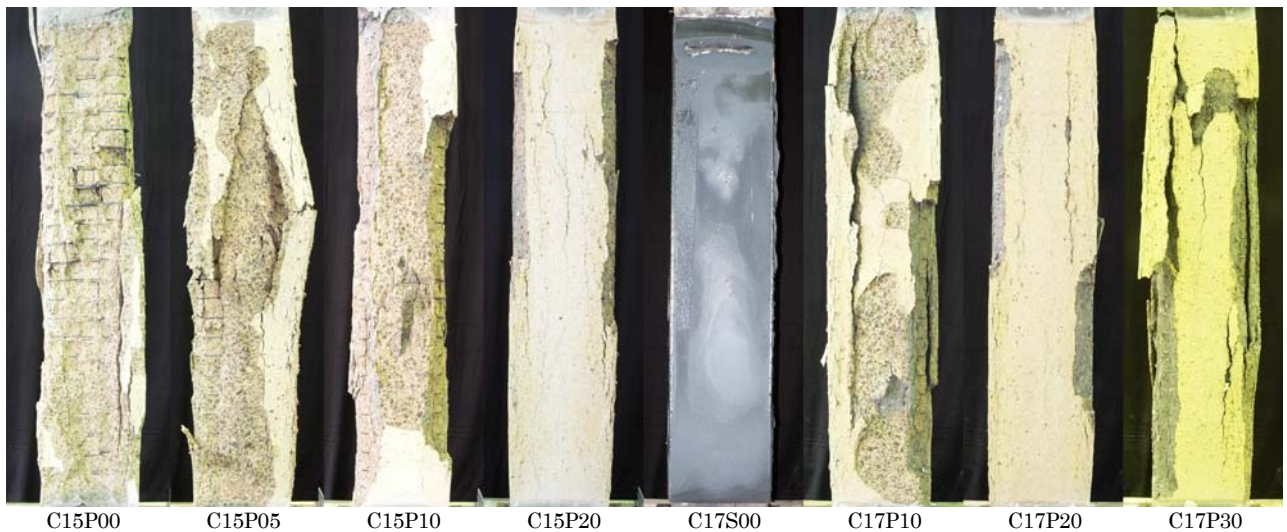
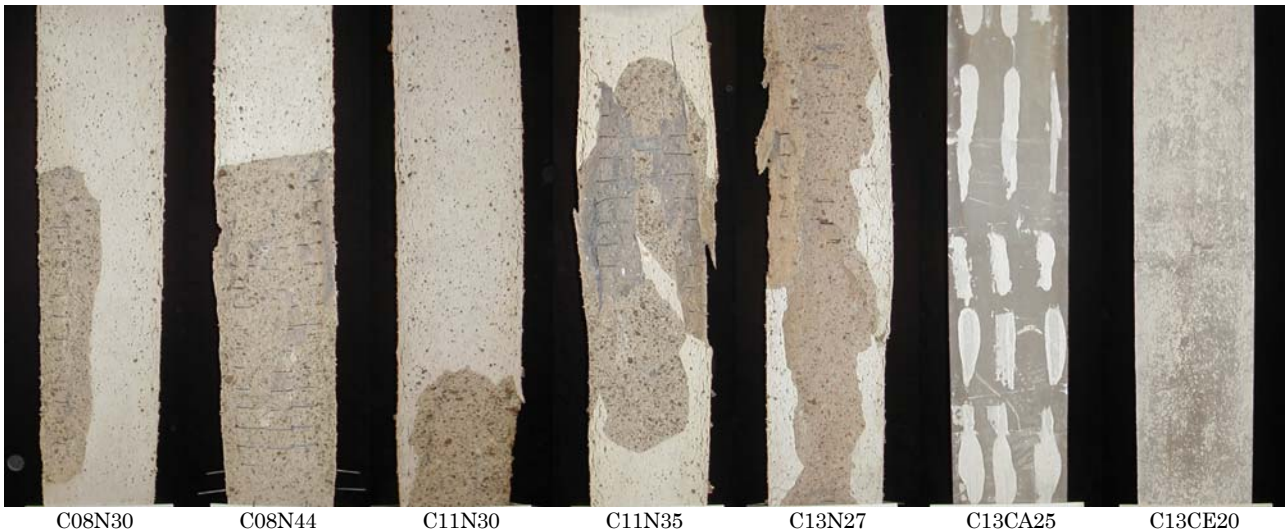


写真 2 加熱終了後の試験体の状況(実験 2)

§5. 実大加熱実験結果(実験 3)

5.1 実験経過

写真 3 に実験終了後の試験体の状況を示す。

RC15P10 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が、その後は爆裂を生じなかった。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。また爆裂の程度は帯筋が露出するほどではなかった。なお、RC17P20 は加熱開始から加熱終了まで爆裂を生じなかった。

5.2 爆裂深さ

図 5 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。RC15P10 における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。なお、爆裂の深さおよび程度は、縮小柱試験体と概ね同等であった。

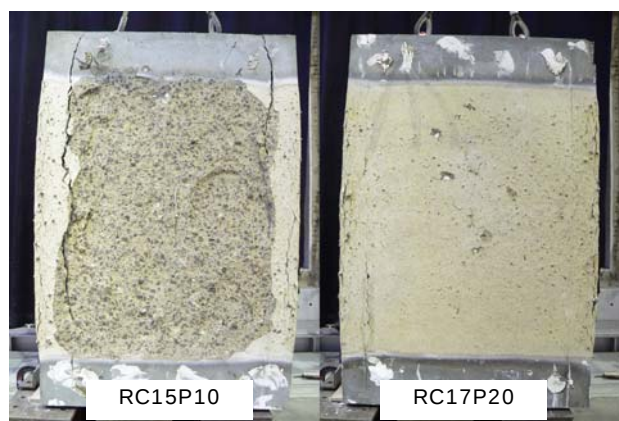


写真 3 加熱終了後の試験体の状況(実験 3)

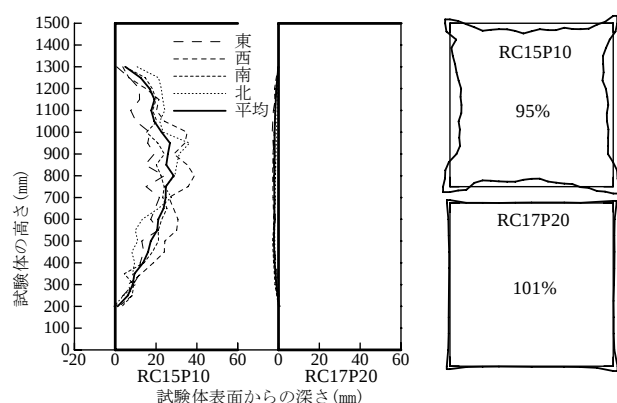


図 5 爆裂深さの測定結果(実験 3)

謝辞:本実験を計画するにあたり、齋藤光千葉大学名誉教授、千葉大学大学院自然科学研究科 上杉英樹教授、(財)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頂きました。記して謝意を表します。

なお、本研究は、熊谷組・佐藤工業・戸田建設・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である。

§6. まとめ

3 シリーズの実験結果から、以下のことが分かった。

1. 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非常に有効である。
2. コンクリート強度が 120N/mm^2 を超える場合、 140N/mm^2 では $0.05\text{vol}\%$ 、 170N/mm^2 では $0.10\text{vol}\%$ のポリプロピレン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。
3. 超高強度コンクリートは、 $0.20\text{vol}\%$ 以上ポリプロピレン繊維を混入することにより、ほぼ爆裂を防止できる。
4. 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と考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 辻大二郎・三井健郎・米澤敏男・藤中英生: 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
- 4) 森田武・西田朗・橋田浩・山崎庸行: 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
- 5) 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, 第 56 号, pp.1-7, 1957.6
- 6) 安部武雄・古村福次郎・戸祭邦之・黒羽健嗣・小久保勲: 高温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集, 第 515 号, pp.163-168, 1999.1
- 7) 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
- 8) 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・梶田秀幸・野中英・小林利充・西田浩和・杉野英治・梅本宗宏・増田隆行・澤田由美子・濱田真・浦川和也・中込昭・山田人司・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 1~12), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002~2005

ひとこと



松戸 正士

本共同研究は、5 年間に亘り実施されたものです。参加された多くの方々に感謝いたします。今後は、本研究成果を幅広く利用できるよう検討を進めていく予定です。