

繊維を混入した $F_c80 \sim 120\text{N/mm}^2$ 高強度 PCa コンクリート部材の 部材強度と耐火性能

技術研究所 中瀬 博一
技術研究所 藤井 和俊
技術研究所 鈴木 雅博

概要: $F_c80\text{N/mm}^2$ を超えるような高強度コンクリートでは組織が緻密となり、火災時において、水蒸気圧による爆裂現象を考慮する必要がある。その抑止対策として、コンクリートに有機繊維を混入し、水蒸気圧を抑制する方法が有効であり、実物件にも適応されている。本報では有機繊維を混入した $F_c80 \sim 120\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリート部材を、既存のプレキャスト工場で製作し、その耐火性能の検討を行った。

Key Words: 高強度コンクリート, 耐火性能, 部材強度

1. はじめに

近年、RC 造の建物の高層化が加速し、それに伴い主に低層階の柱などで $F_c80\text{N/mm}^2$ を超えるような高強度コンクリートが用いられるようになった。 $F_c80\text{N/mm}^2$ 以上の高強度コンクリートでは、火災時における部材の耐火性能の確保のため信頼できる資料または実験などにより検討し、対策が必要な場合は適切な措置をとることとされている¹⁾。

火災時にコンクリート部材内部の水蒸気圧を低減させる方法として有機繊維の混入が実用化されている。本実験では、PCa工場で製造する設計基準強度 $80 \sim 120\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリート部材を対象にして、合成繊維を混入したコンクリートのフレッシュ性状ならびに圧縮強度の確認をおこなった。さらに、繊維を混入したコンクリート部材の耐火性能を実験的に検討した。それらの結果を報告する。

2. 実験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。爆裂防止繊維は、ポリプロピレン(以下 PP)とポリビニールアルコール(以下 PVA)の2種類を使用した。既往の文献等から²⁾³⁾、PP の単位混入量は、 1.5kg/m^3 (W/C15%)、 1.0kg/m^3 (W/C19%)、および 0.5kg/m^3 (W/C23%)とし、PVA はいずれの水セメント比でも 3.9kg/m^3 とした。フレッシュコンクリート試験は、練混ぜ完了から 10 分後に行い、スランプフロー $60 \pm 10\text{cm}$ 、空気量 $2.0 \pm 1.0\%$ を目標値とした。

表-1 使用材料

種 類	産 地 ・ 性 質	記 号
セメント	シリカフェームセメント(M 社製): 密度 3.08g/cm^3 , 比表面積 $5600\text{cm}^2/\text{g}$	—
粗骨材	盛岡産砕石: 表乾密度 2.93g/cm^3 , 吸水率 0.39% , FM 6.60, 実績率 59.6%	M
細骨材	浜岡産山砂: 表乾密度 2.62g/cm^3 , 吸水率 1.44% , FM 2.76, 実績率 67.8%	—
混和剤	高性能減水剤(K 社製), 消泡剤(K 社製)	—
繊 維	ポリビニールアルコール (PVA): 繊維径: $100\mu\text{m}$ 、繊維長: 12mm	V
	ポリプロピレン (PP): 繊維径: $18\mu\text{m}$ 、繊維長: 10mm	P



中瀬博一



藤井和俊



鈴木雅博

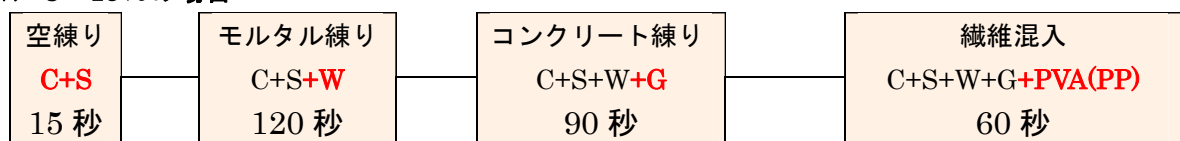
表-2 コンクリートの調合

呼 称	W/C	S/a	単位量(kg/m ³)				繊維(kg/m ³)	
	(%)	(%)	W	C	S	G	PVA	PP
M-23-N	23	47.9	155	674	760	926	-	-
M-23-V	23	47.9	155	674	760	926	3.9	-
M-23-P	23	47.9	155	674	760	926	-	0.5
M-19-N	19	43.6	155	816	640	926	-	-
M-19-V	19	43.6	155	816	640	926	3.9	-
M-19-P	19	43.6	155	816	640	926	-	1.0
M-15-N	15	35.4	155	1033	455	926	-	-
M-15-V	15	35.4	155	1033	455	926	3.9	-
M-15-P	15	35.4	155	1033	455	926	-	1.5

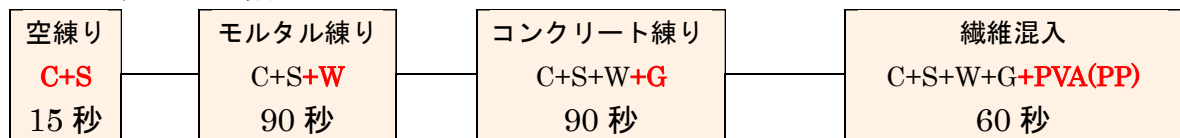
(2) コンクリートの製造

コンクリートの製造は、PCa 工場の実機プラントミキサ(強制2軸型)により1バッチの練混ぜ量を 0.75m³ として行った。プレーンコンクリート練混ぜ後、ミキサに所定量の繊維を投入して 60 秒間練り混ぜた。荷卸し地点でフレッシュ性状を確認後、部材強度試験体および耐火性能確認試験体の打込みを行った。コンクリートの練り混ぜ方法を以下に示す。

W/C=15%の場合



W/C=19, 23%の場合



※ 高性能減水剤、消泡剤は混練水と同時投入とする。

(3) 試験項目

1) フレッシュコンクリートの試験

フレッシュコンクリートの各試験は、荷卸し時(練混ぜから 10 分後)に行うものとする。

表-3 フレッシュコンクリートの試験項目

試 験 項 目	試 験 方 法
スランプフロー値	JIS A 1150 に準拠
フロー到達時間(T ₅₀ , T _{end})	JIS A 1150 に準拠
空 気 量	JIS A 1128 に準拠
コンクリート温度	温度計で測定

2) 硬化コンクリートの試験

硬化コンクリート試験用に各調合及び養生方法毎にφ10×20cm の供試体を採取し、材令7, 28, 56, 91 日で圧縮強度を測定した。φ10×20cm の供試体への打込みは2層に分けて行い、各層 5 回突きとした。簡易断熱養生供試体は材齢7日まで専用の簡易断熱養生箱にて養生を行い、その後は試験材齢まで現場封緘養生とした。図-1 に簡易断熱養生箱の形状を示す。

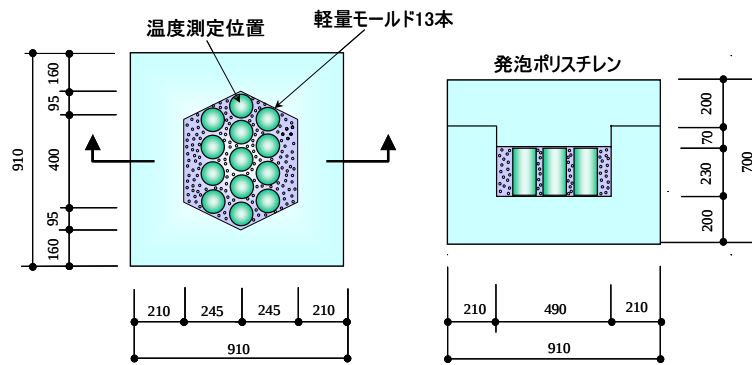


図-1 簡易断熱養生箱

(4) 試験用部材の製造

1) 部材強度試験体

部材強度試験体へのコンクリートの打込みは、フレッシュコンクリート試験の合格確認後直ちに、高周波バイブレータを用いて行った。図-2 に部材強度試験体の形状及びコア採取位置、コンクリート内部温度測定位置を示す。

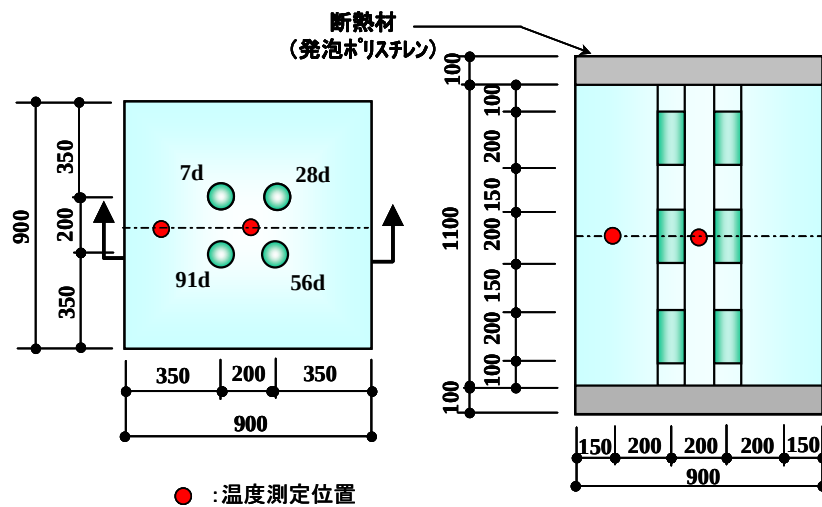


図-2 部材強度試験体

2) 耐火性能確認試験体

耐火性能確認試験体を図-3 に示す。耐火性能確認試験体の片側断面は PC 構造を想定し、シース管を打込み PC 鋼材を挿入後、高粘性型グラウトを注入した。耐火試験時の部材内部温度測定用熱電対は①～⑤の5箇所設置した。

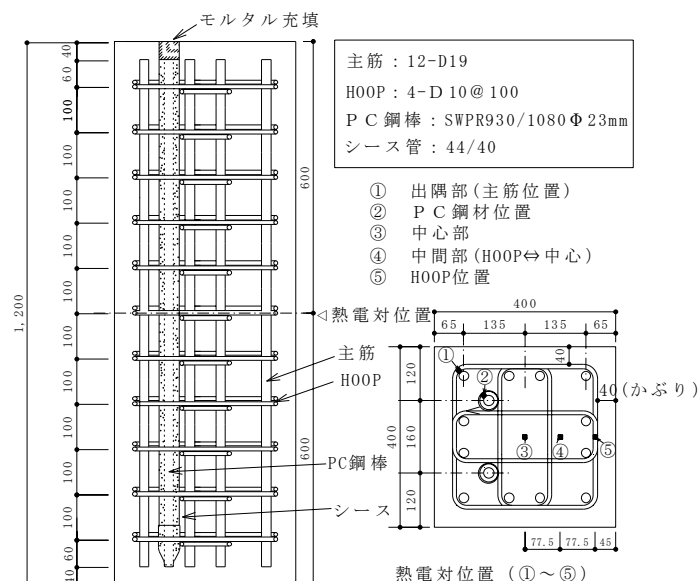


図-3 耐火性能確認試験体

3. 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-4に示す。繊維を混入したコンクリートは、無混入の場合と同様、各調合において目標通りのフレッシュ性状が得られ、骨材分離等は認められなかった。また、繊維混入後のスランプフロー値は繊維混入前と比較し、5～10cm小さくなる傾向が認められた。フレッシュコンクリートの試験状況を写真-1、写真-2に示す。

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

記 号	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	C. T (°C)	フロー時間(秒)	
				50cm	停止
M-23-N	62.0 × 62.0	1.4	25	7.0	43.0
M-23-V	57.0 × 54.5	1.6	25	7.0	33.0
M-23-P	60.0 × 59.0	1.5	25	7.0	42.0
M-19-N	60.0 × 57.0	1.2	25.5	8.0	37.0
M-19-V	65.0 × 62.0	1.4	25	6.0	49.0
M-19-P	57.0 × 56.5	1.3	26	12.0	46.0
M-15-N	65.0 × 67.0	1.8	20	9.0	99.0
M-15-V	62.0 × 63.0	1.2	22	14.0	77.0
M-15-P	63.0 × 61.0	1.2	22	14.0	82.0

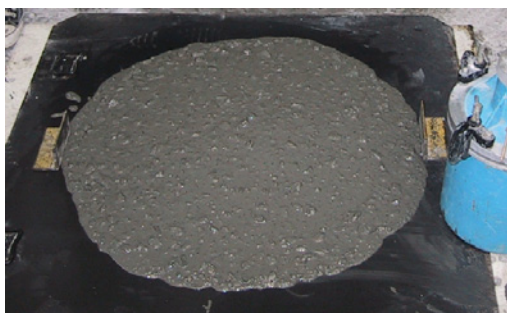


写真-1 繊維無混入



写真-2 PP 繊維混入

(2) 部材内部温度

コンクリートの練り上がり後の経過時間と部材内部温度の関係を図-4～図-6に示す。低熱系セメントをベースにしたシリカフェウム混合セメントを用いたため、部材中心部の最高温度は 60～70℃となり、低水セメント比の割に低い値に留まった。また、いずれの水セメント比においても、部材中心部と簡易断熱養生の最高温度の差は 10℃以内であった。有機繊維の混入の有無および繊維の種類が部材内部温度に与える影響は、顕著には認められなかった。また、水セメント比が 15%の場合の最高温度が、水セメント比が 19%の場合を下回った。これは水セメント比 15%のコンクリート混練時、および最高温度に達するまでの外気温が水セメント比が 19%混練時と比べて 5～7℃低かったことが原因と考えられる。

(3) 強度発現性

コンクリートの材齢と標準養生供試体強度、簡易断熱供試体強度およびコア強度の関係を図-7に示す。水セメント比 15%の材齢 91 日強度は、繊維混入の有無および繊維の種類にかかわらず、標準養生で 170N/mm²、簡易断熱養生で 155N/mm²、コア強度では 150N/mm²以上が得られた。簡易断熱養生供試体では、初期材齢での強度発現性が良好であり、水セメント比 15%のコンクリートでは材齢 7 日圧縮強度で 150N/mm²が得られた。材齢 91 日までの強度増進はいずれの水セメント比においても 10N/mm²以内に留まった。

材齢 7 日から 91 日におけるコア強度の伸びは、いずれの水セメント比においても 10～20N/mm²を示した。また、繊維の有無および繊維の種類が強度に及ぼす影響は小さかった。

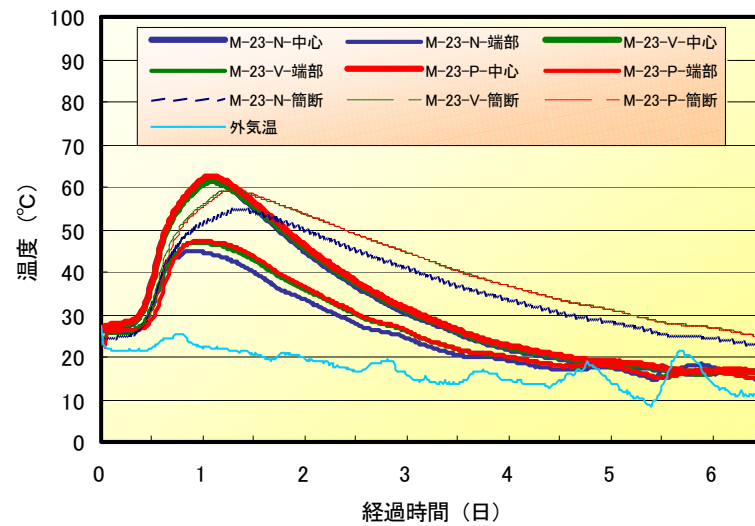


図-4 経過時間と部材コンクリート温度 (W/C=23%)

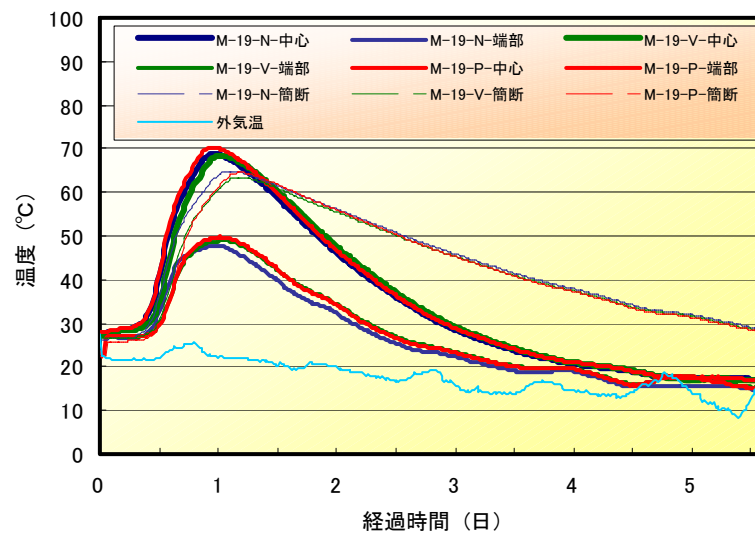


図-5 経過時間と部材コンクリート温度 (W/C=19%)

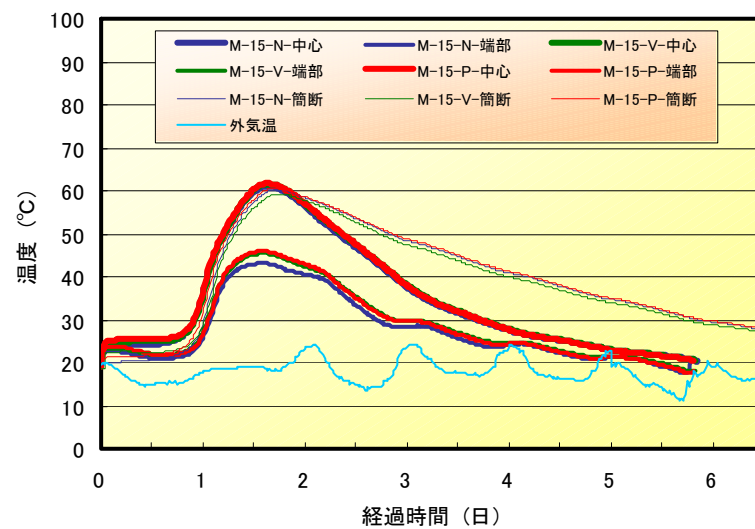


図-6 経過時間と部材コンクリート温度 (W/C=15%)

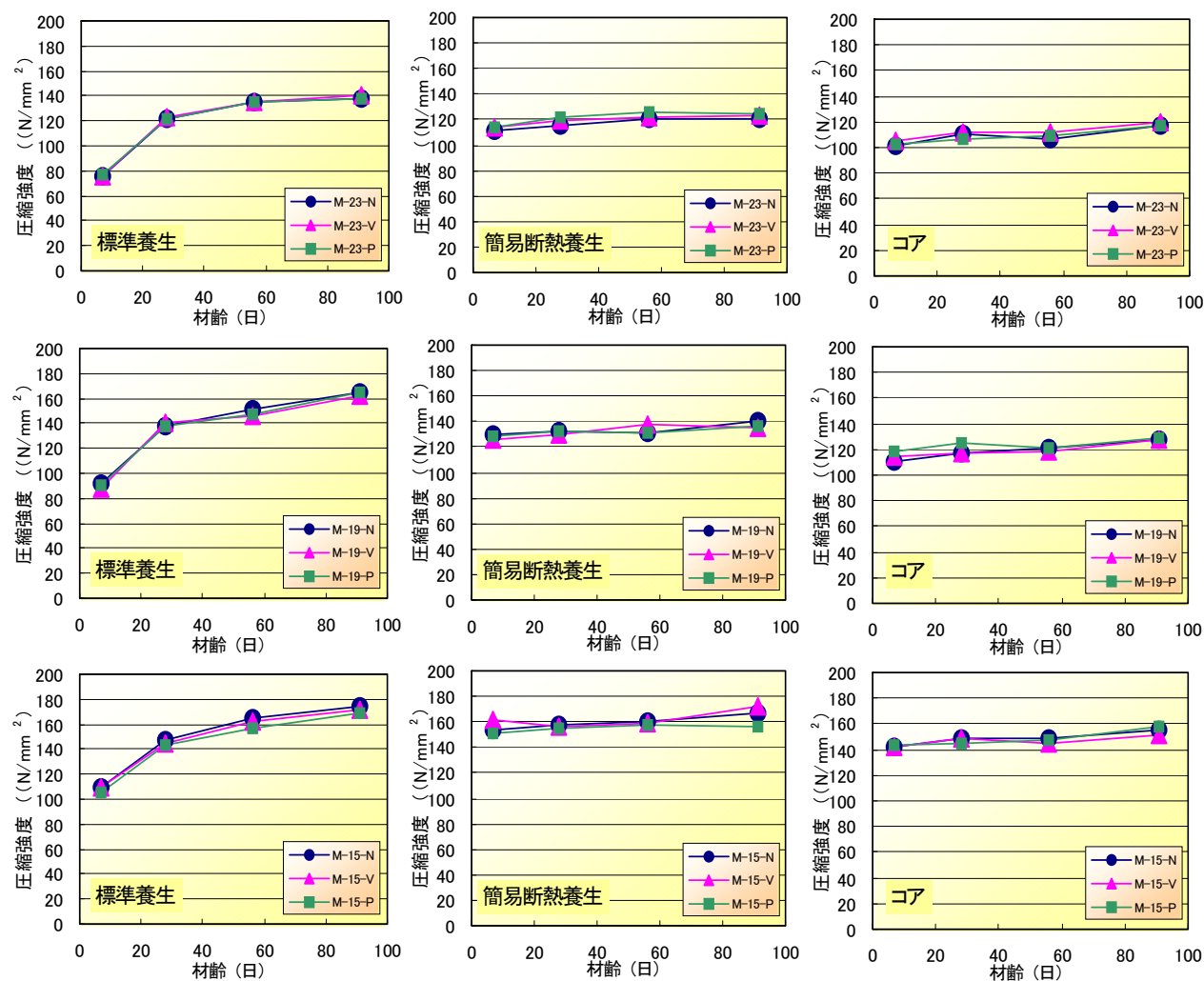


図-7 材齢と圧縮強度の関係

(4) 耐火性能試験

耐火試験は打込みから5ヶ月の乾燥期間を置いた後、ISO-834「建築構造部材の耐火試験方法」に規定される標準加熱温度曲線に従って実施した。温度測定は図-3 に示す①～⑤の位置で示す鉄筋温度・PC 鋼材温度およびコンクリートの内部温度とし、併せて炉内温度の測定も行った。写真-3 に耐火性能試験体のコンクリート打ち込み前状況を、写真-4 に耐火性能試験体のコンクリート打ち込み状況を示す。また、図-8 に耐火炉内の配置図を、写真-5 に実験に用いた耐火炉の状況を、写真-6 に耐火試験後の炉内状況を示す。

1) 爆裂状況

耐火試験後の試験体の状況を、写真-7～写真-15 に示す。繊維を混入しない試験体および、PVA 繊維を混入した試験体は加熱開始後7分程度で爆裂が始まり、加熱から 30 分で水セメント比 15～23%の繊維を混入しない試験体および、水セメント比 15%の PVA 繊維を混入した試験体は鉄筋が露出、35 分程度まで爆裂が継続し、HOOP 筋まで露出する結果となった。爆裂の状況が極めて甚しかった繊維を混入しない試験体の耐火試験では、爆裂に伴うコンクリート片が炎の噴出し口を塞ぎ、耐火試験設備を損傷する恐れが生じたため、水セメント比 23%では 1 時間後、水セメント比 19, 15%では 30 分後に加熱をストップする結果となった。水セメント比 19, 23%の PVA 繊維を混入した試験体は、鉄筋の露出にまでは至らなかったが、激しい爆裂が認められた。PP 繊維を混入した各試験体は、いずれの場合も 3 時簡の耐火試験終了まで爆裂を防止できたことを確認した。

2) 温度測定結果

図-9～図-11 に各耐火試験時の炉内温度、耐火試験体内部の鉄筋温度、PC 鋼材温度、およびコンクリートの内部温度の測定結果を示す。

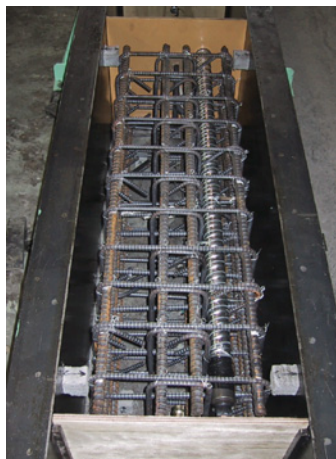


写真-3 打込み前状況



写真-4 打込み状況



写真-5 炉内状況(実験前)



写真-6 炉内状況(実験後)

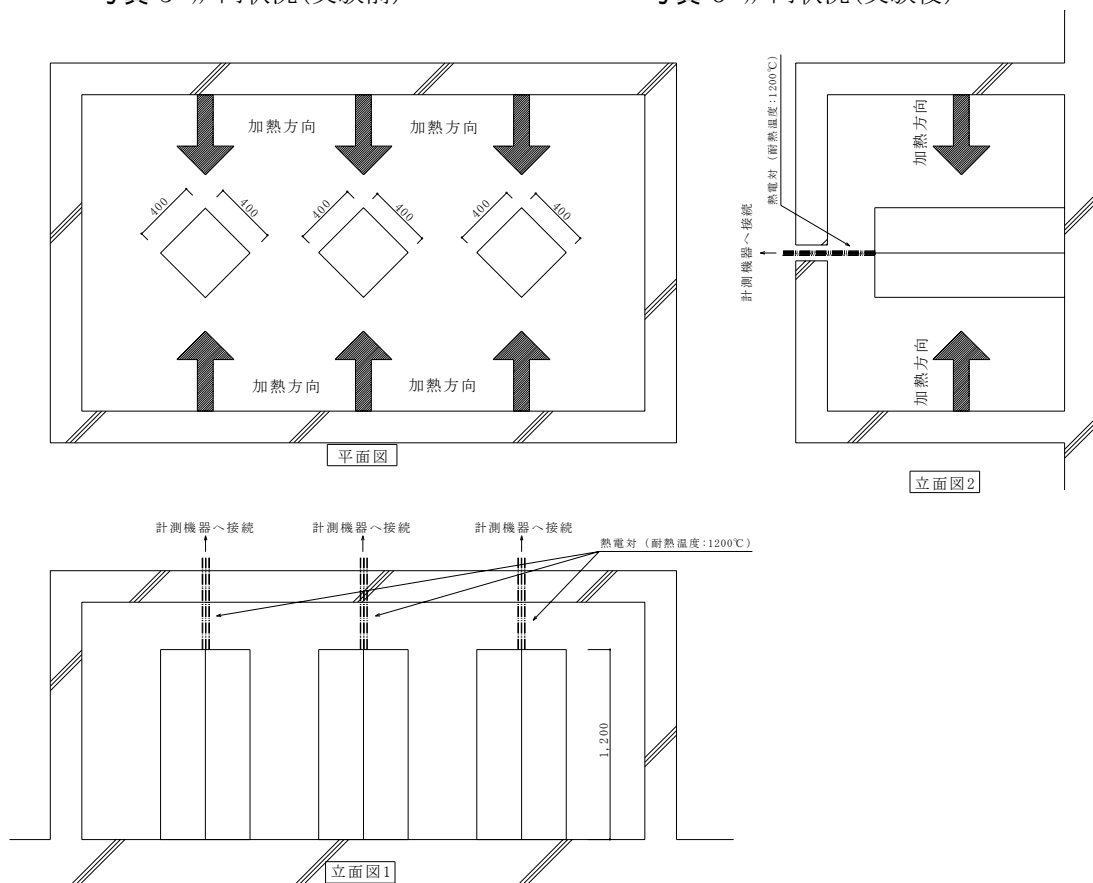


図-8 耐火炉内配置図



写真-7 加熱後状況(M-23-N)



写真-8 加熱後状況(M-23-V)



写真-9 加熱後状況(M-23-P)



写真-10 加熱後状況(M-19-N)



写真-11 加熱後状況(M-19-V)



写真-12 加熱後状況(M-19-P)



写真-13 加熱後状況(M-15-N)



写真-14 加熱後状況(M-15-V)



写真-15 加熱後状況(M-15-P)

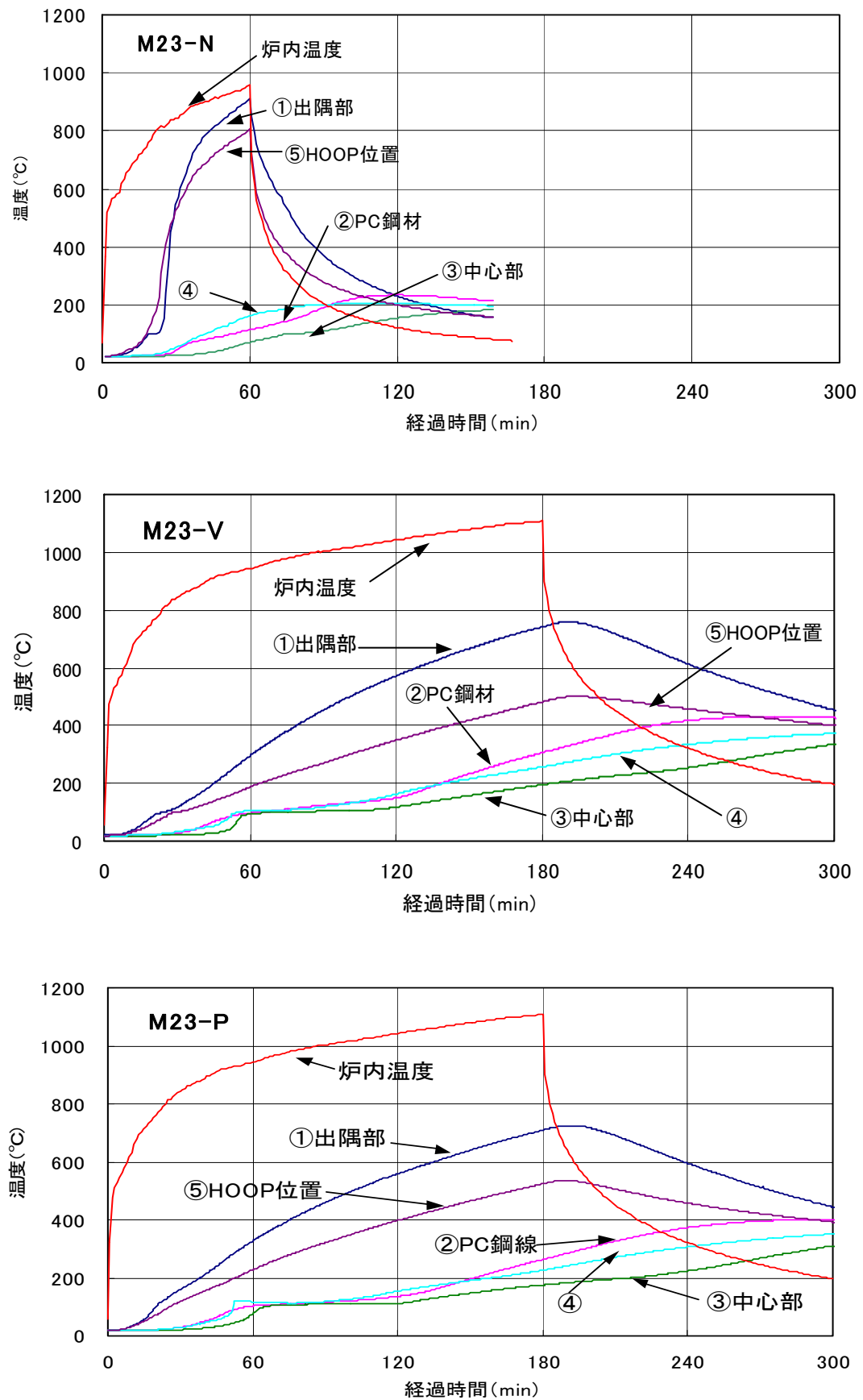


図-9 加熱時間と部材内部温度(W/C=23%)

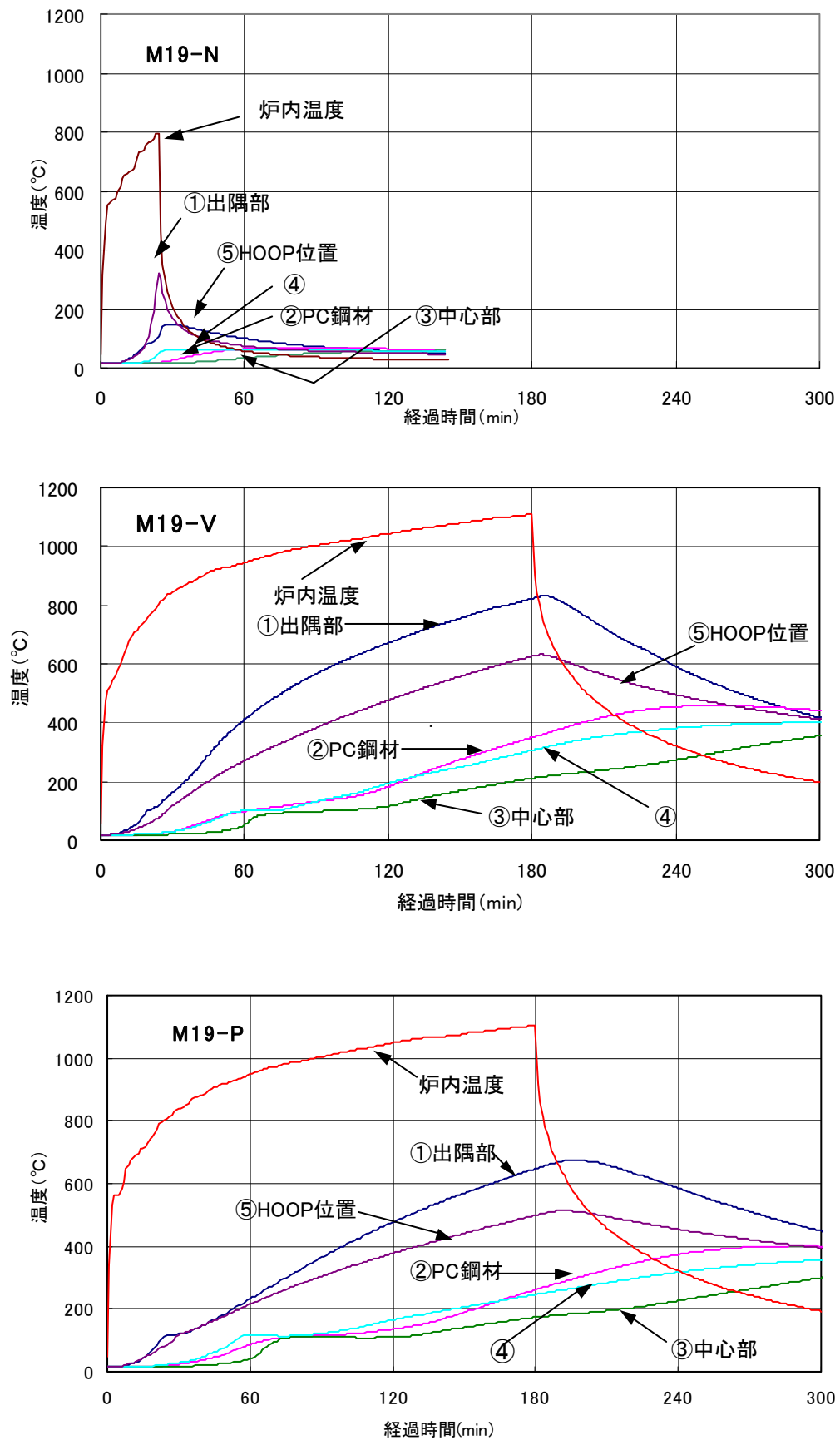


図-10 加熱時間と部材内部温度(W/C=19%)

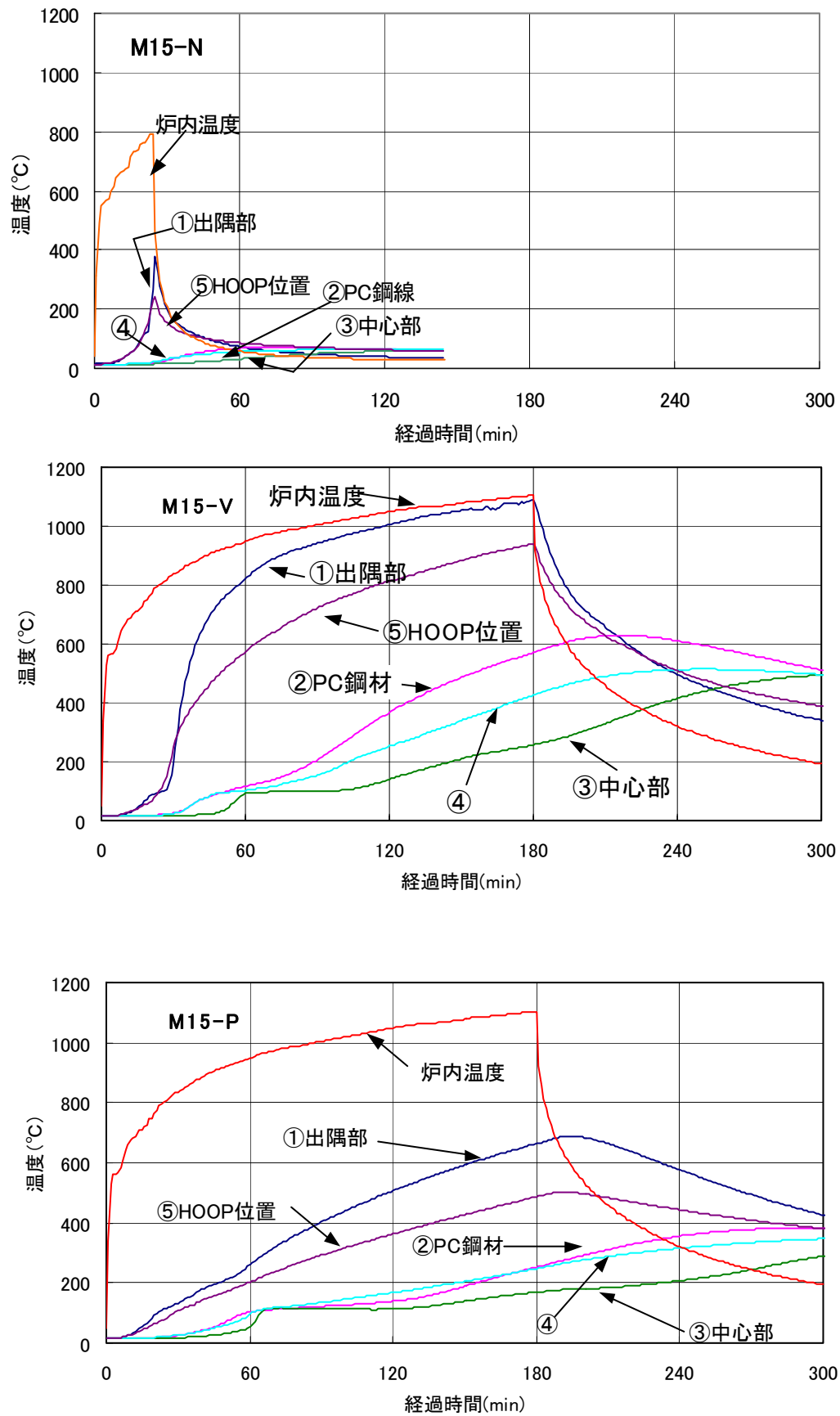


図-11 加熱時間と部材内部温度 (W/C=15%)

鉄筋温度(図中①, ⑤)は、繊維を混入しない場合および、PVA 繊維を混入した場合は、爆裂による断面欠損が生じたため、加熱開始後、約 30 分から急激に上昇した。一方、PP 繊維を混入した各試験体では、爆裂は認められず、鉄筋の温度上昇が緩やかであり、加熱3時間後での鉄筋温度を概ね 500℃以下に抑えることができた。

PP 繊維を混入した高強度プレキャストコンクリート部材では、いずれの水セメント比の場合も、ISO-834「建築構造部材の耐火試験方法」に規定される標準加熱温度曲線に従って実施した耐火試験において PC 鋼材の最高温度は 400℃以下であることを確認できた。

コンクリートの中心部温度は繊維の混入、無混入にかかわらず、各試験体とも加熱開始後の温度上昇は極めて緩やかであった。

4. まとめ

有機繊維を混入した設計基準強度 80~120N/mm² の高強度コンクリート部材をプレキャストコンクリート工場で既存の設備を用いて製造した場合、製造上必要な流動性および、設計基準強度を満足するために十分な部材強度が得られることが確認できた。また、PP 繊維を強度レベルに応じて適量混入することで、高強度プレキャストコンクリート部材の火災時における爆裂を防止できることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会:高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, pp.5, 2005.1
- 2) 百瀬晴基・桜本文敏・柳田克巳:ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度 150N/mm² の超高強度コンクリートの耐久性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.995-1000, 2003
- 3) 三井健郎・米澤敏男・藤中英生・古平章夫・辻代二郎: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, pp.199-200, 2003.9