

論文 超高強度繊維補強コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造柱の耐火性に関する実験的検討

森田 武*1・菊地 俊文*2・戸澤 正美*4・奥山 孝之*3

要旨：設計基準強度 120～150N/mm² 相当の超高強度繊維補強コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造柱の火災加熱中および加熱後の荷重支持能力を把握することを目的として、柱の載荷加熱実験を実施した。また、予備的な検討として、部材レベルと供試体レベルの爆裂性状を比較するため、供試体の爆裂試験を実施した。実験の結果、鉄筋コンクリート造柱は 3 時間の加熱中および加熱後において荷重支持能力を維持することが確認された。また、部材レベルと供試体レベルのいずれにおいても顕著な爆裂は見られず、両者の爆裂性状に大きな差異はなかった。

キーワード：鉄筋コンクリート造柱, 超高強度コンクリート, 鋼繊維補強, 合成繊維, 耐火性, 爆裂

1. はじめに

設計基準強度 (以下, F_c) が 60N/mm² を超える高強度・超高強度コンクリートは、火災時に爆裂する可能性が高いことが一般的に知られており、爆裂防止のため、コンクリートに合成繊維を混入する技術¹⁾が広く適用されるに至っている。爆裂はコンクリートの強度が高いほど生じやすい傾向があることから、 F_c 120N/mm² を超えるような超高強度コンクリートでは、合成繊維に加えて鋼繊維を混入する技術の開発が行われ^{例え ば 2)~4)}、実際の建築物にも適用されている例もある⁵⁾。

一方、合成繊維と鋼繊維の双方を混入した超高強度コンクリート (以下、超高強度繊維補強コンクリート) を使用した鉄筋コンクリート造柱の耐火性に関する既往の実験的検討^{例え ば 2)~4)}では、載荷加熱実験を行い、柱が荷重支持能力を失って崩壊した時点あるいは所定の加熱時間を経過した時点で実験を終了している。このため、所定の加熱が終了した後の荷重支持能力についての知見がほとんど得られていないのが現状である。なお、鋼繊維を混入していない超高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造柱については、加熱終了後の冷却期間に柱が荷重支持能力を失い崩壊した例が報告されている⁶⁾。

そこで、本検討では、設計基準強度 120～150N/mm² 相当の超高強度繊維補強コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造柱の火災加熱中および加熱後の荷重支持能力を把握することを目的として、柱の載荷加熱実験を実施した。また、予備的な検討として、部材レベルと供試体レベルの爆裂性状を比較するため、供試体の爆裂試験を実施した。載荷加熱実験および爆裂試験では、コンクリートの水結合材比、粗骨材かさ容積、鋼繊維混入量、爆

裂防止用の合成繊維混入量を実験パラメータとした。

2. 試験体

2.1 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートの使用材料を表-1 に示す。セメントはシリカフェューム混入低熱ポルトランドセメントであり、混入した繊維は、PA 繊維と鋼繊維の 2 種類である。

(2) 柱試験体の鉄筋

主筋には JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」の D19 (SD490) を用い、せん断補強筋には JIS G 3137「細径異形 PC 鋼棒」の SBPD 1275/1420 の規格に準拠した U7.1 (ウルボン 1275, 高周波熱錬 (株)) を用いた。

2.2 コンクリートの調合および力学特性

試験体に用いたコンクリートの調合および力学特性を表-2 に示す。調合は、水結合材比 17% (F_c 120N/mm² 相当) および 13% (F_c 150N/mm² 相当) の各々で 4 種類、合計 8 種類である。粗骨材かさ容積は 300, 500L/m³ の 2

表-1 コンクリートの主な使用材料

材料	仕様
セメント (C)	シリカフェュームセメント 密度: 3.08g/cm ³
細骨材 (S)	硬質砂岩砕砂 (茨城県桜川市飯渕産), 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 0.76%
粗骨材 (G)	硬質砂岩砕石 2005 (茨城県桜川市飯渕産), 表乾密度: 2.66g/cm ³ , 吸水率: 0.60%, 実積率: 59.8%
化学混和材 (Ad)	1)高性能減水剤 (ポリカルボン酸ポリエーテル系), 2)空気量調整剤
合成繊維 (PA)	PA 繊維, 密度: 1.41 g/cm ³ , 繊維径: 40 μ m, 繊維長: 10mm
鋼繊維 (MF)	端部フック付き, 密度: 7.85 g/cm ³ , 繊維長: 30 mm, 繊維径: 0.62mm

*1 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター 防耐火グループ長 博士 (工学) (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター 研究員 (正会員)

*3 清水建設 (株) 建築総本部 設計本部 主査

*4 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター

表-2 コンクリートの調査・力学特性・含水率

調合名	W/C (%)	粗骨材 かさ 容積 (L/m³)	単位量※ ¹ (kg/m³)						Ad1 (C ×%)	Ad2 (Ad1 ×%)	試験 体	実験 材齢 (日)	圧縮強度※ ² (N/mm²)		ヤング 係数※ ¹ (kN/mm²)	含水率※ ³ (%)	水分率 (%)
			W	C	S	G	PA	MF					28 日	実験時			
17-500-0	17.0	500	155	912	607	795	3.1	0	1.50	1.0	柱	151	146.5	155.3	45.6	3.80 (231)	4.9
							0.22	0			爆裂	221		157.5	47.0	3.59 (154)	
17-500-05	17.0	500	155	912	607	795	3.1	40	1.55	1.0	柱	153	155.8	154.7	46.9	3.47 (208)	5.6
							0.22	0.5			爆裂	215		159.2	47.8	3.22 (154)	
17-300-05	17.0	300	155	912	923	477	3.1	40	1.65	1.0	柱	157	148.7	160.0	45.1	3.78 (208)	5.4
							0.22	0.5			爆裂	214		164.2	46.0	3.64 (148)	
17-300-10	17.0	300	155	912	923	477	3.1	80	1.85	1.0	柱	182	153.5	164.7	45.7	3.44 (174)	5.9
							0.22	1.0			爆裂	208		168.0	46.6	3.32 (148)	
13-500-0	13.0	500	155	1192	367	795	3.9	0	1.85	1.0	柱	181	154.6	175.8	48.4	3.35 (167)	4.7
							0.28	0			爆裂	216		186.6	49.3	3.10 (132)	
13-500-05	13.0	500	155	1192	367	795	3.9	40	1.95	1.0	柱	183	160.3	177.1	48.9	3.25 (160)	5.0
							0.28	0.5			爆裂	211		186.7	49.8	2.97 (132)	
13-300-05	13.0	300	155	1192	683	477	3.9	40	2.10	1.0	柱	177	167.5	186.1	49.7	2.61 (153)	5.0
							0.28	0.5			爆裂	203		186.5	50.1	2.65 (127)	
13-300-10	13.0	300	155	1192	683	477	3.9	80	2.20	1.0	柱	181	163.9	183.7	48.4	2.69 (146)	5.0
							0.28	1.0			爆裂	200		180.5	50.6	2.70 (127)	

※1 PA・MF の下段の数値は、コンクリートの体積に対する外割の体積混入率 (vol%)。

※2 28 日圧縮強度は標準養生供試体 (φ10×20cm) 3 体の平均。実験時圧縮強度・ヤング係数は現場封かん養生供試体 (φ10×20cm) 3 体の平均。

※3 現場封かん養生供試体 (φ10×20cm) 3 体の乾燥前質量 (W_w) と 105℃乾燥後質量 (W_d) から、式 [含水率 (%) = (W_w - W_d) / W_d × 100] に
より求めた値の平均。表中の()内の数字は 105℃での乾燥日数。

水準、鋼繊維混入率は 0, 0.5, 1.0vol% の 3 水準とした。
PA 繊維混入率は水結合材比 17, 13% に対して各々 0.22, 0.28vol% とした。載荷加熱実験時および爆裂試験時の圧縮強度は、水結合材比 17% で 155.3~168.0N/mm² であり、13% で 175.8~186.7N/mm² であった。含水率は、実験実施期間が長期に渡ったため、乾燥日数が柱試験体用供試体で 146~231 日、爆裂試験用供試体で 127~154 日の範囲となった。水分率は、コンクリート・モルタル水分計 (高周波容量式 (HI-520, ケット科学研究所)) を用いて、柱試験体の 4 側面の各中央で 1 箇所ずつ実験直前に測定した値の平均であり、4.7~5.9% の範囲であった。

2.3 試験体の種類・形状・寸法および養生方法

(1) 柱試験体

柱試験体は、表-2 に示したコンクリートの各調査につき 1 体を製作し、8 種類 8 体とした。試験体の形状・寸法および温度測定位置を図-1 示す。建設省告示第 1399 号「耐火構造の構造方法を定める件」によれば、3 時間耐火に適合する鉄筋コンクリート造柱の小径は 40cm 以上とされている。このことから、試験体の断面は、400×400mm とし、帯筋に対するかぶり厚さは 40mm とした。試験体の高さは実験装置に合わせて 3500mm (有効加熱長さ 2875mm) とした。主筋は 12-D19 (SD490, 降伏点: 549N/mm², 引張強さ: 728 N/mm², 主筋比: 2.15%),

帯筋は U7.1@100 (0.2% オフセット耐力: 1433N/mm², 引張強さ: 1488N/mm², 帯筋比: 0.40%) とした。試験体の内部温度の測定には K 熱電対 (素線径 0.65mm) を用いた。柱試験体の養生は、コンクリート打設後 3~6 日に脱型した後、温湿度非制御の屋内で気中養生とした。

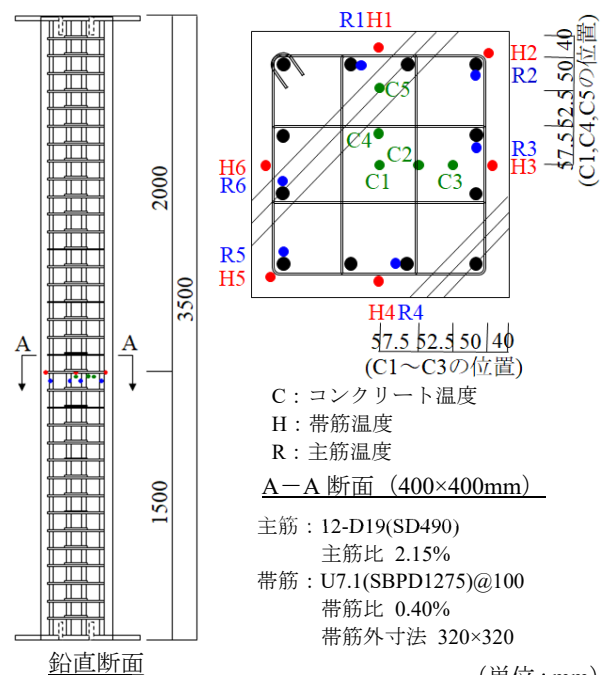


図-1 柱試験体

(2) 爆裂試験用供試体

爆裂試験用供試体は、柱試験体の製作と同時に、表-2に示したコンクリートの各調合につき3体を製作した。供試体の形状・寸法は、JCI 規準「コンクリートの爆裂試験方法」⁷⁾の「B 法：一軸拘束供試体」に則り、異形棒鋼 D19(SD345)を軸方向に内包した 10×10×40cm の角柱供試体とした。供試体の養生は、柱試験体と同時に脱型した後、柱と同一の場所で封かん養生とした。

3. 実験方法

3.1 柱の荷重加熱実験

(1) 荷重方法

実験装置を図-2 に示す。実験装置は加熱炉と載荷フレームで構成される。試験体の上下端には球座を設置し、柱試験体上部に設置されたジャッキによって中心軸圧縮力を作用させた。中心軸圧縮力の大きさは、耐火実験時のコンクリートの圧縮強度と部材断面積の積に対して軸力比を乗じた値とした。軸力比は、実験装置の載荷能力を考慮して、水結合材比 17%の試験体で 0.33、13%の試験体で 0.30 とした。試験体への荷重は加熱に先立って行い、3 時間の加熱中および加熱終了後 9 時間（加熱時間の 3 倍）が経過するまで荷重を一定に維持した。

加熱終了後 9 時間が経過した時点で中心軸圧縮力を除荷し、その約 12 時間後に所定の軸力まで再度載荷して

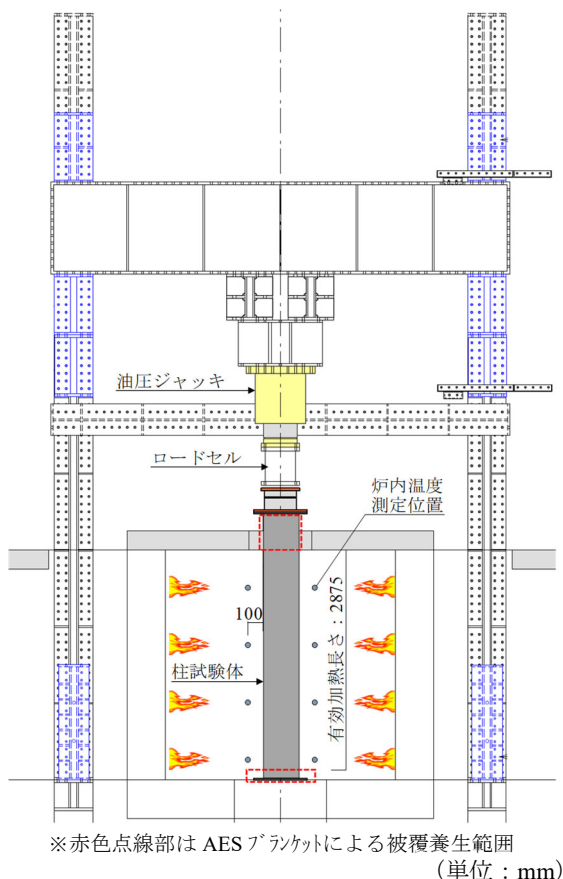


図-2 柱の荷重加熱実験装置

柱の荷重支持能力と剛性を確認した。

(2) 加熱方法

加熱は JIS A 1304「建築構造部分の耐火試験方法」⁸⁾に規定される標準加熱曲線 A（ISO834-1 と同等）による 3 時間加熱とし、加熱終了後は試験体を炉内に設置した状態を維持して約 21 時間徐冷した。

3.2 爆裂試験

実験装置を図-3 に示す。実験装置は垂直加熱炉であり、爆裂試験用供試体の一側面（コンクリート打設時に型枠底面に接していた面）が加熱バーナーに正対するように試験体の長辺方向を鉛直に立てて設置した。バーナーと反対側の試験体面と炉壁の間には約 20cm の離隔距離を設けた。JCI 規準⁷⁾では加熱曲線 1（JIS⁸⁾に規定される標準加熱曲線 A）による 30 分加熱が規定されているが、本検討では標準加熱曲線 A による 1 時間加熱とし、加熱終了後は供試体を炉内に設置した状態で 3 時間徐冷した。

4. 実験結果

4.1 柱の荷重加熱実験

(1) 概要

実験時のコンクリートの材齢は、水結合材比 17%で 151~182 日、13%で 177~183 日であった。載荷加熱実験後の各試験体の状況を写真-1 に示す。各試験体は加熱中および加熱後ともに荷重支持能力を維持した。試験体 17-500-0 では 1 箇所では軽微な爆裂（平均深さ 11mm、最大深さ 17mm）が生じ、試験体 17-500-05 および 17-300-10 では各 1 箇所では軽微な表層剥離が生じたが、構造耐力に影響するものではなかった。他の 5 体の試験体では爆裂および表層剥離は生じなかった。

(2) 温度性状

水結合材比 17、13%の各試験体に関して測定した炉内温度、側面部主筋（R1,R3,R4,R6）平均温度、隅角部主筋（R2,R5）平均温度、深さ 90mm（C3,C5）と断面中心のコンクリート温度（C1）の経時変化を図-4(a)、(b)お

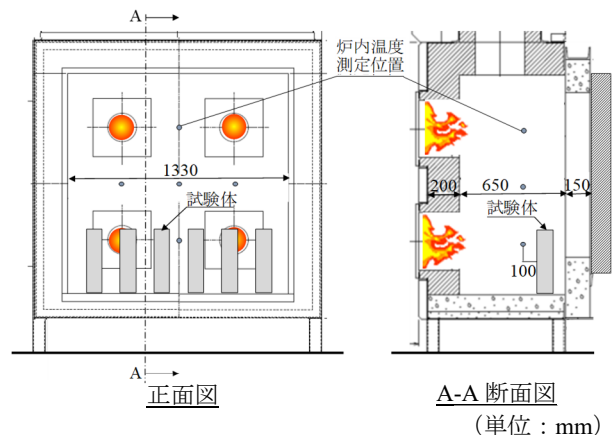
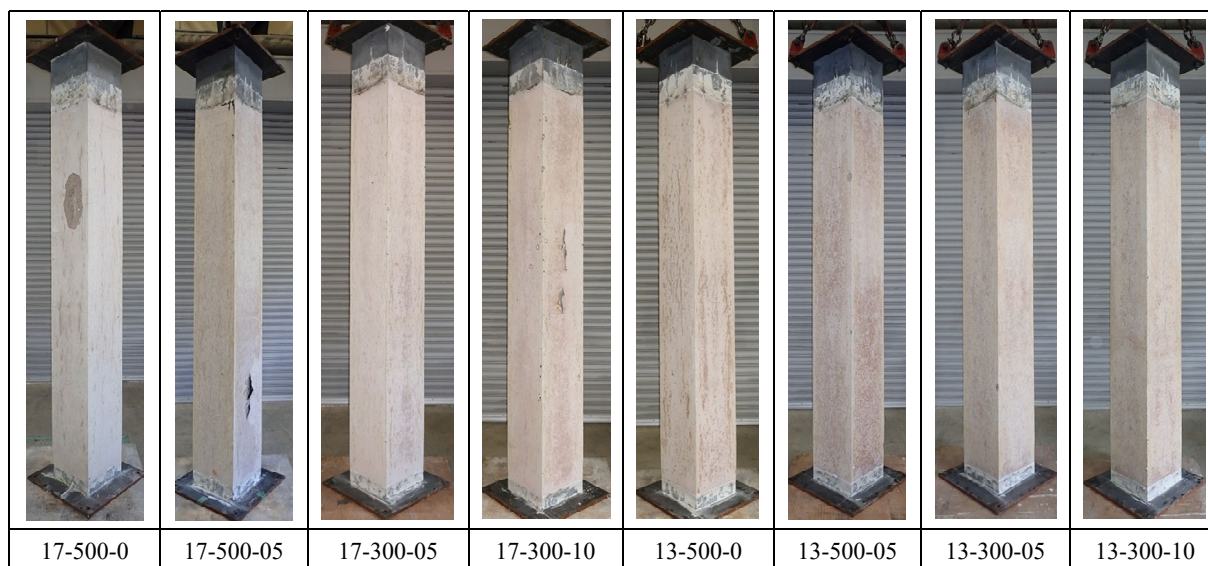


図-3 爆裂試験の実験装置（垂直炉）



写真－1 載荷加熱実験後の試験体の状況

よび図－5(a), (b)に示す。

・主筋温度：水結合材比 17%の場合，17-500-0 の側面部主筋温度が他の試験体よりも若干低くなったが，それ以外の温度に関しては，側面部・隅角部ともに各試験体間の差異は小さい。一方，水結合材比 13%の場合，側面部主筋の最高温度は 13-500-0<13-500-05<13-300-05<13-300-10 の大小関係に，隅角部主筋の最高温度は 13-500-0<13-500-05<13-300-05≒13-300-10 の関係になった。水結合材比 17%では明瞭ではないが，水結合材比 13%では，鋼繊維混入量が多く，粗骨材かさ容積の小さい方が主筋温度は高くなる傾向があるものと考えられる。

・コンクリート温度：水結合材比 17，13%の深さ 90mm および断面中心の最高温度を同粗骨材かさ容積ごとに比較すると，いずれも 17-500-0<17-500-05，17-300-05<17-300-10，13-500-0<13-500-05，13-300-05<13-300-10 の大小関係になっている。このことから，鋼繊維混入量が多い方がコンクリートの熱伝導率は高くなるものと言える。また，鋼繊維混入量が同等な 17-500-05 と 17-300-05，および 13-500-05 と 13-300-05 の同位置における最高温度を比較すると，水結合材比 17%の場合は粗骨材かさ容積の大きい方が高く，水結合材比 13%の場合は粗骨材かさ容積の小さい方が高くなっている。水セメント比 50～60%程度の普通強度レベルの熱伝導率は，セメントペースト<モルタル<コンクリートの大小関係があることが示されており⁹⁾，普通強度レベルでは粗骨材量が多いほどコンクリートの熱伝導率が高くなる。しかし，本検討の結果から，水結合材比が 13%程度になると，前記の関係が異なってくる可能性のあることが示唆される。

(5) 変位挙動

水結合材比 17，13%の各試験体に関して測定した軸方向変位の経時変化を図－4(c)および図－5(c)に示す。図

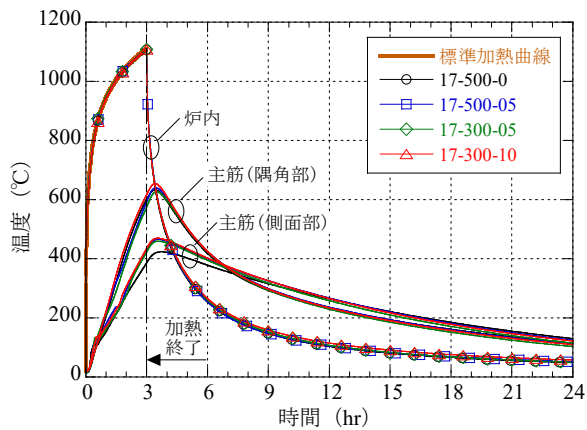
から，水結合材比 17%における収縮変位は，17-500-0<17-500-05<17-300-05<17-300-10 の関係になっている。同粗骨材かさ容積では鋼繊維混入量の多い方が，同鋼繊維混入量では粗骨材かさ容積の小さい方が収縮変位は大きくなる傾向があると言える。一方，水結合材比 13%における収縮変位は，13-500-0≒13-500-05<13-300-05<13-300-10 の関係になっている。この関係から粗骨材かさ容積の小さい方が収縮変位は大きくなる傾向があると言える。また，粗骨材かさ容積が 500L/m³では，鋼繊維混入量の違いによる大きな差異は見られないが，粗骨材かさ容積が 300L/m³では鋼繊維混入量の大きい方が収縮変位は大きい。

以上の結果は，1) 高温になるほどコンクリートの圧縮強度やヤング係数が低下するという性質⁹⁾に対して，鋼繊維混入量が大きいとコンクリートの熱伝導率が高くなり，部材内部温度上昇も高くなること，2) 鋼繊維の混入により熱膨張が拘束されて，収縮ひずみが大きくなる傾向があること⁹⁾，3) 富調合なコンクリートほど高温時における収縮ひずみが大きくなる傾向があること⁹⁾などが寄与していることを示しているものと考えられる。

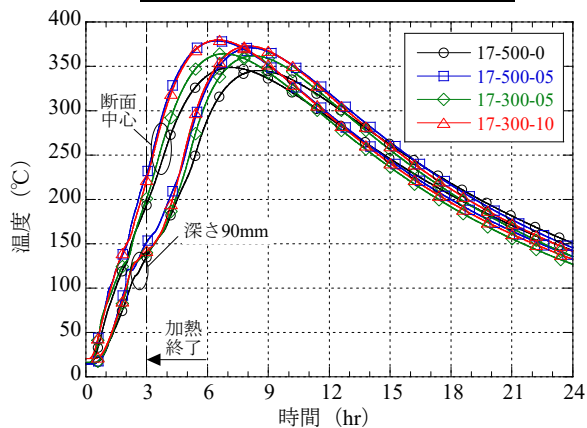
(6) 残存特性

加熱実験前の初期載荷時および加熱後の再載荷時における中心軸圧力と軸方向変位の関係を図－4(d)および図－5(d)に示す。図には，各々の試験体の中心軸圧力－軸方向変位関係を線形回帰した場合の回帰直線の傾き（軸剛性）を併せて示した。再載荷時の試験体内部温度は，図－4(a)，(b)および図－5(a)，(b)から，概ね 150℃程度であったと言える。

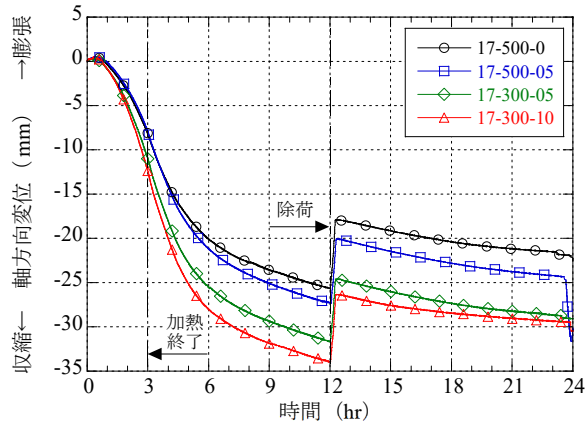
図－4(d)および図－5(d)から，初期載荷時と再載荷時では明らかに軸剛性が低下している。初期剛性に対する再載荷時の剛性は，水結合材比 17%では 58～61%（平均



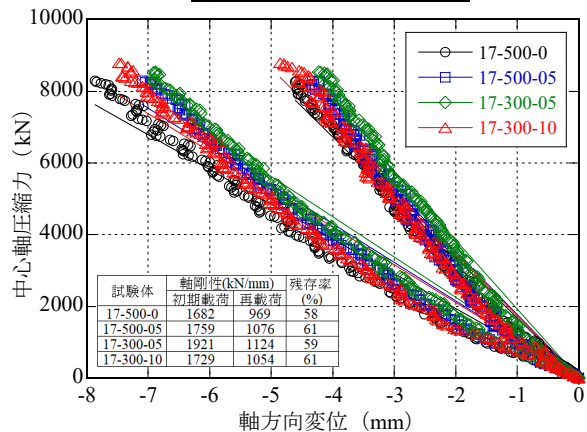
(a) 炉内温度・主筋温度の経時変化



(b) コンクリート温度の経時変化

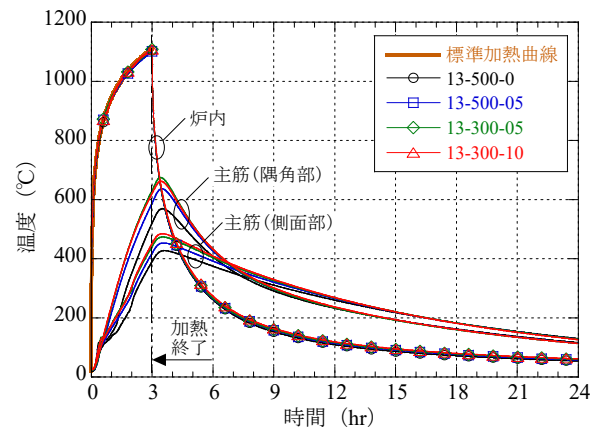


(c) 軸方向変位の経時変化

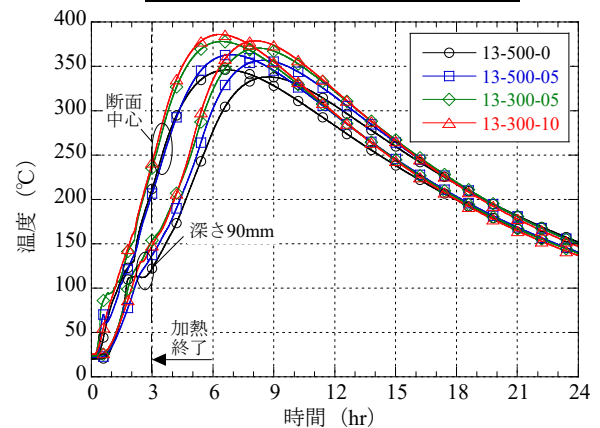


(d) 中心軸圧縮力－軸方向変位関係

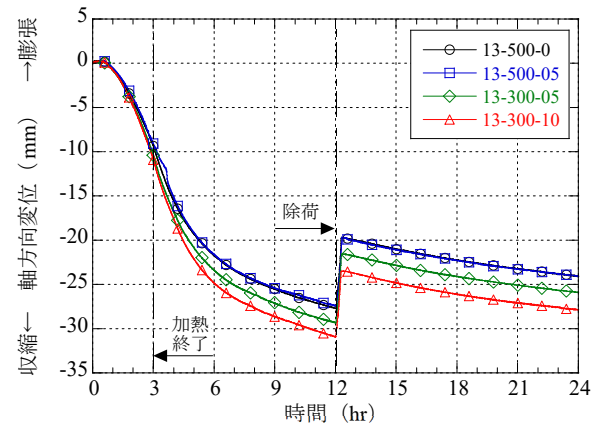
図－4 柱の載荷加熱実験結果（水結合材比 17%）



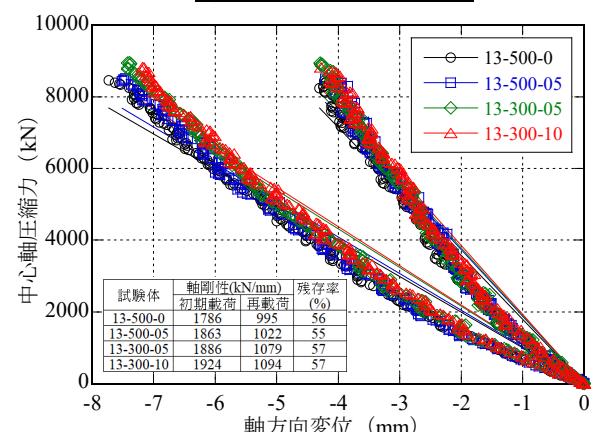
(a) 炉内温度・主筋温度の経時変化



(b) コンクリート温度の経時変化



(c) 軸方向変位の経時変化



(d) 中心軸圧縮力－軸方向変位関係

図－5 柱の載荷加熱実験結果（水結合材比 13%）

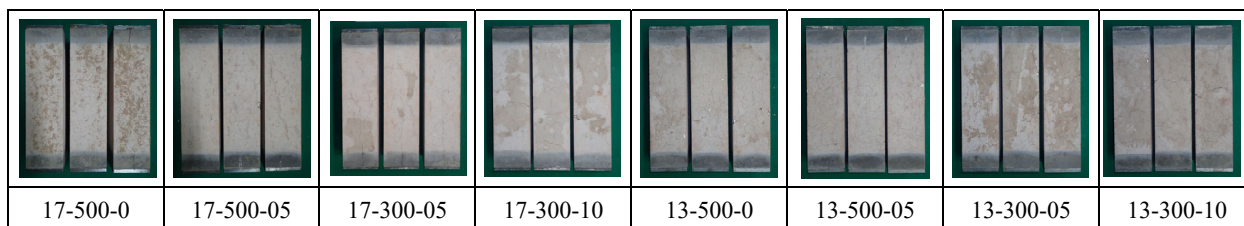


写真-2 爆裂試験後の試験体の状況

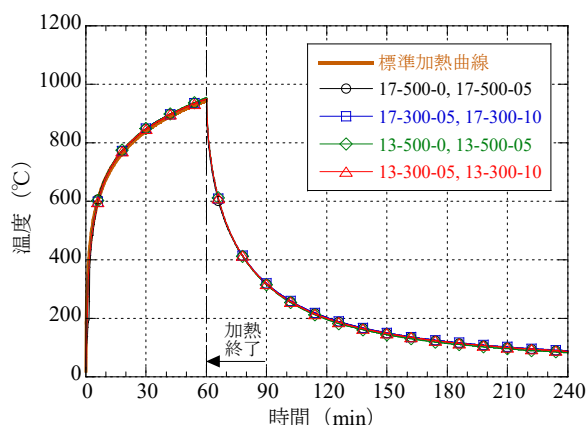


図-6 爆裂試験における炉内温度の経時変化

60%) まで、水結合材比 13%では 55～57% (平均 56%) まで低下した。これらの結果から、水結合材比の低い方が軸剛性の低下は大きいことが示唆される。

4.2 爆裂試験

爆裂試験は、1 回の試験で 2 種類の調合の供試体を加熱して行った。JCI 規⁷⁾準では、爆裂試験は材齢 91 日で実施することになっているが、本検討では材齢 200～221 日に実施した。試験時における炉内平均温度を図-6 に示し、爆裂試験後の供試体の状況を写真-2 に示す。写真では表面にあばた状の模様が見られるが、これは供試体表面の変色によるものであり、いずれの調合においても爆裂は発生しなかった。柱試験体においても 17-500-0 で軽微な爆裂 (表層剥離) が 1 箇所で見られただけであることから、本検討では、柱試験体と一軸拘束供試体の爆裂性状は同等な結果であったと判断される。

5. まとめ

超高強度繊維補強コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造柱の火災加熱中および加熱後の荷重支持能力を把握することを目的として、8 種類のコンクリートで製作した 8 体の鉄筋コンクリート造柱の荷重加熱実験を実施した。また、部材レベルと供試体レベルの爆裂性状を比較するため、爆裂試験を実施した。

5.1 柱の荷重支持能力

荷重加熱実験の結果、いずれのコンクリートにおいても 3 時間の加熱中および加熱後において、荷重支持能力を維持した。また、加熱終了後 9 時間経過した時点で一度除荷し、その約 12 時間後に所定の軸力 (水結合材比

17%の場合：軸力比 0.33、水結合材比 13%の場合：軸力比 0.30) まで再載荷した結果、軸剛性は 55～61%程度まで低下していたものの、所定の荷重を支持する能力を維持していた。

5.2 爆裂性状

柱と同等な 8 種類のコンクリートで製作した一軸拘束供試体の爆裂試験において爆裂は発生しなかった。柱試験体においてもきわめて軽微な爆裂 (表層剥離) が 1 試験体で 1 箇所生じただけであり、破壊的な爆裂が発生しなかったという点で、柱試験体と一軸拘束供試体の爆裂性状は概ね同等な結果であったと判断される。

参考文献

- 1) 森田武 他：耐火性に優れた超高強度コンクリートの仕様と施工，コンクリート工学，Vol.39，No.11，pp.18-23，2001.11
- 2) 三井健郎 他：設計基準強度 80～200N/mm² 超高強度コンクリート柱の耐火性能に及ぼす合成繊維および鋼繊維の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 648 号，pp.461-468，2010.2
- 3) 道越真太郎 他：300N/mm² 級超高強度 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.19-20，2011.8
- 4) 鈴木達朗 他：超高強度繊維補強コンクリート柱の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火)，pp.37-38，2019.7
- 5) 三井健郎 他，設計基準強度 150～200N/mm² 超高強度繊維補強コンクリートの開発と実建物への適用，日本建築学会技術報告集，第 16 巻，第 32 号，pp.21-26，2010.2
- 6) 松戸正士，濱田真，増田隆行 他：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 9～11)，日本建築学会学術講演梗概集 (A-2)，pp.75-80，2005.7
- 7) 日本コンクリート工学会：JCI 規⁷⁾準「コンクリートの爆裂試験方法」，JCI-S-014-2018
- 8) 日本規格協会：建築構造部分の耐火試験方法，JIS A 1304，2017
- 9) U.シュナイダー (森永繁，山崎庸行，林章二 訳)：コンクリートの熱的性質，技報堂出版，1983