

論文 火災加熱を受ける高強度 RC 柱の損傷プロセスに関する研究

三好 徹志*1・米澤 敏男*2

要旨：火災加熱を受ける高強度 RC 柱の損傷プロセスを把握するため、水結合材比 20% の高強度コンクリートを用いた小型 RC 柱の加熱実験を行い、爆裂は加熱開始から 5 分頃に始まり 20 分前後まで継続すること、その後熱応力によるひび割れが発生し、コア内部にまで進展すること等を示した。損傷が爆裂プロセスと熱応力によるひび割れプロセスを経て進む点で、筆者らが提案した高強度 RC 柱の損傷に関するプロセス理論の妥当性を確認したが、熱応力ひび割れがコア内部にまで著しく進展する点等は考慮出来ていなかったため、これらを考慮したプロセス理論（修正版）を提案した。

キーワード：高強度コンクリート、火災加熱、爆裂、熱応力ひび割れ、損傷プロセス

1. はじめに

圧縮強度 80MPa 程度以上、水結合材比 25% 程度以下の高強度・超高強度コンクリートが火災加熱を受けると、爆裂等の損傷が発生し、場合によっては耐力の喪失に至ることが知られている。損傷発生の原因としては水蒸気圧説¹⁾と熱応力説²⁾が対立的に、あるいは複合的に議論されてきたが、観察されている諸現象を統一的に説明しうる理論は構築されていなかった。

筆者らは、一面加熱したモルタル表層の質量変化に基づく水分移動量とポロシテータで得た細孔量の関係から、損傷過程で見られる爆裂現象が水による圧力（蒸気圧又は超臨界水圧）によって生じることを、実証した³⁾。更に、この結果を RC 柱の載荷加熱実験に関する経験的知見と統合し、火災加熱を受ける高強度 RC 柱の損傷が、a)水の圧力による爆裂プロセス、b)熱応力によるはく離プロセス、c)コア部コンクリートと鉄筋の高温強度低下による耐力喪失プロセス、の3プロセスにより順次進展すると考えるプロセス理論を提案した。しかし、高強度 RC 柱の損傷プロセスに関する実験的知見は、載荷加熱実験からの情報にほぼ限定されるため、加熱過程ではく落や内部ひび割れの進展に関する定量的知見が殆ど得られておらず、プロセス理論の実験的な検証も十分には行えていなかった。

上記の観点から、本研究では、水結合材比 20% の高強度小型 RC 柱供試体を ISO834 に定める標準加熱曲線に基づいて加熱し、はく落・ひび割れ等の損傷過程を観察することにより、プロセス理論に関する検討を行った。

2. 実験

2.1 実験概要

水結合材比 20% の高強度コンクリートを用いた 200×200×600mm の小型 RC 柱供試体を 5 分から 60 分ま

で時間を変えて加熱し、加熱中の爆裂の観察、加熱終了後はく落深さや内部ひび割れの測定等を通じ、損傷プロセスを実験的に調べた。同様の実験を、ポリプロピレン繊維を混入することで爆裂を防止した供試体でも実施し、爆裂を生じる供試体との比較を行った。

2.2 実験因子と水準

実験の因子と水準を表-1 に示す。

2.3 小型 RC 柱供試体

小型 RC 柱供試体の概要を、図-1 に示す。主筋は D22 をかぶり厚さ 30mm で長軸方向に貫通させ、帯筋は、突合せ溶接した D6 を、50mm 間隔で配置した。また、60 分加熱した供試体の高さ中央に関し、平面部では図-1

表-1 因子と水準

因子	水準
加熱時間	0 分, 5 分, 10 分, 20 分, 40 分, 60 分
PP 繊維混入	無 (0vol%), 有 (0.2vol%)

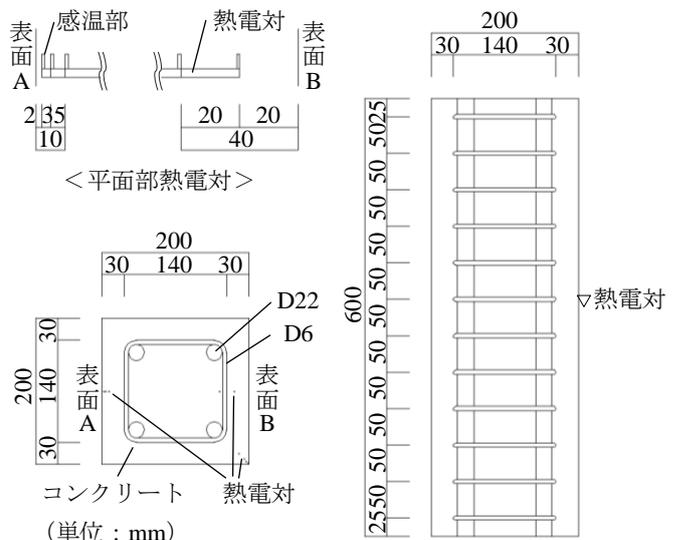


図-1 小型 RC 柱供試体の概要

*1 株式会社竹中工務店 東京本店技術部 主任 工修 (正会員)

*2 株式会社竹中工務店 技術研究所 リサーチフェロー Ph.D. (正会員)

表-2 コンクリートの配(調)合

水結合材比 (wt%)	スランブ フロー(cm)	空気量 (vol%)	シリカフューム 置換率 (wt%)	単用量 (kg/m ³)				減水剤 (B×wt%)
				結合材 B	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	
20	60	2.0	10	775	155	668	830	1.0

表-3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,270cm ² /g
シリカフューム	密度 2.24g/cm ³ , 粉体シリカフューム SiO ₂ 含有量 95.7wt%
粗骨材	安山岩 6号砕石, 絶乾密度 2.56g/cm ³ 吸水率 2.34wt%, 実積率 60.9vol%
細骨材	山砂, 絶乾密度 2.61g/cm ³ 吸水率 1.10wt%, 実積率 67.4vol%
水	上水道水
減水剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤
PP 繊維	ポリプロピレン, 17dtex, 繊維長 10mm

表-4 フレッシュ及び硬化コンクリートの試験結果

	NF	PP
スランブフロー (cm)	60.0	64.0
空気量 (vol%)	1.7	1.7
圧縮強度 (MPa) (標準養生: 4週)	144.9	149.0
圧縮強度 (MPa) (部材同一養生: 加熱試験時)	150.4	147.4
含水率 (wt%) (105°C恒温: 4週強制乾燥)	3.1	3.0

に示す様に表面から 2,5,10,20,40mm, 隅角部では隅角部から 2,5,10,20mm の位置に, 感温部を鉛直に曲げ上げた K 型熱電対 (ガラス被覆) を埋設した。供試体の上下端から 100mm, 及び, 熱電対露出部は, 断熱材で被覆した。

2.4 使用材料

鉄筋には SD295A の異形棒鋼を, コンクリートには水結合材比 20% の高強度コンクリートを用いた。また, 前述した様に, 爆裂防止のためポリプロピレン繊維を 0.2vol% 混和したコンクリートを用いる供試体も作成した (以下, 繊維を混和したコンクリートを PP, ベースコンクリートを NF と表記)。

NF コンクリートの配(調)合を表-2, 使用材料を表-3 に示す。コンクリートは打設後封緘し, 凝結まで概ね 30 分間隔で振動を与え, 熱電対感温部周辺での空隙の形成を防いだ。また, 硬化確認後, 最高温度 80°C の蒸気養生を 2 日間施した。フレッシュ及び硬化コンクリートの試験結果を表-4 に示す。

2.5 加熱方法

加熱は, 小型 RC 柱供試体を 1,000×1,000×1,000mm の加熱室を持つガス式の小型加熱炉内に図-2 の様に配し, ISO834 に定める標準加熱曲線に準拠して行った。加熱後は, 炉蓋を閉鎖した状態で, 緩やかに自然冷却した。

2.6 試験項目と試験方法

(1) 加熱中の損傷状況の観察

加熱炉の二面に設置されている観察窓から供試体を目視し, 爆裂による破裂音の発生, はく離部の飛散と発生時間の関係等を観察した。

(2) 内部温度

加熱時間 60 分の供試体に埋設した熱電対により, コン

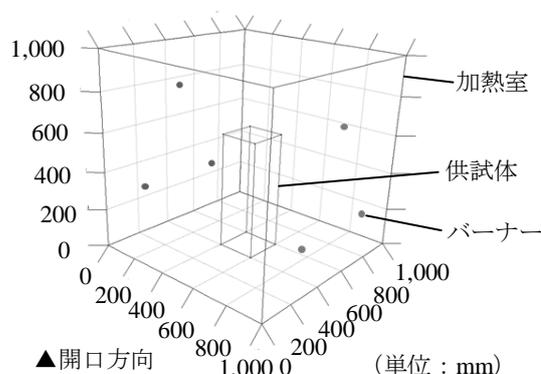


図-2 小型加熱炉内の供試体配置

クリートの内部温度を測定した。

(3) 加熱終了後の損傷状況の観察

三次元レーザースキャナー (位相シフト型, 出力光 20mW, 波長 905nm, 発散角 0.009°, 出射口の光径 3.8mm) により外形を採寸し, はく落深さを求めた。また, 供試体を水平, 鉛直にそれぞれ湿式ダイヤモンドカッターにより切断し, 内部ひび割れの分布を観察した。

(4) はく落片の形状観察

炉内に飛散したはく落片を回収し, JIS Z 8801 に準拠した篩 (公称目開き 16.0, 13.2, 9.50, 4.75, 2.36, 1.18 mm) により分級の上, 各篩から 10 片を無作為に選択した。測定は, はく落片の最も薄い方向の厚さと, 同方向と直交する面の長径と短径に関し, ノギスで実施した。

3. 実験結果

3.1 損傷の進展

NF 供試体の加熱後の外観を図-3 に示す。同図と加熱中の経過観察に基づく損傷の進展状況を以下に示す。

まず, 加熱開始から 3~4 分経過時に, 隅角部で破裂音を伴うはく離部の飛散を生じた。これが爆裂の開始である。その後, 6 分前後に平面部でも爆裂が始まり, 10 分

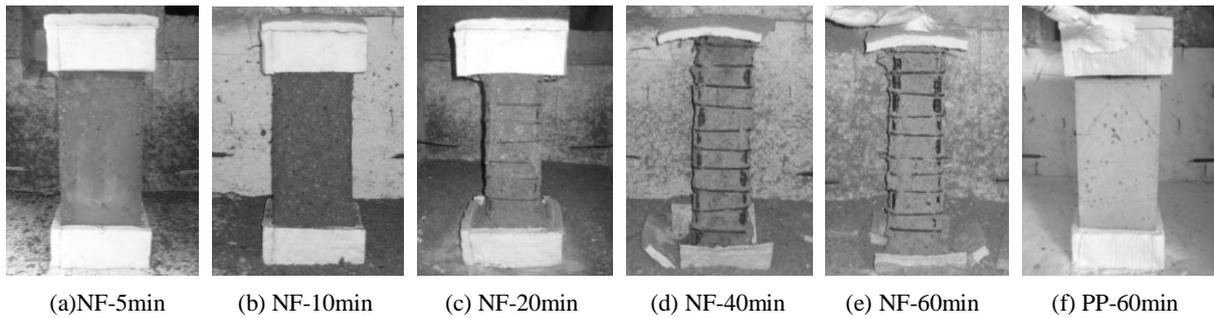


図-3 加熱後の外観 (凡例：コンクリート略号-加熱時間)

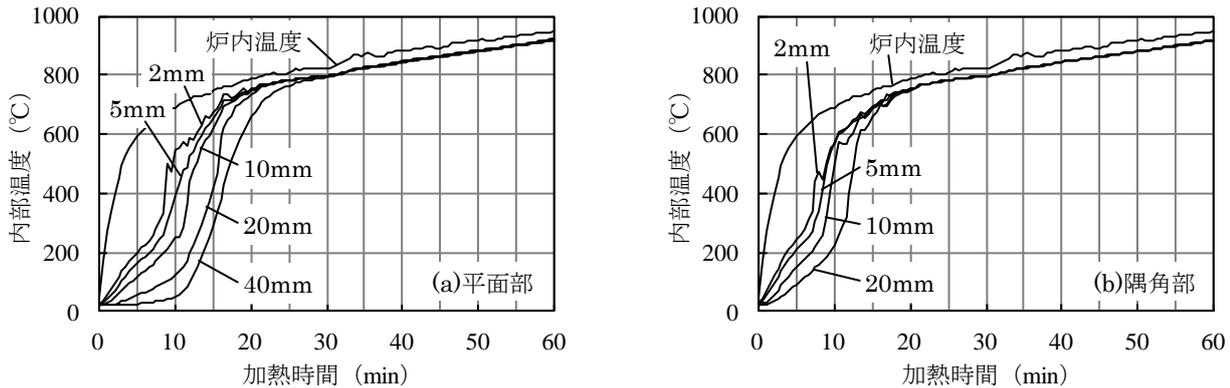


図-4 内部温度 (NF 供試体)

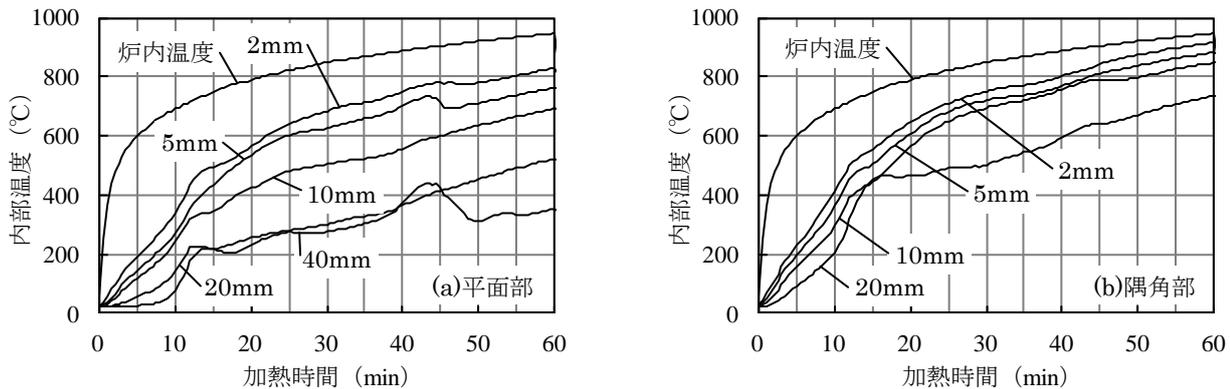


図-5 内部温度 (PP 供試体)

程で表面のほぼ全面で爆裂を生じた。その後、更に爆裂が継続し、20分経過時には、かぶりコンクリートの大部分が失われて帯筋が露出し始め、40分では主筋の一部が露出するに至った。この時点で、かぶりコンクリートは、全面的に失われた。また、60分経過時の供試体の損傷は、40分と殆ど差がなかった。

3.2 内部温度の履歴

(1) NF 供試体

NF 供試体の内部温度の測定結果を、平面部と隅角部に分けて図-4 に示す。平面部に関し、加熱中に温度上昇勾配が急増する現象が認められる。この温度上昇は、平面部の深さ 2mm で 200~250℃と 300~350℃の 2 回生じている。前者は熱電対近傍の爆裂によるかぶり厚さの急減、後者は熱電対位置を含む爆裂による熱電対の炉内への露出によるものと推察される。深さ 5mm と 10mm で

は 200~300℃で温度が一気に上昇しており、この時に熱電対が炉内に露出したものと推察される。深さ 20mm では 150~200℃と 400~450℃の 2 回、温度の急上昇が認められ、深さ 2mm と同様に、2 回目の温度上昇で熱電対が炉内に露出したと推察される。

熱電対が炉内に露出後ただちに炉内温度と一致しない理由は特定されないが、熱電対表面に硬化ペーストが残存していることや、供試体から水分が逸散することにより、供試体表面近くの温度が炉内より低くなったこと等が要因として考えられる。

また、熱電対露出時の温度は 300~450℃であり、この温度が爆裂発生位置のコンクリート温度と推察される。水の臨界点は 374℃であるので、この温度以下では蒸気圧により、同温度以上では超臨界水圧によって、爆裂が発生していたと推察される。

(2) PP 供試体

PP 供試体の内部温度の測定結果を図-5 に示す。爆裂を生じる迄の温度履歴は、NF 供試体とほぼ同じである。その後は爆裂を生じないため、NF 供試体の様な温度の急上昇は見られない。

平面部の深さ 20mm と 40mm の場合に明瞭に認められる、約 200℃における温度上昇の停滞は、熱電対近傍のひび割れ生成部や繊維の熔融部に蓄積した水による潜熱の影響等によるものと考えられる。

3.3 はく落の進展

3D レーザースキャナーの測定結果から、図-6 に示す 3 断面 (A,B,C) を抽出し、平均はく落深さを求めた。NF 供試体の平均はく落深さの経時変化を図-7 に示す。

はく落は 5~20 分の間、即ち、爆裂の発生時期に急速に進展し、20 分ではほぼ終了する。20 分時のはく落深さは帯筋外面の 30mm 程度であり、かぶりコンクリートの大部分が、爆裂によってはく落したことが分かる。

3.4 ひび割れの進展

各供試体の水平及び鉛直断面で確認される内部ひび割れの分布を図-8 に示す。図示したひび割れは幅 0.1mm 以上のものである。なお、併記した加熱前の NF 供試体の断面には、これに該当するひび割れは認められない。

図中、NF 供試体の水平断面で、5 分経過時に隅角部に

斜め方向のひび割れを生じている。このひび割れは、隅角部の昇温速度が速いため、コア部との温度差による半径方向の熱応力が過大となり、先行したものと推察される。同ひび割れを除くと、爆裂が急速に進展する 5~20 分の間において、著しいひび割れの進展は見られない。

NF 供試体の水平断面で測定したひび割れ長さと加熱時間の関係を整理して図-9 に示す。図-8 及び図-9 から、ひび割れは 20 分経過後、帯筋に囲まれたコア内部で著しく進展することが分かる。同ひび割れは爆裂の終了後に発生しているため、爆裂時の破壊機構と明確に区分されるもので、隅角部同様、供試体の表層とコア部の温度差によって生じる熱応力ひび割れと判断される。

上記の結果から、爆裂が急速に進展する間は、熱応力ひび割れは殆ど進展せず、爆裂が終了してから、熱応力ひび割れが急速に発生することになる。即ち、爆裂と熱応力ひび割れは、別のプロセスであると結論される。

また、PP 供試体では、はく落は生じていないが、若干の熱応力ひび割れの発生が認められる。同供試体の表面に生じたひび割れは、幅 0.1mm 未満の微細な亀甲状ひび割れのみであるため、図-8 の結果には、加熱後の冷却過程の熱応力は殆ど影響していないと判断される。

3.5 はく落片の形状

はく落片の外観を図-10 に示す。はく落片は、供試体

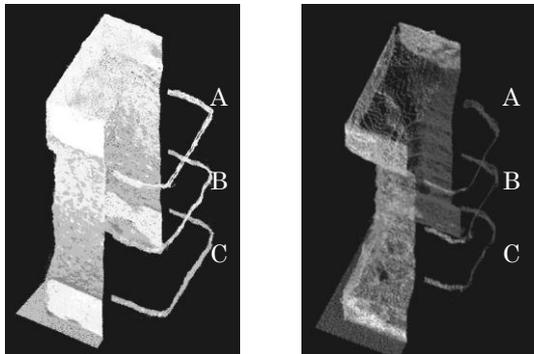


図-6 はく落深さの測定例 (NF 供試体)

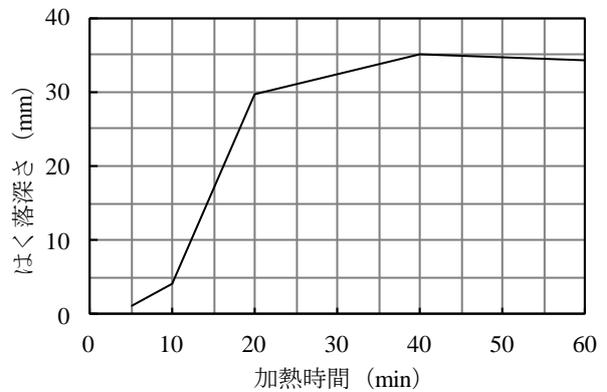


図-7 平均はく落深さの経時変化 (NF 供試体)

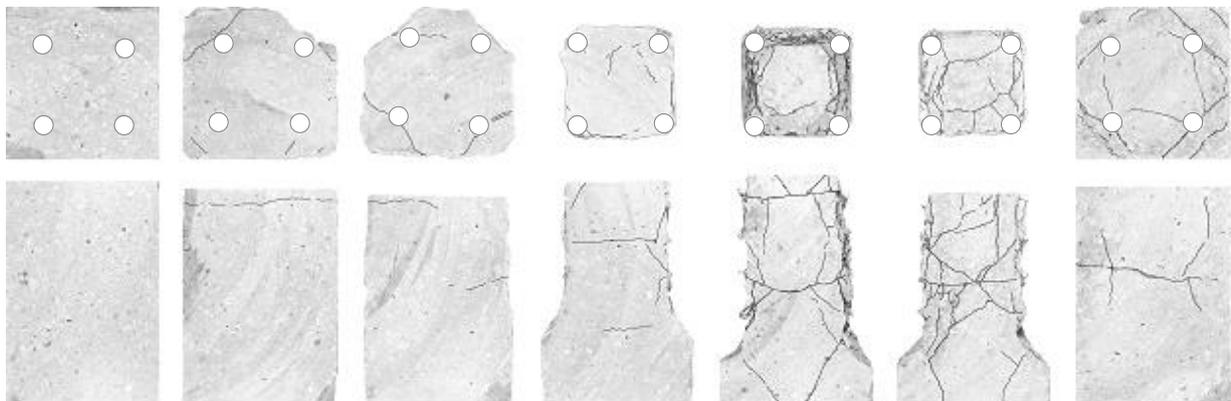


図-8 内部ひび割れの分布 (上段: 水平, 下段: 鉛直 (底面から 1/2), 凡例: コンクリート略号-加熱時間)

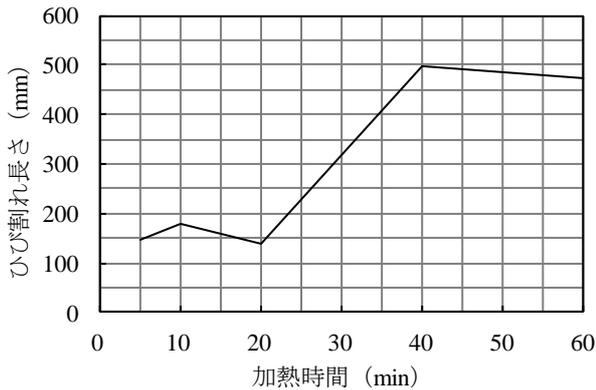
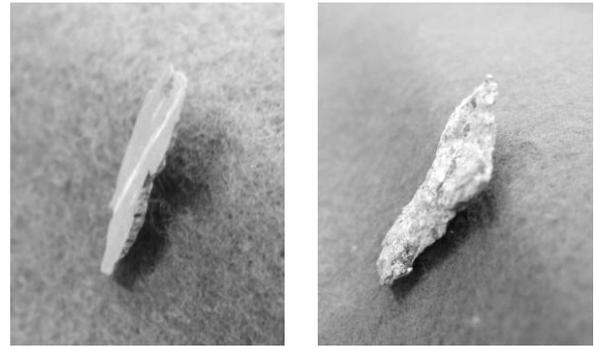


図-9 ひび割れ長さの経時変化 (NF 供試体)



(a)表面を伴うはく落片 (b)内部からのはく落片

図-10 はく落片の外観

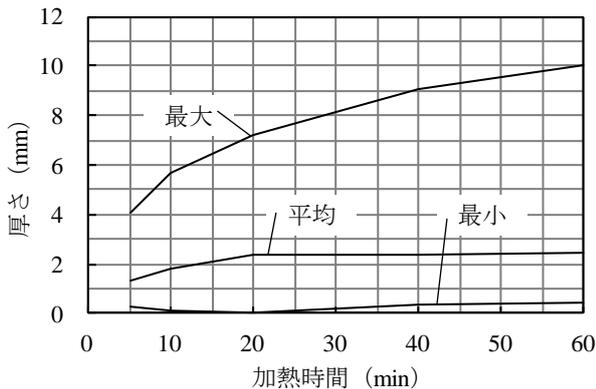


図-11 はく落片の厚さの経時変化 (NF 供試体)

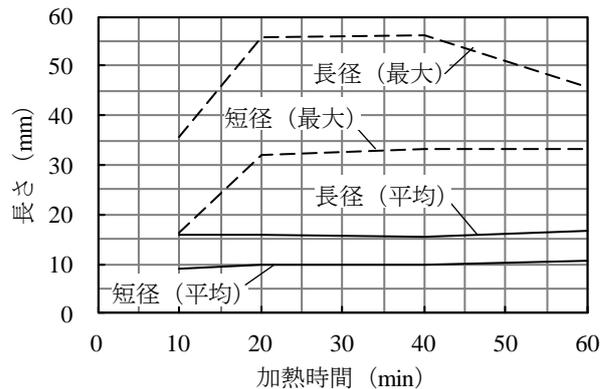


図-12 はく落片の平面寸法の経時変化 (NF 供試体)

の表面を伴うか否かによらず、何れも薄い板状である。はく落片の厚さと加熱時間の関係を、図-11に示す。平均厚さは1.5~2.5mm程度である。爆裂がほぼ終了する20分までは平均厚さも加熱時間とともに大きくなる傾向が見られる。一方、最大値は20分以降も大きくなっており、比率は小さいが、厚さの大きいはく落片が混在したことが分かる。これらのはく落片は熱応力ひび割れによるはく離から生じた可能性がある。

はく落片の長径及び短径の、平均値と最大値を図-12に示す。但し、対象は、公称目開き2.5mmの篩に留まる加熱時間10分以上のはく落片のみとした。長径の平均値は約16mm、短辺は約10mmで安定している。長径、短径の最大値は、ばらつきはあるが、ともに加熱開始後10~20分にかけて増加する傾向がある。

4. 損傷プロセスの検討

4.1 損傷プロセスの特徴

本実験で確認したNF供試体の損傷プロセスは、爆裂主体のプロセス(5~20分)と20分経過後の熱応力ひび割れ主体のプロセスに分離されるものであった。

具体的には、爆裂プロセスは16×10mmの平面寸法と1.5~2.5mmの厚さからなる薄片の形状に特徴づけられる。加熱初期に隅角部に熱応力ひび割れが生じたが、これを除くと爆裂プロセスでは、ひび割れは殆ど発生して

いない。

一方、20分経過後の熱応力ひび割れは、帯筋に囲まれたコア内部まで深く進展するのが特徴である。また、爆裂を防止した比較用のPP供試体では、コア内部に若干の熱応力ひび割れが認められるものの、爆裂するNF供試体よりはるかに軽微である。このようなコア内部の熱応力ひび割れの程度が、荷重加熱を受ける高強度RC柱の耐火時間に影響している可能性は十分に考えられる。

なお、今回の実験ではかぶりコンクリートがほぼ失われるまで爆裂が継続したが、これまでの荷重加熱実験の知見では、かぶりコンクリート内で爆裂が停止する事例が認められており、留意を要する。

4.2 爆裂プロセスと熱応力ひび割れプロセスの分離機構

火災加熱を受ける高強度RC柱において爆裂プロセスが先行し、爆裂プロセス終了後、熱応力ひび割れプロセスに至るのはほぼ確実であるが、これらのプロセスが分離される機構は、本研究の範囲では必ずしも明らかではない。少なくとも、爆裂プロセスが終了する機構には、かぶり厚さで示される鉄筋位置が影響する場合としない場合の2種類が存在するものと考えられる。

しかし、第一に、図-11に示した爆裂によるはく落片の厚さは、爆裂を発生させる水の圧力(水蒸気圧又は超臨界水圧)が増大し、コンクリートにはく離が生じる深さが平均1.5~2.5mmであることを示している。第二に、

PP 供試体を含め、図-8における内部ひび割れは、表面から 1cm 又はそれ以上内部に生じている。この結果は、 $\phi 50 \times 100$ mm の円柱の高温加熱時の挙動を解析した出端らの研究⁴⁾において、半径方向の引張応力の最大値が円柱中心 25mm という深部で得られたこととも合致している。爆裂に至る水の圧力が発生する深さと、熱応力が最大となる深さは明らかに異なっており、プロセス分離機構の一因であると考えられる。また、熱応力は表層と内部の温度差によって生じるが、爆裂によって表層が次々と失われるプロセスでは、引張応力を形成するための表層の膨張領域が形成されにくい。この点も、同機構の一因として挙げることができる。

4.3 プロセス理論の検討

損傷プロセスに複数のプロセス（爆裂プロセスと熱応力ひび割れプロセス）があり、各プロセスが順次出現した点で、筆者らが提案したプロセス理論は妥当であった。また、加熱初期に隅角部で熱応力ひび割れが生じる点は考慮していなかったが、耐力に影響する可能性が低く、本理論の構成上、問題を認めないものであった。

但し、かぶりコンクリートの喪失が爆裂プロセスのみ、あるいは爆裂と熱応力ひび割れの両プロセスで生じると考えられる点は、プロセス理論の修正が必要である。さらに、かぶりコンクリートが失われた後、帯筋内部のコア部コンクリートに、耐力に影響する可能性がある著しい熱応力ひび割れが発生した点も修正を要する。

RC 柱が耐力喪失に至る損傷機構で最も重要なのは、かぶりコンクリートのはく落後、コア部コンクリート及び鉄筋が高温加熱により強度低下するプロセスであり、損傷回避機構としては、かぶりコンクリートが残存し、耐火被覆として機能することである。これらを考慮して修正したプロセス理論を、図-13 に示す。

5. まとめ

本研究で実験的に得た事実と結論を以下に示す。

- 1) 爆裂は加熱開始から 5 分頃に始まり 20 分前後まで継続した上終了し、この間、ごく初期の隅角部ひび割れを除き熱応力ひび割れは殆ど発生しない。
- 2) 熱応力ひび割れは爆裂終了後発生し、帯筋に囲まれたコア部コンクリート内まで著しく進展する。
- 3) 爆裂が発生する深さが 1.5~2.5mm であるのに対し、熱応力ひび割れの深さは 1cm 又はそれ以上であり、この深さの違いが 2 つのプロセスが分離される理由の一つと推定される。
- 4) 爆裂による熱電対露出時と推定される温度からは、爆裂発生点近傍のコンクリート温度は 300~450℃ となり、水の臨界点 (374℃) の上下いずれの温度においても爆裂が生じていると考えられる。

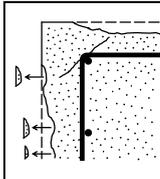
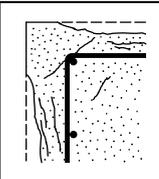
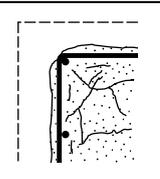
	爆裂プロセス (5~20 分)	熱応力ひび割れプロセス (20~40 分)	耐力喪失プロセス (40 分以降)
損傷機構	 <ul style="list-style-type: none"> 水蒸気圧・超臨界水圧による爆裂（条件に応じて、かぶり喪失） 隅角部で初期に熱応力ひび割れ（耐力に影響しない程度） 	 <ul style="list-style-type: none"> 熱応力ひび割れによるかぶりのはく離・はく落 熱応力ひび割れのコア部への進展 	 <ul style="list-style-type: none"> 高温によるコア部コンクリート、鉄筋の強度低下による耐力喪失 コア部コンクリートのひび割れによる耐力低下
損傷回避機構	<ul style="list-style-type: none"> 細孔組織（普通コンクリート）、有機繊維による細孔（高強度コンクリート）を介した水分逸散 水和物の熱分解による多孔質化 	<ul style="list-style-type: none"> 表層の耐火被覆効果による熱応力緩和 表層の軟化による熱応力緩和 鋼繊維による耐力増加とはく落抑制による耐火被覆効果の維持 	<ul style="list-style-type: none"> かぶりコンクリートの耐火被覆効果によるコア部の温度上昇・強度低下抑制 先行プロセスにおけるひび割れ低減による耐力低下抑制

図-13 プロセス理論（修正版）

- 5) 高強度 RC 柱の損傷が爆裂プロセスと熱応力による損傷プロセスによって順次進行する点で、筆者らの提案したプロセス理論は妥当と判断される。
- 6) かぶりコンクリートの喪失が爆裂単独、あるいは、爆裂と熱応力ひび割れによって生ずる点や、コア部コンクリートに著しい熱応力ひび割れが進展する点でプロセス理論の修正が必要であり、これらを考慮したプロセス理論（修正版）を提案した。

参考文献

- 1) Harmathy, T. Z.: Effect of Moisture on the Fire Endurance of Building Elements, ASTM, STP, No.385, pp.74-95, 1965
- 2) 斎藤光：プレストレスコンクリート部材の爆裂について、日本火災学会論文集, Vol.15, No.2, pp.23-30, 1966
- 3) 米澤敏男, 三好徹志, 松下哲郎, 川尻聡：火災加熱を受ける高強度コンクリート中の水による圧力と損傷機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1151-1156, 2010
- 4) 出端祐輔, 原田和典, 山崎雅弘：火災時におけるコンクリートの爆裂機構に関する有限要素法解析, 防火, 海洋, 情報システム技術, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.85-86, 2004