

# 論文 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

米澤 敏男\*1・三好 徹志\*2・松下 哲郎\*3・川尻 聡\*4

**要旨:** 火災加熱を受ける高強度コンクリート部材の損傷機構を検討するためにモルタル試験体の加熱実験を行い、爆裂する試験体では水分はほとんど移動しないが、爆裂しない試験体では外部に水分が逸散することを確認した。PP 繊維の爆裂抑制効果もこれによることを示した。また高温下の平衡水分量と空隙量から求めた空隙の水充填率は、空隙中の水が蒸発曲線の圧力を形成するのに十分であり、臨界点 374°Cでは一挙に大きな超臨界水圧を形成することがわかった。したがって、この温度までの水蒸気圧が超臨界水圧で爆裂が発生すると考えられた。これらの結果を基に、火災による損傷の全体機構を説明するプロセス理論を提案した。

**キーワード:** 火災, 損傷, 爆裂, はく離, 高強度コンクリート, 水蒸気圧, 超臨界水圧, プロセス理論

## 1. はじめに

圧縮強度 80N/mm<sup>2</sup> 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。これに対し、筆者らはポリプロピレン繊維 (以下 PP 繊維と略記) を混入する技術<sup>1)</sup>やポリプロピレン繊維と鋼繊維をハイブリット化する技術<sup>2)</sup>により損傷を抑制する技術の研究開発を進めプロジェクトに適用<sup>3)</sup>してきた。しかし、爆裂等の損傷が生ずる機構や上記の繊維が効果を発揮する機構は、内外で多くの研究が行われているにもかかわらず、必ずしも十分に解明されているとは言えない。現在の損傷抑制技術の効率化や将来の超高強度コンクリートを考えるうえで損傷メカニズムを良く理解しておくことが大切である。

火災加熱による損傷発生の原因として水蒸気圧説<sup>4)</sup>等と熱応力説<sup>5)</sup>等が対立的に、あるいは複合的に議論されてきたが、今の所、観察されている諸現象を統一的に説明し得る理論が構築されているとは言えない。このような理論を考える事を目的に本論文は水蒸気圧等水に起因する圧力に関する研究を行ったものである。

これまでの水蒸気圧に関する研究は、水蒸気圧の測定を試みたものと、Darcy 則に基づく圧力勾配による流れの解析に基づくものに大別することができる。前者は England<sup>6)</sup>らの研究に始まると考えられるが、ナノメートルからミクロンに分布する細孔中でセメント水和物 (以下水和物と略記) の分解により発生する水による蒸気圧をミリメートル径の管に導通して正確に測定するのは相当に困難であり、圧力を過小評価することになると考えられる。また、Harmathy<sup>4)</sup>や Bazant<sup>7)</sup>らに始まる後者の研究は、水分の移動を均一な径の管路の圧力勾配による

流れで近似するものであり、細孔径の分布の評価や水和物の分解速度の定量化の難しさから正確な圧力の推定は、やはり相当に困難と考えられる。

上記の認識に基づき本研究では、ISO834 の標準加熱曲線に準じて加熱したモルタルの加熱面からの水分量の変化を測定するとともに、圧力発生の特ポテンシャルとして高温時の平衡水分量と空隙量の変化を測定し空隙の水充填率を求めた。さらに水の相平衡から空隙の水充填率に応じた水蒸気圧と超臨界水圧を計算し、実験結果に基づく水による圧力を推定した。これらの結果から火災加熱を受ける高強度コンクリート部材の損傷機構を説明する理論の検討を行った。

## 2. 実験

### 2.1 概要

本研究では下記二種類の実験を行った。

- (1) 実験 1: 鋼製型枠中に打設したモルタルを型枠とともに小型ガス炉で ISO834 の標準加熱曲線に準じて一面から加熱して爆裂の有無を観察し、加熱後の割裂薄片の質量変化から水分量の分布を求めた。
- (2) 実験 2: 温度 105~1000°Cの電気炉中で 24 時間加熱した試験体の質量変化と水銀圧入式ポロシメータによる空隙量の変化を測定し、水による圧力形成の特ポテンシャルとしての温度に平衡する水分量 (蒸発可能水分の総量) と空隙量の変化を測定した。

### 2.2 因子と水準

実験 1 の因子と水準を表-1 に示す。実験 2 の因子と水準を表-2 に示す。

### 2.3 使用材料とモルタルの配 (調) 合

使用材料の概要を表-3 に、モルタルの配 (調) 合を

\*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 リサーチフェロー Ph.D. (正会員)

\*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 材料部門 研究主任 工修 (正会員)

\*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 材料部門 研究員 工博 (正会員)

\*4 (株) 竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 エコエンジニアリング部門 主任研究員 工博

表-4 に示す。

## 2.4 試験体

一面加熱実験用試験体と水分量・空隙量測定用試験体はいずれも 70×70×200 mm のモルタル角柱であり (図-1)、70×70 mm の面を上にして打設し、ブリーディング終了後、鋼製のフタを取り付け、上下逆にして静置し水分分布の均一化を図った。フレッシュモルタルの試験結果を表-5 に示す。

試験体は型枠に打設したまま材齢 3 日から 6 日まで 60℃で蒸気養生し、材齢 7 日から一面加熱実験と水分量・空隙量測定実験に供した。一面加熱実験と同一材齢で求めた円柱試験体 (φ50×100mm) の圧縮強度と静弾性係数を表-5 に示す。

## 2.5 一面加熱実験 (実験 1)

一面加熱に使用した小型ガス炉 (内面 100×100×106cm) の外観を写真-1 に示す。この炉の扉に図-1 と写真-1 に示すように鋼製型枠に打設した試験体 2 体を設置し、一面から ISO834 による標準加熱曲線の時間軸を 2 倍とした昇温曲線で加熱した。2 体のうちの 1 体は温度測定用、1 体は爆裂観察と水分量測定用とした。鋼製型枠の鋼板接合部には膨張黒鉛を主成分とする耐熱シーンを施し蒸気漏洩を防いだ。

30 分加熱後ただちに脱型し、割裂薄片作成のために開発したプレストレス式割裂法 (写真-2) で厚さ 15 mm の割裂薄片を切り出し水分量分布測定に供した。割裂薄片をルツボに入れ電気炉中で、1) 105℃、2) ガス炉 30 分加熱時の割裂薄片の中心温度、3) 1000℃、の三水準の温度レベルに昇温させ 24 時間保持した時の質量変化から水分量 (各温度での蒸発可能水分の総量) を求めた。この時の昇温速度は 100℃/hr とし、200℃昇温ごとに 1 時間保持して割裂薄片の爆裂を防止した。

## 2.6 水分量・空隙量の測定実験 (実験 2)

実験 1 と同様に製作し蒸気養生した試験体をただちに写真-2 の方法で 15mm 厚の薄片に割裂し、この割裂薄片をルツボに入れて電気炉中で 105℃、200℃、400℃、600℃、800℃、1000℃の 6 水準で加熱し 24 時間各温度に保持した後、質量減少量から各温度と平衡する水分量 (蒸発可能水分の総量) を求めた。水分量測定時の昇温速度は実験 1 と同様とした。

空隙量の測定には、水分量測定と同様に製作した割裂薄片のジョークラッシャー破砕片 (2.5~5mm) を使用した。これを上記の各温度に昇温させ 24 時間保持した後、デシケーター中で冷却して凍結乾燥し、水銀圧入式ポロシメータで細孔径分布 (0.003~100 μm) と全細孔量を測定した。

表-1 一面加熱実験の因子と水準 (実験 1)

因子	水準
水セメント比・水結合材比 (mass %)	W/B=20, W/C=50
PP 繊維混入率 (mass %)	0, 0.1

表-2 平衡水分量・空隙量の実験の因子と水準 (実験 2)

因子	水準
水セメント比・水結合材比 (mass.%)	W/B=20, W/C=50
温度 (℃)	105, 200, 400, 600, 800, 1000

表-3 使用材料

材料	メーカー・物理的性質
セメント	T 社製普通ポルトランドセメント
シリカフェーム	E 社製粉体シリカフェーム (密度=2.35 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積=19 m <sup>2</sup> /g)
細骨材	君津産山砂 (吸水率=1.29%, 表乾密度=2.62 g/cm <sup>3</sup> )
ポリプロピレン繊維	D 社製ポリプロピレン繊維 (長さ 10mm, 直径 49 μm, 密度 0.91g/cm <sup>3</sup> )
減水剤	T 社製ポリカルボン酸系高強度用高性能減水剤 (W/B=20%) 同上高性能 AE 減水剤 (W/C=50%)

表-4 モルタルの配 (調) 合

No.	水結合材比 (wt%)	0 打フロ一 (mm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				減水剤 (C×mass.%)
				C	SF	W	S	
1	20	190	3.0	960	106	213	1066	1.6
2	50	110	7.0	525	—	263	1313	0.8

表-5 フレッシュ・硬化モルタルの試験結果

No.	フレッシュモルタル		硬化モルタル	
	0 打フロ一 (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
1	194	3.5	143	4.90
2	112	7.4	42	2.78

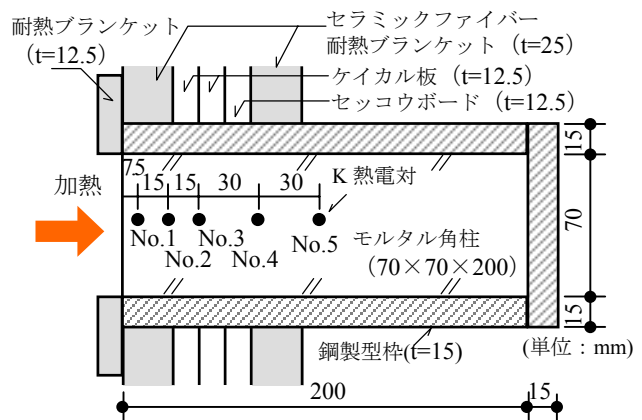


図-1 モルタル試験体と小型ガス炉への設置状況



写真-1 小型ガス炉と試験体

### 3. 実験結果

#### 3.1 一面加熱実験（実験 1）

##### (1) 温度分布と爆裂現象

小型ガス炉の炉内温度と試験体内温度の測定結果を図-2~4に示す。W/B=20%の試験体では加熱開始後13分から破裂音とはく離片の飛散・炉壁への衝突音を伴う爆裂が発生し20分過ぎまで継続した。したがって、爆裂が発生した時の温度は表面から7.5mmの熱電対の位置（No.1）で200~350℃程度、これより表層の温度が高いことを考えると200~400℃程度で爆裂が生じたと考えられる。加熱終了後の加熱面は、深さ約7mmのすり鉢状に失われていた。W/C=50%の試験体とPP繊維を0.1vol.%混入したW/B=20%の試験体では全く爆裂は発生せず、既に知られているPP繊維の爆裂抑制効果<sup>1),3)</sup>がこの実験でも確認された。

##### (2) 水分量分布

W/B=20%の試験体の水分量（蒸発可能水分の総量）の分布を測定した結果を図-5に示す。1000℃に加熱して求めた水分量は水和物の分解によって生じた水分と移動・逸散した水分の合計を示すものである。図-5から明らかなように1000℃の水分量は割裂薄片間でほぼ一定であり、この試験体では爆裂は生じているが水分はほとんど移動していないことになる。

105℃の水分量は割裂薄片を常温に戻した後も水として残存していた水分量であり、加熱30分の温度の水分量は一面加熱試験で30分加熱した時の割裂薄片の中心位置の温度に再加熱して平衡させた水分量である。したがって、水和物の分解速度が有限であり室温に戻した時にCa(OH)<sub>2</sub>の分解により生成したCaOが再びCa(OH)<sub>2</sub>に戻る等の再水和が生ずる可能性を考えると、実際に存在していた水分量は加熱30分の温度の水分量と105℃の水分量の間ということになる。この水分は試験体の内外にほとんど移動していないのであり、その位置で圧力の形成に寄与していたと考えられる。

W/C=50%の試験体（図-6）では、最外層のみ3~4%水分量が減少している。この水分量分布から最外層の水分は内部には移動していないのであり、外部すなわちガス炉内に逸散したことがわかる。

PP繊維を入れたW/B=20%の試験体（図-7）の水分量の分布はW/C=50%の試験体と類似しており、同様に最外層の水分が炉内に逸散したことを示している。

W/C=50%の試験体とPP繊維を入れたW/B=20%の試験体が同様の水分量分布を示し、かつ両方で爆裂が発生していないという事実は重要であり、PP繊維が水分を外部に逸散させる効果により爆裂を抑制していることを示している。



写真-2 プレストレス式割裂装置

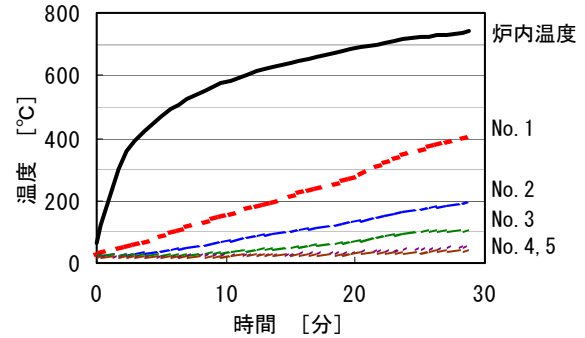


図-2 炉内・試験体温度 (W/B=20%)

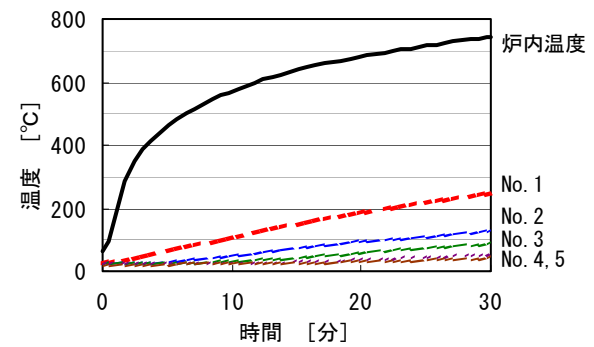


図-3 炉内・試験体温度 (W/C=50%)

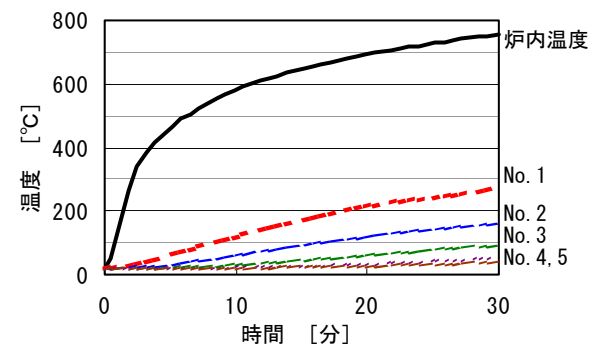


図-4 炉内・試験体温度 (W/B=20%, PP繊維 0.1vol.%)

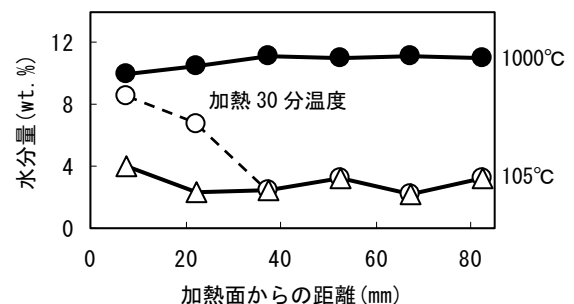


図-5 加熱試験体の水分量分布 (W/B=20%)

### 3.2 平衡水分量・空隙量の実験（実験2）

高温下の平衡水分量（蒸発可能水分の総量）と温度の関係の測定結果を図-8に示す。水和物の分解等による水分発生量は200~800℃で温度とともに増大し800℃でほぼ終了している。

1000℃の水分量は表-4に示した配（調）合から求まる水分量とほぼ一致する。200℃以上ではW/C=50%と20%で類似のパターンを示すのに対し、105℃では20%の値が50%よりも相当に小さく20%の場合には24時間で水分量が平衡に至っていない可能性が考えられる。

水銀圧入式ポロシメータで求めた10μm, 1μm, 0.1μm, 0.01μmの累積細孔量および全細孔量と温度の関係を図-9, 10に示す。全細孔量はW/B=20%, W/C=50%いずれも400~800℃で大きく増加しており、水分量の増大特性とはやや相違する。

一面加熱実験で爆裂したW/B=20%の爆裂温度領域200~400℃の細孔径分布を爆裂しないW/C=50%と比較すると、W/C=50%では0.1μm以上の空隙量がW/B=20%よりはるかに多く、この空隙量の違いが爆裂に影響していると考えられる。

水銀圧入法で求めた空隙の量や分布に様々の限界があるのは良く知られているとおりであるが、ここではフレッシュモルタルの空気泡に相当する空隙は測定されていないので、図-9, 10の全細孔量に空気量を付加したものを空隙の総量とし、図-8の水の量から空隙に対する水（液体としての水）の充填率と温度との関係を求めた。これを図-11に示す。W/C=50%の充填率は60~80%であり400℃前後で極大を示す傾向が認められる。W/B=20%ではW/C=50%と同様400℃前後に極大が認められるが、200~600℃では100%を上回る値となった。水銀圧入法で測定されていない独立空隙の存在等を考えると充填率が100%を上回る可能性は考えにくい、空隙の相当部分が水で充填されているのは確かである。また、ここでは水和物の分解速度を考慮していないのであり、加熱面近傍の分解速度は相当に速いと考えられるものの図-11の水充填率は、この点からもある程度割り引いておく必要がある。

### 4. 水の相平衡と空隙中の圧力の検討

図-12は良く知られている水の相平衡・状態図を温度0~500℃, 圧力0~60MPaの範囲で作図したものである。爆裂が発生するモルタルの温度を200~400℃とすると、この温度領域で水は水蒸気, 水, 超臨界水のいずれの状態も取り得ることがわかる。

図-13は良く知られている常温から臨界点までの水蒸気と水の平衡曲線すなわち蒸発曲線とともに平衡蒸気圧に達するのに必要な空隙中の水充填率を気体の状

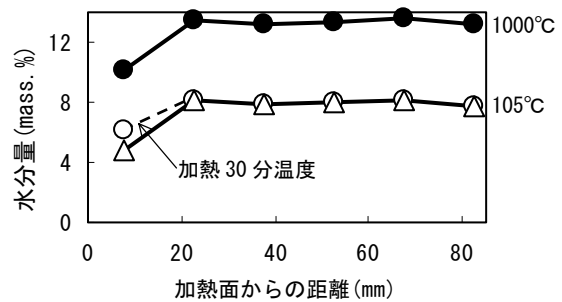


図-6 加熱試験体の水分量分布 (W/C=50%)

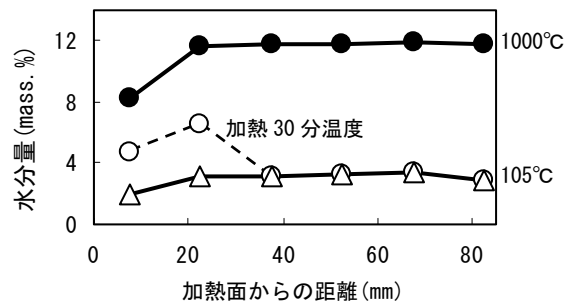


図-7 加熱試験体の水分量分布 (W/B=20%, PP 繊維 0.1vol.%)

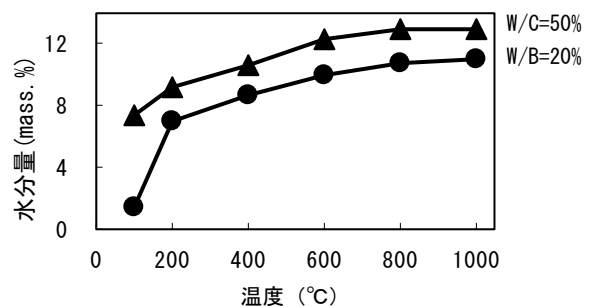


図-8 平衡水分量と温度の関係

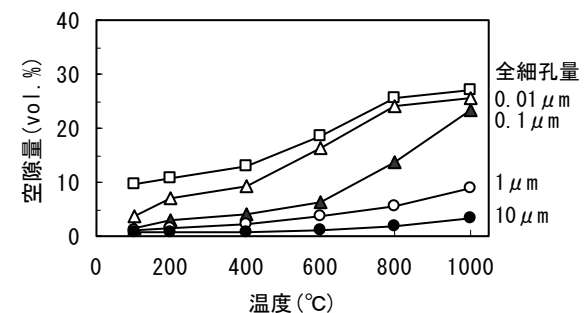


図-9 平衡空隙量と温度の関係 (W/B=20%)

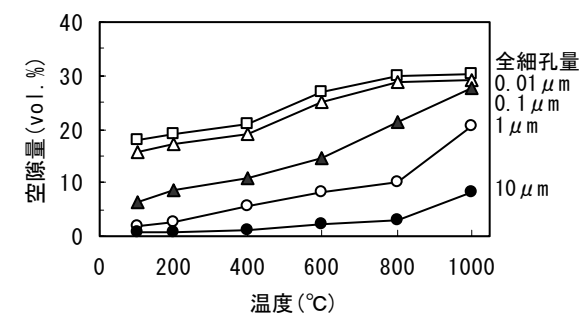


図-10 平衡空隙量と温度の関係 (W/C=50%)

態方程式 ( $PV=nRT$ ) における圧力  $P$  (平衡蒸気圧), 体積  $V$  (空隙の容積) とモル数  $n$  (水の量) の関係から算定した結果を示している。臨界点  $374^{\circ}\text{C}$  においても空隙の10%弱が水で充填されていれば平衡蒸気圧に達することがわかる。図-11 に示したようにモルタル中の空隙の水充填率は、これが平衡状態のものであることを考慮しても図-13 の充填率よりはるかに大きなものであり、相当量の水が逸散しない限り、空隙中の圧力はこの平衡蒸気圧で定まることになる。200 $^{\circ}\text{C}$  ではこの圧力は 1.6 MPa 程度であるが、250 $^{\circ}\text{C}$  で 4.3 MPa, 300 $^{\circ}\text{C}$  で 9.4 MPa, 350 $^{\circ}\text{C}$  で 18 MPa, 臨界点の  $374^{\circ}\text{C}$  では 22 MPa という大きな圧力となる。したがって、250 $^{\circ}\text{C}$  程度以上  $374^{\circ}\text{C}$  までの水蒸気圧によって十分に爆裂が生じ得る。

一面加熱した  $W/B=20\%$  の試験体の表層 200~400 $^{\circ}\text{C}$  の領域で爆裂していると推定されたが、そうだとすれば、臨界点  $374^{\circ}\text{C}$  を上回る温度になっている可能性がある。そのため、臨界点を超え超臨界水となる時の圧力を空隙の水充填率を 10~80% に変化させ、蒸気表<sup>8)</sup>を基に計算した。その結果を図-14 に示す。臨界点を越えた瞬間に平衡蒸気圧をはるかに上回る超臨界水圧が発生するのであり、この状態ではもはやコンクリートやモルタルが水の圧力に抵抗する事はできず直ちに爆裂が発生する。

図-15 は PP 繊維等 6 種類の有機繊維が気化する温度を熱重量分析により測定した結果と繊維の爆裂抑制効果を示している。有効な繊維はいずれも臨界点  $374^{\circ}\text{C}$  までに気化が終了しているのに対し、効果の少ない繊維はいずれも質量50%が気化する温度が臨界点を上回っている。すなわち、有機繊維が爆裂防止効果を発揮するには臨界点以下の温度領域で気化し水分を逸散させることが重要である。

以上の検討から、爆裂は 250~374 $^{\circ}\text{C}$  の水蒸気圧または  $374^{\circ}\text{C}$  の超臨界水圧によって発生する可能性が高く、有効な有機繊維はこの温度領域で気化して圧力を緩和し爆裂を抑制していると結論される。

### 5. 火災加熱による損傷の全体機構の検討

水蒸気圧または超臨界水圧という水の圧力によって爆裂は十分に起こり得るとの結論を受け、ISO834 の標準加熱曲線による荷重加熱を受ける RC 柱を主たる対象に火災加熱による損傷の全体機構を検討した。この検討に当り、今までに筆者らが経験している損傷の特性とそれに影響している要因を表-6 にまとめた。

本研究の結果と表-6 を基に損傷の全体機構を図-16 のように提案する。これは水蒸気圧説や熱応力説と言うより、これらの「プロセス理論」とでも呼ぶべきものであるが、要点は以下のとおりである。

- ・水の圧力による爆裂, 熱応力によるはく離・はく落,

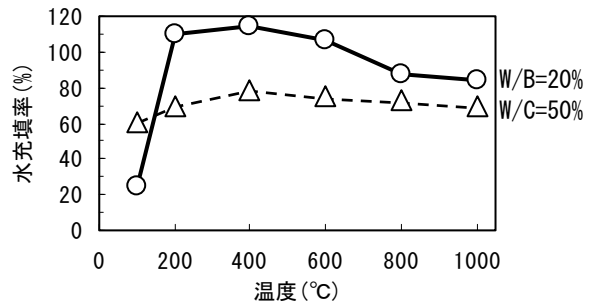


図-11 空隙の水充填率と温度の関係

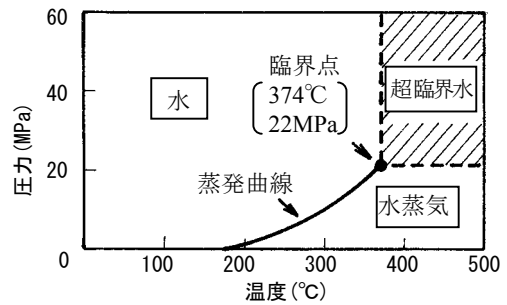


図-12 水の相平衡・状態図

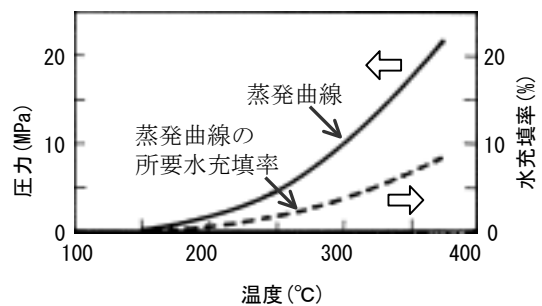


図-13 蒸発曲線と平衡蒸気圧に必要な空隙の水充填率

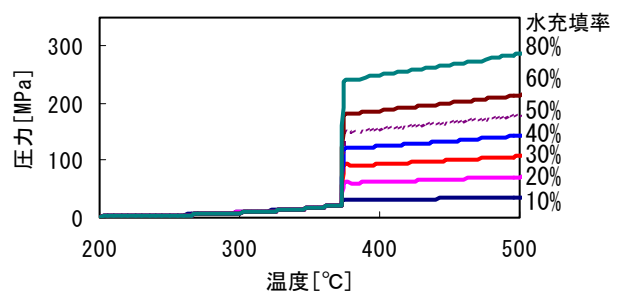


図-14 超臨界水により発生する圧力

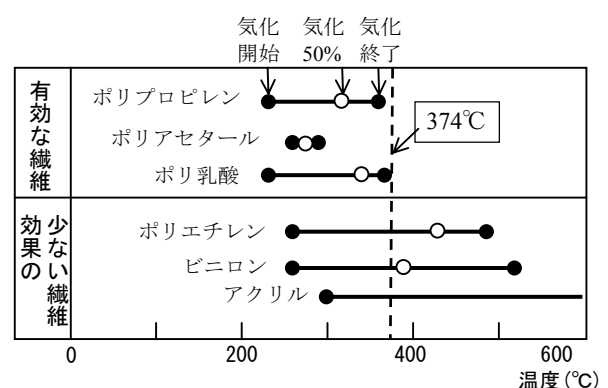


図-15 有機繊維の気化温度領域と爆裂抑制効果

表一六 火災加熱を受ける高強度 RC 柱の損傷の特性と影響要因

損傷の特性	1. 加熱後 5~20 分の間に激しい破裂音とはく離小片の飛散を伴う爆裂 2. 20~40 分の間に比較的大きなはく離片の落下 3. 40 分前後以降耐力喪失
影響要因	1. 水結合材比 25%程度以下, 圧縮強度 80N/mm <sup>2</sup> 程度以上で耐力喪失にいたる損傷 2. 有機繊維には爆裂抑制に有効なもの (PP 繊維等) と効果の少ないもの (ポリエチレン繊維等) がある 3. 150N/mm <sup>2</sup> 程度以上の超高強度では PP 繊維と鋼繊維のハイブリッド化が損傷回避に有効

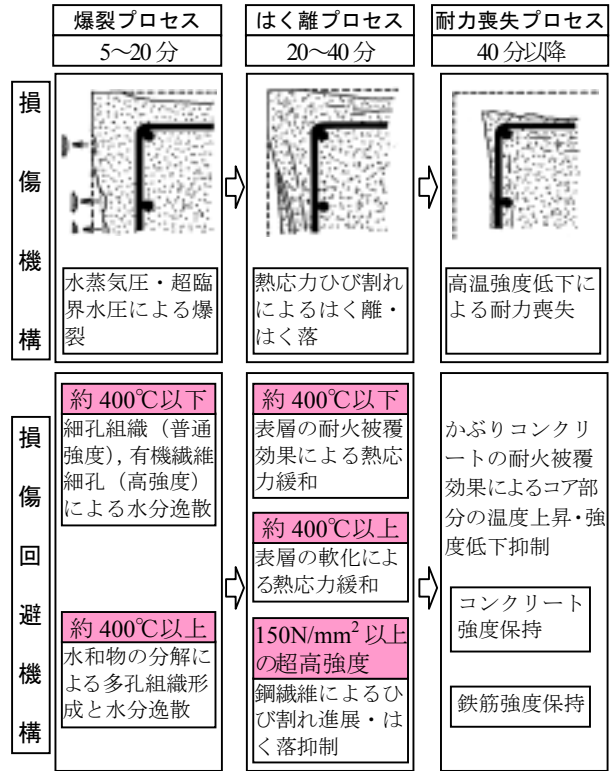
高温下のコア部分の強度低下による耐力喪失という三つの損傷プロセスが順に進展する。

- ・水の圧力による爆裂は耐力喪失に至るプロセスの引き金となるのであり, 耐力喪失に至らないためには, まず爆裂が起こらないことが必要である。
- ・爆裂せずに持ちこたえた表層は, 多孔質化・軟化するのであり, 水分の逸散を容易にし熱応力を緩和する。
- ・爆裂しない多孔質な表層・かぶりコンクリートが耐火被覆として機能し, コア内部のコンクリートと鉄筋を保護して, 長時間の耐力保持を可能とする。

6. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- (1) 水結合材比 20%の試験体では爆裂が生じたが 50%および PP 繊維を 0.1 vol.% 添加した 20%の試験体では爆裂は生じなかった。
- (2) 爆裂した試験体では水分の移動はほとんど認められないのに対し, 爆裂しない試験体では外部に水分が逸散しており, PP 繊維の爆裂抑制効果も水分の外部への逸散によることを確認した。
- (3) 平衡水分量と空隙量の測定により求めた空隙に対する水充填率は水セメント比 50%で 60~80%, 水結合材比 20%で 100%に近い高い値と推定された。
- (4) 水の相平衡から計算すると空隙の水充填率 10%以下で 374℃までの平衡蒸気圧の形成が可能であり, 250~374℃で爆裂の発生に十分な水蒸気圧となる。
- (5) 水が臨界点 374℃を超えて超臨界水に変化すると瞬時に大きな圧力を形成する。爆裂はこの超臨界水圧か, この温度までの水蒸気圧によって発生する。
- (6) 爆裂抑制に有効な有機繊維 (PP 繊維等) は臨界点以下で気化が終了するのに対し, 効果の少ない繊維 (ポリエチレン等) は質量 50%が気化する温度が臨界点以上であり, この違いが繊維の効果を決めている。
- (7) 火災加熱による損傷は, 爆裂プロセス, はく離・はく落プロセス, 耐力喪失プロセスが順に進展しており, これを説明するプロセス理論を火災損傷の全体機構として提案した。



図一六 火災加熱を受ける高強度コンクリート柱の損傷機構のプロセス理論

参考文献

- 1) 米澤敏男, 古平章夫, 藤中英生, 三井健郎, 山崎庸行, 西田 朗, 森田 武: 耐爆裂性コンクリート, 特許第 3584171 号
- 2) 三井健郎, 米澤敏男, 古平章夫, 藤中英生, 武田浩: 耐爆裂性コンクリート, 特許第 4071983 号
- 3) 三井健郎, 米澤敏男, 上田忠男, 佐藤敏之: Fc 100 N/mm<sup>2</sup> 超高強度高耐火コンクリートの超高層 RC 造建築物への大量施工, 日本建築学会技術報告集, Vol. 20, pp. 47-52, 2004
- 4) Harmathy, T. Z.: Effect of Moisture on the fire Endurance of Building Elements, ASTM, STP, No.385, pp. 74-95, 1965
- 5) 齊藤 光: プレストレスト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
- 6) England, G.L., Ross, A.D.: Shrinkage, Moisture and Pore Pressure in Heated Concrete, ACI SP-34, pp. 883-907, 1972
- 7) Bazant, Z.P., Thonguthai, W.: Pore Pressure in Heated Concrete Walls: Theoretical Prediction, Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No. 107, pp. 67-76, 1979
- 8) 日本機械学会: 蒸気表, 1999