

# 論文 リング拘束供試体を用いたポリマーセメントモルタルで補修したコンクリートの火災時における爆裂性状

祐川 真紀帆\*1・杉野 雄亮\*2・谷辺 徹\*3・小澤 満津雄\*4

**要旨:** 本研究では、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）とコンクリートの複合体における爆裂性状を評価するため、リング拘束供試体を用いて PCM によりコンクリートを補修したケースを想定した模擬供試体を作製し加熱試験を実施した。対象とした供試体は、PCM の補修厚さが異なる 2 種類の複合体と、コンクリートおよび PCM の単体の 4 種類とし、補修厚さの影響が爆裂性状に与える影響を検討した。その結果、PCM で補修した複合体はコンクリート単体の供試体より爆裂規模が大きかった。また、補修厚さが薄いものに比べ、厚いものの方が爆裂規模が大きかった。

**キーワード:** ポリマーセメントモルタル, 爆裂, リング拘束供試体, 拘束応力, 水蒸気圧

## 1. はじめに

ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）はセメントモルタルに有機系ポリマーを混入した材料であり、一般的にコンクリートの断面補修材として広く用いられている。PCM は、コンクリートとの接着性、緻密性、施工性等に優れているためコンクリート構造物の補修・補強に必要不可欠な材料である。一方、PCM は有機系材料のポリマーを含有するため高温作用を受けた場合、爆裂が生じやすいことが指摘されている<sup>1)</sup>。しかしながら、PCM の爆裂に関する研究事例は少ないのが現状である。一方、著者らの研究グループでは、コンクリートの爆裂評価方法として日本コンクリート工学会より規準化されたリング拘束供試体法（A 法）を用いて PCM の爆裂評価を行っている<sup>2)</sup>。すなわち、爆裂現象の主要因とされる熱応力と水蒸気圧を測定し、爆裂を評価した。加えて、リング拘束供試体法によりポリマーの添加量の違いによる検

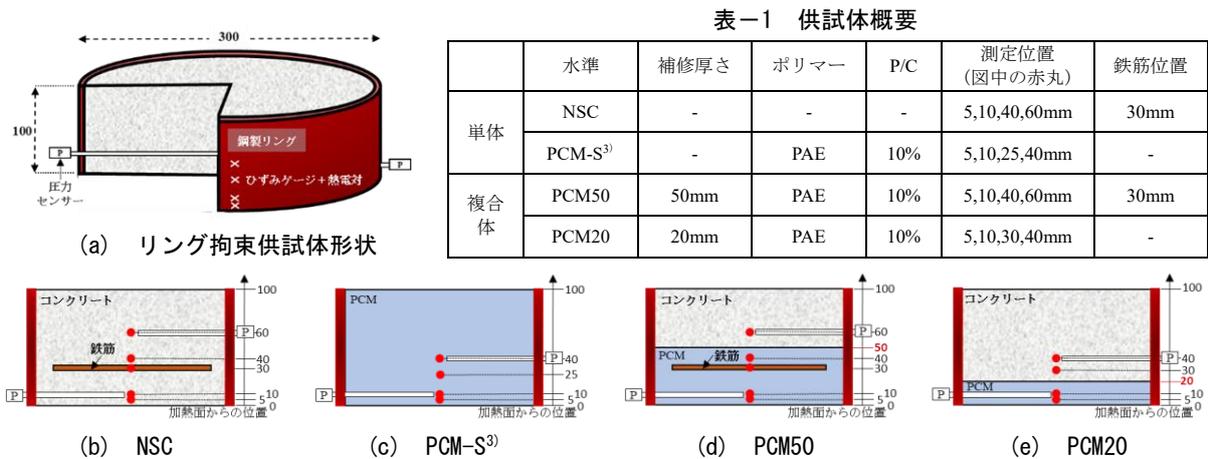
討<sup>3)</sup>も実施している。しかしながら、コンクリート部材を PCM で補修したケースについては、検討していない。

そこで本研究では、コンクリートを PCM で補修した実部材について、リング拘束供試体で模擬したものを作製して、加熱試験を実施しコンクリートと PCM の一体性に関する検討を行った。実験因子は、補修厚さの異なる 2 種類の複合体（補修厚さ 50mm, 20mm）とした。比較用として普通コンクリート（以下、NSC）と PCM それぞれ単体の供試体も作製し、計 4 種類について補修厚さの違いや PCM と NSC の違いによる爆裂性状を比較した。PCM 単体（以下、PCM-S）は既報<sup>3)</sup>のデータを引用して考察を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 リング拘束供試体

表-1, 図-1 に、本研究で用いたリング拘束供試体の



\*1 群馬大学 理工学部環境創生理工学科（学生会員）

\*2 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 修士(工学)（正会員）

\*3 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 博士(工学)（正会員）

\*4 群馬大学大学院 理工学府環境創生部門 准教授 博士(工学)（正会員）

概要を示す。供試体の種類はコンクリートを PCM で補修した複合体と NSC と PCM-S の 4 種類とした。複合体は、PCM の補修厚さが 50mm (PCM50) と 20mm (PCM20) とした。PCM50 と NSC には、加熱面から 30mm 位置に鉄筋を設置し、鉄筋を含む部材を模擬した。

リング拘束供試体の共通する事項を説明する。拘束リングは外径 300mm×高さ 100mm×厚さ 8mm の鋼製リングを用いた。供試体内部に温度測定用の熱電対と、水蒸気圧を測定するためのステンレスパイプ (外径 5mm×内径 2mm×長さ 170mm) を設置した。このステンレスパイプにシリコンオイルを充填した後、圧力センサー (許容値 10MPa) を接続し、水蒸気圧を計測した。また、鋼製リングの表面にひずみゲージと熱電対を対極に設置した。内部温度と蒸気圧の測定位置およびリング表面のひずみゲージの位置は、PCM50 と NSC は加熱面から 5,10,40,60mm とした。一方、PCM20 は 5,10,30,40mm とし、PCM-S は 5,10,25,40mm とした。

複合体の PCM50 と PCM20 作製時においてコンクリートを打設した後、打ち継ぎ目の処理には以下の処理を行った。まず、コンクリート打設から約 1 時間後の凝結が終了した後、打ち継ぎ目処理剤をコンクリート表面に噴霧し、コンクリート表面のモルタル部分ブラシで削りながら、水で洗い流して粗骨材を露出させた。その後、PCM を打設した。

## 2.2 材料仕様およびフレッシュ性状

表-2, 3 に使用した NSC と PCM の配合を示す。NSC は W/C は 49.5% とし、セメントの種類は普通ポルトランドセメントとした。細骨材は佐野市仙波町産砕砂 (表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>) と佐野市山菅町産砕砂 (表乾密度 2.61g/cm<sup>3</sup>) を用いた。粗骨材はみどり市大間々町産砕石 (表乾密度 2.89g/cm<sup>3</sup>) と佐野市閑馬町産砕石 (表乾密度 2.65g/cm<sup>3</sup>) を使用した。混和剤は AE 減水剤標準形とした。PCM の W/C は 50% とした。ポリマーセメント質量比 (P/C) は 10% とした。ポリマーはアクリル共重合体粉末樹脂 (密度 0.4~0.6g/cm<sup>3</sup>) を使用し、セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm<sup>3</sup>) を用いた。細骨材は珪砂 (絶乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>) を用いた。

表-2 NSC の配合

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
49.5	183	370	439	439	634	271	4.07

表-3 PCM の配合

P/C (%)	W/C (%)	パウダー (kg/m <sup>3</sup> )	ポリマー (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )
10	50	197	5.63	28.2

表-4, 5 に PCM とコンクリートのフレッシュ性状と力学特性および含水率を示す。強度試験には φ100mm×L200mm の円柱供試体を各種 2 本ずつ使用し、含水率測定には φ50mm×L100mm の円柱供試体を各種 2 本ずつ使用した。圧縮強度は JIS A 1108 コンクリートの圧縮試験方法、弾性係数は JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法、引張強度は JIS A 1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法、そして含水率は JIS A 1476 建築材料の含水率測定方法に準拠した。なお強度試験および含水率測定用供試体は、リング拘束供試体と同様に試験に供するまで封緘養生とした。表-5 において、使用したコンクリート (NSC) の圧縮強度は 43.1MPa であった。なお、複合体に使用した PCM と PCM-S は同一の配合で作製した。圧縮強度に差異がみられるが、PCM 複合体は材齢 3 ヶ月程度、PCM-S<sup>3)</sup> は材齢 2 ヶ月程度と、材齢が異なるためであると考えられる。含水率は PCM が 6.1~6.3%、NSC は 5.7% となった。

表-4 フレッシュ性状

	温度 (°C)	PCM : 15 打フロー(mm) NSC : スランプ(cm)	空気量 (%)
複合体 PCM	28.1	180	-
PCM-S <sup>3)</sup>	26.0	181	6.2
NSC	29.2	19.5	5.6

表-5 力学特性

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	含水率 (%)
複合体 PCM (材齢 3 ヶ月)	56.0	3.9	22.4	6.3
PCM-S <sup>3)</sup> (材齢 2 ヶ月)	43.0	2.8	22.0	6.1
NSC	43.1	2.8	30.3	5.7

## 2.3 加熱試験

図-2 に本研究で用いた RABT30 加熱曲線を示す。RABT30 加熱曲線は 5 分間で 1200°C まで昇温し 25 分間保持後、110 分間で常温まで徐冷するものである。本試験では図-3 に示すようなガス水平炉を用いた。加熱試験はリング供試体の底面を加熱した。鋼製リング部分は断熱材ブランケットを設置し、鋼製リング自体の温度上昇を抑制した。加熱試験時の供試体の材齢は、PCM50、PCM20 および NSC は 3 ヶ月、PCM-S<sup>3)</sup> は 2 ヶ月とした。

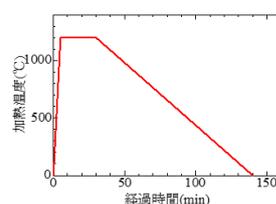


図-2 RABT30 加熱曲線



図-3 ガス水平炉

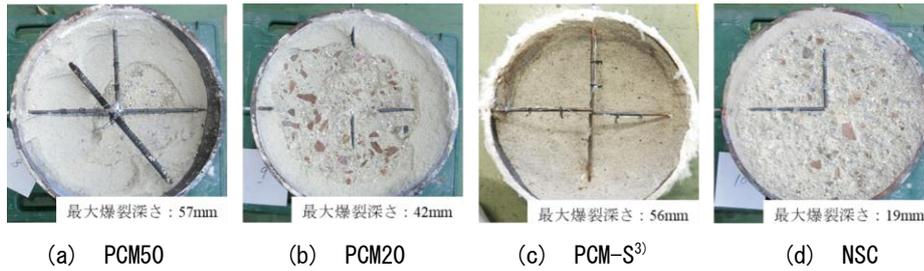


図-4 加熱面の状況

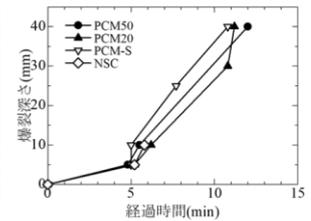


図-5 爆裂深さ経時変化

## 2.4 拘束応力の算出方法

拘束応力は、測定した鋼製リングの円周方向ひずみを用いて算出した。算出方法を式(1)に示す。

$$\sigma_{re} = \varepsilon_{\theta} \cdot E_s \cdot t / R \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{re}$ ：コンクリートに生じる拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_{\theta}$ ：リング円周方向ひずみ

$E_s$ ：リング材弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$t$ ：リング材厚み (mm)

$R$ ：リング材内径 (mm)

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 爆裂性状

図-4にPCM50, PCM20, PCM-S<sup>3</sup>およびNSCのリング拘束供試体の加熱表面の状況を示す。複合体のPCM50の最大爆裂深さは、57mm程度となった。一方、PCM20の最大爆裂深さは42mm程度であり、補修厚さが大きいほうが爆裂規模が大きくなる傾向がみられた。さらに、PCM50, PCM20ともに母材を想定したコンクリート部分まで爆裂する結果となった。この点について、爆裂抑制方法とされている繊維を添加するなどして、今後も継続的に検討する必要がある。また、PCM-S<sup>3</sup>およびNSCの最大爆裂深さはそれぞれ56mm, 19mmであった。4つの供試体を比較すると、PCMで補修したものまたはPCM単体は爆裂規模が大きく、NSCは爆裂規模が小さくなる傾向を示した。また、PCM50およびPCM20の試験結果よりPCMが加熱に伴い少しずつ剥離し一部でコンクリートも爆裂するが、PCMとコンクリートの界面付近で爆裂が止まる傾向となった。このことから、加熱時にPCMとコンクリートが一体となって挙動していることが確認できた。さらに、加熱面から30mm位置に鉄筋を設置したPCM50とNSCは、かぶりだけが一気に剥落することは起きなかったため、供試体の一体性が保たれていると考えられる。

次に、図-5にPCM50, PCM20, PCM-S<sup>3</sup>およびNSCの爆裂深さの経時変化を示す。PCM50, PCM20およびPCM-S<sup>3</sup>は加熱開始後5min付近で爆裂が始まり、11~12min付近で40mm位置まで達し、その後は12~13min

まで爆裂が継続した。NSCは加熱開始後約5minで爆裂が始まり、6min付近で爆裂が終了した。

### 3.2 供試体内部温度の経時変化

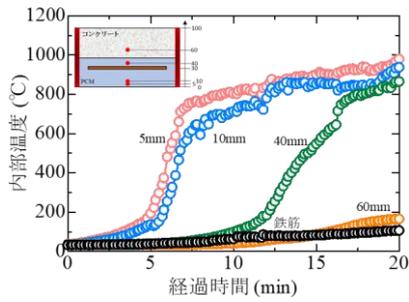
図-6に各供試体の加熱面からの各測定位置における内部温度の経時変化を示す。図-6(a)より、PCM50では加熱面から5, 10, 40mm位置では、ある点から急勾配になっていることから急激な温度上昇が確認できる。これは、測定位置のPCMが爆裂により剥離し、熱電対が直接加熱されたことが要因と考えられる。図-6(b)~(d)よりPCM20, PCM-SおよびNSCも爆裂が生じた位置においては同様の急激な温度上昇が確認できる。ここで、図-6(c)におけるPCM-Sの15min付近での温度の急降下は、連続的な爆裂の発生により安全面を考慮して加熱を中断したためである。また、PCM50およびNSCは、加熱面から30mm位置に鉄筋を設置した。図-6(a), (d)より、鉄筋の表面温度は急な上昇がみられず、PCM50は120℃付近、NSCは60℃付近で停滞した。鉄筋位置の温度が上昇しなかった点については、今後検討する必要がある。

### 3.3 拘束応力の経時変化

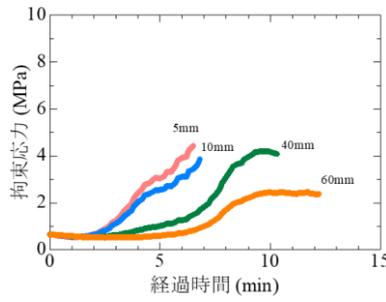
図-7に各供試体の加熱面からの測定位置における拘束応力の経時変化を示す。図-7(a)のPCM50において、5mm位置での拘束応力は、加熱後4minで3MPa以降の拘束応力の増加割合が変化し緩やかになっていることが分かる。これは、加熱による熱損傷によって水和生成物の熱分解とマイクロクラックが発生したことによるものと考えられる。拘束応力の勾配が緩やかになった後、急激な増減がみられる。これは、爆裂の発生によるものと考えられる。以上の傾向は、PCM20とPCM-SおよびNSCでも加熱面から5mmと10mm位置で確認できる。図-7(a)よりPCM50の拘束応力の最大値は4.4MPa、図-7(b)のPCM20の最大値は8.1MPa、図-7(c)のPCM-Sの最大値は6.6MPa、図-7(d)のNSCの最大値は5.4MPaであった。

### 3.4 水蒸気圧の経時変化

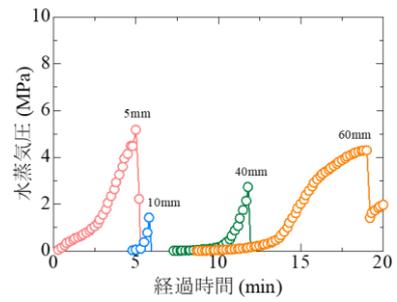
図-8に各供試体の加熱面からの測定位置における水蒸気圧の経時変化を示す。各供試体ともに、加熱に伴い



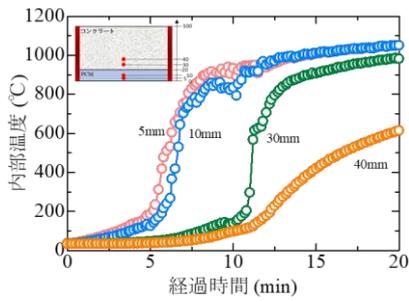
(a) PCM50



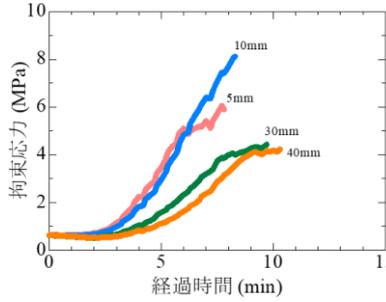
(a) PCM50



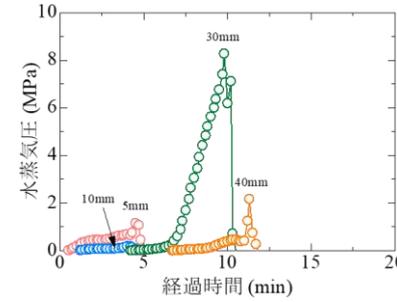
(a) PCM50



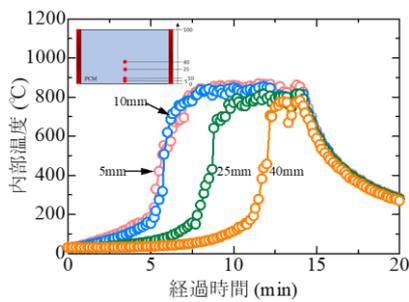
(b) PCM20



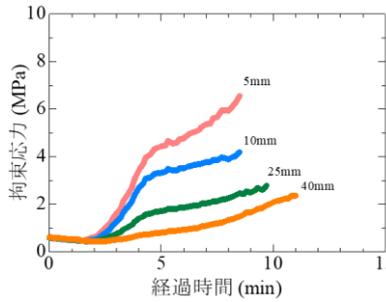
(b) PCM20



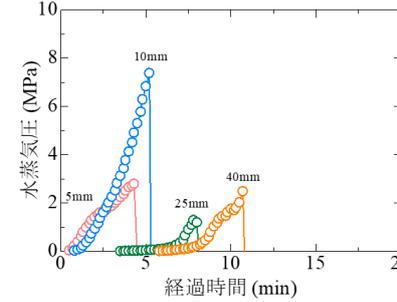
(b) PCM20



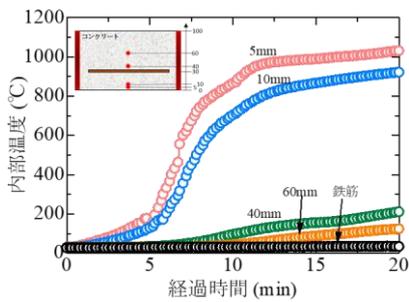
(c) PCM-S



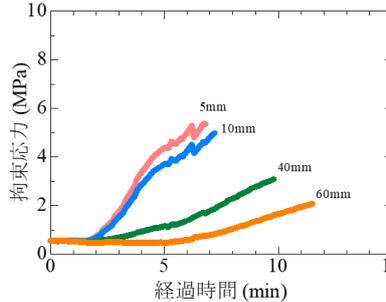
(c) PCM-S



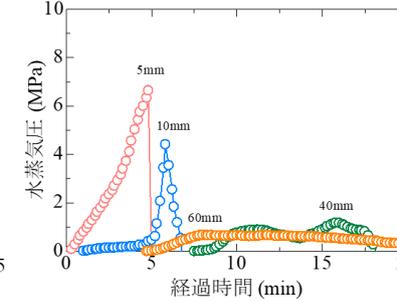
(c) PCM-S



(d) NSC



(d) NSC



(d) NSC

図-6 内部温度の経時変化

図-7 拘束応力の経時変化

図-8 水蒸気圧の経時変化

水蒸気圧が急上昇するが、爆裂の発生による急降下が確認できる。最大爆裂深さが 19mm だった図-8(d)の NSC は 40, 60mm 位置では爆裂に至っていないため、水蒸気圧の急激な増減は見られない。また、図-8(a), (b)の PCM50 の 60mm 位置、および PCM20 の 30mm 位置では水蒸気圧が大きく上昇していることが確認できる。PCM50 は PCM とコンクリートの境界面の深さが加熱面から 50mm であり、PCM20 は 20mm であることから、異

種の材料の境界面に、水分溜まりが生じたことが影響していると考えられる。この点について既報では、加熱に伴い供試体内の水分が加熱面から上側に移動すること<sup>4)</sup>が報告されている。また、別の報告では常温環境でコンクリートの水分はコンクリートと補修材との界面に移動しやすい<sup>5)</sup>との報告がある。今回のケースでは、コンクリートの PCM の透気性が影響していると考え、今後更に検討が必要である。

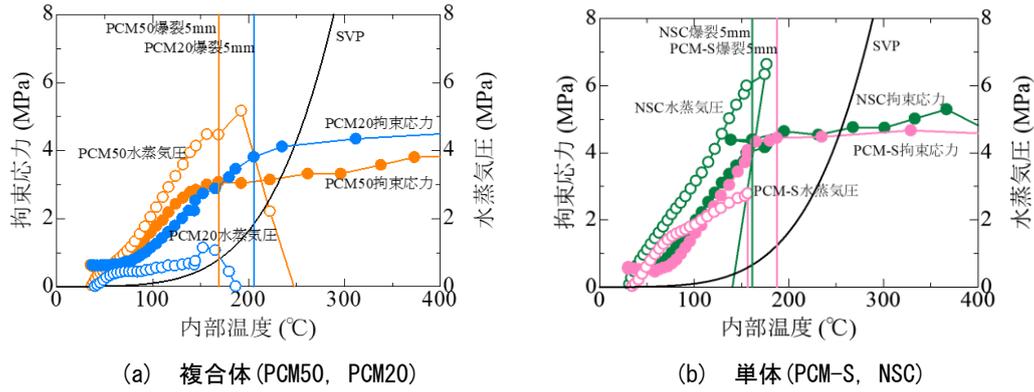


図-9 加熱面から 5mm 位置における内部温度・拘束応力・水蒸気圧の関係

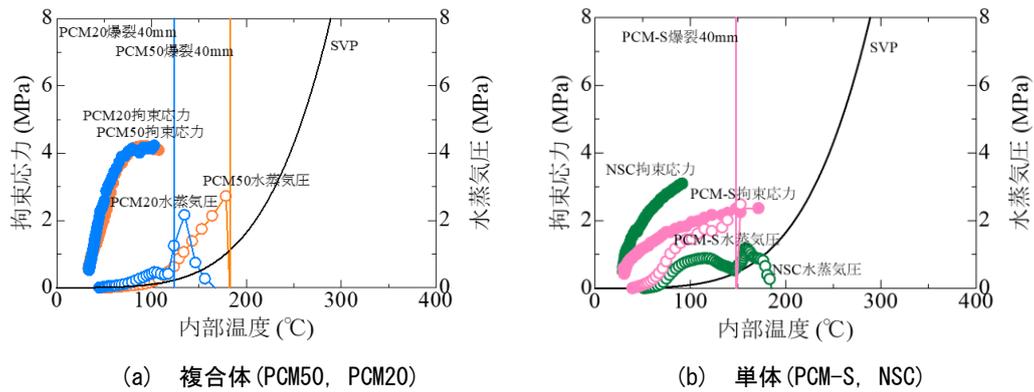


図-10 加熱面から 40mm 位置における内部温度・拘束応力・水蒸気圧の関係

### 3.5 PCM とコンクリートの爆裂メカニズムの仮定

既往の文献より、コンクリートの爆裂発生メカニズムには熱応力説<sup>6)</sup>や水蒸気圧説<sup>7)</sup>およびその複合説が挙げられている。本研究では、コンクリートにおけるリング拘束供試体の爆裂メカニズムを下記のように仮定した。

- ①加熱に伴い加熱面と平行方向に拘束応力が作用する。
  - ②この拘束応力が作用することにより、ポアソン効果によって加熱面に垂直な方向に引張ひずみが作用する。この引張ひずみが限界値を超えると、内部の微細空隙とマトリックスに、加熱面に水平方向にマイクロクラックが生じる。
  - ③加熱により、コンクリート中の微細空隙に存在する水分が蒸気へ変化する。内部温度が 100°C を超えると、水蒸気圧としてコンクリートの内部に作用する。
  - ④②と③の複合作用によって微細空隙とマトリックスにマイクロクラックが生じ、その破壊面に水蒸気圧が作用してマイクロクラックが拡大することで爆裂が生じる。
- これらの仮定に基づいて、爆裂メカニズムに関する以降の考察を行う。

### 3.6 内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係

図-9, 10 に、PCM50 と PCM20 および PCM-S と NSC について加熱面から 5, 40mm 位置における内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係を示す。併せて飽和水蒸

気圧曲線（以下、SVP）を示す。Ichikawa ら<sup>8)</sup>はコンクリートの内部温度と水蒸気圧の関係について考察を行っている。SVP を境界として左側を過飽和領域（Saturated zone）、右側を不飽和領域（Dry zone）としている。各供試体ともに加熱に伴い水蒸気圧が上昇し、過飽和領域から不飽和領域に移動して低下していることがわかる。さらに、爆裂に至った時の内部温度を併せて示す。これは、図-5 に示すとおり、それぞれの位置の内部温度が急激な温度上昇を示したときの温度を爆裂発生とした。

図-9(a) より、PCM50 では拘束応力が 3MPa (130°C) 付近で傾きが緩やかになり、水蒸気圧は 4MPa (150°C) 付近までは上昇し、その直後に 5mm 位置で爆裂が生じた。一方、PCM20 では拘束応力が 4MPa (180°C) 付近で勾配が緩やかになり、水蒸気圧は 1MPa 未満で停滞し、200°C 付近で 5mm 位置での爆裂が発生した。爆裂のメカニズムは上記の仮定とほぼ同様と考えられる。しかし、5mm 位置の PCM20 の水蒸気圧が低い点について、コンクリートと PCM の界面付近に水分溜まりが移動したためだと推察される。この点について、図-8(b) より、界面より手前の 10mm 位置でも水蒸気圧は低く、一方で界面より深い位置の 30mm ではかなり高い値となっていることが読み取れる。

図-9(b) より、NSC では拘束応力と水蒸気圧が 150°C

付近までは上昇し、拘束応力は 4MPa 程度で勾配が緩やかになっている。その直後に 5mm 位置で爆裂が生じ、水蒸気圧が急激に低下している。この点について仮定より、加熱に伴い拘束応力と水蒸気圧が上昇し、拘束応力の傾きが変化した頃にクラックが発生し、そこに水蒸気圧が作用したことで爆裂が生じたと考えられる。一方、PCM-S では NSC と同様に、拘束応力と水蒸気圧が 150°C 付近まで上昇し、拘束応力は 4MPa 程度で勾配が緩やかになった。水蒸気圧の最大値は 2.8MPa をとり、その後 5mm 位置での爆裂が生じた。このことから、PCM-S においても上記の仮定と同様の爆裂メカニズムであることが考えられる。しかし、NSC と PCM-S の水蒸気圧の最大値はそれぞれ 6.6MPa と 2.8MPa であったが、これは弾性係数と透気性が関係していると考えられるが、透気性については今後更に検討が必要である。

図-10(a)より、PCM50 は加熱面から 40mm 位置の PCM 部分の測定結果であるが、PCM20 はコンクリート部分の測定結果である。PCM50 と PCM20 とともに拘束応力は 4MPa (80°C) 付近まで上昇し勾配が緩やかになった。PCM50 と PCM20 の水蒸気圧の最大値はそれぞれ 2.7MPa、2.2MPa となった。PCM50 と PCM20 とともに、拘束応力の増加と停滞によって水平方向にひび割れが生じ、そこに水蒸気圧が作用することで爆裂が生じたと考えられる。

図-10(b)より、NSC は最大爆裂深さが 19mm であるため 40mm 位置まで爆裂に至っていない。そのため、水蒸気圧は爆裂時に特有にみられる急降下が確認できなかった。また、水蒸気圧が低い点について、コンクリート中の水和生成物の熱分解と微細なひび割れにより水蒸気圧が逃げやすい状態であるためだと考えられる。PCM-S は 5mm 位置での拘束応力に比べ、初期から勾配が緩やかであることが読み取れる。拘束応力と水蒸気圧が 2.5MPa (150°C) 付近まで上昇したころ 40mm 位置まで爆裂が生じ、水蒸気圧が一気に低下した。これは加熱損傷と爆裂面の形成が関係していると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) PCM で補修したコンクリート部材を模擬したリング拘束供試体では、母材を想定したコンクリート部分まで爆裂が進展した。補修された実部材において爆裂の危険性があることがリング拘束供試体においても見出せた。爆裂抑制方法とされている繊維を添加するなどして、今後検討する必要がある。
- 2) PCM で補修した複合体において、補修厚さが薄いも

のに比べ、厚いものの方が爆裂規模は大きい傾向がみられた。

- 3) リング拘束供試体法による加熱試験で得られた拘束応力、水蒸気圧および内部温度の関係により、補修した実部材を模擬した供試体においても爆裂が生じる際のそれらの関係を評価できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究は科学技術研究補助金基盤研究 C(番号：19K04546：代表小澤)の補助を受けて実施した。また、大林財団の支援を受けた。ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 構造材料の耐火性ガイドブック：日本建築学会，2017
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリートの爆裂試験方法，JCI-S-014-2018，2018
- 3) 杉野雄亮，谷辺徹，六本木日菜子，小澤満津雄：リング拘束供試体を適用したアクリル系ポリマーセメントモルタルの火災時の爆裂性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1001-1006，2019
- 4) Jansson, R. : Fire Spalling of Concrete Theoretical and Experimental Studies , Doctoral Thesis in Concrete Structures, Stockholm, Sweden, pp.18, 2013.8
- 5) 上田洋，工藤輝大，玉井謙：セメント系補修材の耐久性評価，鉄道総研報告，第 24 巻，第 8 号，pp.5-10，2010.8
- 6) Bazant,Z.P.: Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete, in: L.T. Phan, N.J. Carino, D. Duthinh, E. Garboczi (Eds), Proceedings of the international workshop on fire performance of high-strength concrete. Gaithersburg, Maryland, NIST, pp.155-164, 1997
- 7) Anderberg ,Y.: Spalling phenomena in HPC and OC, in: L.T Phan, N.J. Carino, D. Duthinh, E. Garboczi (Eds.), Proceedings of the international workshop on fire performance of high-strength concrete. Gaithersburg, Maryland, NIST, pp.69-73, 1997
- 8) Ichikawa,Y. and England,G.L.: Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperature, Nuclear Engineering and Design 228, pp.245-259, 2004