

# 論文 実 RC セグメントと同配合で作製したリング拘束供試体の爆裂試験における材齢の影響

阿久津 裕亮\*1・小澤 満津雄\*2・明石 孝太\*3・杉野 雄亮\*4

**要旨:** 本研究では、実大 RC トンネルセグメントの耐火試験実績があるコンクリート配合を対象として、リング拘束供試体を作製し、耐火試験を実施し材齢の影響を検討した。すなわち、材齢は2ヵ月と12ヵ月とし、加熱曲線はRABT30を用いた。リング拘束試験において拘束応力と水蒸気圧および内部の温度を計測し爆裂性状を比較した。PP 繊維混入の有無の影響も検討した。その結果、PP 繊維無しの場合で材齢2ヵ月のものは爆裂を生じたが、材齢12ヵ月では爆裂を生じなかった。また、PP 繊維混入有りの場合では、材齢2ヵ月と12ヵ月ともに爆裂を生じなかった。

**キーワード:** RCセグメント, 爆裂, RABT30加熱曲線, 材齢, リング拘束供試体加熱試験, PP繊維

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物が、火災などにより高温に曝された場合、爆裂現象を生じることがある。この爆裂現象はコンクリートの強度が大きい場合や含水率が高いほど発生しやすいとされている<sup>1)</sup>。高温時の爆裂現象や熱損傷を抑制する方法としては、ポリプロピレン(以下、PP)繊維などを添加する方法と耐火被覆材を設置する方法が一般的である<sup>2)</sup>。また、爆裂のメカニズム(図-1)としては、水蒸気説と熱応力説およびその複合説があるが、未だに確たる結論に至っていないのが現状である<sup>3)</sup>。一方、本研究グループは、熱応力説に着目し、リング拘束供試体を用いた爆裂試験法を検討している<sup>3)</sup>。この手法は、日本コンクリート工学会のJCI-TC154A委員会で議論されコンクリートの爆裂を評価試験法として提案がなされている<sup>4)</sup>。委員会の中で、実大RC柱の耐火試験結果がある配調合についてリング拘束供試体の加熱試験に関する共通試験が実施されている<sup>1)</sup>。また、本研究グループではRCトンネルセグメントの耐火試験実

績のある配合について、材齢2ヵ月におけるリング拘束加熱試験を比較したものを報告した<sup>4)</sup>。一方で、材齢が経過したケースに関する報告は少ない<sup>5)</sup>。そこで、本研究ではリング拘束供試体の爆裂試験法に対する材齢の影響を検討するために、既報<sup>4)</sup>と同配合の供試体について材齢12ヵ月の加熱試験を行い、耐火性状を確認した。加えて、材齢2ヵ月の耐火試験結果と比較し材齢の影響を検討した。更に、拘束応力と蒸気圧の温度に対する関係より爆裂メカニズムの検討を試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

図-2に本研究で用いたリング拘束供試体の概要を示す。供試体は鋼製リングにコンクリートを充填し、試験に供するまで2ヶ月、12ヶ月養生した。なお、鋼製リング(外径300×高さ50×厚さ8mm)を2段重ねとして拘束リング(外径300×高さ50×厚さ8mm)とした。養生方法は、恒温室(20℃一定)にて封緘養生とした。拘束リングの

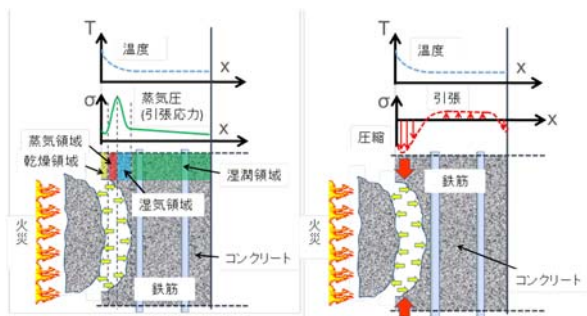


図-1 爆裂メカニズム

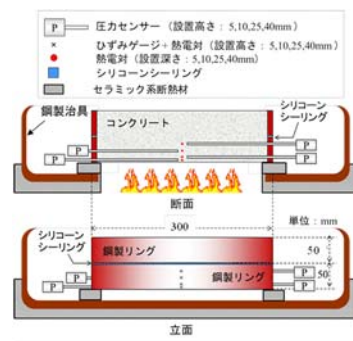


図-2 リング拘束供試体の概要

\*1 群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 (学生会員)

\*2 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)

\*3 群馬大学 大学院理工学府 環境創生理工学プログラム (学生会員)

\*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 修士(工学) (正会員)

内部には温度測定用の熱電対を底面から 5, 10, 25, 40mm の位置に設置した。供試体の内部には水蒸気圧計測用にステンレスパイプ(内径 2mm, 外径 5mm, 長さ 180mm)をコンクリート内部から拘束リング外部まで突出するように、加熱面から 5, 10, 25, 40mm の位置に設置した。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)を接続して計測を行った。本研究では、測定している水蒸気圧は圧力パイプの開口部の細孔空隙の水蒸気圧と仮定している。コンクリートの拘束応力を算出するため、拘束リングの円周方向に自己温度補償型ひずみゲージを設置した。設置位置は、リングの外周で対極に 2 か所、加熱面から 5, 10, 25, 40mm の位置とした。ひずみゲージは常温用(耐熱温度 80°C)を使用した。拘束応力の算出は、拘束リング側面の温度を熱電対で計測し、80°C以下におけるひずみデータを使用した。

## 2.2 コンクリート

表-1, 2 にコンクリートの配合表および使用材料を示す。また、表-3, 4 にコンクリートのフレッシュ性状と特性および含水率を示す。含水率は、測定用にリング供試体と同配合のφ50×100mm 供試体を別に作製した。それを電気炉(約 105°C一定)で加熱して水分を蒸発させ、

表-1 配合表

記号	W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	Ad	PP
Seg	0.32	145	450	872	962	3.8	—
Seg+PP							1.8

表-2 使用材料

記号	詳細
C	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> )
S	硬質砂岩砕砂 (吸水率: 1.04%, 絶乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> )
G	硬質砂岩砂石 (吸水率: 1.39%, 絶乾密度: 2.59g/cm <sup>3</sup> )
Ad	高性能減水剤
PP	PP 繊維 (繊維長 12mm, 密度 0.9g/cm <sup>3</sup> )

表-3 フレッシュ性状

記号	空気量	スランプ	Tc
	(%)	(cm)	(°C)
Seg	5	1.8	21
Seg+PP	2.4	1.9	21

加熱前後の質量変化から算出した。配合は RC セグメントものとし繊維混入の有無によって Seg と Seg+PP の 2 種類とした。また、材齢 2 ヶ月のもので PP 繊維の混入なしのものを Seg-2 とし、PP 繊維を混入したものを Seg+PP-2 とした。材齢 12 ヶ月のものも同様に、PP 繊維混入なしを Seg-12 とし、PP 繊維を混入したものを Seg+PP-12 と表記した。Seg+PP は実構造物のトンネル RC セグメントとして使用されている配合を用いた。材齢によって Seg シリーズの含水率は Seg-2 が 4.1%, Seg-12 が 3.1%であった。

## 2.3 加熱試験

本研究の加熱試験は、RABT30 加熱曲線(5分 で 1200°C 昇温, 1200°C を 30 分まで保持, その後 110 分間で常温まで徐冷)を用いた。加熱にはガス水平炉を用いた。ガス炉の上面に試験器具を設置し、その上に供試体を設置した。供試体下面を RABT30 加熱曲線に沿って一面加熱した。供試体下面のリング部分については、リング自体の熱膨張を防ぐため、断熱材ブランケットを設置し、リングの温度上昇を防いだ。

## 2.4 円筒モデルによる拘束応力の算出方法

拘束応力は、拘束リングの円周方向ひずみより式(1)を用いて算出した<sup>9)</sup>。

表-4 含水率(質量比)

記号	材齢	含水率
	(ヶ月)	(%)
Seg-2	2	4.1
Seg-12	12	3.1
Seg+PP-2	2	4.1
Seg+PP-12	12	3.1

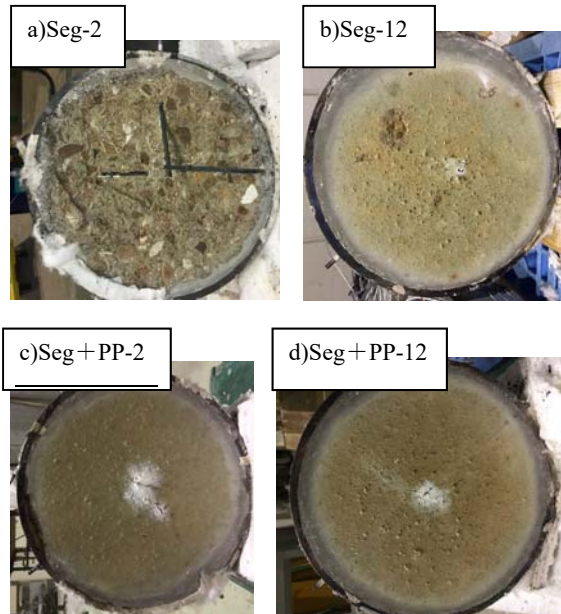


図-3 加熱面の状況

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

ここに、

$\sigma_{re}$  : 拘束応力

$\varepsilon_{\theta}$  : 円周方向ひずみ

$E_s$  : 拘束リングの弾性係数

$t$  : 拘束リングの厚み

$R$  : 拘束リングの内半径

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 加熱面の状況

図-3 に Seg シリーズおよび Seg+PP シリーズの材齢 2 ヶ月と 12 ヶ月の加熱面の劣化状況を示す。図より、Seg-2 では爆裂が生じた。爆裂深さの最大値は 21 mm であった。材齢が 12 ヶ月の Seg-12 は骨材のポップアウトによる軽微な爆裂が生じただけで大きな損傷は生じなかった。Seg+PP シリーズも材齢 2 ヶ月と 12 ヶ月ともに爆裂が生じなかったが、表面に加熱に伴う微細なひび割れが生じた。また、Seg-2 以外の 3 つの供試体に関しては、加熱面が

白色に呈している。このことは、蒸気圧計測用パイプに充填した圧力媒体(シリコンオイル)が加熱面のひび割れから染み出し、気化したものである。

#### 3.2 コンクリート内部温度の経時変化

図-4 に材齢毎におけるコンクリート内部温度の経時変化を示す。Seg-2 の 5, 10mm に着目すると加熱開始からそれぞれ 5.2min, 7.2min 以降に急激に上昇していることが確認された。これは、爆裂が生じ、コンクリートのかぶりがかつ深さまで剥離したためであると考えられる。Seg-12 は急激な温度変化は確認されなかった。Seg+PP シリーズも Seg-12 と同様な傾向となった。

#### 3.3 拘束応力の経時変化

図-5 に式(1)より算出した拘束応力の経時変化を示す。全体の傾向として、加熱に伴うコンクリートの熱膨張によって拘束応力が増加している。Seg-2 は爆裂によって拘束応力の増減が確認できる。Seg-12 と Seg+PP-2 は爆裂が生じていないため、拘束応力の増減はない。Seg+PP-12 は 5mm と 10mm 値の拘束応力が 5 分程度に変曲点

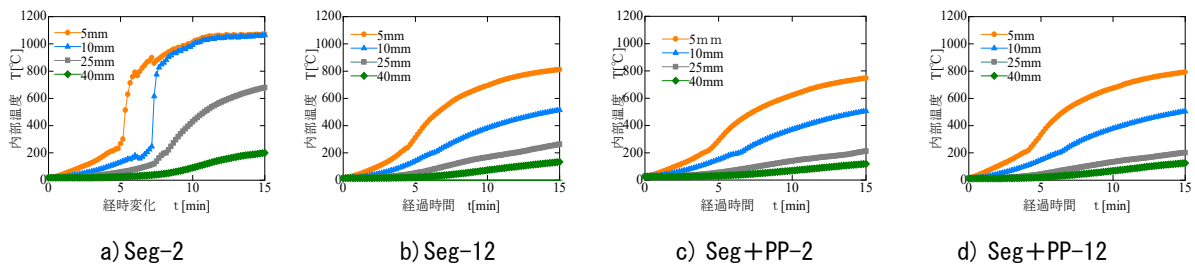


図-4 コンクリート内部温度の経時変化

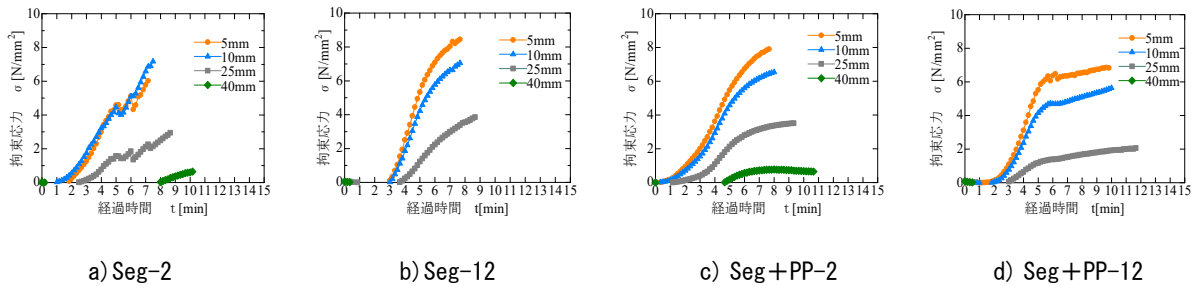


図-5 拘束応力の経時変化

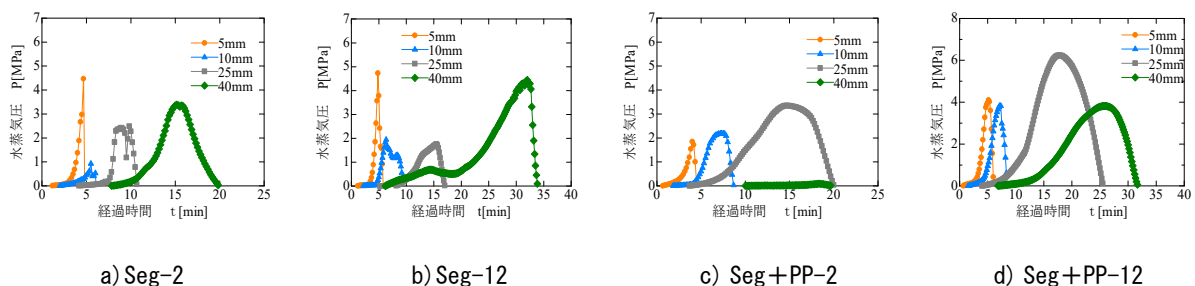
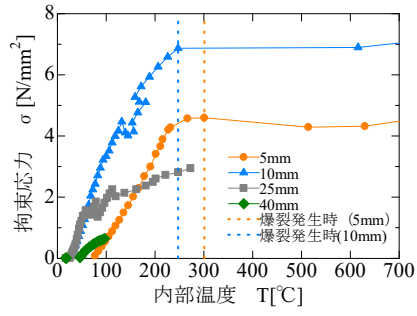
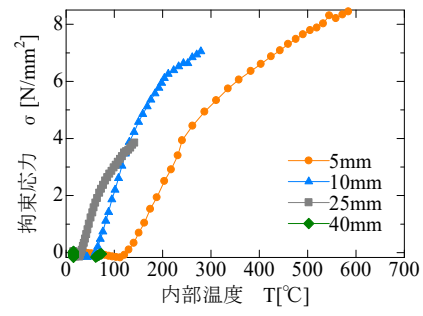


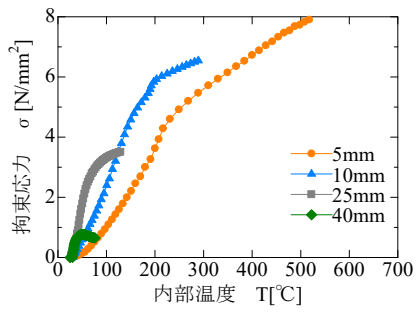
図-6 水蒸気圧の経時変化



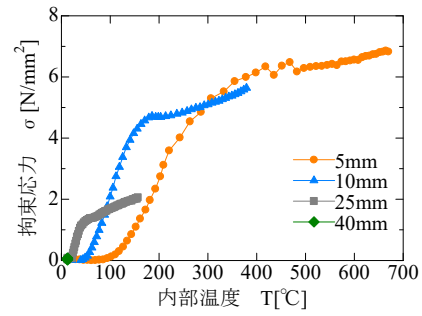
a) Seg-2



b) Seg-12

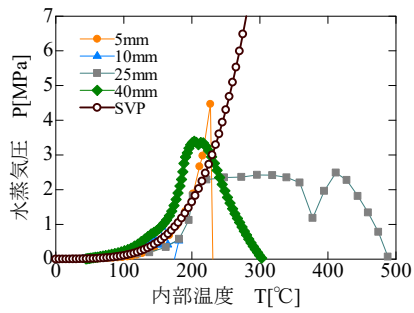


c) Seg+PP-2

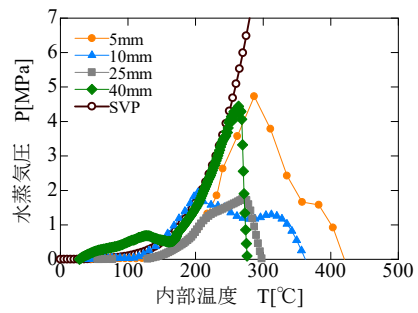


d) Seg+PP-12

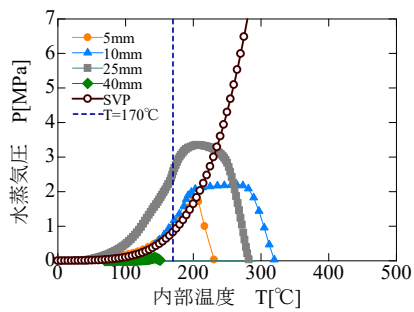
図-7 拘束応力と内部温度の関係



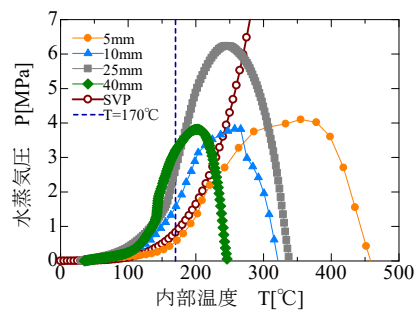
a) Seg-2



b) Seg-12



c) Seg+PP-2



d) Seg+PP-12

図-8 水蒸気圧と内部温度の関係

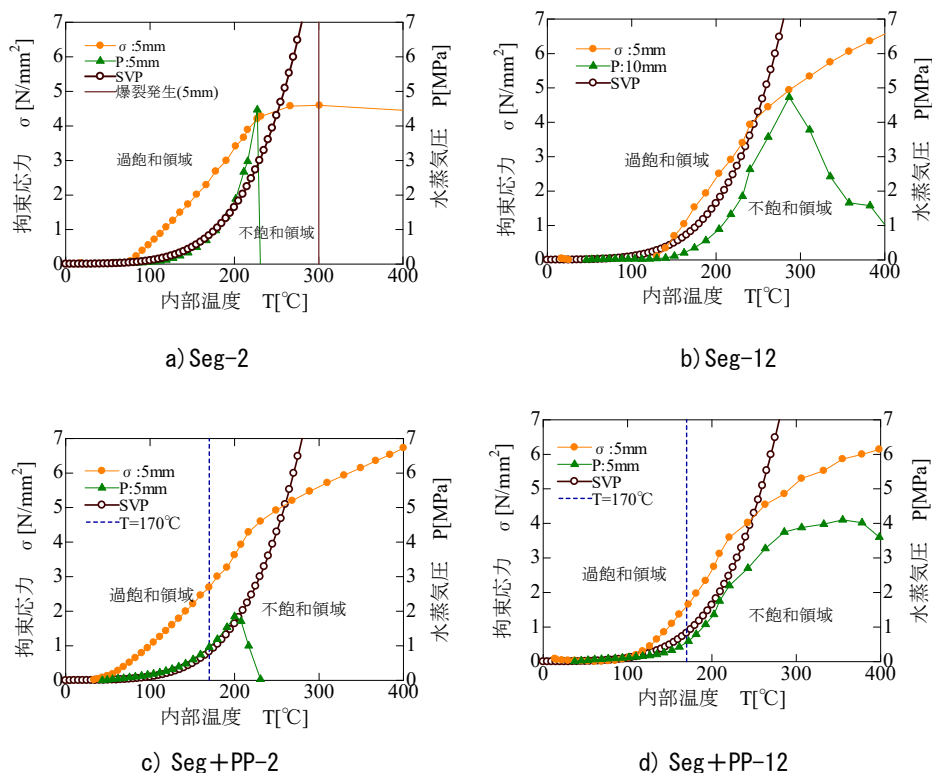


図-9 拘束応力および水蒸気圧と内部温度の関係

を示している。Seg+PP-12 が変曲点を示す点については、PP 繊維の融融と含水率の低下およびひび割れの影響が考えられるが、詳細の検討は今後の課題としたい。

### 3.4 水蒸気圧の経時変化

図-6 に水蒸気圧の経時変化を示す。爆裂を生じた Seg-2 は 5mm 位置の水蒸気急激な増加と低下がみられた。Seg-12 も 5mm 位置の水蒸気急激な増加を示すが大きな爆裂は生じていない。Seg+PP-2 と Seg+PP-12 は、Seg-2 と比較して、水蒸気圧の上昇は緩やかである。これは PP 繊維混入の影響と考えられる。

### 3.5 拘束応力と内部温度の関係

図-7 に拘束応力と内部温度の関係を示す。Seg-2 は 5mm と 10mm 位置で 300°C と 247°C で最初の爆裂が生じている。

Seg-12 と Seg+PP-2 および Seg+pp-12 の 5mm 位置の拘束応力の傾きが 230°C 付近で変化している。これは加熱に伴う微細なひび割れと水和生成物の熱分解による剛性の低下と考えられる。微細ひび割れの影響と水和生成物の影響については、今後さらに検討が必要であると考えられる。加えて PP 繊維を混入したものは、PP 繊維融融による応力緩和が生じたことが考えられる。

### 3.6 水蒸気圧と内部温度の関係

図-8 に水蒸気圧と内部温度の関係を示す。まず、Ichikawa ら<sup>7)</sup>はコンクリート内部の水蒸気圧と温度変化について、考察を行っている。飽和水蒸気圧曲線(SVP)を境

界として左側を過飽和領域(Saturated zone)とし、右側を不飽和領域(Dry Zone)としている。ここでは、過飽和領域と不飽和領域について考察する。

Seg-2 において加熱面に近い 5mm 位置の水蒸気圧は、過飽和領域を示し最大値に達したあと、急激に低下している。40mm 位置の水蒸気圧の最大値は過飽和領域にあるが、これは加熱に伴う水分が上部へ移動し、水分溜まりを形成したと考えられる。

Seg-12 は全体的に SVP 上か、不飽和領域にある。これは材齢経過に伴う水和反応の進行による含水率の低下が影響していると考えられる。

Seg+PP-2 の水蒸気は加熱面に近い 5mm 位置で SVP 上にあり、最大値は 2MPa であった。この原因として、PP 繊維の融融によって水蒸気圧の上昇が抑制されたことが考えられる。一方、25mm 位置の水蒸気圧の最大値は過飽和領域にある。これは加熱に伴い、水分が上部へ移動し、水分溜まりが形成されたものと考えられる。

Seg+PP-12 は加熱面に近い 5mm 位置で不飽和領域にある。一方、10mm 位置は過飽和領域にある。Seg+PP-12 は材齢が 12 ヶ月であり、材齢の経過による水和反応により、含水率の低下が生じている。また、PP 繊維の融融により、5mm 位置では不飽和領域にあると考えられる。一方、10mm 位置より上部では、PP 繊維の融融により空隙は形成されるが、加熱に伴い供試体下部からの水分が上部へ移動し、水分溜まりを形成することから過飽和領

域を示したと考えられる。加熱による PP 繊維の溶融と空隙の形成と水分が上部に移動することによる水分溜まりの形成の関係が爆裂の発生に関係すると考えられるが、今後さらに検討が必要であると考えられる。

### 3.7 拘束応力および水蒸気圧と内部温度の関係

図-9 に加熱面から 5mm 位置における拘束応力および水蒸気圧と内部温度の関係を示す。ここでは、爆裂の発生の有無の原因について考察する。Seg-2 は拘束応力の変化が 230℃付近(4.5MPa)で緩やかになった。水蒸気圧の最大値は、過飽和領域にあり 220℃で 4.5MPa を示し、急激に低下した。その後、300℃で爆裂が生じている。爆裂が生じる直前で拘束応力による微細ひび割れが発生し、そこに過飽和領域にある水蒸気圧が作用することで爆裂が生じたものと考えられる。本検討により、爆裂直前の拘束応力と水蒸気圧の関係の一例を示すことができた。Seg-12 では、拘束応力は 230℃付近で勾配に変化が見られる。水蒸気圧の最大値は不飽和領域にあり、280℃で 5MPa であった。拘束応力の増加により、微細なひび割れは生じるが、材齢が 12 ヶ月経過し含水率の低下により、水蒸気圧は不飽和領域にあることで大きな爆裂が生じなかったものと考えられる。

次に Seg+PP シリーズについて考察する。このシリーズは、材齢に関係なく爆裂を生じなかった。Seg+PP-2 の拘束応力は 230℃付近で勾配に変化が見られる。これは内部に微細なひび割れが生じ剛性が低下したことを表すと考えられる。水蒸気圧は SVP 上にあり、最大値は温度 200℃で 2MPa であった。拘束応力の増加により、微細なひび割れは生じるが PP 繊維が混入されているため、170℃付近で PP 繊維の溶融が生じ、水蒸気圧の上昇が抑制され、爆裂が生じなかったものと考えられる。

Seg+PP-12 の拘束応力は 200℃付近で勾配に変化が見られる。水蒸気圧の最大値は不飽和領域にあり 300℃で 4MPa となった。拘束応力の増加により、微細なひび割れは生じ、更には PP 繊維の溶融が生じ空隙が形成される。加えて、Seg+PP-12 は材齢の経過による水和反応の進行による含水率の低下している。以上より、水蒸気圧は不飽和領域にあり水蒸気圧の急激な上昇が抑制され、爆裂が生じなかったものと考えられる。

## 4. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- 1) PP 繊維無しの場合で材齢 2 ヶ月のものは爆裂を生じたが、材齢 12 ヶ月では爆裂を生じなかった。また、PP 繊維混入有りのケースでは、材齢 2 ヶ月

と 12 ヶ月ともに爆裂を生じなかった。材齢の経過によって、爆裂が生じないケースもあることが示唆された。また、材齢の経過により、含水率が低下し、飽和状態が変化するが、それらは爆裂の有無やメカニズムに影響を及ぼしていることが考えられる。今後、更にはサンプル数を増やして検討していく必要がある。

- 2) リング拘束加熱試験で得られた拘束応力および水蒸気圧と内部温度の関係より、爆裂が生じる際の拘束応力と水蒸気圧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) 16K06437)と LIXIL 住生活財団および JCI 研究助成金の補助を受けた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会 報告書，pp.231-252，2017.9
- 2) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.9，pp.87-91，2007
- 3) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，内田裕一，六郷恵哲：高温環境下での高強度コンクリートの耐爆裂性評価における爆裂発生指標の提案，土木学会論文集 E2,Vol.70，No.1,pp.104-117,2014
- 4) 山本哲，小澤満津雄，谷辺徹，古市耕輔：実大 RC セグメントの耐火試験と同配合で作製したリング拘束供試体加熱試験結果の比較，コンクリート工学年次論文集,Vol.39,No.1，pp.1123-1128，2017
- 5) 鎌田亮太，小澤満津雄，明石孝太，谷辺徹：リング拘束試験方法における高強度コンクリートの爆裂性状におよぼす養生期間の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38,No.1,pp.1305-1310,2016
- 6) M.Ozawa, T.Tanibe, R.Kamata, Y.Uchida, K.Rokugo, S.S.Parajuli : Behavior of ring-restrained high performance concrete under extreme heating and development of screening test, Construction and Building Materials, 162, pp.215-228, 2017
- 7) Y. Ichikawa, G.L. England: Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperature, Nuclear Engineering and Design 228, pp.245-259, 2004