

論文 火災時における各種繊維を混入した高強度コンクリートの爆裂性状に与える材齢の影響：リング拘束試験法による検討

祐川 真紀帆*1・小澤 満津雄*2・赤坂 春風*3・杉野 雄亮*4

要旨：本研究では、異なる2種の繊維を用いた高強度コンクリートを対象としてリング拘束供試体加熱試験を実施し、材齢や繊維の混入の有無による影響を検討した。すなわち、繊維はポリプロピレン繊維(以下、PP)とジュート繊維(以下、Jute)繊維を用い、材齢は2ヶ月と14ヶ月とした。加熱曲線はRABT30とし、計測項目は拘束応力および水蒸気圧とした。その結果、繊維無混入のケースでは材齢2ヶ月と比較して14ヶ月は爆裂深さが小さくなった。PP繊維を混入したケースでは14ヶ月で爆裂を生じなかった。Jute繊維を混入したケースでは材齢2ヶ月と14ヶ月ともに爆裂は生じた。

キーワード：高強度コンクリート, PP繊維, Jute繊維, 爆裂, 材齢, リング拘束供試体, 飽和水蒸気曲線

1. はじめに

高強度コンクリート(以下、HSC)は高層建築物や橋梁などのコンクリート構造物に広く用いられている。しかし、火災などによりコンクリートが急激な高温作用を受けると、コンクリートのかぶり部分が剥離・剥落する爆裂現象を生じてしまう可能性がある¹⁾。爆裂現象の発生メカニズムとしては熱応力説²⁾や水蒸気圧説³⁾およびその複合説が挙げられるが、確たる結論は得られていないのが現状である。爆裂を抑制する方法としては、一般的にポリプロピレン(以下、PP)繊維の混入方法が多数報告されている⁴⁾。一方、著者らの研究グループでは、資源の有効利用の面から再生可能な天然繊維であるジュート(以下、Jute)繊維による爆裂抑制効果について検討している⁵⁾。更に、爆裂現象の主要因である熱応力と水蒸気圧を測定し爆裂を評価する方法として、リング拘束供試体加熱試験を検討している⁶⁾。この手法は、日本コンク

リート工学会の試験法：リング拘束供試体法(A法)として規準化がなされた⁷⁾。リング拘束供試体法を用いてこれまでに、材齢の影響⁸⁾⁹⁾や種々の配合¹⁰⁾¹¹⁾の違いによる検討がなされているが、適用データを更に増やして適用性の検討を進める必要がある。

そこで本研究では、天然繊維であるJute繊維混入型HSCを対象として、リング拘束供試体法を実施し材齢の影響を検討した。すなわち、材齢は2ヶ月と14ヶ月とした。比較用としてHSCとHSCにPP繊維を混入したケースについて加熱試験を行った。また、既往の研究から一般性や再現性が確保できると判断したため、各ケースにおける供試体数は1体とした。

2. 実験概要

2.1 リング拘束供試体⁷⁾

図-1に、本研究で用いたリング拘束供試体の概要を

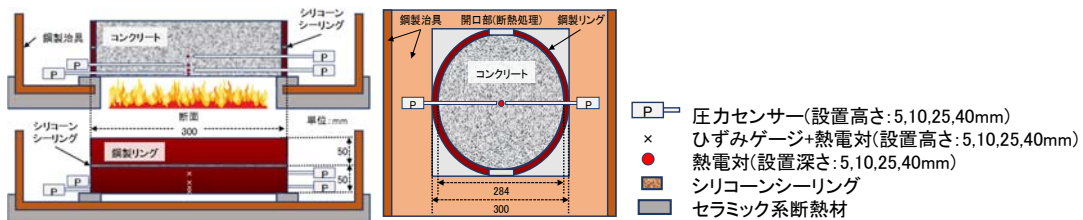


図-1 リング拘束供試体概要

表-1 コンクリートの配合

	W/C	単位量(kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G	Ad	PP	Jute
HSC	0.3	150	500	359	372	1169	4	0	0
HSC+PP								0.9	0
HSC+Jute								0	1.38

*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)

示す。拘束リングは外径 300mm×高さ 50mm×厚さ 8mm の鋼製リングを 2 段重ねにしたものとし、拘束リングの内部にコンクリートを充填した。コンクリートの内部に温度測定用の熱電対を設置した。さらに、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。供試体内部の熱電対とステンレスパイプ、および鋼製リング表面のひずみゲージと熱電対の設置位置はいずれも供試体底面から 5, 10, 25, 40mm とした。

2.2 配合およびフレッシュ性状

表-1 にコンクリートの配合を示す。コンクリートの配合は HSC, HSC+PP, HSC+Jute の 3 種類とした。W/C は 0.3 とし、セメントの種類は早強ポルトランドセメントとした。細骨材は佐野市中町産細目砕砂(S1: 吸水率 1.06%, 絶乾密度 2.60g/cm³)と大間々町小平産砕砂(S2: 吸水率 1.93%, 絶乾密度 2.68g/cm³)を用いた。粗骨材は大間々町小平産輝緑凝灰岩(G: 吸水率 0.94%, 絶乾密度

2.83g/cm³)を使用した。混和剤 Ad は高性能減水剤(ポリカルボン酸系)とした。使用した繊維は PP 繊維および Jute 繊維とし、混入率は 0.1vol% とした。表-2, 3 に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 3 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。測定方法は JIS 規格に準拠した。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。コンクリートの強度は材齢によって多少の差異はあるが、90~100MPa 程度となった。含水率は材齢 2 ヶ月が 3.1~3.5% であるが、材齢 14 ヶ月では 2.4~2.7% 程度となった。弾性係数は材齢 2 ヶ月で 53~56GPa, 14 ヶ月で 55~62GPa となり、材齢の経過に伴い増加している。含水率の低下により、水和反応が進行しマトリックスが密になったためと考えられる。一方、圧縮強度の増加が確認できない点について、既報⁸⁾でも同様の結果があるが、定量的な評価は今後の検討課題としたい。

2.3 使用した繊維の特性

表-4 に、Jute 繊維および PP 繊維の特性を示す。本研

表-2 フレッシュ性状

	空気量 (%)	スランプ (cm)	温度 (°C)
HSC	0.9	21.0	27.0
HSC+PP	0.8	20.4	27.6
HSC+Jute	2.9	20.0	27.7

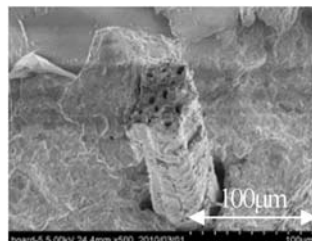


図-2 Jute 繊維の SEM 写真

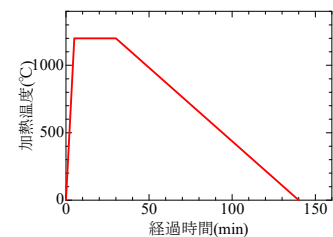


図-3 RABT30 加熱曲線

表-3 圧縮強度・弾性係数・含水率

	材齢 (ヶ月)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	含水率 (%)
HSC_2	2	102.0	55.6	3.29
HSC+PP_2	2	90.2	55.5	3.11
HSC+Jute_2	2	100.1	52.7	3.54
HSC_14	14	96.4	62.1	2.40
HSC+PP_14	14	102.8	57.3	2.39
HSC+Jute_14	14	90.3	55.3	2.74

表-4 Jute 繊維および PP 繊維の特性

繊維の種類	繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	密度 (g/cm ³)	その他の特性
PP	12	110	0.91	170°C で溶融
Jute		50	1.38 (1.3-1.45)	360°C で炭化



図-4 ガス水平炉



a) HSC_2 b) HSC+PP_2 c) HSC+Jute_2
 図-5 材齢 2 ヶ月における加熱面の状況¹¹⁾



a) HSC_14 b) HSC+PP_14 c) HSC+Jute_14
 図-6 材齢 14 ヶ月における加熱面の状況

究では Jute 繊維の密度を平均値である 1.38g/cm^3 として、 $0.1\text{vol}\%$ をコンクリートに混入した。Jute 繊維は天然繊維であり、ストロー(中空)構造(図-2)であることから、コンクリート加熱時に蒸気の逸散ネットワークを形成し、蒸気圧の低減効果が期待できるとされている⁵⁾。

2.4 加熱試験

図-3 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-4 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。

2.5 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。

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

σ_{re} : コンクリートに生じる拘束応力

ε_{θ} : リング円周方向ひずみ

E_s : リング材弾性係数

t : リング材厚み

R : リング材内径

3. 実験結果および考察

ここでは、材齢 14 ヶ月の内部温度と拘束応力および蒸気圧の結果について報告する。材齢 2 ヶ月の結果の詳細は既報¹¹⁾を参照頂きたい。

3.1 爆裂性状

図-5, 6 に材齢 2 ヶ月および材齢 14 ヶ月のリング拘束供試体の加熱表面の状況をそれぞれ示す。HSC のケースにおいて、材齢 2 ヶ月(HSC_2)では加熱面全体で爆裂が生じ、最大爆裂深さは 40mm 程度となった。一方、材齢 14 ヶ月(HSC_14)では加熱面全体で爆裂が生じたが、HSC_2 よりも爆裂規模が小さく、最大爆裂深さは 25mm 程度であった。PP 繊維を混入したケースにおいて、材齢 2 ヶ月(HSC+PP_2)では小規模な爆裂が生じたが、材齢 14 ヶ月(HSC+PP_14)では爆裂は生じず、加熱表面に亀甲状にひび割れが生じた。次に Jute 繊維の混入したケースにおいて材齢 2 ヶ月(HSC+Jute_2)と 14 ヶ月(HSC+Jute_14)

ともに爆裂は生じず、亀甲状にひび割れが生じた。各シリーズともに材齢の経過により水和反応が進行して含水率が低下し、爆裂が生じにくくなったと考えられる。

3.2 供試体内部温度の経時変化

図-7 に材齢 14 ヶ月の各供試体における内部温度(5, 10, 25, 40mm 位置)の経時変化を示す。図-7a) より、HSC のケースでは、各測定位置の温度は加熱に伴い上昇していることが分かる。加熱面から 5mm と 10mm 位置では急激な温度上昇が確認できる。これは、爆裂によって測定位置のコンクリートが剥離し、熱電対が炉内に露わになり、直接加熱されたことが要因と考えられる。図-7b) および図-7c) より、PP 繊維と Jute 繊維を混入したケースにおいて、各測定位置の温度は加熱に伴い上昇していることが分かる。既報より、材齢 2 ヶ月のケースにおいても、加熱に伴い同様に内部の温度が上昇することを確認している¹¹⁾。

3.3 拘束応力の経時変化

図-8 に材齢 14 ヶ月の各供試体における拘束応力の経時変化を示す。図-8a) より、HSC では、拘束応力は加熱面に近い 5mm 位置が増加していることがわかる。拘束応力の増減は加熱から 7 分経過後に確認できる。これは、爆裂の発生により、拘束応力が一時的に低下したことを示すものと考えられる。既報の材齢 2 ヶ月においても、爆裂現象に伴い、拘束応力の増減が確認できると報告がある。拘束応力の最大値は 9.5MPa であった。図-8b) より、PP 繊維を混入したケースでは、拘束応力の最大値が 10.0MPa であった。図-8c) より、Jute 繊維を混入したケースでは拘束応力の最大値が 10.4MPa となった。

3.4 水蒸気圧の経時変化

図-9 に材齢 14 ヶ月の各供試体における水蒸気圧の経時変化を示す。図-9a) より、HSC では水蒸気圧の最大値は 9.6MPa であった。加熱面から 5mm 位置の水蒸気圧は加熱に伴い急上昇するが、爆裂の発生による低下が確認できる。 25mm 位置でも水蒸気圧の上昇は確認できるが、爆裂は生じず緩やかに低下していることがわかる。図-9b) より、PP 繊維を混入したケースにおいて水蒸気圧の最大値は 10.9MPa となった。加熱面に近い位置から順に水蒸気圧が上昇しているが、急激な圧力低下は確認されず爆裂も生じていない。これは、PP 繊維の混入によ

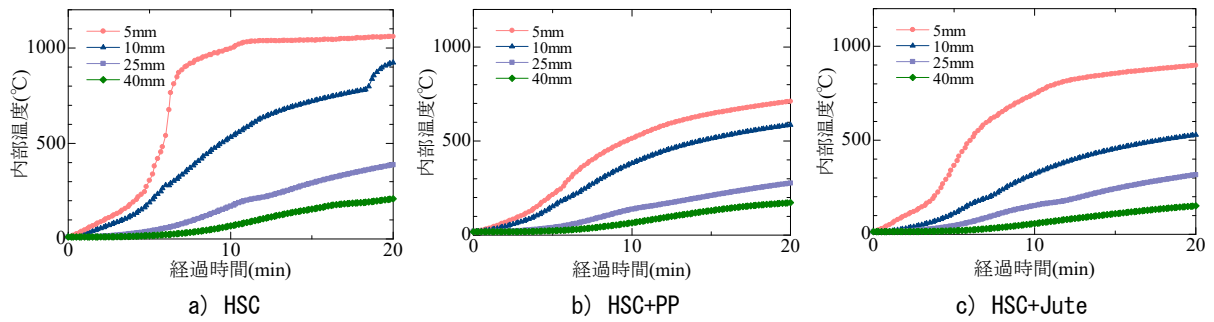


図-7 材齢 14 ヶ月における内部温度の経時変化

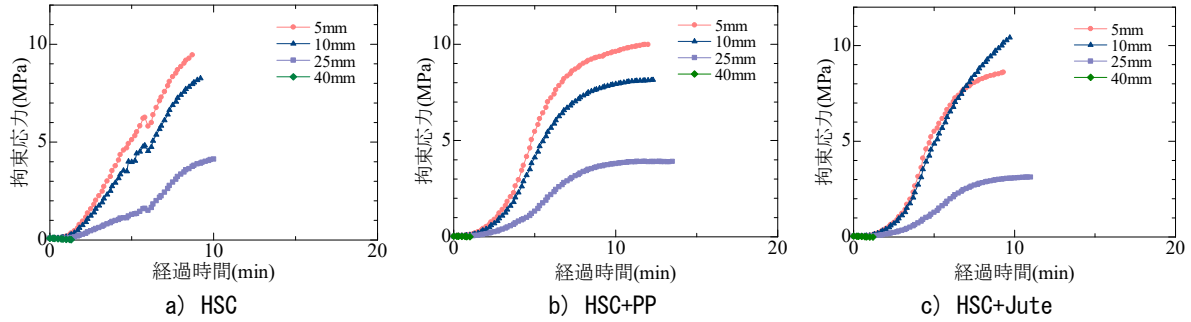


図-8 材齢 14 ヶ月における拘束応力の経時変化

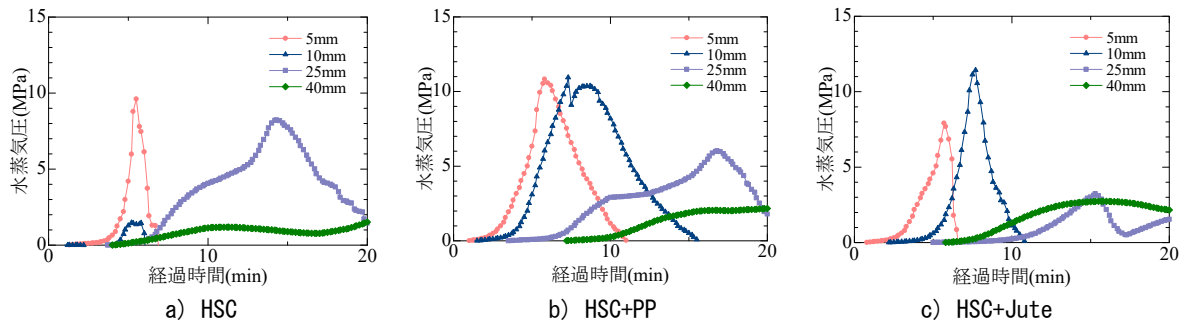


図-9 材齢 14 ヶ月における水蒸気圧の経時変化

って、水蒸気圧の逸散ネットワークが形成されたことによると考えられる。図-9c)より、Jute 繊維を混入したケースでは水蒸気圧の最大値は 11.4MPa となった。加熱面から 5mm と 10mm 位置では急激な上昇が確認できるが爆裂は生じていない。また、HSC と PP 繊維を混入したケースよりも水蒸気圧は高いが、Jute 繊維のストロー構造による蒸気圧の逸散ネットワークによって爆裂が生じなかったと考えられる。

3.5 供試体内部温度と水蒸気圧に関する材齢比較

図-10 に材齢 14 ヶ月の水蒸気圧と内部温度の関係を示す。併せて飽和水蒸気圧曲線(以下、SVP)を示す。Ichikawa ら¹²⁾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。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 SVP の付近で上昇し、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。図-10a)より、HSC では、加熱面から 5mm 位置の水蒸気圧が過飽和領域で温度 200°C のときに最大値が 10MPa 程度を示し、その後低下してい

る。これは、加熱初期の爆裂が生じていない時点での上昇であるため、爆裂に影響する水蒸気圧の上昇であると考えられる。測定温度の間隔が広いため、短時間の温度上昇により水蒸気圧が上昇していることがわかる。

図-10b)より、HSC+PP のケースでは、加熱面から 5mm と 10mm 位置の水蒸気圧が高く、温度 250°C で 11MPa 程度である。その後、緩やかに不飽和領域に移動して低下していることがわかる。これは、PP 繊維の熔融による蒸気圧の緩和効果であると考えられる。

図-10c)より、HSC+Jute のケースでは、加熱面から 5mm 位置の水蒸気圧が 250°C までは SVP に沿って上昇しているが、その後不飽和領域に移動し、8MPa まで上昇している。これは、加熱により乾燥し供試体上部へ水分が移動したことによるものと考えられる。一方で、10mm 位置では過飽和領域で水蒸気圧の上昇があり、最大値は 11MPa であった。これは、加熱により乾燥し、供試体下部から水分が移動したことが要因と考えられる。

3.6 内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係

図-11 に、各供試体の 5mm 位置における材齢 2 ヶ月、

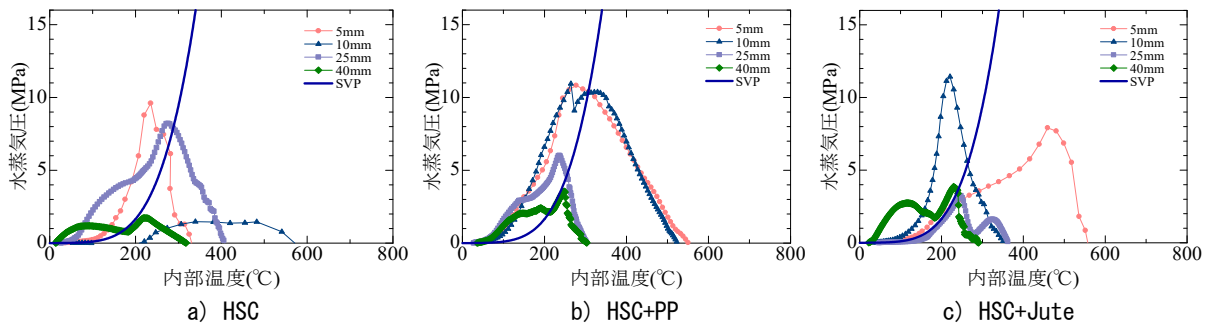


図-10 材齢 14 ヶ月における水蒸気圧と内部温度の関係

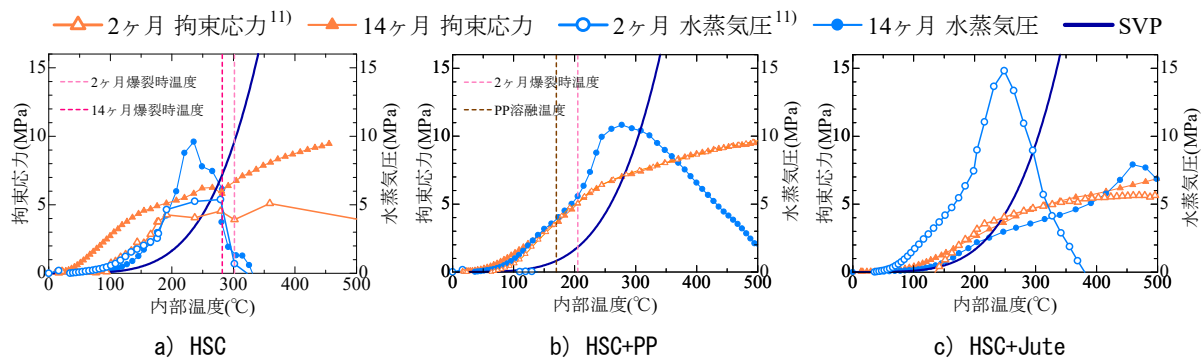


図-11 5mm 位置における内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係(材齢 2 ヶ月¹¹⁾, 14 ヶ月)

14 ヶ月の内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係を示す。図-11a)より、HSCでは、材齢 2 ヶ月で拘束応力と水蒸気圧が 180°C までは上昇し、5MPa 程度で変極点が見てとれる。その後停滞し、280°C で水蒸気圧が低下した後、300°C 付近で爆裂が生じている。この点について、加熱に伴う水和生成物の熱分解¹³⁾と、拘束応力により内部に水平方向のひび割れが生じ¹⁴⁾、そこに水蒸気圧の上昇が作用し、爆裂が生じたと考えられる。一方、材齢 14 ヶ月では、拘束応力は 4.5MPa(150°C 付近)で勾配が緩かになった。水蒸気圧は 10MPa(230°C 付近)まで上昇して低下した。その後、280°C 付近で拘束応力と水蒸気圧が 6MPa で爆裂が生じている。この点について、爆裂のメカニズムは 2 ヶ月と同様に考えるが、材齢が経過したことによる水和反応の促進で含水率が低下し、マトリックスの組織が密になったことで、剛性も向上し拘束応力が大きくなったと考える。また、組織が密になったことで水蒸気圧も大きくなったと考えられる。

図-11b)より、HSC+PP のケースでは、材齢 2 ヶ月の水蒸気圧の計測について有意な計測ができなかった。拘束応力は 5MPa(200°C 付近)で勾配が緩かになり、200°C 付近で爆裂が生じる結果となった。繊維混入率は 0.1vol% であるが、材齢 2 ヶ月では爆裂を抑制することができなかった。繊維の混入率によって爆裂が抑制できない場合がある点については、既報にも報告がある¹⁵⁾。一方、材齢 14 ヶ月での拘束応力は材齢 2 ヶ月とほぼ同様に 5MPa(200°C 付近)で勾配が緩かになっている。水蒸気圧

は過飽和領域で上昇し、最大値は 11MPa(280°C)であった。その後不飽和領域に移動して緩やかに低下し、爆裂は生じなかった。材齢 14 ヶ月では、0.1vol%でも爆裂を抑制することができた。この点について、材齢 14 ヶ月は材齢 2 ヶ月と比較して含水率が低くなった点と、PP 繊維の熔融による蒸気圧逸散ネットワークの形成で爆裂が抑制できたと考えられる。材齢の経過により爆裂が生じない点については同様の報告がある⁹⁾。

図-11c)より、HSC+Jute のケースでは、材齢 2 ヶ月と 14 ヶ月ともに爆裂は生じなかった。材齢 2 ヶ月では拘束応力が 4MPa(200°C 付近)で勾配が緩やかになり、その後上昇した。水蒸気圧は過飽和領域にあり最大値は 15MPa(230°C)まで上昇するが、その後は緩やかに低下し不飽和領域に移動した。次に材齢 14 ヶ月では、拘束応力は材齢 2 ヶ月と同様に 4MPa(200°C 付近)で勾配が緩やかになり、その後上昇した。水蒸気圧について、2MPa(200°C)までは過飽和領域にあるが、その後不飽和領域に移動し最大値は 8MPa であった。材齢 14 ヶ月で水蒸気圧が大きく低下し不飽和領域に移動した点については、含水率の低下と Jute 繊維のストロー構造の影響が考えられるが、今後更に検討が必要である。

以上、HSC と HSC+PP および HSC+Jute の材齢の違いによる拘束応力と水蒸気圧と温度の関係を考察した。材齢の進行によって水和反応が進み含水率が低下することで爆裂は生じにくくなることが分かった。一方で、含水率が低下しているにも関わらず、水蒸気圧があまり低下

しないケースもあり、今後、内部組織の剛性と加熱に伴う透気性の変化も検討が必要であると考え。また Jute 繊維を混入することで、材齢が 1 年以上経過しても爆裂抑制効果が期待できることが明らかとなった。資源の有効利用と環境負荷低減の観点から、天然繊維の有効利用について更に検討を進めて行く予定である。

4. まとめ

高強度コンクリートに各種の繊維を混入し材齢 2 ヶ月と 14 ヶ月で加熱試験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) HSC では、若い材齢では爆裂が生じるが、材齢 14 ヶ月では、爆裂規模が小さくなった。PP 繊維を混入したケースでは、材齢 2 ヶ月では爆裂が生じたが、材齢 14 ヶ月では爆裂は生じなかった。
- 2) Jute 繊維を混入したケースでは、材齢 2 ヶ月と 14 ヶ月の両方で、爆裂が生じなかった。Jute 繊維を混入することで、材齢が 1 年以上経過しても爆裂抑制効果が期待できることが明らかとなった。
- 3) リング拘束供試体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)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，2017.9
- 2) Z.P. Bazant, 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, 1997, 155-164.
- 3) Y. Anderberg, 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, 1997, 69-73.
- 4) P. Kalifa, F.-D. Meneteeau, D. Quenard, Spalling and

pore pressure in HPC at high temperatures, Cem. Concr. Res. 30 (2000) 1915-1927.

- 5) 小澤満津雄, 森本博昭：高温環境下における天然繊維を添加した高強度コンクリートの爆裂抑制効果, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.3, pp.324-336, 2013
- 6) 谷辺徹, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 六郷恵哲：拘束リング試験法を適用したコンクリートの高温環境下における耐爆裂性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1138-1143, 2012
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 阿久津裕亮, 小澤満津雄, 明石孝太, 杉野雄亮：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1023-1028, 2018
- 10) 谷辺徹, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 六郷恵哲：拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1135-1140, 2013
- 11) 赤坂春風, 小澤満津雄, Sirjana Subedi Parajuli, 杉野雄亮：リング拘束供試体加熱試験による天然繊維を混入した高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1029-1034, 2018
- 12) 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
- 13) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック, 2017.3
- 14) 谷辺徹, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 内田裕市：拘束リング試験法を適用した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂深さの推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1336-1341, 2014
- 15) 韓千求, 韓ミンチョル, 李建哲, 許榮善：有機繊維を調合使用した高強度コンクリートの爆裂防止, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.151-156, 2007