

論文 天然繊維混入型超高強度繊維補強コンクリートのリング拘束加熱試験による爆裂評価

島村 一樹*1・小澤 満津雄*2

要旨：本研究では天然繊維混入型超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制効果を確認するために、Jute 繊維の混入率を実験因子として、小型円柱供試体の加熱試験とリング拘束加熱試験を実施した。Jute 繊維の混入率は 0~0.5%vol の範囲とした。その結果、小型円柱供試体による簡易爆裂試験(850℃一定で 30 分間加熱)で Jute 繊維を 0.5%vol 混入することで爆裂継続時間の短縮と質量減少率が低下した。リング拘束加熱試験では Jute 繊維を 0.4%vol 以上混入することで無混入と比較し、爆裂を抑制することが確認できた。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート, Jute 繊維, リング拘束試験, 熱応力, 水蒸気圧

1. はじめに

近年、超高強度繊維補強コンクリートが開発され実用化されている。超高強度繊維補強コンクリート(Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete: 以下、UHPC)は、圧縮強度が 150MPa 以上であり、鋼繊維もしくは合成繊維を用いることで耐久性に優れ、高い力学性能を有する。土木学会においては、2004 年に「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」が発刊された¹⁾。一方で、UHPC は火災時に爆裂が生じ、耐火性が低下することが懸念される。土木学会の指針においても、爆裂によってコンクリートが著しく損傷・劣化するおそれがある場合は、対策を検討する必要があると記載されている。一般的に高強度コンクリートの爆裂現象メカニズムには、熱応力説²⁾と水蒸気圧説³⁾がある。これまでに種々の UHPC が利用されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。いずれの種類も粉体が非常に多いことが特徴である。また、高強度の鋼繊維を体積で 2.0%程度混入し、高靱性を確保している。加えて、圧縮強度が 300MPa 以上の無孔性コンクリートが開発されている⁷⁾。爆裂の抑制方法として、PP 繊維や PVA 繊維⁸⁾および高結晶の PP 繊維を混入する方法が提案されている⁹⁾。本研究グループでも、PP 繊維と天然のジュート繊維(以下、Jute 繊維)を用いた UHPC の爆裂抑制効果について、小型の円柱供試体を用いた検討を進めている¹⁰⁾。日本コンクリート工学会では、コンクリートの爆裂評価方法が規準化されている¹¹⁾。本研究グループでは、規準化された試験法により、リング拘束加熱試験法を用いて種々のセメント系材料の爆裂評価を実施している¹²⁾。しかしながら、UHPC を対象としたリング拘束加熱試験の検討と Jute 繊維の爆裂抑制効果の検討は、十分とは言えないのが現状である。そこで、本研究では、Jute 繊維を混入した UHPC を対象として小型円柱供試体の加熱試験とリング拘束加熱試験を実施し、爆裂抑制効果を

検討した。

2. 研究フロー

図-1 に本研究のフロー図を示す。本研究では、下記の検討を行った。すなわち、①小型供試体の簡易加熱試験、②リング拘束加熱試験とした。

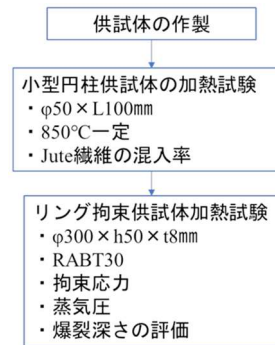


図-1 研究フロー

表-1 使用材料

C	低熱ポルドランドセメント, 密度3.22g/cm ³
SF	シリカフューム, 密度2.20g/cm ³
S ₁	栃木県佐野市仙波町産 (吸水率1.25%, 表乾密度 2.58 g/cm ³)
S ₂	栃木県佐野市山菅町産 (吸水率1.29%, 表乾密度 2.81g/cm ³)
Ad	ポリカルボン酸系高性能減水剤
鋼繊維	繊維長 13mm, 繊維径 0.20mm, アスペクト比 65
Jute繊維	繊維長 12mm, 繊維径 10-30μm, 密度1.3-1.45g/cm ³

表-2 配合

UHPC	WB%④	kg/m ³							
		W	C	SF	S ₁	S ₂	Ad	鋼繊維	Jute繊維
Control									—
Jute-0.2	12.5	180	1224	216	420	418	26	79	2.8
Jute-0.4									5.5
Jute-0.5									6.9

*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 大学院理工学部物質環境類教授 博士(工学)(正会員)

3. 実験概要

3.1 使用材料と配合

表-1, 2 に使用材料と配合表を示す。W/B は 12.5% とした。結合材は低熱ポルドランドセメント（密度 3.22g/cm³）とシリカフューム(密度 2.20g/cm³)を用いた。細骨材は栃木県佐野市仙波町産（吸水率 1.25%，表乾密度 2.58 g/cm³）と栃木県佐野市山菅町産（吸水率 1.29%，表乾密度 2.81g/cm³）を用いた。混和剤にはポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。鋼繊維（繊維長 13mm，繊維径 0.20mm，密度 7.85g/cm³）の混入率は 1.0%vol とした。爆裂抑制繊維として，Jute 繊維(繊維長 12mm，繊維径 10-30μm，密度 1.3-1.45g/cm³)を 0~0.5%vol の範囲で混入した。練混ぜ方法について下記のとおりである。練混ぜには，2 軸強制練りミキサ(容量 50 リットル)を用いた。練混ぜ方法は下記のとおりである。①低熱セメント，シリカフューム，細骨材を混入して 10sec 空練り，②混和剤と水を投入し 20min 練混ぜ，③5min 静置，④鋼繊維と投入し 1min 練混ぜ，⑤Jute 繊維を投入して 1min 練混ぜとした。練混ぜ後，型枠に打ち込みを行い，打ち込み面を仕上げ，1 日静置した。その後，脱枠して供試体を湿布で包み，水分蒸発防止シートに入れて水分の逸散を防止し，90℃に保持した養生炉に入れて 2 日間熱養生を実施した。その後，自然冷却した。加熱養生後，加熱試験まで封緘養生した。

3.2 小型試験体による簡易爆裂試験概要

図-2 に試験法の概要図を示す。簡易加熱試験ではφ50×L100 mmの円柱供試体を使用した。各配合につき 3 本，合計 12 本加熱を行った。加熱には電気炉を使用した。炉内温度を 850℃に設定し，供試体を 1 本ずつ投入し，30 分間加熱を行った。加熱試験中は，破裂音を記録し爆裂継続時間を確認した。加熱の前後で質量を測定し，爆裂による損傷程度を質量減少率で評価した。

3.3 リング拘束供試体加熱試験

図-3 に本研究で用いた拘束リング供試体の概要を示す。供試体には鋼製リング(外径 300×高さ 50×厚さ 8mm)を用い，内部にコンクリートを充填した。供試体の内部温度を測定するために熱電対を設置した。設置位置は，加熱面から 5，10，25，40mm とした。水蒸気圧を測定するためにステンレスパイプ（外径 5mm×内径 3mm×長さ 170mm）を 4 本設置した。設置位置は，加熱面から 5，10，25，40mm とした。加熱試験直前に，ステンレスパイプ内にシリコンオイルを充填した後，圧力センサーを接続して測定を行った。拘束リングの表面に拘束応力を推定するためのひずみゲージを加熱面から 5，10，25，40mm の位置に貼付した。ひずみゲージは拘束リングの対極に設置した。拘束リングの表面温度を測定するための熱電対を設置した。位置は，加熱面から 5，10，25，

40mm とした。熱電対拘束リングの対極に設置した。各配合条件について 1 体ずつ作製した。加熱にはガス水平炉を使用した。加熱には加熱曲線 2（RABT30 相当）¹¹⁾ とした。すなわち，5 分間で 1200℃まで加熱し，30 分間保持とした。ただし，内部温度の上昇状況と爆裂状況から加熱が継続困難な場合は途中で試験を中止した。加熱試験後，リング供試体の爆裂深さは加熱面を 10mm ピッチに分割して測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 フレッシュ性状と圧縮強度

図-4 に圧縮強度およびフロー値と Jute 繊維混入率の関係を示す。なお，鋼繊維の混入率は 1.0%vol 一定である。圧縮強度の範囲は 170~188MPa の範囲であった。Jute 繊維を加えると無混入と比較して，圧縮強度は増加

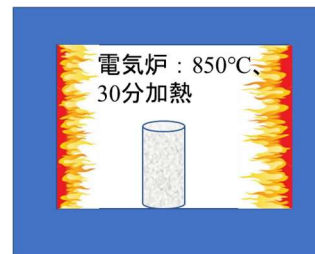


図-2 円柱供試体の加熱試験

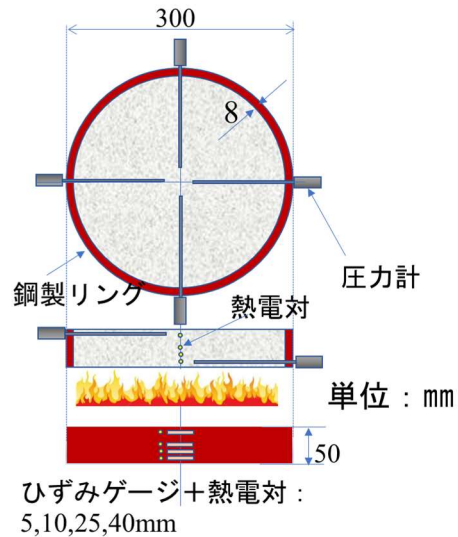


図-3 リング拘束供試体加熱試験

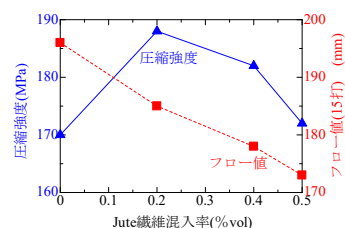


図-4 圧縮強度、フロー値と Jute 繊維混入率の関係

する傾向を示した。また、繊維の混入率が 0.2%vol で最大値を示し、それ以上繊維混入率を上げると圧縮強度は若干低下する傾向を示した。既報¹⁰⁾においても、Jute 繊維の混入率が大きくなると圧縮強度が低下するという報告がある。次に、フロー値について、Jute 繊維の混入率が大きくなると流動性が低下する結果となった。これについても、同様の報告¹⁰⁾がある。

4.2 小型供試体の簡易爆裂試験

(1) 爆裂性状

表-3 に各供試体の爆裂性状を示す。Control は供試体の一部が欠損するほど爆裂の損傷が激しいことがわかる。一方、Jute-0.2, Jute-0.4 は供試体全体で表面剥離が起きているが、Control と比較して爆裂は抑制できていることがわかる。Jute-0.5 では表面剥離が一部で生じているが、比較的損傷は軽微であった。

(2) 爆裂継続時間

図-5 に小型供試体の爆裂継続時間と Jute 繊維の混入率との関係を示す。ここでは、各繊維混入率の 3 本の爆裂継続時間と 3 本の爆裂終了時間の平均を示す。加熱は 850°C で 30 分間実施したが、Jute 繊維の混入率が大きくなると、爆裂の継続時間が短くなることがわかる。繊維混入率が 0%vol(Control) で、爆裂継続時間が約 10min であった。繊維混入率が 0.5vol% では、約 2min となり、爆裂継続時間は約 1/5 となった。

(3) 爆裂による質量損失率













図-6 に爆裂による質量減少率と Jute 繊維混入率の関係を示す。ここでは、鋼繊維による架橋効果によって、爆裂による破片が繋ぎ止められている領域もあるが、その影響も含む値として示す。Jute 繊維混入率が 0%では質量減少率が 36%であるのに対して、0.5%では 10%程度であり、Jute 繊維混入率が大きくなると質量減少率は小さくなる傾向を示した。Jute 繊維を 0.5%vol 混入すると、爆裂による質量減少率は約 1/3 になった。以上より、Jute 繊維の混入率を大きくすると爆裂の継続時間と質量減少率を抑制できることがわかった。これは、Jute 繊維のストロー構造により蒸気圧が逸散することが影響し、爆裂が抑制されると考えられるが、既報でも同様な報告がある¹⁰⁾。

4.3 リング拘束加熱試験の結果

(1) 爆裂性状

写真-1 にリング拘束供試体の加熱面の状況を示す。Control は、供試体全体で爆裂が生じ、上面(供試体厚さ: 50 mm)まで貫通する結果となった。Jute-0.2 は加熱面全体で爆裂が生じた。Jute-0.4 は加熱面全体で爆裂は生じてい

表-3 各供試体の爆裂性状

供試体の種類	No.1	No.2	No.3
Control			
jute-0.2			
jute-0.4			
jute-0.5			

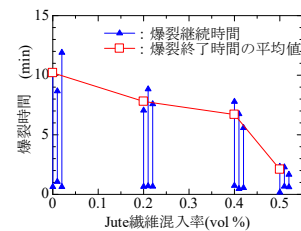


図-5 爆裂継続時間と Jute 繊維混入率の関係

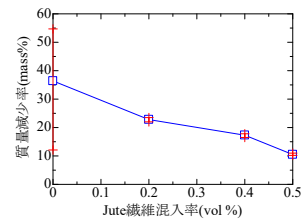


図-6 質量減少率と Jute 繊維混入率の関係

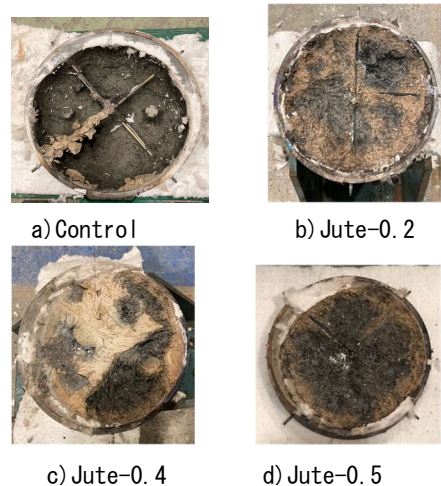


写真-1 リング試験による爆裂性状

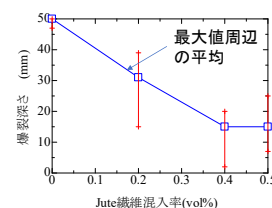


図-7 爆裂深さと Jute 繊維混入率の関係

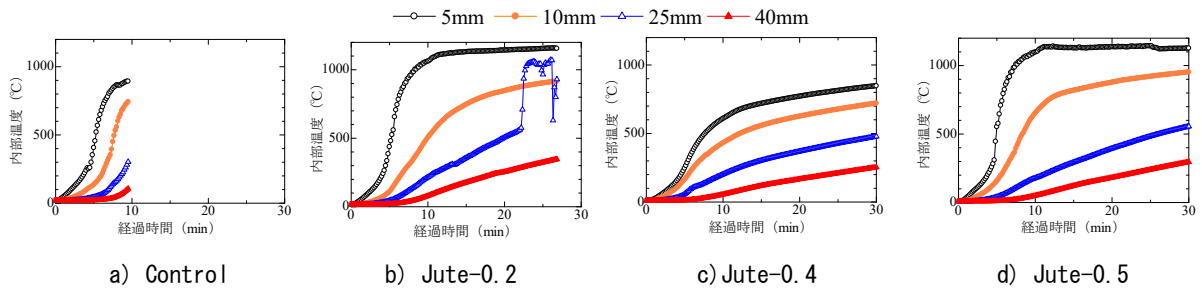


図-8 内部温度の経時変化

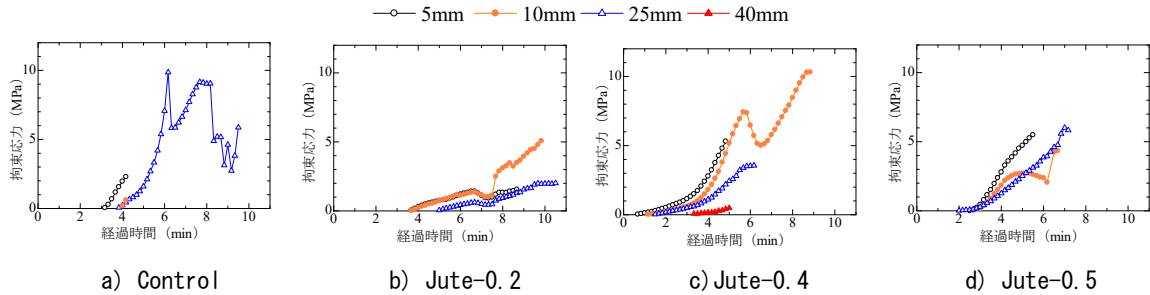


図-9 拘束応力の経時変化

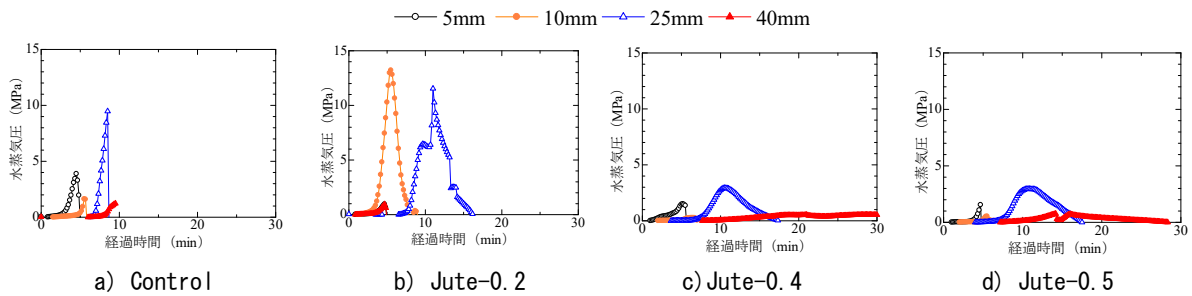


図-10 蒸気圧の経時変化

ないが、部分的に爆裂深さが大きい領域があった。Jute-0.5は、加熱面全体で爆裂が生じる結果となった。

図-7にリング供試体の爆裂深さとJute繊維混入率の関係を示す。ここでは、10mmピッチで爆裂深さを計測した結果をもとに、最大爆裂深さを計測した計測点の周囲の9点を取り、その平均値および最大値と最小値を示す。図より、Jute繊維混入率が大きくなると、爆裂深さは小さくなる傾向を示した。また、Jute繊維を0.4%以上混入することで、爆裂深さの平均値が15mm程度となっている。

(2) 内部温度の経時変化

図-8にリング拘束加熱試験時における内部温度の経時変化を示す。図より、各供試体ともに加熱面に近い位置から内部温度が上昇していることがわかる。Controlは加熱初期から爆裂が生じたため、5mm位置の温度が4minで急激に上昇した。爆裂の進行が早く貫通する危険が生じたため、10min未滿で加熱を中止した。Jute-0.2も加熱初期から爆裂が生じ、5mm位置は4minで急激な温度上昇を生じた。25mm位置が23minで急激な温度上昇を生じたため、27minで加熱を中止した。Jute-0.4では、温度計

測位置である中央付近で爆裂が生じなかったため、急激な温度上昇は生じなかった。Jute-0.5は、5と10mm位置が急激な温度上昇を生じていることがわかる。

(3) 拘束応力の経時変化

拘束リングの外周に設置したひずみゲージ(耐熱温度:80°C)により拘束リングの円周方向ひずみを計測し、薄肉円筒を仮定した式(1)を用いてコンクリートに生じる拘束応力を算出した¹¹⁾。

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

ここに、

σ_{re} : コンクリートに生じる拘束応力

ε_{θ} : リング材円周方向ひずみ

t : リング材厚み

E_s : リング弾性係数

R : リング内半径

図-9に各供試体について拘束応力の経時変化を示す。Controlは5mmと10mmで拘束応力の最大値が2.5MPaまでしか計測できていない。これは加熱初期から爆裂が

生じ、断面が欠損したためと考えられる。25mm 位置は、最大値が 9MPa 程度となったが、その後爆裂の発生によって急減したと考えられる。Jute-0.2 も加熱初期から爆裂が生じているため、最大値は 5MPa 程度であった。Jute-0.4 は 10mm 位置の拘束応力が 10MPa 程度となった。これについて、Jute-0.4 は局所的な爆裂は生じたが、加熱面全体の断面欠損が少なかったためと考えられる。Jute-0.5 も Control と Jute-0.2 と比較して爆裂による断面欠損が小さいため、拘束応力が 6MPa まで達したと考えられる。

(4) 蒸気圧の経時変化

図-10 に各供試体について水蒸気圧の経時変化を示す。全体の傾向として、加熱面から近い計測位置から蒸気圧が急上昇し、爆裂の発生とともに急減する傾向が確認できる。Control では加熱開始から 8min 経過で 25mm の蒸気圧は 9MPa になった。Jute-0.2 では加熱開始から 5min 経過で 10mm 位置の蒸気圧が 13MPa になった。Jute-0.4,0.5 は 5mm 位置の蒸気圧が上昇し、2MPa に達したあと、急減している。これは、爆裂の発生により、蒸気圧が低下したものと考えられる。一方、Jute-0.4,0.5 は、Control と Jute-0.2 よりも蒸気圧の最大値が小さい傾向を示した。

(5) 簡易加熱試験とリング拘束試験の比較

図-11 に簡易加熱試験による質量減少率およびリング拘束試験による爆裂容積率と繊維混入率の関係を示す。ここで、爆裂容積率と質量減少率ともに爆裂損傷指標であるため、比較することを試みた。爆裂容積率は爆裂深さから以下の式 (2) を用いて算出した。

$$V_{sp} = \sum D_i / (N \times H) \quad (2)$$

- $\sum D_i$: 合計爆裂深さ (mm)
- N : 爆裂深さの測定点数
- H : 供試体高さ (mm)

爆裂容積率と質量減少率ともに、Jute 繊維の混入率が大きくなると小さくなる傾向が確認でき、両指標ともに Jute 繊維の爆裂抑制効果を評価できる可能性を示していると考えられる。一方、爆裂容積率と質量減少率は、Jute 繊維混入なしの場合に 57%と 36%で差異が生じている。これは、リングが UHPC の熱膨張を拘束することで、爆裂の規模が大きくなったためであり、配合のスクリーニング試験としてリング拘束試験が有用であることを示すものと考えられる。既報¹³⁾でも、高強度コンクリートに対して拘束の有無により爆裂規模に違いが生じることが報告されている。

(6) Jute 繊維の爆裂抑制効果

ここでは、UHPC に対する Jute 繊維の爆裂抑制効果を

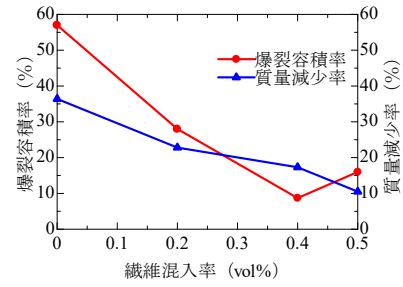


図-11 爆裂容積率（リング拘束試験）、質量減少率（簡易加熱試験）と繊維混入率の関係

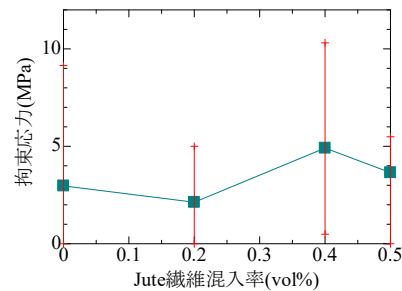


図-12 拘束応力と Jute 繊維混入率の関係

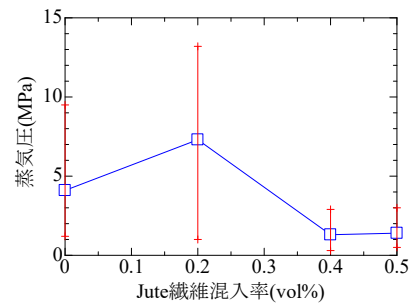


図-13 蒸気圧と Jute 繊維混入率の関係

考察する。図-12 に拘束応力と Jute 繊維混入率の関係を示す。プロットは、5~40mm の最大値の平均値と最大値と最小値を示している。拘束応力の平均値の範囲は、2.1~4.9MP であった。Jute 繊維を 0.4vol%以上混入すると爆裂が抑制され断面が保持されることで、拘束応力は大きくなったと考えられる。これについて、高強度コンクリート(HSC)を対象としたリング試験でも爆裂が抑制されたシリーズで断面欠損が小さい場合、拘束応力は大きくなることが報告されている¹⁴⁾。

図-13 に蒸気圧と Jute 繊維混入率の関係を示す。プロットは、5~40mm の最大値の平均値と最大値と最小値を示している。Control と Jute-0.2 は 4.1MPa と 7.1MPa で Jute 繊維を 0.2%vol 混入することで、蒸気圧が上昇した。一方、0.4%vol から 0.5%vol 混入すると、蒸気圧は 1.4MPa 程度に低下した。Jute 繊維を 0.2%vol 混入した場合、水蒸気圧が上昇した点について、既報においても HSC や補修材を対象としたケースで蒸気圧が繊維無しと比較して、

大きくなるとの報告がある¹³⁾¹⁴⁾。Jute 繊維を混入することで、繊維周辺に気泡を巻き込むことが報告されており¹⁵⁾、0.4vol%以上混入することで爆裂を低減できたと考えられる。

以上、リング拘束加熱試験により、Jute 繊維を混入した UHPC の爆裂抑制効果を確認した。

4. まとめ

本研究では火災時における UHPC の爆裂抑制方法として Jute 繊維を混入する手法を検討した。以下に、本研究の範囲で得られた知見を示す。

- 1) 本研究で用いた UHPC は圧縮強度の範囲が 170～188MPa であった。Jute 繊維の混入率が 0.2%vol で圧縮強度は最大値を示し、それ以上混入率が大きくなると強度は若干低下した。モルタルフロー値は Jute 繊維の混入量を増加すると低下した。
- 2) 小型円柱供試体による簡易爆裂試験において、850℃一定で 30 分間加熱試験を実施した。その結果、Jute 繊維を 0.5%vol 混入することで爆裂継続時間の短縮と質量減少率が低下した。
- 3) リング拘束加熱試験により、爆裂評価を実施した。その結果、Jute 繊維を 0.4%vol 以上混入することで無混入と比較し、爆裂を抑制することが確認できた。また、蒸気圧の低減効果も確認できた。

今後の課題として、鋼繊維混入率が爆裂に与える影響、曲げ強度、流動性、自己収縮特性の評価が挙げられる。

謝辞

本研究は日本コンクリート工学会研究助成の補助を受けて実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリーNo.113，2004.9
- 2) Bazant ZP., Proc. of the Int. Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, Maryland; 1997.9, p.155-164.
- 3) Anderberg Y., Proc. of the Int. Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, Maryland; 1997.9, p. 69-73
- 4) P. Richard, and M. Cheyrezy: Composition of reactive powder concretes, Vol.25, Issue 7, Cement and Concrete Research, pp.1501-1511,1995.10
- 5) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.3，

2006.4

- 6) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.10，2012.3
- 7) 森香奈子，安田瑛紀，河野克哉，多田克彦：圧縮強度 300N/mm² 以上を発現する超高強度繊維補強コンクリートの高温爆裂防止に関する熱養生温度と合成繊維の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40 No. 1, pp. 1039-1044, 2018.6
- 8) 水野敬三ほか：超高強度繊維補強コンクリート(Ductal)の耐火性能，有機繊維混入による爆裂抑止効果と熱拡散率算定，大成建設技術センター 第 35 号，pp.33-1～33-6，2002
- 9) 溝口愛実，岸良竜，河野克哉，小澤満津雄：繊維補強PFC（無孔性コンクリート）の高温に対する耐爆裂性，コンクリート工学年次論文集，Vol.44, No.1，pp.940-945，2022.7
- 10) M.Ozawa, S.S.Parajuli, Y.Uchida, B.Zhou：Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material, Construction and Building Materials, Vol.206, 10. pp.219-225, May. 2019
- 11) 日本コンクリート工学会：JCI 規準，コンクリートの爆裂試験方法，JCI-S-014-2018
- 12) 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, 2014.7
- 13) 谷辺徹，兼松学，小澤満津雄，森田武：高強度コンクリートの爆裂性評価に及ぼす供試体種類の影響，日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1，pp.1087-1092, 2017.7
- 14) 赤坂春風，小澤満津雄，S. S. 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, 2018.7
- 15) 武井祐哉，富山隆彦，福井拓也，小澤満津雄：簡易型リング拘束加熱試験による耐熱性断面補修材の爆裂評価，コンクリート工学年次論文集，pp.718-723, Vol.44, No.1, 2022.7
- 16) D.Zhang, K. H. Tan, A.Dasari, Y. Weng: Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 109, May 2020, 10351