

論文 内部養生を施した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討

明石 孝太*1・小澤 満津雄*2・周 波*3・内田 裕市*4

要旨: 内部養生を施した超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の火災時の爆裂抑制手法を検討するために、天然のジュート繊維を混入した UFC の加熱試験を実施しコンクリート中の蒸気圧を計測した。供試体は自己収縮対策として細骨材を廃瓦細骨材で置換し、爆裂抑制繊維はポリプロピレン繊維とジュート繊維を用いた。その結果、内部養生を施した UFC にジュート繊維を 0.5%vol 混入することで、爆裂抑制効果を確認した。
キーワード: 爆裂, UFC, 内部養生, 廃瓦材, ジュート繊維, ポリプロピレン繊維

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (Ultra-High Strength Fiber Reinforced Concrete: UFC) 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た高い力学性能を有する¹⁾。しかし、UFC は火災時に爆裂を生じやすく、また、自己収縮が大きいという欠点がある。自己収縮はセメントと水の水和によって内部水が消費され間隙に毛細管張力が発生して生じる体積減少である。自己収縮対策としては、軽量骨材や廃瓦材など、吸水率の大きい材料を骨材として使用し、予め吸水させた上記の材料からセメントマトリックスに水を供給する内部養生(Internal Curing: IC)がある。これにより、自己収縮を低減できるという報告がある²⁾。既往の研究では、廃瓦材を細骨材として 100%置換することで、自己収縮を 30~40%程度低減できるとされている³⁾。一方、UFC の爆裂対策としてはポリプロピレン(PP)繊維を混入する方法があるが、十分な効果が得られているとは言い難いのが現状である⁵⁾。本研究グループでは、天然のジュート(Jute)繊維を適用し、爆裂抑制効果があることを確認している⁴⁾。

内部養生は UFC のセメントマトリックスに水分を供給するため水和が促進され、強度増加は見込めるが、通常の UFC よりも内部水が増加するため、爆裂が生じやすいと予想される。しかしながら、UFC に内部養生を適用した供試体についての爆裂抑制方法については十分な検討がなされていないのが現状である。そこで、本研究で

は、UFC に内部養生を施した供試体の爆裂抑制方法として、天然繊維の適用を検討した。すなわち、内部養生を施した UFC に Jute 繊維を混入した場合の爆裂抑制効果を検討し、繊維混入量の定量化を行うことを目的とする。

2. 実験概要

2.1 配合

表-1 に本研究で使用した基本配合を示す。力学特性を確保するために、鋼繊維を添加した。配合は、内部養生の有無による爆裂状況の違いを調べるために、プレミックスの結合材と細骨材および高性能減水剤を用いたものと、細骨材を廃瓦細骨材 (密度 2.33g/cm³, 吸水率 8.40%) で 100%置換したものの 2 種類を用いた。以下、前者の配合の供試体を UFC、後者の配合の供試体を UFC+IC とする。配合の PRA は結合材が主要な材料、PRB は細骨材が主要な材料となっている。供試体は UFC と UFC+IC のそれぞれで爆裂抑制繊維が未混入のものを Control と定義し、全部で 8 種類とした。繊維の混入率は、既往の研究から UFC に対して Jute 繊維を 0.3%vol 混入することで爆裂を抑制できると報告されている⁵⁾ため、混入率の最小値を 0.3%vol とした。すなわち Control に対して、Jute 繊維を 0.3~0.5%vol 混入したものを 3 種類作製し、UFC Jute-0.3 (UFC の配合に Jute 繊維を 0.3%vol 混入)、UFC+IC Jute-0.3 (UFC+IC の配合に Jute 繊維を 0.3%vol 混入)、UFC+IC Jute-0.5 (UFC+IC の配合に Jute 繊維を 0.5%vol 混入) とした。また、蒸気圧低減効果お

表-1 基本配合

単位量(kg/m ³)							
	細骨材置換率	PRA	PRB	廃瓦材 (表乾)	水	減水剤	鋼繊維
UFC	0%	1278	934	0	180	18	157
UFC+IC	100%		0	814			

*1 群馬大学 工学部社会環境デザイン工学科 学生 (学生会員)

*2 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 学生 (学生会員)

*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博 (正会員)

表-2 爆裂抑制繊維の種類と特徴

繊維種類	繊維長(mm)	繊維径(μm)	融点(°C)	密度(g/cm ³)	加熱時の特徴
Jute	12	10~30	—	1.3~1.45	炭化
PP	12	42	170	0.91	170°Cで溶解

よび爆裂抑制効果の比較用に PP 繊維を 0.3~0.5%vol 混入したものを 3 種類作製し、UFC PP-0.3 (UFC の配合に PP 繊維を 0.3%vol 混入)、UFC+IC PP-0.3 (UFC+IC の配合に PP 繊維を 0.3%vol 混入)、UFC+IC PP-0.5 (UFC+IC の配合に PP 繊維を 0.5%vol 混入) とした。

2.2 使用した爆裂抑制繊維

表-2 に本研究で使用した爆裂抑制繊維の種類とその特徴を示す。使用した繊維は PP 繊維と Jute 繊維の 2 種類であり、繊維長はいずれも 12mm である。PP 繊維は約 170°C で融点を示すという特徴がある。そのため、コンクリート中の PP 繊維は火災時に 170°C で熔融し、コンクリート内部に空隙を形成する。この空隙により蒸気圧を逸散することで、爆裂を抑制できるとされている。それに対し、Jute 繊維は天然の繊維であり、ストローが複数の束になったような構造になっている (図-1)。Jute 繊維を混入したコンクリートが火災を受けると、このストロー構造が内部の蒸気圧を外部に逸散し、爆裂を抑制できると考えられる⁶⁾

2.3 供試体の作製

UFC の練り混ぜにはホバート型ミキサを使用した。ベースモルタルを作製した後、鋼繊維と爆裂抑制繊維を混入した。練り混ぜ終了後、流動性を確認するため、フロー試験を実施した。フロー試験後モルタルを φ50×100mm の型枠に打設した。蒸気圧測定用パイプと熱電対は、予め、モルタルの打設前に型枠に設置した。打設後は 20°C で 48hr 前養生後、90°C で 48hr の蒸気養生を実施した。

2.4 試験項目

試験項目は蒸気圧計測試験および爆裂判定試験とした。供試体の形状・寸法は φ50×100mm の円柱供試体とした。供試体は、UFC と UFC+IC の Control が 4 本ずつ、それ以外が 1 種類につき 3 本ずつとした。Control シリーズは 4 本の供試体のうち 1 本ずつを予備実験で用いた。蒸気圧計測試験と爆裂判定試験は同一供試体で実施した。

図-2 に蒸気圧計測用供試体の形状・寸法を示す。供試体内部には蒸気圧計測用パイプと熱電対を設置した。設置位置は、供試体断面の中央部とし、差込深さは供試体の下面から 25mm の位置とした。図-3 には蒸気圧計測システムを示す。蒸気圧は蒸気圧計測用パイプに設置した圧力計により計測した。蒸気圧計測用パイプおよび圧力計の中には圧力伝達媒体としてシリコンオイルを注

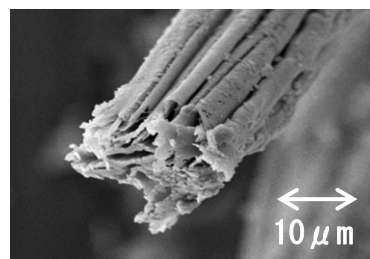


図-1 Jute 繊維 (SEM)

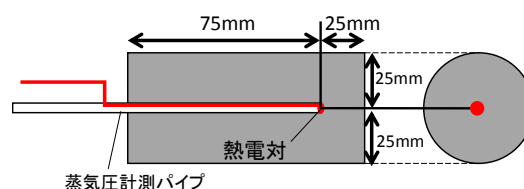


図-2 蒸気圧計測用供試体の寸法・形状

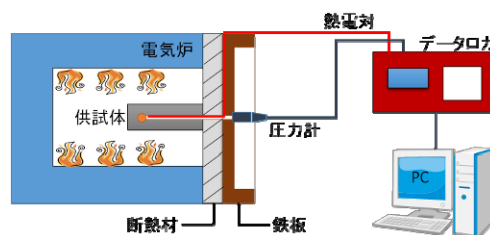


図-3 蒸気圧計測システム

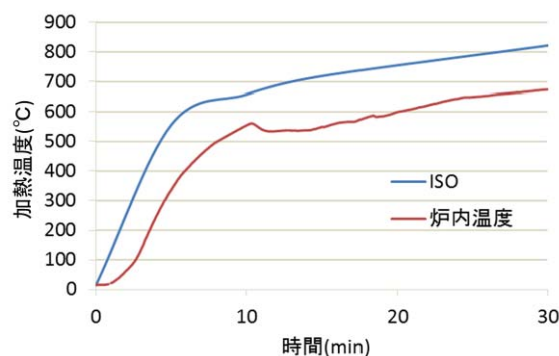


図-4 蒸気圧計測試験の加熱曲線の一例

入した。蒸気圧の計測値は、シリコンオイルの膨張値を補正した。また、爆裂判定は加熱後の供試体を目視で観察することにより行った。また、供試体内の温度は熱電対により計測した。図-4 には本実験で用いた加熱曲線を示す。加熱曲線は ISO834 標準加熱曲線を目標とした⁷⁾。しかし、電気炉の性能による制約で、実際の炉内温度は ISO 標準加熱曲線より 100°C 程度低くなった。予備試験の結果、加熱時間は 30 分とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

図-5に UFC および UFC+IC のフロー試験（0 打モルタルフロー）の結果を示す。なお、UFC+IC Jute-0.5 および UFC+IC PP-0.5 は流動性が悪かったため、モルタルフロー試験装置で 15 打した時のフロー値の結果を示す。図より、Control のフロー値は UFC Control が 263mm, UFC+IC Control が 275mm であった。Jute 繊維を混入したもののフロー値は、UFC Jute-0.3 が 188mm, UFC+IC Jute-0.3 が 150mm, UFC+IC Jute-0.5 が 144mm であった。一方、PP 繊維を混入したもののフロー値は、UFC PP-0.3 が 245mm, UFC+IC PP-0.3 が 191mm, UFC+IC PP-0.5 が 176mm であった。以上より、Jute 繊維および PP 繊維の混入率が増加するとフローの値は低下する傾向を示した。また、フロー値の低下量は PP 繊維を混入したものに比べて Jute 繊維を混入したもののほうが大きかった。

3.2 供試体の含水率

供試体を 105°C24hr で乾燥させることにより含水率を求めた。その結果、表-3 のようになった。UFC+IC のほうが含水率は高く、爆裂発生リスクが高くなる結果となった。

3.3 圧縮強度

図-6に UFC および UFC+IC の各供試体の圧縮強度試験の結果を示す。図より、Control の圧縮強度は UFC Control が 215MPa, UFC+IC Control が 227MPa であった。Jute 繊維を混入したシリーズは、UFC Jute-0.3 が 187MPa, UFC+IC Jute-0.3 が 181MPa, UFC+IC Jute-0.5 が 170MPa であった。一方、PP 繊維を混入したシリーズは、UFC PP-0.3 が 197MPa, UFC+IC PP-0.3 が 186MPa, UFC+IC PP-0.5 が 184MPa であった。以上より、爆裂抑制繊維を混入することで圧縮強度は低下する傾向を示した。特に、UFC+IC Jute-0.5 は UFC+IC Control に比べて圧縮強度が 57MPa 低下した。

3.4 内部蒸気圧

図-7~14に UFC および UFC+IC 全 8 種類の供試体の蒸気圧と内部温度および炉内温度の経過の様子の一例を示す。

図-7より、UFC Control は 9.4min で爆裂を生じ始め、25.7min で爆裂が終了した。蒸気圧の最大値は 28min で 10.9MPa となった。図-8より、UFC PP-0.3 は 9.3min で爆裂を生じ始め、21.9min で爆裂が終了した。蒸気圧の最大値は 18.3min で 2.8MPa となった。図-9より、UFC Jute-0.3 は 10.5min で爆裂を生じ始め、22min で爆裂が終了した。蒸気圧の最大値は 20.7min で 1.3MPa となった。図-7~9より UFC の結果を比較すると、UFC Control に比べ、爆裂抑制繊維を混入した UFC PP-0.3 と UFC Jute-0.3 は蒸気圧の最大値が低下していることがわかる。

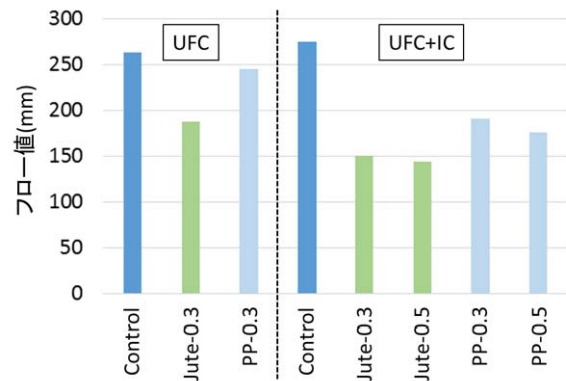


図-5 フロー試験結果

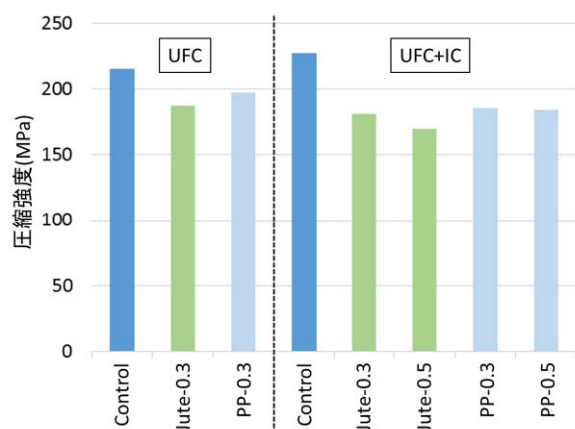


図-6 圧縮強度試験結果

表-3 含水率

供試体	加熱前重量 (g)	加熱後重量 (g)	含水率 (%)
UFC	486.8	476.8	2.1
	477.9	467.8	2.2
UFC+IC	451.3	440.4	2.5
	443.9	432.5	2.6

また、Controlは爆裂継続時間が約16minであるのに対し、PP-0.3とJute-0.3はそれぞれ約12minと約11minと短くなった。

図-10より、UFC+IC Controlは8.3minで爆裂を生じ始め、28.2minで爆裂が終了した。蒸気圧の最大値は22minで5.7MPaとなった。図-11より、UFC+IC PP-0.3は9.5minで爆裂を生じ始め、28.8minで爆裂が終了した。蒸気圧の最大値は18.9minで2.9MPaとなった。図-12より、UFC+IC PP-0.5は8.8minで爆裂を生じ始め、25.4minで爆裂が終了した。蒸気圧の最大値は17minで1.8MPaとなった。図-13より、UFC+IC Jute-0.3は8.6minで爆裂を生じ始め、21.4minで爆裂が終了した。蒸気圧

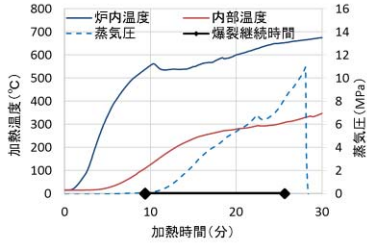


図-7 UFC Control

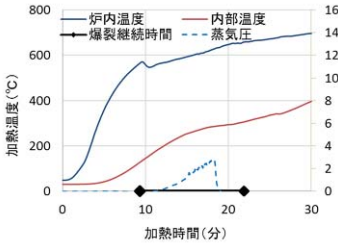


図-8 UFC PP-0.3

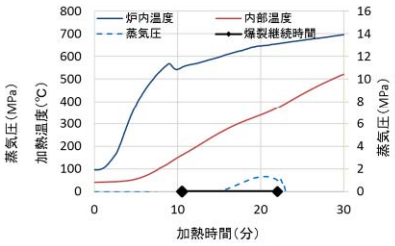


図-9 UFC Jute-0.3

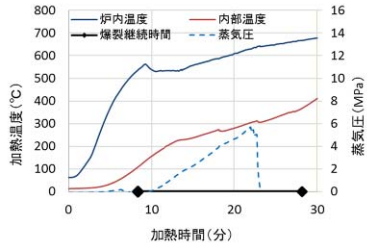


図-10 UFC+IC Control

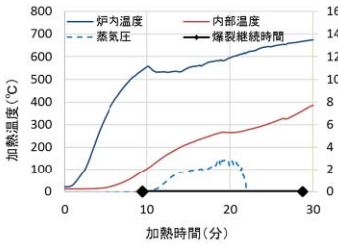


図-11 UFC+IC PP-0.3

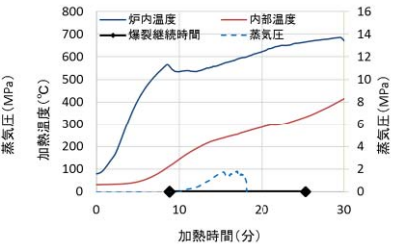


図-12 UFC+IC PP-0.5

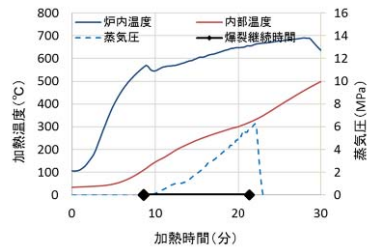


図-13 UFC+IC Jute-0.3

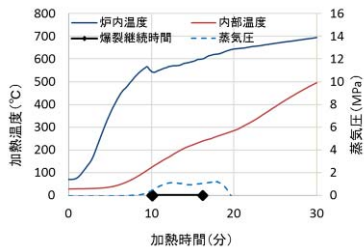


図-14 UFC+IC Jute-0.5

の最大値は 22.1min で 6.3MPa となった。図-14 より、UFC+IC Jute-0.5 は 10.1min で爆裂を生じ始め、16.2 min で爆裂が終了した。蒸気圧の最大値は 18min で 1.2MPa となった。図-10~14 より UFC+IC の結果を比較すると、UFC+IC Control に比べ、爆裂抑制繊維の混入率が増加することで蒸気圧の値は低下する傾向を示した。爆裂継続時間は UFC+IC PP シリーズと UFC+IC Jute シリーズともに Control に比べて短くなった。また、同シリーズでも繊維の混入率が増加すると爆裂継続時間は短くなった。

図-15, 16 には飽和水蒸気圧(SVP)と 内部蒸気圧の関係の一例を示す。図より蒸気圧の値は途中まで SVP 曲線とほぼ一致しており、他の供試体でも同様の傾向が見られた。UFC PP-0.3 と UFC Jute-0.3 および UFC+IC PP-0.5 は最初から SVP 曲線とずれているが、これは、蒸気圧の計測位置付近 (図-2 参照) に空隙が多くあり、供試体内の水分と共に空気も加熱されたことにより、SVP 曲線と一致しなかったためと考えられる^{8),9)}。また、他の計測値も途中から SVP 曲線からずれるが、これは、加熱により生じたマイクロクラックや爆裂抑制繊維の蒸気圧逸散ネットワークにより蒸気圧が外部に逸散したためだと

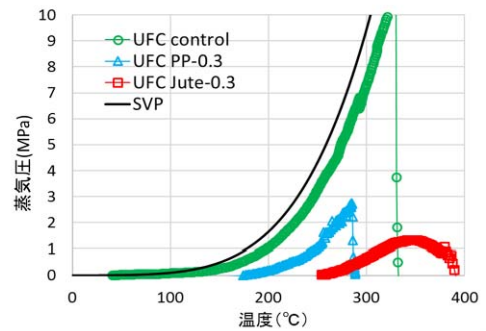


図-15 蒸気圧と SVP 曲線 (UFC)

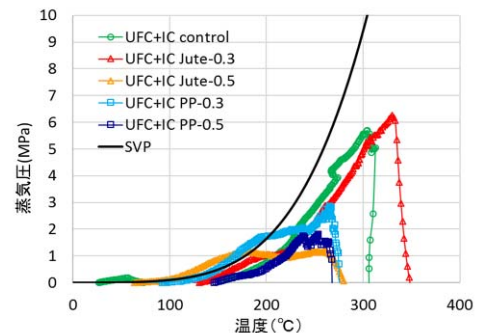


図-16 蒸気圧と SVP 曲線 (UFC+IC)

考えられる。

図-17 に各供試体の蒸気圧計測値の最大値の平均と繊維混入率との関係を示す（図中のエラーバーは測定値の最大値および最小値を示している）。全体的に繊維の混入率が増加することで蒸気圧は低下する傾向を示した。

3.5 爆裂判定

表-4 に各供試体の爆裂の状況を示す。試験は UFC Jute-0.3 は供試体の不備のため、2本のみ実施した。まず、UFC について、UFC Control と UFC PP-0.3 はいずれの供試体も爆裂により激しく損傷しているが、UFC Jute-0.3 は爆裂による損傷が軽微であることがわかる。次に、UFC+IC について、UFC+IC Control と UFC+IC PP-0.3 はいずれも激しく爆裂を生じている。UFC+IC PP-0.5 は PP 繊維の効果も見られるが、爆裂による損傷は激しかった。一方、UFC+IC Jute-0.5 はほとんど爆裂による損傷がなかった。UFC+IC Jute-0.3 もある程度爆裂を抑制できていた。UFC と UFC+IC の爆裂の状況を比較すると、爆裂抑制繊維を 0.3%混入した供試体は Jute-0.3 と PP-0.3 のいずれも内部養生を施した UFC+IC のほうが爆裂による損傷が激しかった。これは内部養生を施したことにより、内部の水量が増加したためだと考えられる。

3.6 Jute 繊維の爆裂抑制効果

ここでは本試験の結果について考察する。本試験の結

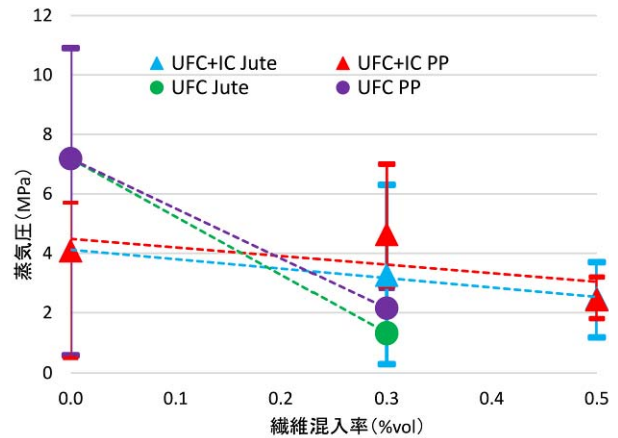
























図-17 蒸気圧計測結果のまとめ

果、UFC に Jute 繊維を 0.3%vol 混入することで爆裂を抑制でき、UFC に内部養生を施したとしても Jute 繊維を 0.5%vol 混入することで爆裂を抑制できた。また、UFC+IC においても Jute 繊維を 0.3%vol 混入することである程度爆裂を抑制できた。PP 繊維は UFC+IC において PP-0.3 と PP-0.5 のどちらでも爆裂を抑制できなかった。図-11, 12 より、PP 繊維が 170℃で熔融するよりも前に爆裂が生じ始めているため、爆裂を抑制できなかったと考える。また、Jute 繊維が PP 繊維に比べて爆裂抑制効果が大きい

表-4 供試体の爆裂状況

No.	1	2	3
UFC control			
UFC Jute-0.3			/
UFC PP-0.3			
UFC+IC control			
UFC+IC Jute-0.3			
UFC+IC Jute-0.5			
UFC+IC PP-0.3			
UFC+IC PP-0.5			

点について、Jute 繊維のストロー構造と、加熱により Jute 繊維とコンクリートの付着が切れることで生じた空隙 (PITS 効果)¹⁰⁾が内部蒸気圧の上昇に対して効果的に作用したためと考えられる。

図-17 より、蒸気圧の計測値に関しても PP 繊維と Jute 繊維ともに繊維混入率が増加することで蒸気圧は低下する傾向を示したが、繊維混入率が増加すると蒸気圧と同時に強度も低下した。しかし、既往の研究から UFC を加熱すると 400°C 付近までは強度が増加すると報告されており¹¹⁾、爆裂抑制効果の大きかった UFC+IC Jute-0.5 においても加熱により強度が増加したと考えられる。そのため、繊維を 0.5%混入したことによる爆裂抑制効果は高かったと考えられる。また、含水率から UFC+IC のほうが爆裂のリスクが高いと考えられるが、Control において蒸気圧の値は UFC のほうが高くなった。今回、蒸気圧の計測値の平均値により図-17 の蒸気圧の低減効果をまとめたが、UFC Control の蒸気圧は最大値と最小値で開きが最も大きかった。そのため蒸気圧の計測精度について更に検討する必要がある。

4. まとめ

本研究の結果から得られた知見を以下に示す。

- 1) フロー値は Jute 繊維と PP 繊維ともに混入率が増加すると低下する傾向を示した。特に、爆裂抑制繊維を 0.5%vol 混入した UFC+IC Jute-0.5 および UFC+IC PP-0.5 は、爆裂抑制繊維未混入の Control に比べてフロー値が著しく低下した。
- 2) 圧縮強度は、Jute 繊維と PP 繊維ともに混入率が増加することで低下する傾向を示した。
- 3) UFC+IC は UFC と比較して爆裂損傷が大きいことが明らかとなった。PP 繊維を混入することで、蒸気圧の値は低下する傾向を示したが、UFC と UFC+IC のどちらでも爆裂損傷は激しかった。
- 4) Jute 繊維を混入した場合、蒸気圧の値は低下する傾向を示し、UFC に内部養生を施しても Jute 繊維を 0.5%vol 混入することで爆裂損傷は軽微であった。

今後の課題として、蒸気圧の計測精度の更なる検討と、供試体寸法の影響の検討が必要である。

謝辞

本研究の実施に対し、本学 4 年生 新井秀行氏の協力を受けた。また、本研究は、H26 年度科学研究補助金 基盤研究(C)研究課題番号：25420459 火災時におけるコンクリートの爆裂メカニズムの解明と爆裂評価手法の提案

(代表：小澤満津雄)の補助を受けた。ここに謝意を表す。

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
- 2) 鈴木雅博ほか：廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp651-656，2007
- 3) 周波ほか：廃瓦細骨材による超高強度繊維補強コンクリートの自己収縮低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.301-306，2013
- 4) 小澤満津雄ほか：高温環境下における各種短繊維を添加した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1120-1125，2012
- 5) Davaajav Munkhtsatsral ほか：天然繊維を適用した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1330-1335，2014
- 6) Ozawa.M.et al.: Relationship between spalling behavior and internal vapour pressure of high-strength concrete reinforced with natural fibre under high temperature, Proceeding of 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Germany, Lipzig, pp.140-149, 2009
- 7) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，Vol.63，No.1，pp.63，2004
- 8) Kalifa, P., Menneteau, F.D.and Quenard, D.:Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.1915-1927, 2000
- 9) Mindeguia, J.C., Pimienta, P., Noumowé, A. and Kanema, M.:Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature-Experimental and numerical discussion on spalling risk, Cement and Concrete Research, Vol.40, pp.477-487, 2010
- 10) 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
- 11) 川口潤ほか：超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制と加熱後の残存強度に関する検討，コンクリート工学年次論文集，vol.35，No.1，pp.1153-1158，2013