

論文 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

小澤 満津雄^{*1}・俵 想太郎^{*2}・内田 裕市^{*3}・森本 博昭^{*4}

要旨: 高温環境下におけるアラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の爆裂抑制方法を検討するために、爆裂抑制繊維としてポリプロピレン繊維(PP)と水溶性ポリビニールアルコール繊維(WSPVA)および Jute 繊維を 0.19% vol 添加したケースについて加熱試験を実施した。加熱温度は、400, 600, 800℃とした。その結果、爆裂抑制繊維を添加したものは、添加しないものに比べて爆裂抑制効果が確認できた。

キーワード: 爆裂, 火災, UFC, アラミド繊維, PP 繊維, Jute 繊維, WSPVA 繊維

1. はじめに

近年、超高強度繊維補強コンクリート(UFC)が実用化され、土木学会から超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)¹⁾が刊行されている。この指針で対象としているUFCは高い力学特性を得るために高強度の鋼繊維が用いられており、ひび割れが発生した場合に鋼繊維が腐食する可能性が考えられるため、使用時にはひび割れを許容しないこととされている。そこで、鋼繊維の代わりに耐食性に優れた合成繊維を用いることが検討されている。著者らは収束タイプのアラミド繊維を用いることで、鋼繊維を用いたUFCに近い力学性能が得られることを報告した²⁾。しかしながら、火災時の爆裂抵抗性の検討については、PP繊維を混入することで効果があるという報告があるが³⁾、その他の有効な手段について検討例が少ないのが現状である。そこで、本研究ではUFCの火災時の爆裂抵抗性向上に関する基礎的資料を得ることを目的とし実験を実施した。すなわち、合成繊維と天然繊維をUFCに少量添加した供試体を作製し加熱試験を実

施し、爆裂抵抗性の効果を検討した。併せて、通気率試験を行い加熱前後の蒸気圧逸散ネットワークの定量化を試みた。

2. 実験概要

2.1 モルタルの配合および使用材料

表-1に本研究で使用した基本配合を示す。水結合材比は 0.19 とした。セメントはシリカフェームセメント(密度: 3.08g/cm³)を用いた。微細組織の充填材として珪石粉末(密度: 2.6g/cm³, 比表面積 8180cm²/g)を用い、細骨材には 6 号珪砂(密度: 2.6g/cm³)を使用した。また、混和剤には、超高強度コンクリート用高性能減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)を使用した。供試体の種類はアラミド繊維のみを用いたものを Control と定義し、5 種類とした。すなわち①Control に対して、②PP 繊維、③WSPVA 繊維、④Jute 繊維 3mm、⑤Jute 繊維 12mm を爆裂抑制繊維として添加した。

表-1 基本配合

		kg/m ³				
W/B	シリカフェームセメント	水	珪砂	珪石粉末	アラミド繊維	減水剤
0.19	1258	208	682	248	26.2	31.5

表-2 爆裂抑制繊維の特性

繊維の種類	繊維長	繊維径	融点	密度	その他の特性
	mm	μ m	℃	g/cm ³	
Jute	3, 12	10~30	-	1.3-1.45	炭化
WSPVA	4	12	220-240	1.3	水溶性 (50-90℃)
PP	12	42	170	0.91	熔融

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科学生 (非会員)

*3 岐阜大学 総合情報メディアセンター教授 博士(工学) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

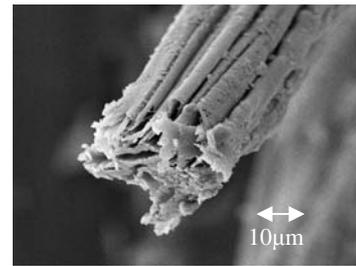
2.2 使用した短繊維

本研究では、力学性能を確保するために集束タイプのアラミド繊維を用いた。本研究で用いたアラミド繊維(コポリパラフェニレン・3,4'オキシジフェニレン・テレフタラミド)の材料特性は、密度 1.39 g/cm^3 、引張強度 3410 N/mm^2 、引張弾性率 74 kN/mm^2 である。集束タイプのアラミド繊維は繊維径 $12\mu\text{m}$ の繊維267本をエポキシ系樹脂により集束してスティック状に加工したものである。繊維長は 20mm のものを用いた。次に、本研究で使用した爆裂抑制繊維の種類と熱特性を表-2に示す。使用した繊維は合成繊維としてポリプロピレン繊維(以下、PP: 繊維長 12mm 、繊維径 $42\mu\text{m}$)と水溶性PVA繊維(以下、WSPVA: 繊維長 4mm 、繊維径 $10\mu\text{m}$)およびジュート繊維(以下、Jute: 繊維長 3mm および 12mm 、繊維径 $10\sim 30\mu\text{m}$)とした。

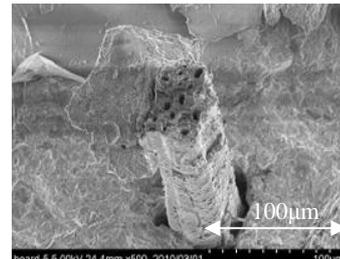
比較の為に、従来使用されているPP繊維の特性を併記する。図-1にJute 繊維のSEM写真(a)単体、b)コンクリート中の繊維を示す。Jute繊維は天然の麻繊維の一種であり、植物の茎であるため、複数のストローが束になった構造となっている。ストロー構造であることから、コンクリートが加熱された場合に蒸気圧逸散ネットワークを形成することで蒸気圧の低減効果があると考えられる。既報では、混入率 $0.075\% \text{ vol}$ とすることで爆裂抑制効果が確認されている⁴⁾。WSPVA 繊維は、耐火レンガなどの不定形耐火物の爆裂抑制に用いられている材料である。本研究で使用した繊維は $50\sim 90^\circ\text{C}$ の水溶液中で溶解する特性を有している⁵⁾。既報より、混入率が $0.15\% \text{ vol}$ で爆裂抑制効果が確認されている⁴⁾。なお、WSPVA繊維は蒸気養生(90°C 、 48 時間)を実施した後も溶解せずに供試体中で存在していることを確認している⁶⁾。図-2にJute繊維の示差走査熱量測定(以下、DSC)と熱重量測定(以下、TGA)の結果を示す。DSCの吸熱のピークは 360°C であり、また、TGAの結果より、 100°C 付近で脱水による重量変化がみられ、 260°C から熱可塑性を示し、 360°C までに熱分解が生じることがわかる。次に、図-3にWSPVA 繊維の示差熱分析(以下、DTA)とTGAの結果を示す。DTAの結果より 227°C 付近で吸熱のピークを示している。また、 246°C 付近から重量変化が見られ、 470°C までに熱分解が生じることがわかる。図-4にPP繊維のDSCとTGAの結果を示す。図より、 173°C 付近で吸熱のピーク(融点)を示している。また、 400°C 付近で、質量減少が開始し、 450°C で焼失していることが分かる。

2.3 供試体の作製

供試体寸法は圧縮強度と加熱試験用として $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を15本づつ作製した。Control供試体は、曲げ強度試験用として $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ を3本作製した。練り混ぜには、容量 10l のホバートミキサーを使用した。練り混ぜ方法を以下に示す。①水、混和剤、



a) Jute 繊維単体



b) コンクリート中の繊維

図-1 Jute 繊維の SEM 写真

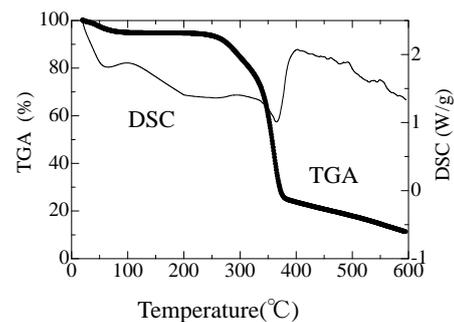


図-2 Jute 繊維の DSC-TGA 結果

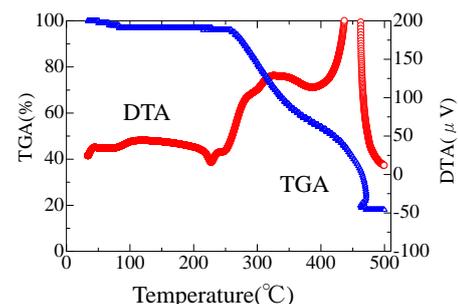


図-3 WSPVA 繊維の DTA-TGA 結果

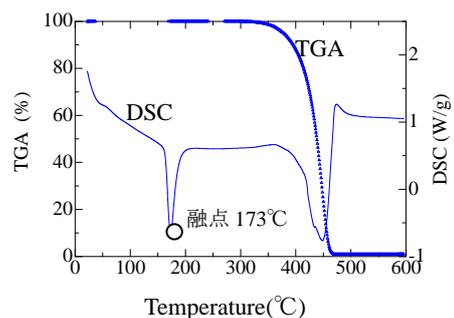


図-4 PP 繊維の DSC-TGA 結果

繊維以外の材料を投入して、1分間攪拌を行った。②水と混和剤を投入し、2分間攪拌を行い、容器内の粉体を掻き出し、さらに5分間攪拌を行った。③アラミド繊維を投入し、3分間の攪拌を行った。④爆裂抑制繊維を投入して1分間攪拌を行った。⑤練り上がり温度およびモルタルフローを計測した。⑥モルタルを各供試体の型枠に打ち込み、テーブルバイブレーターで締め固めた。作製した供試体は、1日間20℃の恒温室で養生を行った後、蒸気養生(90℃、2日間)を行った。

2.4 加熱試験

加熱試験には電気炉を用いた。電気炉は最高温度が1150℃まで上昇可能なもので、内寸:300×150×250mmのものを用いた。図-5に加熱パターンを示す。電気炉の設定温度と加熱時間はそれぞれ400℃(30分)、600℃(20分)、800℃(15分)とした。予め、炉内温度を設定温度に保持し、電気炉を開閉し供試体を2本ずつ電気炉内に設置した。所定の時間、供試体を加熱した後電気炉の電源を切って自然冷却を行った。電気炉扉の開閉の際、炉内温度は30℃程度低下したが、1分程度で所定の温度に回復できることを確認した。各設定温度で加熱前後の重量を測定し、重量変化から式(1)を用いて重量損失率を算出した。加熱後の残存重量は、残った大きな塊で重量の重い方を選択して測定した。算出した重量損失率には、水分損失も含まれているが、本研究では、爆裂抑制効果を重量損失率で評価することとした。

$$\alpha_{sp} = (W_{ini} - W_{after}) / W_{ini} \times 100 \quad (1)$$

ここに、

α_{sp} : 重量損失率(%)

W_{ini} : 加熱前の重量(g)

W_{after} : 加熱後の残存重量(g)

2.5 通気率測定試験

加熱試験後の供試体を対象として、通気率試験を実施した。ただし、加熱によって爆裂損傷が激しい供試体は試験を行わなかった。加熱後の供試体の内、損傷の少ない供試体を選び、爆裂損傷の無い部分を10~15mm程度の長さに切り出した。

通気率試験は、JIS R 2115「耐火物の通気率試験方法」⁷⁾を用いた。この方法は、耐火レンガなどの不定形耐火物の通気率を計測するのに用いられている。この方法を用いてコンクリートの通気率を計測した。式(2)に通気率の算出方法を示す。

$$\mu = V/t \times \eta \times \delta / A \times 1 / (p_1 - p_2) \times 2P / (p_1 + p_2) \quad (2)$$

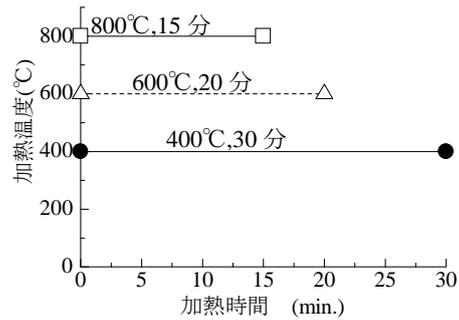


図-5 加熱パターン

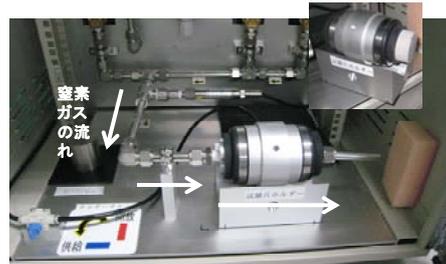


図-6 通気率試験装置

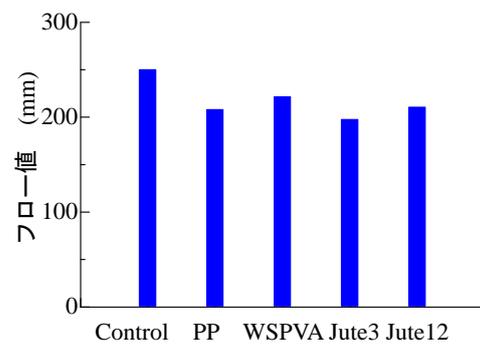


図-7 フロー試験結果

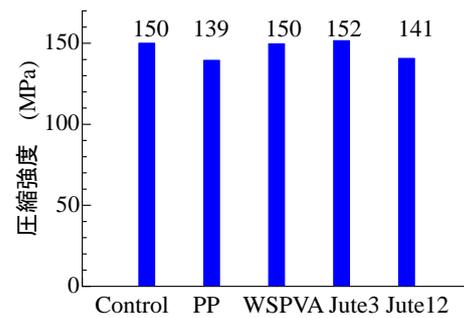


図-8 圧縮強度試験結果

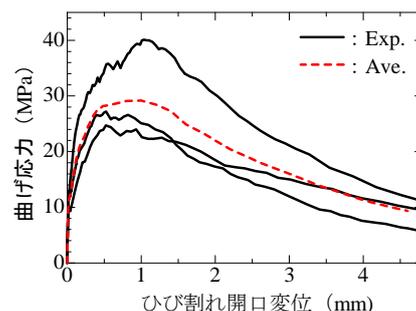


図-9 曲げ強度試験結果 (Control)

表-3 各供試体の爆裂状況

供試体の種類	加熱温度(°C)								
	400			600			800		
Control									
PP									
WSPVA									
Jute3									
Jute12									

ここに、

- μ : 物質の通気率(m^2)
- V : 物質が通過した圧力 p_1 におけるガス量(m^3)
- t : ガス量(V)が物質を通過するのに要した時間(s)
- η : 試験温度におけるガスの粘度($Pa \cdot s$)
- A : ガスが通過する物質の断面積(m^2)
- δ : ガスが通過する物質の厚み(m)
- P : ガス容量測定時のガス絶対圧(Pa)
- p_1 : 物質へのガス侵入絶対圧(Pa)
- p_2 : 物質からのガス離脱絶対圧(Pa)

図-6に通気率試験装置の概要を示す。本試験では、窒素ガスを使用した。図より、試験片ホルダーに供試体を設置し、所定の圧力を作用させた際の窒素ガス流量から式(2)を用いて通気率を算出した。試験圧力は70,80,90kPaとし、ガスの通過時間は60秒とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

図-7にモルタルフロー(0打)を示す。Controlのフローは250mmである。一方、各種爆裂抑制繊維を添加するとフローは低下した。すなわち、PP繊維とWSPVA繊維およびJute繊維3mmと12mmでフローは、208mm, 221mm, 197mm, 210mmとなった。練り上がり温度は、26~28°Cの範囲であった。

3.2 強度特性

図-8,9に各シリーズの圧縮強度とControl供試体の曲げ強度試験結果を示す。図-8より、圧縮強度は各シリーズともに140~150MPa程度の範囲となった。また、図-9に示す通り、曲げ強度の平均値は30MPa程度であった。

3.3 爆裂性状

表-3に加熱温度400,600,800°CにおけるControl, PP, WSPVA, Jute3mm, Jute12mm供試体の爆裂状況を示す。表より、各シリーズともに、加熱温度が高くなるほど、爆裂損傷が激しくなっているが、爆裂抑制繊維を混入す

ることで Control より爆裂を抑制できていることがわかる。加熱温度 400℃で 30 分加熱したケースは Control, PP, WSPVA, Jute3mm 供試体は爆裂を生じている。この場合の損傷は表面剥離よりも内部からの破壊が顕著である。加熱温度 600℃で 20 分加熱したケースは, Control 供試体の損傷が大きい。PP, WSPVA, Jute3mm においても損傷はあるが Control に比べて爆裂の規模は小さい。主に, 表面剥離による損傷が観察できる。加熱温度 800℃で 15 分加熱したケースは, Control 供試体が供試体の原型を留めないほど損傷している。一方, PP, WSPVA, Jute3mm においても損傷はあるが Control に比べて爆裂の規模は小さい。主に, 表面剥離による損傷が観察できる。Jute12mm 供試体は, 400℃, 600℃加熱においては大きな損傷はみられない。800℃では, 表面が爆裂により剥離しているが, 他のシリーズに比べて爆裂の程度が一番小さいことがわかる。今回の加熱試験は, 所定の温度に保持された電気炉内に供試体を投入して加熱を行っており, 供試体表面と内部の温度勾配が非常に大きく実際の火災よりも初期の温度条件が厳しいものである。この条件下においても, 爆裂抑制用繊維を混入することで爆裂抑制効果が確認できた。

3.4 通気率

図-10 に Control, PP, WSPVA, Jute3mm, Jute12mm 供試体の通気率計測結果を示す。400℃の場合は WSPVA, Jute3mm, Jute12mm の結果のみを示す。600℃の場合は Jute12mm のみの結果を示す。すなわち, その他の供試体は加熱時の損傷が激しく計測供試体の切り出しができなかった。加熱前の通気率は Control, PP, WSPVA, Jute3mm, Jute12mm それぞれ $2.0 \times 10^{-15} \text{m}^2$, $3.23 \times 10^{-15} \text{m}^2$, $1.53 \times 10^{-15} \text{m}^2$, $3.99 \times 10^{-15} \text{m}^2$, $4.12 \times 10^{-15} \text{m}^2$ で 10^{-15}m^2 の単位となりオーダーはほぼ同等であった。WSPVA は, 400℃加熱により通気率が $4.06 \times 10^{-14} \text{m}^2$ となりオーダーが 1 桁上昇し繊維溶融による通気率の上昇が確認できた。Jute3mm と Jute12mm は 400℃加熱により $2.53 \times 10^{-15} \text{m}^2$ と $2.46 \times 10^{-15} \text{m}^2$ となり, 通気率の上昇はみられなかった。一方, Jute12mm は 600℃加熱によって $2.04 \times 10^{-14} \text{m}^2$ となりオーダーが 1 桁上昇し通気率の上昇が確認できた。Jute 繊維はストロー構造を有しているため, 加熱前から蒸気圧逸散ネットワークが形成されていることが, この結果に表れていると考えられる。

3.5 爆裂抑制繊維の効果

図-11 に重量損失率を示す。図より, 各供試体とも加熱温度が 400, 600, 800℃と高くなると重量損失率が高くなる傾向にある。しかし, 爆裂抑制繊維を混入すると 800℃加熱でも重量損失率が 30%程度に抑制できることがわかる。特に, WSPVA 繊維と Jute12mm は PP 繊維よりも爆裂抑制効果が期待できる可能性が示された。図-12

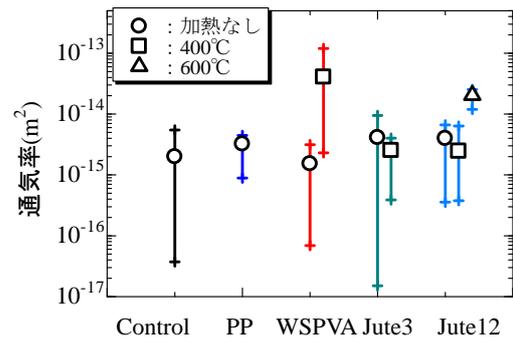


図-10 通気率試験結果

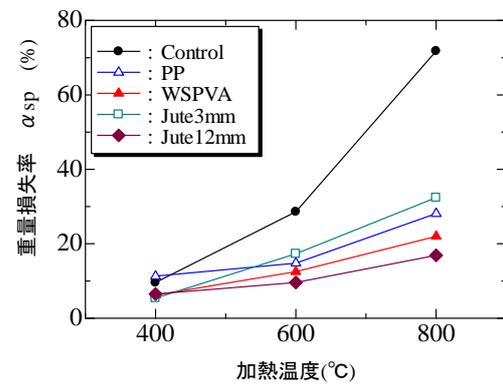


図-11 重量損失率

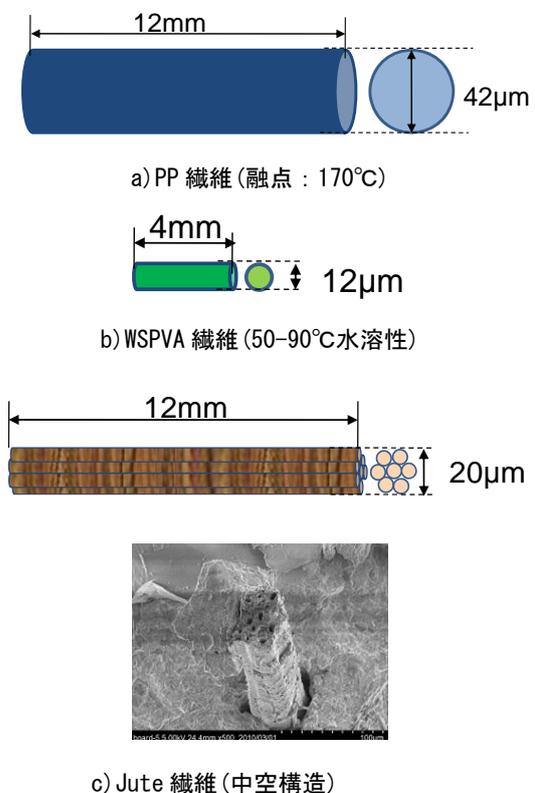


図-12 爆裂抑制繊維の概形

に今回使用した繊維の概形を示す。PP 繊維は一般的に爆裂抑制用として用いられているが、今回の結果では損傷率が大きい場合があった。PP 繊維の融点は 170℃前後であるが、今回の加熱試験は急激な温度勾配を供試体に与えたため PP 繊維が熔融する前に爆裂が生じた可能性が考えられる。一方、WSPVA は PP 繊維に比べて重量損失率は小さかった。WSPVA 繊維が 50-90℃の水溶液中で溶解することから急激な温度勾配が供試体内部に生じた場合でも、水分存在下で繊維の一部が溶解するか、繊維とセメントマトリックスとの付着力が緩和されたため蒸気圧逸散ネットワークが形成され爆裂を低減できたと考えられる。次に Jute 繊維について、繊維長 3mm よりも 12mm が爆裂抑制効果の高いことが分かる。Jute 繊維は、複数の管(中空構造)が束になっていることから、蒸気圧逸散ネットワークを形成し爆裂を抑制できることを著者らはこれまでに示したが⁴⁾、繊維長 3mm では蒸気圧逸散ネットワークの形成が十分ではなく爆裂抑制効果が小さくなったと考えられる。以上のように、繊維の種類と長さによって爆裂抑制効果に差異が見られた。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- 1) 加熱試験において各供試体とも加熱温度が 400, 600, 800℃と高くなると重量損失率が高くなる傾向にある。しかし、爆裂抑制繊維を混入すると 800℃加熱でも重量損失率が 30%程度に抑制できることがわかった。
- 2) PP 繊維は一般的の爆裂抑制用として用いられているが、今回の結果では重量損失率が大きい場合があった。PP 繊維の融点は 170℃前後であるが、今回の加熱試験は急激な温度勾配を供試体に与えたため PP 繊維が熔融する前に爆裂が生じた可能性が考えられる。
- 3) WSPVA 繊維が 50-90℃の水溶液中で溶解することから急激な温度勾配が供試体内部に生じた場合でも、繊維が水分存在下で一部が溶解するか、繊維とセメントマトリックスとの付着力が緩和されたため蒸気圧逸散ネットワークが形成され爆裂を低減できたと考えられる。また、今回使用した繊維長が 4mm であることを勘案すると、繊維長を更に長くすると爆裂抑制効果が高まることが期待できると考えられるが、今後更に検討したい。
 - 4) Jute 繊維について、繊維長 3mm よりも 12mm が爆裂抑制効果の高いことが分かる。Jute 繊維は、

複数の管(中空構造)が束になっていることから、蒸気圧逸散ネットワークを形成し爆裂を抑制できることが考えられるが、繊維長 3mm では蒸気圧逸散ネットワークの形成が十分ではなく爆裂抑制効果が小さくなったと考えられる。

- 5) 本研究の範囲内において、繊維の種類と長さによって爆裂抑制効果に差異が見られた。

謝辞 :

本研究は、科学技術研究補助金基盤(C), No. 22560461 (代表:小澤満津雄)の補助を受けた。(株)テザック 山本基由氏より Jute 繊維の提供を受けた。また、(株)クラレ 稲田真也氏より WSPVA 繊維の提供を受けた。また、通気率計測において(株)クラレ 稲田真也氏と三宅進氏に多大なご協力を頂いた。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) 竹山忠臣, 小川義宏, 出井丈也, 内田裕市：アラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.313-318, 2009
- 3) BaBa.S et al, 'Fire Resistance of Pre-Stressed Slabs in Ultra High Performance Concrete for Use in an Office Building Retrofit Project', Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-performance Concrete,(2008).CD-ROM.
- 4) 小澤満津雄,水野宏紀,森本博昭：高温環境下における水溶性 PVA 繊維および Jute 繊維混入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.32, pp.1133-1138,No.1, 2010
- 5) T.Kobayashi,T.M. Nakashima: Optimization of the PVA Fiber for Explosion Control of Refractory Castables, No.127 Proceeding of UNITECR,CD-ROM, 2009
- 6) M.Ozawa, Y.Uchida, H.Morimoto: Prevention of Spalling for UFC using WS-PVA Fiber and Jute Fiber at High Temperature, Proceeding of the 9th International Symposium on High Performance Concrete - Design, Verification & Utilization,Vol.1,pp.222-229, 2011
- 7) 日本工業規格: JIS R 2115 耐火物の通気率試験方法, pp.145-155, 2008