

論文 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

川口 潤*1・小澤 満津雄*2・周 波*3・内田 裕市*4

要旨：火災時の超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の爆裂抑制方法を提案するために、各種短繊維を用いた UFC の加熱試験を実施し、爆裂判定試験(400℃, 600℃)と加熱後の残存強度試験(200℃, 400℃)および通気率試験を実施した。力学性能を付与するために鋼繊維を用い、爆裂抑制繊維として、PP 繊維と Jute 繊維および WSPVA 繊維を添加した。試験の結果、爆裂抑制繊維の種類によって、爆裂抑制効果が異なることが明らかとなった。加熱後の残存強度試験では、200℃加熱しても強度は低下せず、増加する傾向を示した。

キーワード：爆裂, 火災, UFC, 鋼繊維, ポリプロピレン繊維, ジュート繊維, 水溶性 PVA 繊維

1. はじめに

近年、社会資本の長寿命化の観点から、コンクリートの高強度化と高耐久化を目指した取り組みが進んでいる。その成果の一つとして、超高強度繊維補強コンクリート(Ultra-High Strength Fiber Reinforced Concrete: UFC)が実用化されている¹⁾。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高い力学性能を有する。しかし、高靱性で高耐久な材料であるが、火災時に爆裂を生じやすいという欠点がある。これまでに、ポリプロピレン(以下、PP)繊維を混入することで爆裂を抑制できるという報告があるが²⁾、その他の有効な手段については検討例が少ないのが現状である。

本研究グループでは、アラミド繊維を使用した UFC(fc:150MPa クラス)の爆裂抑制手法の提案として PP 繊維以外の爆裂抑制繊維の検討を行った。その結果、天然のジュート (Jute) 繊維や水溶性 PVA (WSPVA) 繊維を混入した場合に PP 繊維と同等以上の爆裂抑制効果を確認している³⁾。しかしながら、更に高強度の UFC(fc : 200MPa クラス)に適用した場合の効果については検討していない状況である。そこで、本研究では 200MPa クラスの UFC を対象として、各種爆裂抑制繊維を混入した場合の爆裂抑制効果を検討した。加えて、加熱後の残存強度と通気率の変化も検討し、耐火設計の基礎資料を得るものとした。

2. 試験概要

2.1 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。力学特性を確保するために、鋼繊維を添加した。本配合はプレミックスの結合材と細骨材および専用の高性能減水剤を用いた。使用した鋼繊維は直径 0.2mm、繊維長は 15mm である。供試体の種類は爆裂抑制繊維が未混入のものを Control と定義し、6 種類とした。すなわち①Control に対して、②PP 繊維を 0.19vol%混入したものを P-0.19 とした。③PP 繊維を 1.0vol%混入したものを P-1.0、④Jute 繊維を 0.19vol%混入したものを J-0.19、⑤長さ 4mm の WSPVA 繊維を 0.19vol%混入したものを WS4-0.19、⑥長さ 12mm の WSPVA 繊維を 0.19vol%混入したものを WS12-0.19 とした。

2.2 使用した短繊維

本研究で使用した繊維の種類と熱特性を表-2 に示す。使用した繊維はポリプロピレン繊維(繊維長 12mm, 繊維径 42μm)とジュート繊維(繊維長 12mm, 繊維径 10~30μm)および水溶性 PVA 繊維(繊維長 4mm および 12mm, 繊維径 12μm)とした。ジュート繊維は天然の麻繊維であり、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

表-1 UFC の基本配合

単位量(kg/m ³)				
プレミックス	細骨材	水	減水剤	鋼繊維
1322	932	156	24	157

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科学生 (学生会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教 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 短繊維の特性

	繊維長	繊維径	融点	密度	その他の 特性
繊維の種類	mm	μm	$^{\circ}\text{C}$	g/cm^3	
PP	12	42	170	0.91	溶解
Jute	12	10~30	-	1.3~1.45	炭化
WSPVA	4, 12	12	220~240	1.3	水溶性($50^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$)

表-3 試験項目一覧

	フロー	圧縮強度試験			爆裂判定試験		通気率測定試験		
		加熱なし	200 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	加熱なし	200 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$
Control	○	○	○	×	○	-	○	○	×
P-0.19	○	○	○	×	○	-	○	○	×
P-1.0	○	-	-	-	○	○	-	-	-
J-0.19	○	○	○	○	○	○	○	○	○
WS4-0.19	○	○	○	×	○	-	○	○	○
WS12-0.19	○	○	-	-	○	○	-	-	-

報では、圧縮強度 70MPa の高強度コンクリートにジュート繊維を 0.075%vol 混入した供試体において、RABT 加熱曲線により加熱試験を行い、爆裂抑制効果が確認できている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 50-90 $^{\circ}\text{C}$ 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 0.15vol% 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 $^{\circ}\text{C}$ 、48 時間)を実施した後で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⁾。

2.3 試験項目

表-3 に試験項目の一覧表を示す。試験項目は爆裂判定試験と残存強度試験および通気率試験とした。加熱試験中に爆裂が生じたものは、「×」とした。また、試験対象から除外したものを「-」で表記した。爆裂判定試験と圧縮強度試験に $\Phi 50\times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用いた。両試験とも各加熱条件につき供試体数は 3 本ずつとした。通気率試験には $\Phi 50\times 50\text{mm}$ の円柱供試体を用い、各加熱条件につき供試体数は 4 体とした。P-1.0 と WS12-0.19 は除外した。

2.4 供試体の作製

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、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鋼繊維を投入し、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、テーブルパイプレーターで締め固めた。作製した供試体は、

2 日間 20 $^{\circ}\text{C}$ の恒温槽で養生を行った後、蒸気養生(90 $^{\circ}\text{C}$ 、2 日間)を行った。

2.5 電気炉

加熱試験には電気炉を用いた。電気炉は最高温度が 1150 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇可能なもので、内寸:300 $\times$ 150 $\times$ 250mm のものを用いた。

2.6 圧縮強度試験

図-1 に圧縮強度試験供試体の加熱パターンを示す。電気炉の設定温度は 200 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ とし、1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. で加熱した。供試体は、予め電気炉内に 3 本設置した。温度を所定の値まで上昇させたのち、1 時間保持した。加熱試験終了後、電気炉の電源を切って自然冷却を行った。加熱後の供試体を対象として、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を実施した。

2.7 爆裂判定試験

図-2 に爆裂判定用試験の加熱パターンを示す。電気炉の設定温度は 400 $^{\circ}\text{C}$ と 600 $^{\circ}\text{C}$ とし、加熱時間はそれぞれ 30 分と 20 分とした。爆裂判定試験の供試体数は各シリーズで 3 本とした。図-3 に加熱試験の状況を示す。供試体は爆裂による飛散を防止するため、金網で巻いた。電気炉を予め設定温度まで上昇させた。設定温度に達したことを確認後、電気炉の扉を迅速に開閉し、供試体を電気炉に投入した。予備試験の結果より、加熱は 2 本ずつとした。供試体を所定時間内で加熱したのち、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 $^{\circ}\text{C}$ 程度低下したが、1 分程度で所定の温度に回復することを確認した。加熱温度 400 $^{\circ}\text{C}$ で 3 本中 1 本でも爆裂しなかったものを対象に、600 $^{\circ}\text{C}$ 加熱を実施した。

2.8 通気率測定試験

加熱パターンは図-1 を用いた。予め供試体を 4 本ずつ

電気炉内に設置し、所定の加熱試験を実施した。加熱後の供試体を対象として、通気率測定試験を実施した。ただし、加熱によって爆裂損傷を受けた供試体は測定から除外した。通気率試験は、JIS R 2115「耐火物の通気率試験方法」⁷⁾に準拠した。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(1)に通気率の計算式を示す。

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

ここに、

μ : 物質の通気率(m^2)

V : 物質が通過した圧力 p_i 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 : 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-4に通気率試験装置を示す。本試験では、不活性の窒素ガスを使用した。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(1)を用いて通気率を算出した。1 供試体について、試験圧力を 60-90kPa の範囲で 3 回計測を行い、試験精度の向上を図った。ガス透過時間は 60 秒とした。

3. 結果・考察

3.1 フレッシュ性状

図-5にモルタルフロー(0 打)を示す。Control のフローは293mm であった。PP繊維を混入したP-0.19は280mm で、Controlと大きな差異はなかった。一方、混入率が1.0%のP-1.0は135mm となり、フローは大きく低下した。ジュート繊維を0.19vol%混入したJ-0.19は、265mm となり大きな低下はみられなかった。WSPVA繊維を用いた場合、繊維長が4mmと12mmのWS4-0.19とWS12-0.19は、フロー値がそれぞれ253mmと218mmとなった。繊維長が長くなると、フローが低下する結果となった。

3.2 圧縮強度

図-6にControlとP-0.19, J-0.19, WS4-0.19, WS12-0.19 供試体の圧縮強度試験結果を示す。温度条件は加熱無し(20℃)と加熱温度200℃および400℃とした。WS12-0.19は加熱無しのみ結果を示す。加熱なしの圧縮強度は214MPa~228MPaとなったが、WS12-0.19のみ188MPaとなった。爆裂抑制繊維混入による強度低下はWS12-0.19以外ではほとんどみられなかった。200℃で加熱した場

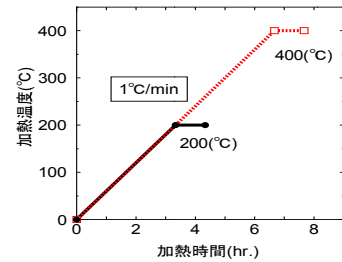


図-1 加熱パターン(圧縮強度, 通気率測定)

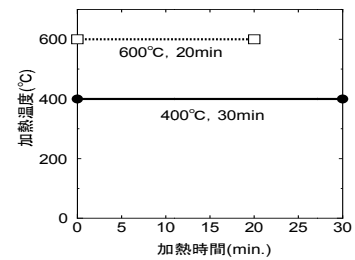


図-2 加熱パターン(爆裂判定)



図-3 供試体の加熱試験状況



図-4 通気率試験装置

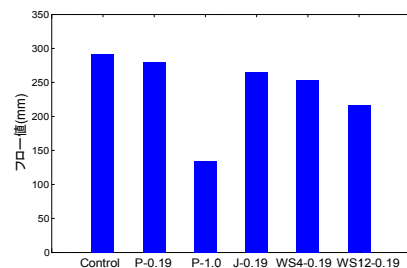


図-5 フロー試験結果

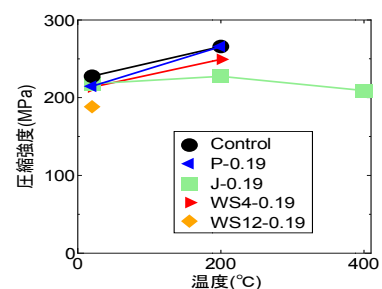
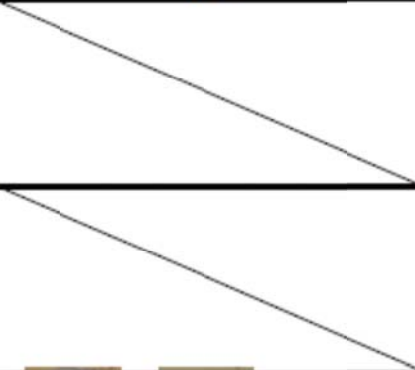
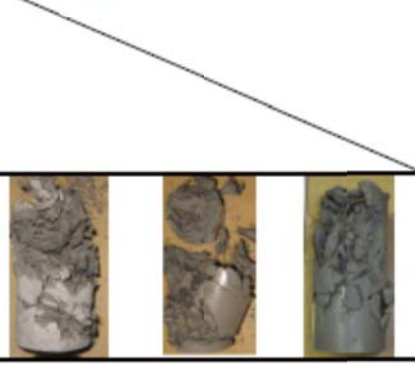


図-6 圧縮強度試験結果

表-4 各供試体の爆裂性状

供試体種類	加熱温度(°C)					
	400			600		
Control						
P-0.19						
P-1.0						
J-0.19						
WS4-0.19						
WS12-0.19						

合、圧縮強度は227MPa～266MPaであり、加熱に伴い強度が増加する傾向を示した。これは加熱に伴い、未水和セメントの水和反応が進行したものと考えられ、この現象については宮本ら⁸⁾も同様の報告をしている。加熱温度400°CにおいてJ-0.19以外は、加熱時に爆裂が生じ、圧縮強度試験を実施できなかった。400°Cで加熱したJ-0.19の圧縮強度は209MPaであった。Jute繊維を混入したJ-0.19は加熱無し供試体とほぼ同程度の残存強度となった。

3.3 爆裂判定

表-4に加熱温度400,600°Cにおける爆裂判定試験の結果を示す。対象供試体は、Control、P-0.19、P-1.0、J-0.19、WS4-0.19、WS12-0.19とした。加熱温度400°Cで30分加熱した場合、Control、P-0.19、WS4-0.19、WS12-0.19供試体は爆裂を生じている。特に、ControlとP-0.19は損傷が激

しい。WS4-0.19、WS12-0.19は爆裂による表面剥離が生じているが、Controlと比較しても損傷が軽微であることがわかる。WS12-0.19は1本ではあるが、爆裂が生じていないものもある。一方、J-0.19とP-1.0は爆裂が生じない結果となった。次に、400°C加熱で1本でも爆裂が生じなかったJ-0.19とP-1.0およびWS12-0.19について、600°C加熱を実施した。表より、P-1.0は、爆裂が3本中2本で原型をとどめないほどの損傷が生じている。WS12-0.19は3本ともに原型を留めないほどの爆裂を生じる結果となった。一方、J-0.19供試体は表面剥離による損傷が生じているが、原型を留めている。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、ジュート繊維が爆裂抑制用

繊維として有効であることが確認できた。

3.4 通気率測定

図-7～10にControlとP-0.19および J-0.19とWS4-0.19供試体の通気率と加熱温度(加熱無し, 200℃, 400℃)との関係を示す。なお, 400℃加熱において, ControlとP-0.19は, 加熱時に供試体が爆裂したため, 通気率の計測ができなかった。試験結果は計測値の最大値と最小値および平均値を示した。

図-11に通気率の平均値を示す。図より, Controlの通気率は200℃加熱で小さくなる傾向となった。P-0.19は加熱200℃で, 通気率は上昇した。これは, PP繊維が溶融することにより, 蒸気圧逸散ネットワークが形成され, 通気率が上昇したと考えられる。WS4-0.19は他の供試体よりも通気率は小さかった。200℃加熱で通気率は上昇したが, 400℃加熱では通気率の上昇は見られなかった。200℃では, 繊維の溶融による効果が確認できたが, 400℃では大きな差異がなかった。J-0.19は200℃加熱で通気率が小さくなったが, 400℃で加熱なしと同等となった。

3.5 短繊維の爆裂抑制効果

これまでに, 各種短繊維を混入したUFCの流動性と加熱に伴う強度変化および爆裂判定と通気率の評価を行った。圧縮強度レベルが200MPaのUFCに関して, 各種繊維の効果を考察する。まず, PP繊維は0.19vol%では爆裂を抑制することができなかったが, 1.0vol%混入することで爆裂抑制効果を確認できた。PP繊維は融点が170℃であるが, 0.19vol%を混入した際, 200℃加熱で通気率の上昇を確認した。これは, 繊維の溶融による蒸気圧逸散ネットワークが形成されたと考えられる。0.19vol%混入の供試体は, 200℃加熱の通気率は他の種類と比べても高い傾向にある。爆裂判定試験では, PP繊維を0.19vol%混入した場合, 爆裂抑制効果は確認できなかったが, 1.0vol%混入では抑制効果が確認できた。これは, 通気率が大きくなるためと考えられる。ただし, 混入率1.0vol%供試体は流動性が極端に低下する傾向を示した。既往の研究では, PP繊維を0.5vol%以上混入することで, 効果があるという報告がある⁹⁾。ジュート繊維は, 本研究で使用した繊維のなかで最も爆裂抑制効果が高かった。これは, 著者らのグループでこれまでに報告しているように, ジュート繊維が複数の管(中空構造)の束になっており, 蒸気圧逸散ネットワークが形成されたことが要因と考えられる。一方で, 流動性の低下も小さく, 強度低下もほとんどみられなかった。一般的に使用されているPP繊維と比較しても, その優位性が確認できた。今後は, 繊維の混入率を更に大きくして, 爆裂抑制効果を確認し, 流動性と強度特性も検討していく予定である。加えて, 曲げ強度の加熱に伴う変化も検討する必要があると考え

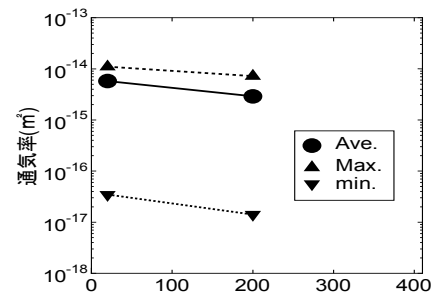


図-7 通気率(Control)

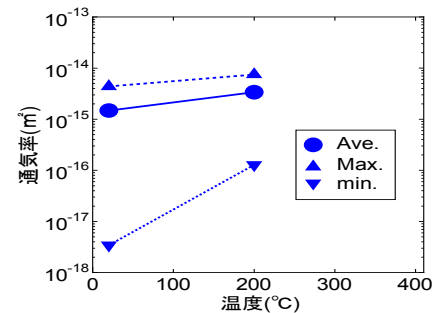


図-8 通気率(P-0.19)

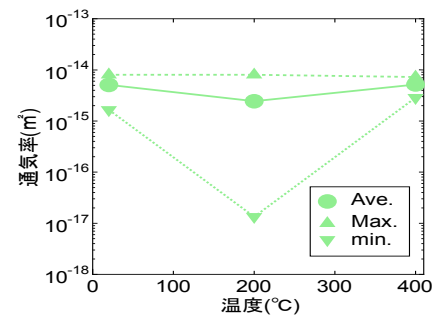


図-9 通気率(J-0.19)

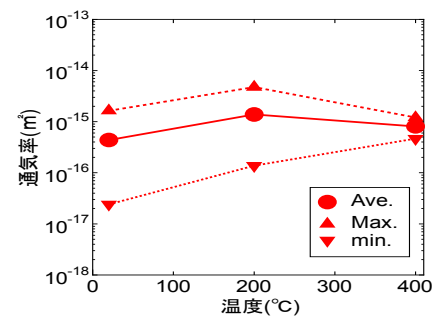


図-10 通気率(WS4-0.19)

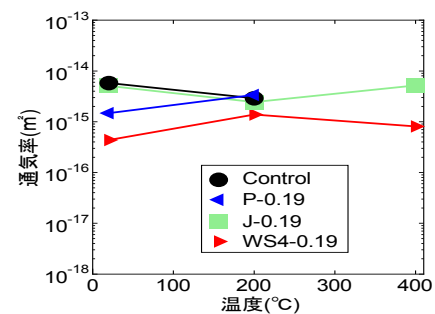


図-11 通気率の平均値の比較

る。WSPVA繊維は、50℃~90℃の水溶液中で溶解する特性がある。今回、WSPVA繊維4mmを0.19vol%混入した供試体において200℃加熱した際、通気率の上昇がみられた。他の種類と比べると通気率が小さい傾向にあった。一方で、繊維長を12mmとした場合、爆裂抑制効果を確認できた。WSPVA繊維を長くすることで、蒸気圧逸散ネットワークが形成され、爆裂抑制効果が大きくなると考えられる。

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) 圧縮強度 200MPa 以上の UFC においては 400℃加熱であっても大きな損傷を生じるが、爆裂抑制繊維の混入により損傷を低減できる。600℃加熱では、すべての供試体で爆裂を生じたが、爆裂抑制繊維の種類と長さによって損傷に差異が見られた。
- 2) PP繊維は爆裂抑制繊維として一般的に用いられているが、0.19vol%では効果がなかった。1.0vol%混入することで、爆裂抑制効果が確認できた。ただし、流動性は大きく低下した。
- 3) ジュート繊維は、本研究で使用した繊維のなかで最も爆裂抑制効果が高かった。これは、ジュート繊維が複数の管(中空構造)の束になっており、蒸気圧逸散ネットワークが形成されたことが要因と考えられる。一方で、流動性の低下も小さく、強度低下もほとんどみられなかった。一般的に使用されているPP繊維と比較しても、その優位性が確認できた。
- 4) WSPVA繊維は、繊維長4mmよりも12mmが爆裂抑制効果は高いことがわかった。繊維長4mmでは蒸気圧逸散ネットワークの形成が十分でなく、爆裂抑制効果が小さくなったと考えられる。しかしWSPVA12のフロー値は218mmと小さく、繊維長と混入率の検討が必要であると考えられる。

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 稲田真也氏に多大なご協力を頂いた。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
- 2) 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.
- 3) 小澤満津雄, 俵想太郎, 内田裕市, 森本博昭：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.34, No.1, pp.1120-1125, 2012
- 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, No.1, pp.1133-1138, 2010
- 5) Kobayashi, T., Nakashima, M : Optimization of the PVA Fiber for Explosion Control of Refractory Castables, No.127 Proceeding of UNITECR, CD-ROM, 2009
- 6) Ozawa, M. Uchida, Y. Morimoto, H. : 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
- 8) 宮本圭一, 安部 武雄：超高強度コンクリートの高温加熱後の力学的性質 (Fc150 と Fc200), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.193-194, 2012
- 9) Burke, B.T.: Residual Strength of Ultra-High Performance Concrete After Exposure to Elevated Temperatures, Master's Theses, University of Connecticut, DigitalCommons@UConn, 2011