# 論文 高温環境下における繊維混入高強度コンクリートの通気率変化 に関する研究

小澤 満津雄<sup>\*1</sup> · Dantas Rafael<sup>\*2</sup> · 森本 博昭<sup>\*3</sup>

要旨:火災時に高強度コンクリートは爆裂現象を生ずることが問題となっている。爆裂現象を抑制する方法 として、低添加で爆裂抑制に有効な繊維の開発を目指し、水溶性PVA繊維と天然繊維のJUTE繊維の適用性 について、検討を進めてきた。本論文では爆裂抑制に関係する蒸気圧低減効果を確認するために、各種繊維 を混入した高強度コンクリートを作製し、加熱試験を実施し、加熱前後の通気率を検討した。その結果、 WSPVA繊維とJUTE繊維を混入することで、形成される蒸気圧逸散ネットワークの特性がPP繊維を混入した 場合と異なるため、加熱に伴う通気率の上昇割合が小さくても爆裂を抑制できることを確認した。 キーワード:高温加熱、高強度コンクリート、通気率、水溶性PVA繊維、ジュート繊維

### 1. はじめに

JUTE

WSPVA

火災でのコンクリート構造物の安全性を確保する上 で、コンクリートの耐火対策は必要不可欠である。コン クリートが高温加熱を受けたとき、表層部が爆発的に剥 離する爆裂現象を生じることがある。爆裂現象により、 鉄筋コンクリート部材のかぶりが減少し、内部の鉄筋が 直接加熱される危険性がある。その結果、構造体として 部材の耐力低下をもたらすために、その抑制が重要であ ると考えられる<sup>1)</sup>。爆裂のメカニズムとしては、熱応力 説や水蒸気圧説が挙げられるが、未だに確たる結論が得 られていないのが現状である。既往の研究では、耐火塗 料の塗布,鋼板被覆,合成繊維の混入などに爆裂抑制効 果(図-1参照)があるとされている<sup>2)~4)</sup>。特に、ポリプロピ レン(PP)繊維が有効であるとして実用化されている。し かしながら、繊維の長さが不足すると爆裂抑制が困難で あること5や,安全性を考慮して混入量が増えると流動 性が低下するなどの課題も見受けられる4)。そこで、本 研究グループでは、低融点・低添加型で爆裂抑制に有効 な繊維の開発を目指している。これまでに、水溶性PVA 繊維と天然繊維のジュート繊維を混入した高強度コン クリートを対象とした供試体を作製し、加熱試験を行い

				Ī	€-1	示方	配合		
供試体の			kg/m <sup>3</sup>					Fiber	Length
	種類	w/C	W	С	S	G	AD	%vol.	mm
	Control						8.8	/	/
	РР	0.2	122	140	014	1040		0.15	12
		0.5	132	440	014	1048			

\*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 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

蒸気圧の低減効果や爆裂性状を検討している。その結果, 水溶性PVA繊維と天然繊維のジュート繊維を用いるこ とで爆裂抑制に効果があることを確認している<sup>677</sup>。一方 で,蒸気圧低減に関係する加熱時の蒸気圧逸散ネットワ ークの形成状況の確認にまで至っていなかった。既報よ り,合成繊維を混入したコンクリートの加熱時の爆裂抑 制効果を通気率で評価した報告がある<sup>899</sup>。そこで,本論 文においても,蒸気圧逸散ネットワークの形成を,加熱 前後の通気率として評価することとした。すなわち,小 型供試体(φ50×50mm)の加熱試験を実施し,加熱前後の通 気率の計測を試みた。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 使用配合

表-1 に本研究で使用した示方配合を示す。対象は高 強度コンクリートとした。供試体は4 種類とし、繊維無 1 種類と繊維有3 種類とした。繊維混入無はControl 供 試体と定義した。使用した繊維はポリプロピレン繊維(以 下, PP), ジュート繊維(天然繊維,以下JUTE),水溶性 PVA繊維(以下,WSPVA)とした。繊維の設定混入率はPP とWSPVAが0.15%volとし,JUTE が0.075%volとした。



12

4

0.075

0.15

17.6

設定混入率は,過去に本研究グループで加熱試験を実施 した際に,爆裂抑制に効果があったものを選択した<sup>6)7)</sup>。 コンクリートのW/C は0.3とした。セメントは普通ポル トランドセメント(密度:3.15g/cm<sup>3</sup>)を使用した。粗骨材 の最大寸法は15mm とした。混和剤は高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)を使用した。

## 2.2 使用した繊維の特性

表-2 に使用した繊維の種類と特性を示す。JUTE 繊 維は天然繊維であり,SEM 写真(図-2参照)からストロー 構造であることが確認できるため、 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。既報より, 0.075%vol 混入による爆裂抑制効果が確認されている<sup>7)</sup>。 次に、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 した繊維は水が存在する環境下で水溶性を示し, 50-90℃の範囲で溶解する特性を有している<sup>10)</sup>。既報より, 0.15%vol 混入による爆裂抑制効果が確認されている<sup>7)</sup>。 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-3 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。図より, DSC の吸熱のピークは360℃であった。また、TGA の結果よ り、100℃付近で脱水による重量変化がみられ、260℃か ら熱可塑性を示し、360℃までに熱分解が生じることが わかる。次に、図-4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℃付近 で吸熱のピークを示している。また、246℃付近から重 量変化が見られ、470℃までに熱分解が生じることがわ かる。図-5にPP繊維のDSC-TGA結果を示す。図より、 173℃付近で吸熱のピーク(融点)を示している。また, 400℃付近で、質量減少が開始し、450℃で焼失している ことが分かる。

## 2.3 加熱試験用供試体

図-6に供試体作製方法を示す。供試体はΦ50×100mmの 鋼製サミット缶を用いた。コンクリートは2層に分けて 打ち込み,バイブレータで十分振動を与えて締め固めを 行った。その後,打ち込み面をラップで覆い,乾燥を防 止し養生室(温度20±2℃,湿度70±5%)に移動した。養 生期間は2.5ヵ月(75日)とした。供試体は養生後,サミッ ト缶ごと1/2に切断した。その後,加熱試験まで,養生 室に静置し,乾燥を防止した。切断した供試体は切断面 1面のみを残して,周囲をサミット缶ごと断熱材で覆っ た。サミット缶を残して加熱をすることで,加熱に伴う コンクリートの膨張を拘束し,内部の熱膨張によるひび 割れを抑制することを試みた。これにより,コンクリー ト中で加熱に伴う繊維の溶融,消失が生じ空隙の増加に よる蒸気圧逸散ネットワークの生成状態を再現するこ

表-2 使用した繊維

繊維の	繊維長	繊維径	融点	密度	その他の	
種類	mm	$\mu$ m	°C	g/cm <sup>3</sup>	特性	
JUTE	12	10-30	-	1.3-1.45	炭化	
WSPVA	4	12	220-240	1.3	水溶性	
PP	12	110	174	0.91	溶融	



図-2 JUTE 繊維の SEM 写真





## 図-6 供試体の作製方法 \_ \_\_\_\_

表−3 ノレッシュ性状					
供試体の種類	空気量	スランプ	練上温度		
	%	cm	°C		
Control	1.9	3	35		
РР	1.5	/	31		
JUTE	1.8	/	/		
WSPVA	1.1	21	35		

表-4 強度特性

供試体の種類	圧縮強度	弾性係数	
供試体の性規	MPa	GPa	
Control	75.5	38.7	
РР	72.5	36.5	
JUTE	79.2	38.9	

とができると考えた。供試体内部の温度は、供試体中心 部に熱電対を配置することで確認した。表-3,4 にフレ ッシュ性状と強度特性(材齢75日)を示す。圧縮供試体は, Φ100×200mmの円柱供試体を用いた。養生方法は、通気 率供試体と同様とした。今回の供試体は、気温35℃以上 の夏場にコンクリートを打設したため、PP繊維とJUTE 繊維を混入したコンクリートは粘性が非常に大きくス ランプの計測ができなかった。しかし、バイブレータを 使用することで、打ち込みは可能であった。打ち込みが 十分に行われた証明として、図-7にPP繊維とJUTE繊維混 入供試体の切断面を示す。

### 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:30×15×25cmを用い た。図-8に加熱パターンを示す。図より、電気炉の設定 温度は200℃と500℃とした。昇温速度は電気炉の性能を 考慮した。設定温度200℃の昇温速度は100℃/hrとし、設 定温度500℃は125℃/hrとした。電気炉内が設定温度に達 した後、設定温度を4時間保持し、その後、自然冷却を 行った。各設定温度で加熱前後の質量を測定し、質量減 少率を測定した。





b) JUTE 供試体

a) PP 供試体





図-8 加熱パターン



図-9 通率試験装置の概要

# 2.5 通気率測定試験

通気率試験は、JIS R 2115「耐火物の通気率試験方法」<sup>11)</sup> 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の計測を試みた。式(1)に通気 率の算出方法を示す。

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

(1)

ここに,

- μ:物質の通気率(m<sup>2</sup>)
- V: 物質が通過した圧力piにおけるガス量(m<sup>3</sup>)
- 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・s)
- A: ガスが通過する物質の断面積(m<sup>2</sup>)
- 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<sub>1</sub>:物質へのガス侵入絶対圧(Pa)
- p<sub>2</sub>:::物質からのガス離脱絶対圧(Pa)

図-9に通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 (1)を用いて通気率を算出した。試験圧力は40,60,80kPaと し, ガスの通過時間は60sec.とした。

# 3. 実験結果および考察

### 3.1 供試体内部の温度履歴

図-10に,設定温度200℃における供試体内部の温度履 歴を示す。図より,各供試体中心部の最高温度は,154 ~173℃の範囲となった。供試体内部は設定温度200℃ま では達していないが,供試体内部の最高温度を実測温度 として,通気率の評価で使用した。

図-11より,設定温度500℃における供試体内部の温度 履歴を示す。図より,供試体中心部の最高温度は,354 ~358℃となった。供試体内部は設定温度500℃までは達 していないが,供試体内部の最高温度を実測温度として, 通気率の評価で使用した。今回,加熱試験を実施した Control供試体と繊維混入供試体はいずれの温度履歴に おいても爆裂を生じなかった。

#### 3.2 質量減少率

図-12に各設定温度における質量減少率を示す。図よ り、200℃設定における質量減少率は、Control、PP、 WSPVA, JUTEそれぞれで3.2, 3.3, 2.9, 2.5%であった。 マトリックスの加熱に伴い、自由水の蒸発が生じ、加え て水和生成物の脱水分解が生じていると考えられる。ま た, PP繊維混入供試体はPP繊維の溶融温度が173℃(図-5 参照)であるため、繊維の溶融による質量減少も生じてい ると考えられる。WSPVA繊維混入供試体は,使用した繊 維が50~90℃の環境下で水溶性を示す。そのため、繊維 の溶解と水分の蒸発により、質量減少が起きたと考えら れる。JUTE繊維混入供試体は、100℃付近で繊維自体の 脱水が考えられる(図-3参照)が、繊維自体の質量減少は 少なかったと考えられる。次に、500℃設定における質 量減少率は, Control, PP, WSPVA, JUTEそれぞれで5.3, 5.9, 5.7, 5.8%であった。200℃までの水和生成物の分解 に加えて、一部で水酸化カルシウムの脱水分解が生じた

# と考えられる。 3.3 各供試体の通気率

図-13~16にControlとPPおよびWSPVAとJUTE繊維を 混入した供試体の各温度における通気率試験結果を示 す。試験結果は、N=3個の供試体について計測値の最大 値と最小値および平均値を示した。また、供試体内部の 最高温度をもとに結果を整理した。図-13より、Control 供試体の平均値は、加熱無と173℃、358℃でそれぞれ 2.19×10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>、5.52×10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>、2.56×10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>となった。これ は、加熱に伴う微細なひび割れの影響によって通気率が 上昇したものと考えられる。図-14より、PP繊維混入供 試体の平均値は、加熱無と174℃、354℃でそれぞれ



#### 図-14 通気率(PP)



図-18 SEM 観察結果:加熱前後の比較

4.18×10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>, 1.41×10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>, 5.35×10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>となった。図-15 より, WSPVA繊維混入供試体の平均値は, 加熱無と154℃, 357℃でそれぞれ4.84×10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>, 5.60×10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>, 2.08×10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup> となった。図-16より、JUTE繊維混入供試体の平均値は、 加熱無と169℃, 354℃でそれぞれ1.14×10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>, 3.44×10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>, 4.03×10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>となった。図-17に, 全種類の 供試体について通気率の平均値を比較したものを示す。 図より, Control供試体は加熱前の通気率が他の種類に比 べて小さく、他種類と比べて密度が大きいと考えられる。 PP繊維混入供試体はControl供試体に比べて通気率が大 きく,加熱に伴い、繊維の溶融によって通気率が上昇し たものと考えられる。WSPVA繊維混入供試体について, 加熱前は通気率がPP繊維混入供試体と同等である。加熱 に伴い通気率は上昇しているが、PP繊維と比較して上昇 割合は小さい。これは、繊維長が4mmと短いため、通気 率の絶対値はPP繊維混入供試体よりも小さくなったと 考えられる。JUTE繊維混入供試体は、ストロー構造を有 しているため,他の種類に比べて加熱前から通気率が高 い傾向にあると考えられる。加熱に伴い、通気率は上昇 するが,もともと通気率が大きいため,他の種類と比べ

加熱前後の繊維の状況を確認するために,供試体の SEM観察を行った。図-18に加熱無と500℃加熱を行った 供試体のSEM観察の写真を示す。図-18a, bより, PP繊 維混入供試体とWSPVA繊維混入供試体は,加熱前に繊維 が確認されたが,加熱後は繊維消失の跡が確認された。 次に,図-18c-1,2より,JUTE繊維混入供試体は,加熱前 と加熱後でも供試体内部で繊維の存在が確認された。

# 3.5 混入した繊維の爆裂抑制効果

今回使用したPP繊維とWSPVA繊維およびJUTE繊維は, それぞれの混入率と形状において既報より、爆裂抑制効 果が確認されている5~7)。これを踏まえて、以下の議論を 行う。図-19に、加熱無の通気率で加熱後の通気率を無 次元化したものを示す。図より、PP繊維混入供試体の通 気率上昇割合は、供試体内部の温度が174℃および350℃ で3.4倍と12.8倍となった。WSPVA繊維混入供試体は、供 試体内部の温度が154℃および357℃で1.2倍と4.3倍とな った。JUTE繊維混入供試体は、供試体内部の温度が168℃ および353℃で3倍と3.5倍となった。PP繊維混入供試体は、 繊維が溶融する170℃以上で、通気率の上昇割合が他の2 種類と比較して大きいことがわかる。これは、PP繊維(混 入率0.15%vol, 繊維長12mm, 繊維径120µm)のマトリッ クス内部に含まれる体積が他の2種類と比べて、大きい ことによるものと考えられる。一方, WSPVA繊維混入供 試体は加熱に伴う通気率の上昇割合がPP繊維に比べて 小さい。これは、今回使用した繊維は混入率が0.15%vol

でPP繊維と同程度ではあるが,繊維長(4mm)と繊維径(12µm)が,PP繊維に比べて小さいことによるものと考えられる。JUTE繊維混入供試体は,PP繊維混入供試体と比較して,通気率の上昇割合が低い。これは,JUTE繊維がストロー構造(図-2)を有し,加熱前から通気率が高いこと,加熱が進行しても繊維が焼失せずに残存し(図-18 c),一定の空隙を保持していることが要因と考えられる。以上より,WSPVA繊維とJUTE繊維は,PP繊維よりも通気率の上昇割合が小さい。しかし,WSPVA繊維とJUTE繊維それぞれを混入することにより,形成される蒸気圧逸散ネットワークの特性がPP繊維を混入した場合と異なるため,加熱に伴う通気率の上昇割合が小さくても爆裂を抑制できたと考えられる。それぞれの蒸気圧逸散ネットワークの特性については、今後さらに検討が必要であると考える。

## 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 全種類で加熱に伴い、通気率の上昇が確認できた。
- (2) 加熱前の通気率で加熱後の通気率を無次元化して、 相対比較した。その結果、PP繊維供試体は、供試体 内部の温度が170℃および350℃で3.4倍と12.8倍と なった。WSPVA繊維供試体は、供試体内部の温度が 154℃および357℃で1.2倍と4.3倍となった。JUTE繊 維供試体は、供試体内部の温度が168℃および353℃ で3倍と3.5倍となった。
- (3) SEM観察より, PP繊維混入供試体とWSPVA繊維混入供試体は加熱後に繊維消失の跡が確認された。一方, JUTE繊維混入供試体は,加熱前後でも繊維の存在が確認できた。
- (4) JUTE繊維混入供試体は、PP繊維混入供試体と比較して、通気率の上昇割合が低い。これは、JUTE繊維がストロー構造を有し、加熱前から通気率が高いこと、加熱が進行しても繊維が焼失せずに残存し、一定の空隙を保持していることが要因と考えられる。
- (5) WSPVA繊維とJUTE繊維は、PP繊維よりも通気率の 上昇割合が小さい。しかし、WSPVA繊維とJUTE繊 維それぞれを混入することにより、形成される蒸気 圧逸散ネットワークの特性がPP繊維を混入した場 合と異なるため、加熱に伴う通気率の上昇割合が小 さくても爆裂を抑制できたと考えられる。それぞれ の蒸気圧逸散ネットワークの特性については、今後 さらに検討が必要であると考える。

謝辞: 本研究は,平成22年度科学研究費補助金「基盤 研究(C), No.22560461,ハイブリッド耐火コンクリート の開発とその性能評価,(代表:小澤満津雄)」の補助を 受けて実施した。ここに謝意を表する。併せて,(株)テ ザック 山本基由氏よりPP繊維とJUTE繊維の提供を受け た。また,(株)クラレ 小川敦久氏よりWSPVA 繊維の提 供を受けた。通気率計測とSEM観察について(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 謝意を表する。

参考文献

- 土木学会:コンクリート構造物の耐火性技術研究小 委員会報告ならびにシンポジウム論文集,コンクリ ート技術シリーズNo.63,2004
- Khoury,G.A.,Willough.B.: Polypropylene fibres in heatedconcrete. Part 1: Molecular-structure and materials behaviour, Magazine of Concrete Research, pp.125-136, 60, (2), 2008.
- Kalifa,P., Galle,C.G: High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure, Cement and Concrete Research, pp.1487-1499,31,2001
- 4) 森田 武:コンクリートの爆裂とその防止対策,コ ンクリート工学, Vol.45, No.9, pp.87-91, 2007.9
- 5) 木村 和広ほか:繊維補強コンクリートの爆裂性状 と 内部蒸気圧との関係,コンクリート工学年次論文 集, Vol.30, No.1, pp.339-344, CD-ROM, 2008
- 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) 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
- Suhaendi,S.L. and Horiguchi,T: Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition, Cement and Concrete Research, pp.1672-1678, 36, 2007
- 9) Zeiml,M.et al.: How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, Cement and Concrete Research, pp.929-942, 36,2006
- Kobayashi,T. and Nakashima,M.: Optimization of the PVA Fiber for Explosion Control of Refractory Castables,No.127 Proceeding of UNITECR,CD-ROM , 2009
- 11) 日本工業規格: JIS R 2115 耐火物の通気率試験方法, pp.145-155, 2008