

論文 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

小澤 満津雄^{*1}・水野 宏紀^{*2}・森本 博昭^{*3}

要旨：高温加熱を受ける場合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、ポリプロピレン(PP)繊維を混入する方法が有効であるとされている。本研究グループでは、PP繊維以外の繊維に着目し、低添加で爆裂抑制に有効な繊維の開発を目指している。そこで本論文では、爆裂抑制対策として水溶性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の加熱実験を行い、内部蒸気圧の発現性状に及ぼす影響を検討した。その結果、ジュート繊維とPVA繊維ともに爆裂抑制効果があることが明らかとなった。

キーワード：爆裂, 高強度コンクリート, 流動性, PVA 繊維, ジュート繊維

1. はじめに

火災時における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る際、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と、構造体として崩壊の危険性がある。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¹⁾。既往の研究では、耐火塗料の塗布、鋼板被覆、有機繊維の混入、特にポリプロピレン繊維(以下、PP繊維)を用いることにより爆裂抑制効果があるとされている^{1)~7)}。著者らも、コンクリートの高温加熱による爆裂抑制対策を検討している⁸⁾⁹⁾。本研究グループでは、PP繊維以外の繊維に着目し、低添加で爆裂抑制に有効な繊維の開発を目指している。本論文では、水溶性 PVA 繊維¹⁰⁾と天然繊維であるジュート繊維の爆裂抑制効果に注目した。繊維を混入することによるフレッシュ性状の変化と加熱実験時の内部蒸気圧の発現性状や爆裂性状に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用配合

表-1,2 に本研究で使用し示方配合と使用材料一覧表を示す。供試体は高強度コンクリートを対象とした。供試体は3種類とし、繊維無1種類と繊維有の2種類とした。繊維混入無を Control 供試体と定義する。使用した繊維はジュート繊維(天然繊維, 以下 Jute), 水溶性 PVA 繊維(以下, PVA)とした。繊維の設定混入率は Jute が 0.075%で

表-1 示方配合

単位量 : kg/m ³						
W/C	W	C	S	G1	G2	AD
0.3	170	567	763	548	365	6.237

表-2 使用材料

使用材料	記号	種類	密度	吸水率
			(g/cm ³)	(%)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15	
細骨材	S	硬質砂岩	2.66	1.05
粗骨材 1	G1	硬質砂岩(碎石 15-20mm)	2.67	0.54
粗骨材 2	G2	硬質砂岩(碎石 5-15mm)	2.67	0.54
混和剤	AD	高性能減水剤 (C×1.1wt%)	1.05	
水	W	上水道水	1.00	

表-3 フレッシュ性状

	スランプフロー	空気量	練り上り温度
	cm	%	℃
Control	76	1.3	15.2
Jute	64	1.6	17.1
PVA	51	1.9	16.8

表-4 圧縮強度と弾性係数試験結果

	圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
Control	66.8	32.9
Jute	73.7	32.6
PVA	76.8	31.5

*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)

あり、PVA は 0.15%とした。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/cm³)を使用した。粗骨材の最大寸法は 20mm とした。混和剤は高性能減水剤(末端スルホン基を有するポリカルボン酸基含有多元ポリマー)を使用した。供試体は、型枠に打設し 1 日経過後、脱型し、温度 20℃一定の養生室内で 14 日間の湿布養生を行った。表-3, 4 にフレッシュ性状と圧縮強度と弾性係数を示す。Control は材齢 14 日の結果であり、その他は材齢 28 日の結果である。

2.2 使用した繊維の特性

表-5 に使用した繊維の種類と特性を示す。写真-1,2 に Jute と PVA の外観と SEM 写真を示す。ここで、本研究で使用した繊維の目的を示す。Jute 繊維は天然繊維であり、SEM 写真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の逸散ネットワークを形成することで蒸気圧の低減効果を期待した。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⁹⁾。次に、水溶性 PVA 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¹⁰⁾。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¹⁰⁾¹¹⁾。図-1 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-2 に PVA 繊維の示差熱分析(以下、DTA)と TGA の結果を示す。図より、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。

2.3 供試体の形状寸法および実験装置

図-3 に供試体の形状寸法を示す。図より、寸法は 400×400×100mm とした。供試体数はそれぞれ 2 体とした。供試体内部の加熱面から 10mm および 20mm の位置に蒸気圧計測用鋼管を、それぞれ 2 本、合計 4 本(外径 5mm, 内径 2mm, 長さ 200mm)を配置した。鋼管は管内部の温度を均一に上昇させるために加熱面に対して平行に埋設した。また、鋼管内には、コンクリートの蒸気圧計測精度向上を期待して圧力媒体として油圧ジャッキ用油を充填した。蒸気圧は鋼管他端に取り付けた圧力計(K 社製：計測許容値：10MPa)により計測した。供試体内部の温度は K 熱電対により計測した。温度計測位置は加熱面(下面)から 10,20,30,40,50mm とした。図-4 に加熱試験装置を示す。図より、供試体の加熱には電気炉を用いた。電気炉は容量電圧 200V, 最大電流 28A の鉄クロム線を 9 本用いた装置である。加熱面は底面 350×350mm の範囲

表-5 使用した繊維の種類と特性

繊維の種類	繊維長	繊維径	融点	密度	その他
	mm	μm	℃	g/cm ³	
Jute	12	10-30	-	1.3-1.45	炭化
PVA	4	12	220-240	1.30	水溶性



写真-1 Jute 繊維(外観)および SEM 写真

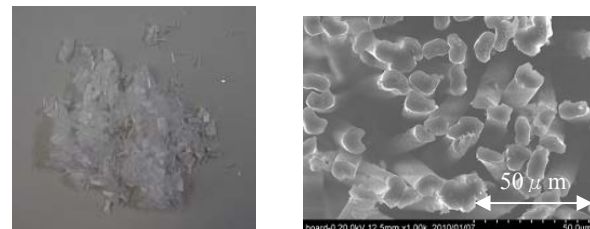


写真-2 PVA 繊維(外観)および SEM 写真

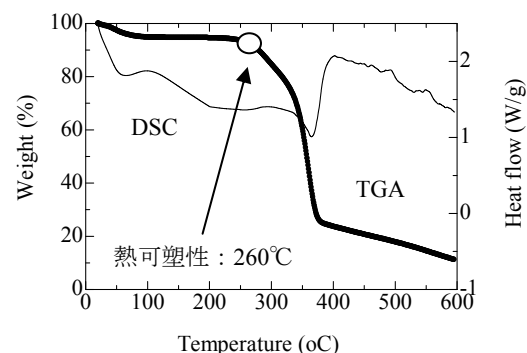


図-1 熱分析結果(Jute 繊維)

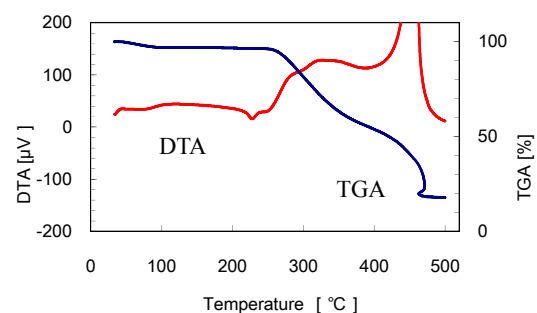


図-2 熱分析結果(水溶性 PVA 繊維)

とした。図-5 に加熱曲線の実測値(炉内)の一例を示す。加熱条件は、RABT 曲線を参考にした¹⁾。電気炉の性能を勘案し、加熱開始から 10min. で 1200℃まで上昇させ、

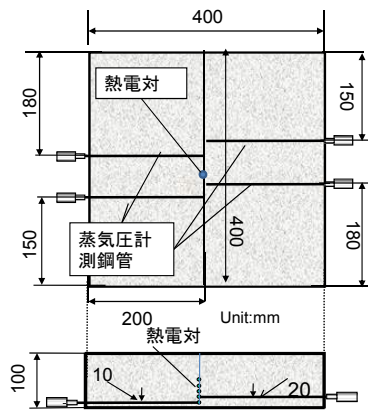


図-3 供試体形状・寸法

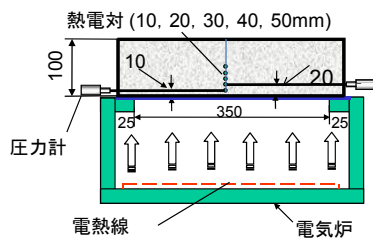


図-4 加熱試験装置

その後 1200℃を 10min.保持した。その後、ヒーター電源を遮断して除熱するものとした。ただし、加熱段階で爆裂により鋼管内の蒸気圧が抜けるか、大きな爆裂が発生し試験継続が危険と判断された時点で加熱を中断して除熱を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および繊維混入率

図-6 に各繊維を混入した際のスランプフローを示す。まず、Control 供試体は平均のスランプフローが 76cm であった。一方、Jute と PVA を用いた場合のスランプフローはそれぞれ 64cm と 51cm であり、Control 供試体に比べて流動性の低下は見られたが、打設に支障が生じることはなかった。次に、図-7 に各繊維の混入率を示す。コンクリートに混入した繊維の混入率を確認するために、練り混ぜたフレッシュコンクリートから約 500g の試料を 3 回採取し、水洗い処理後、繊維を取り出した。繊維のコンクリート試料に対する重量から体積比率を計算し、混入率を確認した⁸⁾。図より、Jute および PVA は平均混入率が 0.093% と 0.141% という結果が得られた。PVA 繊維は 50～90℃で水溶性を示す特性を有しているが、コンクリートの練り混ぜ直後に実施した繊維の洗い出し作業では、繊維を確認することができた。繊維混入率の平均値が概ね所定の混入率となったことより、繊維がコンクリート全体に混入していることが確認された。

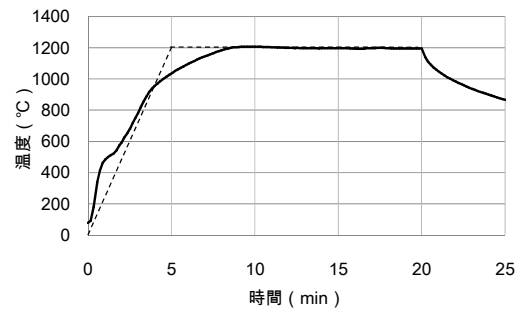


図-5 加熱曲線の実測値(炉内：PVA 供試体)

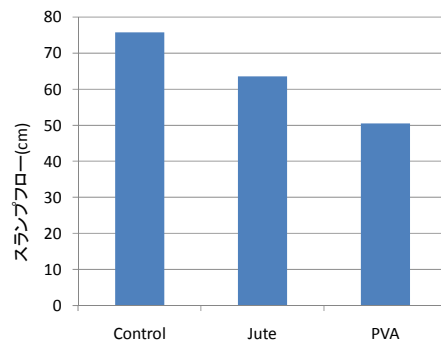


図-6 スランプフロー試験結果

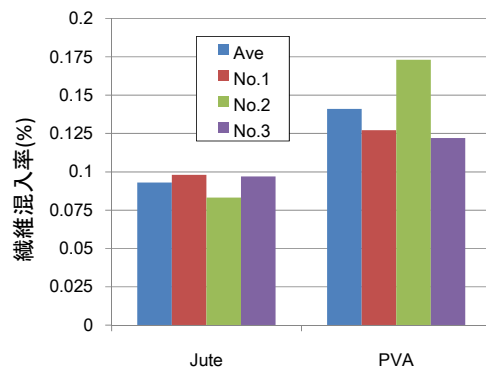


図-7 繊維の混入率

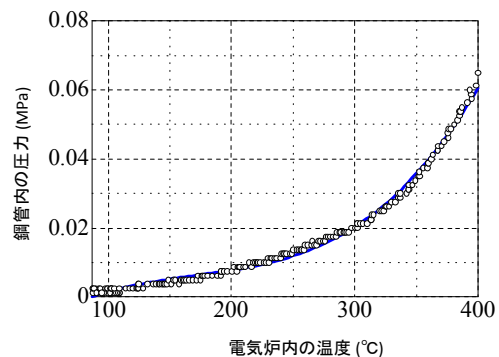


図-8 蒸気圧の校正曲線

3.2 蒸気圧計測の校正曲線

鋼管内の油圧ジャッキ用油が温度上昇によって膨張するため、計測値への影響があると考えられる。そこで、油圧ジャッキ用油の膨張圧の影響を検討するために、油

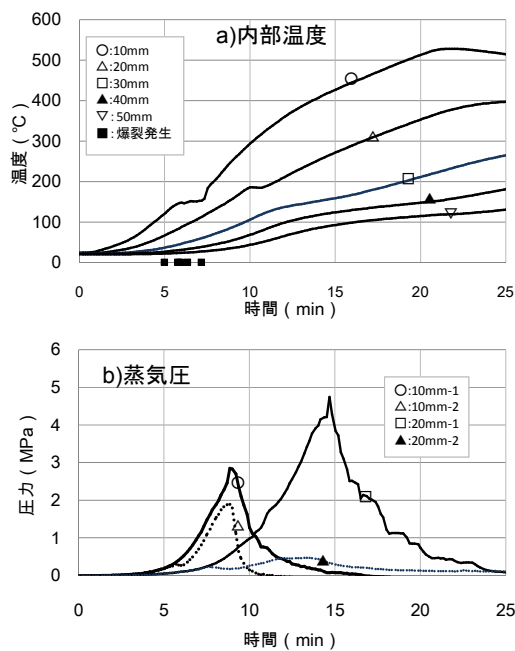


図-9 内部温度と蒸気圧 (Control)

圧ジャッキ用油を充填した鋼管の直接加熱試験を行った。図-8 に圧力媒体の膨張圧と炉内温度との関係を示す。図より、使用した油圧ジャッキ用油は、炉内温度が 100℃ から膨張し始め、曲線的に上昇し、炉内温度 400℃ で 0.06MPa を示した。この実測値をもとに、校正曲線を作成し、実験で計測した蒸気圧の補正を行った。校正曲線を式(1)に示す。

$$y = -1.954 \times 10^{-2} + 3.57 \times 10^{-4} \cdot x - 1.813 \times 10^{-6} \cdot x^2 + 3.55 \times 10^{-9} \cdot x^3 \quad (1)$$

ここに、 y : 蒸気圧の補正分(MPa),

x : 供試体の温度(℃)($0 \leq x \leq 400$)

3.3 内部温度および蒸気圧の計測結果

各シリーズ 2 体の加熱試験を実施した。各計測位置における内部温度の計測値が 2 体ともほぼ同様な傾向を示した。ここでは、各シリーズそれぞれ 1 体の結果を示す。

図-9 に Control 供試体の a)内部温度と b)蒸気圧の経時変化を示す。図-9a)より、内部温度は、加熱面から 10mm の位置において加熱後 5 分で 130℃に達し、1 回目の爆裂が生じた。その後、加熱を継続とともに、7 分までに数回爆裂が生じ、温度が若干停滞した。加熱開始後約 7 分以降は、爆裂は生じず、内部の温度は上昇した。加熱終了時(20 分)において深さ 10mm の温度は 500℃に達した。断面内の 20,30,40,50mm の温度も加熱に伴い、上昇していることがわかる。

図-9b)より、加熱面から 10mm の位置の蒸気圧は、温

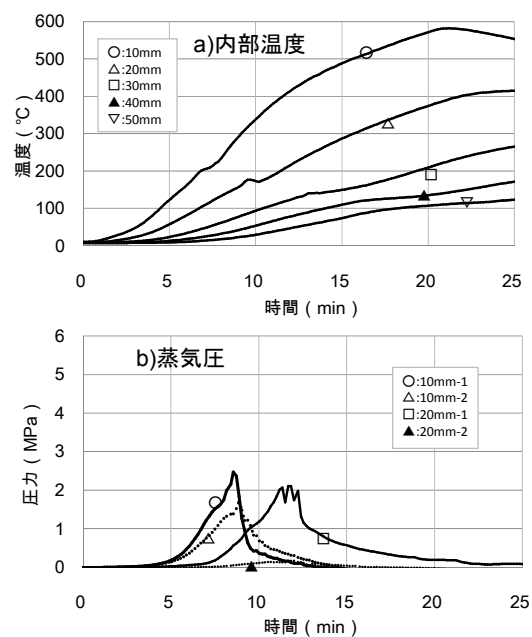


図-10 内部温度と蒸気圧 (Jute)

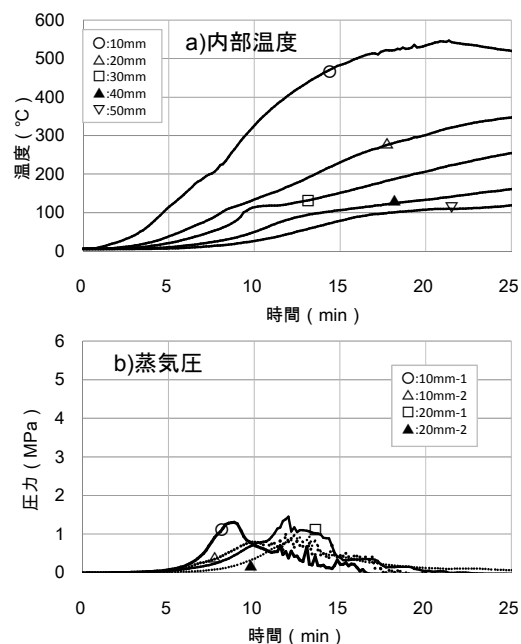


図-11 内部温度と蒸気圧 (PVA)

度が 100℃に達する 5 分程度から上昇し始めることが分かる。温度の上昇とともに蒸気圧も上昇し、252℃で 2.83MPa に達した。その後、低下した。次に、加熱面から 20mm の位置の蒸気圧は 20mm の位置が 100℃に達する 7 分頃から上昇しはじめ、268℃の時点で約 4.7MPa に達した。その後、蒸気圧は低下した。爆裂が生じる直前までは深さ 10mm よりも浅い領域で、熱応力と蒸気圧の複合応力がコンクリートの引張強度とバランスして構造体として保持されていると考える。深さ 10mm の位置で内部温度が 100℃を超えると蒸気圧の急激な上昇によ



a) Control



b) Jute

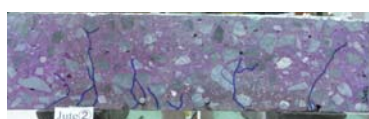


c) PVA

写真-3 加熱面の状況



a) Control



b) Jute



c) PVA

写真-4 供試体断面内の状況

表-6 加熱試験のまとめ

供試体の種類		Control	Jute	PVA
a.爆裂の有無		有	無	無
b.加熱面の性状		剥離	亀甲状	亀甲状
c.蒸気圧(爆裂開始時)	MPa	0.19	/	/
d.温度(爆裂開始時)	℃	122	/	/
e.蒸気圧(最大値)	MPa	4.7	2.4	1.45
f.剥離深さ	mm	7	/	/

り、内部に発生する応力のバランスが崩れ、爆裂が生じたと考える。7分以降は、熱応力によるマイクロクラックの進展により、蒸気の逸散ネットワークが生じることで、それ以上の爆裂は生じなかったものと考えられる。供試体の側面には、熱応力に伴うひび割れが生じ、そのひび割れから蒸気の噴出が確認された。

図-10にJute供試体のa)内部温度とb)蒸気圧の経時変化を示す。図-10a)より、内部温度は、加熱面から10mmの位置において加熱後5分で125℃に達し、加熱終了時(20分)において深さ10mmの温度は571℃に達した。断面内の20,30,40,50mmの温度も加熱に伴い、上昇していることがわかる。次に、図-10b)より、加熱面から10mmの位置の蒸気圧は、温度が100℃に達する5分程度から上昇し始めることが分かる。その後、温度の上昇とともに蒸気圧も上昇し、268℃で2.4MPaに達した。一方、加熱面から20mmの位置の蒸気圧は深さ20mmの位置が100℃に達する6.7分頃から上昇しはじめ、197℃の時点で約2.0MPaに達した。その後、若干増減した後、蒸気圧は低下した。加熱面から10mmと20mmの位置ともに内部温度が100℃を超えると蒸気圧が急激に上昇するこ

とが分かる。Jute供試体は蒸気圧の上昇はみられるが、爆裂は生じなかった。

図-11にPVA供試体のa)内部温度とb)蒸気圧の経時変化を示す。図-11a)より、内部温度は、加熱面から10mmの位置において加熱後5分で116℃に達し、加熱終了時(20分)において深さ10mmの温度は533℃に達した。断面内の20,30,40,50mmの温度も加熱に伴い、上昇していることがわかる。次に、図-11b)より、加熱面から10mmの位置の蒸気圧は、温度が100℃に達する5分程度から上昇し始めることが分かる。その後、温度の上昇とともに蒸気圧も上昇し、255℃で1.3MPaに達した。一方、加熱面から20mmの位置の蒸気圧は39℃に達する5分頃から上昇しはじめ、168℃の時点で約1.45MPaに達した。その後、若干の増減した後、蒸気圧は低下している。PVA供試体も蒸気圧は上昇するが、爆裂は生じなかった。

3.4 各供試体の加熱面のひび割れ状況

写真-3にa)Controlとb)Juteおよびc)PVA供試体の加熱試験後の加熱面の状況を示す。図より、Control供試体は、加熱面に爆裂が生じている、爆裂深さは、7mm程度である。一方、JuteとPVA供試体は、爆裂を生じておらず、加熱面は亀甲状のひび割れが確認された。次に、写真-4にa)Controlとb)Juteおよびc)PVA供試体を切断し、内部のひび割れ状況を確認した。フェノールフタレイン1%溶液を噴霧した状況と併せて示す。図より、繊維混入の有無に関係なく、すべての供試体において、加熱面から上面方向に向かって熱応力に起因すると推測されるひび割れが確認された。また、供試体断面は全面で赤く発色していることが確認された。

3.5 繊維混入による爆裂抑制効果

表-6に爆裂試験状況のまとめを示す。表より、a.爆裂

の有無, b.加熱面の性状, c.爆裂開始時の蒸気圧, d.爆裂発生時の内部温度, e.蒸気圧の最大値, f.剥離深さをまとめた。表より, Jute と PVA 供試体は爆裂を抑制することができた。繊維の混入量は, Jute 供試体が 0.075%(1.08 kg/m³)であり, PVA 供試体 0.15vol% (1.95kg/m³)である。既報²⁾より, 蒸気圧低減に有効である PP 繊維は, 繊維径 50 μm で繊維長が 10~20mm の範囲で使用され, 設計基準強度が 80~150MPa の高強度コンクリートでは, 0.05~0.3vol%(0.45~2.73kg/m³)が実用化されているが, 混入量はその範囲内となっている。Jute 繊維は繊維がストロー(中空)構造(写真-1)となっており, 蒸気圧の逸散ネットワークとして有効に機能したと考えられる。また, DSC-TGA の結果より, 100℃前後で質量の減少が生じることで, モルタルマトリックスと繊維の付着が切れることが予想され, その隙間も蒸気の逸散ネットワークの形成に寄与しているものと考えられる。

今回使用した PVA 繊維は, 水溶性であることから水分の存在する環境において 100℃前後で溶解することで, 蒸気の逸散ネットワークが形成され, 爆裂抑制の効果があつたと考えられる。

以上のことから, 天然繊維の Jute 繊維と有機繊維である PVA 繊維が爆裂抑制に有効であることがわかった。今後, 加熱に伴い繊維が消失することによる内部空隙の形成状況を検討し, 定量的な評価が必要であると考ええる。

4. まとめ

本研究では高温環境下におけるコンクリートの爆裂抑制対策として Jute 繊維と PVA 繊維を混入した場合の効果について検討した。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で使用した Jute 繊維と PVA 繊維を混入した場合の流動性は, Control(繊維無混入)と比較して, 低下する傾向を示したが, 打設に支障が生じることはなかった。
- (2) 長さ 12mm の Jute 繊維を 0.075vol%(1.08kg/m³)混入した供試体は爆裂を抑制することができた。
- (3) 長さ 4mm の PVA 繊維を 0.15vol%(1.95kg/m³)混入した供試体は爆裂を抑制することができた。
- (4) Jute 繊維と PVA 繊維ともに, 蒸気圧の低減効果が確認された。

今後更に, Jute 繊維と PVA 繊維の爆裂抑制のための最適な混入条件などについて検討を進める予定である。

謝辞: 供試体作成にあたり, (株)昭和コンクリート工業 宮澤聡氏の多大なご協力を頂いた。加熱試験に際し, (株)日本インシュレーション 大森宗氏に多大なご協力を

頂いた。ここに謝意を表する。併せて, (株)テザックの山本基由氏よりジュート繊維の提供を受けた。また, (株)クラレ 小林利章氏, 小川敦久氏より PVA 繊維の提供を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Long.T.P.: High-Strength Concrete at High Temperature: An Overview, Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 6th International Symposium Proc. Volume 1. June 2002, Leipzig, Germany, Konig, G. Dehn, F. Faust, T., Edit. pp.501-518, 2002
- 4) Khoury,G.A.,Willough.B.:Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecularstructure and materials behaviour, Magazine of Concrete Research, pp.125-136, 60, (2), 2008.
- 5) Khoury,G.A.:Polypropylene fibres in heated concrete Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria, Magazine of Concrete Research,pp.189-204, 60(3),2008
- 6) Kalifa,P. Chene,G.Galle,C: High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure, Cement and Concrete Research, pp.1487-1499,31,2001
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) Kobayashi,T.,Nakashima,M.: Optimization of the PVA Fiber for Explosion Control of Refractory Castables,No.127 Proceeding of UNITECR,CD-ROM, 2009
- 11) 山本誠二ほか: タンディッシュ内張用キャストブルについて, 耐火物, pp.44-50, No.8, 1985