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

小澤 満津雄¹・森本 博昭²

¹正会員 群馬大学准教授 理工学研究院環境創生部門 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

E-mail: ozawa@gunma-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学名誉教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: morimt@gifu-u.ac.jp

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が、その他の繊維の有効性に関する検討については必ずしも、十分でないのが現状である。そこで本研究では、爆裂抑制対策として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、蒸気圧の発現性状に及ぼす影響を検討した。その結果、ジュート繊維に爆裂抑制効果があることが明らかとなった。

Key Words : jute fiber, straw structure, fire, explosive spalling, heating test

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と、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(図-1)。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⁾。既往の爆裂対策として、耐火被覆材の適用、耐火塗料の塗布、鋼板被覆、合成繊維の混入が報告されている²⁾。一方、資源の有効利用の観点から、再生可能な天然繊維の建設資材への活用の検討がなされている³⁾。

図-1 コンクリートの爆裂現象

著者らは、天然のジュート繊維を建設資材に活用する方法として、高強度コンクリートの爆裂抑制対策⁴⁾⁶⁾と自己収縮低減効果について検討してきた。本論文では、蒸気圧説に着目し、ジュート繊維を高強度コンクリートに混入した場合の高温加熱時における爆裂抑制効果を検討した。すなわち、加熱実験時の内部蒸気圧低減効果と爆裂性状に及ぼすジュート繊維の影響を検討した。また、従来使用されているポリプロピレン(以下、PP)繊維を混入した場合との比較を行った。

2. コンクリートの爆裂抑制方法に関する既往の研究

(1) コンクリートの爆裂現象

コンクリートの爆裂現象は熱応力説⁷⁾と蒸気圧説⁸⁾によって生じるとされている。図-2 に爆裂メカニズムの模式図を示す⁹⁾。図-2a)に熱応力説の模式図を示す。コンクリートは温度を伝え難い材料であるため、加熱表層部は高温となるが、コンクリート内部の温度上昇は緩やかとなる。その結果、表層部と内部で大きな温度勾配が生じる。コンクリートは温度勾配に応じて熱変形を生じるが、表層部の熱変形が大きいことから、表層部に圧縮応力が生じる。この圧縮応力が、コンクリートの圧縮強度を超えると爆裂が生じるというものである。

次に、図-2b)に蒸気圧説の模式図を示す。コンクリー

トは水とセメントおよび骨材が構成材料である。セメントと水の水和反応によって硬化していくが、全ての水が水和により消費されるのではなく、自由水としてコンクリート内部に存在する。コンクリート表面が加熱されると、コンクリート中の自由水が蒸発して乾燥が生じる。表層部は自由水の蒸発により乾燥領域を形成するが、一部は深さ方向に移動し、低温域で凝集して水分に戻る。加熱の継続とともに、コンクリート内部の深さ方向に蒸気領域と湿気領域および湿潤領域が形成される。蒸気領域では、気化した水分の蒸気圧が膨張圧として、コンクリートに作用し、加熱表面に押し出す力として作用する。この時に生じる引張応力がコンクリートの引張強度を超えると爆裂が生じるというものである。

BaileyとKhouri¹⁰⁾は爆裂を6つに分類している。すなわち、a) Aggregate spalling, b) Corner spalling, c) Surface spalling, d) Explosive spalling, e) Sloughing-off spalling, f) Post-cooling spallingである。それぞれを明確に区別することは難しいが、a)~c)は火災の初期に生じ、d)~f)は火災後しばらくしてから生じるとしている。併せて、爆裂への影響因子は多岐にわたることが示されている。コンクリートの爆裂の影響要因については、日本建築学会でも「構造物の耐火性ガイドブック」において詳細なデータが示されている¹¹⁾。

以下に概要を示す。

- ・爆裂は耐火試験の初期に生じやすい。
- ・爆裂は、加熱速度が速いほど発生しやすい。
- ・コンクリートの含水率が高いほど、爆裂が生じやすい。
- ・骨材の岩種やコンクリートの配合・調合が爆裂に影響する。
- ・コンクリートの形状や大きさも重要な要因となる。
- ・外部から与えられる荷重による応力が増加すると、爆裂が発生する可能性が高くなる。
- ・プレストレストコンクリート部材においては、導入プレストレスが大きいほど爆裂を生じやすく、I型梁の薄いウェブも爆裂を生じやすい。
- ・構造物の隅角部における鉄筋の集中は爆裂の危険性を増加させる。

(2) 蒸気圧の計測方法

蒸気圧説を議論する上で、高温環境下におけるコンクリート内部で生じる蒸気圧を計測することは非常に重要である。これまでに、コンクリート内部の蒸気圧の計測について種々の報告がある。RILEM Technical Committee 227 HPB¹²⁾では高強度コンクリートの蒸気圧計測方法について議論した内容を以下のように記述している。図-3に、蒸気圧の計測方法を示す。Type Aは、コンクリート中に圧力計測用パイプを設置する方法である¹³⁾¹⁴⁾。Type BはType Aにパイプの体積を減少させる目的でロッドを

a) 熱応力説

b) 蒸気圧説

図-2 爆裂メカニズム

Type A: 圧力計測用パイプを埋め込む(Jansson).
Type B: Type A + 体積減少ロッドの挿入 + 先端部に空隙形成 (Schneider)
Type C: Type B + 先端部に多硬質金属を設置 (Kalifa, Phan)
Type D: 圧力センサの設置 (Consolezio)
Type E: Type A を加熱面の平行に設置する (Ozawa)

図-3 蒸気圧の計測方法

図-4 爆裂抑制方法 (合成繊維)

挿入し先端部に空隙を形成した方法である¹²⁾。Type CはType Bの方法に加えて先端部に多孔質金属を設置し、蒸気圧の計測面積を拡大した方法であり、Kalifa¹⁵⁾やPhan¹⁶⁾などが提案した方法である。Type Dは圧力センサをコンクリート中に設置する方法である¹⁷⁾。Type Eは加熱面に平行に圧力計測用パイプを設置する方法である¹⁸⁾。Type A~Cは、パイプを加熱面に垂直に設置する方法である。この方法では、加熱時に断面深さ方向に温度勾配が生じるため、圧力計への圧力の伝達が難しいことが問題点として挙げられる。さらに、パイプ内の媒体(オイル)の温度補正が困難であると考えられる。一方、Type Eは、加熱面に対して水平にパイプを設置する方法である。この方法では、加熱時、断面内に温度勾配が生じてパイプは等温領域にあるため、パイプ内の媒体(オイル)も等温状態となる。パイプ内部の媒体の温度補正は必要であるが、Type A~Cに比べて補正が容易であり、より正確な計測が可能となる。予備試験により¹⁹⁾、Type Aを用いて蒸気圧の計測を試みた。パイプ内の媒体は空気とした。その結果、圧力の計測値は非常に小さいものとなった。一方、Type Eを用い、パイプ内にオイルを充填した場合、計測値の精度は向上した²⁰⁾。計測手法による誤差は考えられるが、前述したこれまでの研究により以下のような成果が報告されている。

すなわち、

- ・普通強度コンクリートよりも、高強度コンクリートの方が蒸気圧の最大値は大きい。
- ・含水率が高いものほど、蒸気圧が大きくなる。

- ・温度上昇速度が速い場合よりも、遅い場合の方が蒸気圧が大きくなる傾向にある。
- ・PP 繊維を混入することにより、爆裂抑制に効果がある。その効果は、コンクリートの蒸気圧を低減することによるものである。

(3) コンクリートの爆裂抑制方法

コンクリートの爆裂抑制方法は、主に、合成繊維のPP 繊維を混入する方法について数多くの報告がなされている¹⁶⁾²¹⁾²⁸⁾。図-4 に合成繊維を混入した際の爆裂抑制メカニズムを示す。図より、合成繊維は通常時にコンクリートに分散した状態で存在する。火災時に、表層部が加熱されると、表層部にひび割れが生じる。火災の継続によって、内部まで温度が上昇する。コンクリート中には、図-2b)のように、自由水が存在するため、温度の上昇とともに蒸気となって、蒸気溜まりを形成する。この蒸気溜まりの蒸気圧により、引張応力が発生する。この引張応力がコンクリートの引張強度を超えると爆裂が生じると考えられている。一方、コンクリート中の合成繊維が溶融することによって、蒸気圧逸散ネットワークが形成される。このネットワークによって、蒸気が外部に逸散することで、爆裂を抑制できると考えられる。

各報告をまとめるとPP繊維を 2kg/m^3 程度混入することで爆裂抑制効果があるとしている。コンクリートの内部温度が 170°C 付近でPP繊維が溶融し、蒸気圧逸散ネットワークを形成する。一方で、繊維混入率が高い場合や繊維長が長くなると、フレッシュコンクリートの流動性が

表-1 供試体の種類および示方配合(A シリーズ)

シリーズ	種類	W/C	kg/m ³						繊維の種類	繊維混入率 (vol%)
			W	C1	S1	G11	G12	AD1		
A	A-Control-1	0.3	132	440	814	524	524	13.2	-	-
	A-PP-1								PP	0.15
	A-PP-2								PP	0.075
	A-J-1								Jute	0.15

材料名	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	比表面積 (cm ² /g)
セメント	早強ポルトランドセメント(C1)	3.13	-	4550
細骨材	砕砂 $\leq 5\text{mm}$ (長良川産)(S1)	2.62	1.64	-
粗骨材	碎石 $1\leq 15\text{mm}$ (長良川産)(G11)	2.61	1.42	-
	碎石 $2\leq 25\text{mm}$ (長良川産)(G12)	2.61	1.42	-
混和剤	高性能 AE 減水剤(AD1)	1.05	-	-
水	上水道水(W)	1.00	-	-

低下することも指摘されている²⁾。また、繊維の混入率が少ない場合や繊維の長さ(例: 3mm)によっては爆裂を抑制できない場合がある²⁹⁾。

PP繊維以外の合成繊維でも爆裂を抑制できるという報告がある。すなわち、ビニロン(PVA)繊維²⁸⁾、水溶性PVA(以下、WSPVA)繊維²⁹⁾、PP繊維とナイロン(NY)繊維を組み合わせたもの²⁹⁾について報告がある。鋼繊維とPP繊維を組み合わせたハイブリッド型高強度コンクリートの爆裂抑制効果に関する報告がある^{21),30)-32)}。一方で、合成繊維の種類によっては、爆裂を助長するという報告もある^{28),29)}。

以上のように、コンクリートの火災時の爆裂抑制方法

として合成繊維がよく用いられているが、天然繊維を用いた方法については報告例が少ない。ジュート繊維は、麻袋やロープに使用されているが、建設資材への有効利用が可能であれば、さらなる用途拡大に繋がる。天然繊維の爆裂抑制効果が明らかとなれば、持続可能な資源として天然繊維の利用拡大が期待できると考える。

3. 実験概要

(1) 供試体

表-1,2に本研究における供試体の種類を示す。供試体は、AシリーズとBシリーズとした。Aシリーズは、繊

表-2 供試体の種類および示方配合(Bシリーズ)

シリーズ	供試体の種類	kg/m ³							繊維の種類	繊維混入率 Vol%
		W/C	W	C2	S2	G21	G22	AD2		
B	B-Control-2	0.3	170	567	763	548	365	6.237	-	-
	B-J-2								Jute	0.075

材料名	種類	密度 ³ (g/cm ³)	吸水率(%)	比表面積 (cm ² /g)
セメント	普通ポルトランドセメント(C2)	3.15	-	3350
細骨材	砕砂(硬質砂岩)(S2)	2.66	1.05	-
粗骨材	砕石 2015(硬質砂岩)(G21)	2.67	0.54	-
	砕石 1505(硬質砂岩)(G22)	2.67	0.54	-
混和剤	高性能減水剤(AD2)	1.05	-	-
水	上水道水(W)	1.00	-	-

表-3 フレッシュ性状・強度特性

シリーズ	供試体の種類	空気量 (%)	スランプ フロー (mm)	練上 温度 (°C)	繊維 混入率の 確認(%)	含水率 (%)	圧縮 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	引張 強度 (MPa)
Aシリーズ	A-Control-1	1.1	450	23	-	4.8	61.3	40.3	6.8
	A-J-1	1.7	340	21.5	0.104	4.3	64	36.8	4.9
	A-PP-1	3.1	305	220	0.19	5.5	56.9	39.2	5.2
	A-PP-2	1.7	390	21	0.113	5.2	60.6	38.7	5.8
Bシリーズ	B-Control-2	1.3	760	15.2	-	3.48	66.8	32.9	-
	B-J-2	1.6	635	17.1	0.068	2.63	73.7	32.6	-

維混入無し(A-Control-1)とジュート繊維を 0.15%vol (2.07kg/m^3)混入したものを(A-J-1)および比較用に PP 繊維を 0.15% (1.37kg/m^3)混入したものを A-PP-1 とし, 0.075%vol (0.68kg/m^3)を混入したものを A-PP-2 とした. B シリーズは, 高流動コンクリートを対象とした. 繊維混入なしを B-Control-2 とし, ジュート繊維を 0.075%vol (1.04kg/m^3)混入したものを B-J-2 とした.

(2) 配合

表-1 に A シリーズの配合と使用材料を示す. 表より, W/C は 0.3 とし, セメントは早強ポルトランドセメント (比表面積: $4550\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 3.13g/cm^3) を使用した. 細骨材は長良川産砂 (密度: 2.62g/cm^3 , 吸水率: 1.64%) を用いた. 粗骨材は長良川産碎石 (密度: 2.61g/cm^3 , 吸水率: 1.42%, 最大寸法: 25mm) を使用した. 混和剤は高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体) 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°C 一定の養生室内で 14 日間の湿布養生を行った.

表-2 に B シリーズの配合と使用材料を示す. 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(比表面積: $3350\text{cm}^2/\text{g}$, 密度: 3.15g/cm^3)を使用した. 細骨材は硬質砂岩砕砂(密度: 2.66g/cm^3 , 吸水率: 1.05%)とした. 粗骨材は硬質砂岩碎石(密度: 2.67g/cm^3 , 吸水率: 0.54%)とし最大寸法は 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. A, B シリーズともに目標空気量は $2\pm 1.0\%$ とした. コンクリートの練り混ぜには, パン型 2 軸強制ミキサーを用いた. まず, セメントと細骨材および粗骨材を投入し, 1 分間空練りを行った. 次に, 水と混和剤を投入し, 1 分間練り混ぜを行った. 更に, ミキサー内側にある練り混ぜっていない粉体と細骨材のかき出しを行った. その後, 混和剤の効き目を確認しながら, 7 分間の練り混ぜを行い, 流動性を確認した. 最後に, 所定の繊維をミキサー内に均等に分散させながら投入し, 1 分間, コンクリートの練り混ぜを行い, ミキサーから運搬容器に排出した. 排出したコンクリートを型枠に打設した. 供試体は, 打設後 1 日経過して脱型し, 温度 20°C 一定の養生室内で 14 日間の湿布養生を行った. 表-3 にコンクリートのフレッシュ性状 (練上温度, スランプフロー, 空気量) と強度特性(圧縮強度, 引張強度, 弾性係数: 材齢 14 日)および繊維混入率と加熱試験前の含水率を示す. 繊維混入率の確認方法を以下に示す. すなわち, コンクリートの練り混ぜ直後に約 300g のコンクリートを 3 セット採取した. 採取したコンクリートから繊維を洗い出して, 重量を計測した. 繊維およびコンクリートの重量とそれぞれ

表-4 使用した繊維の特性

繊維の種類	繊維長 mm	繊維径 μm	融点 $^\circ\text{C}$	密度 g/cm^3	その他の 特性
Jute	12	50	-	1.38 (1.3-1.45)	炭化
PP		110	170	0.91	熔融

*jute 繊維: 上段: 平均値, 下段: 密度の範囲

写真-1 ジュート繊維(SEM)

写真-2 コンクリート中のジュート繊維(SEM)

図-5 DSC-TGA 結果(ジュート繊維)

図-6 DSC-TGA 結果(PP繊維)

の密度から体積を算出し、繊維混入率(体積比)を算出した。

含水率は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を作製し、試験直前まで加熱試験用供試体と同様に養生した。その後、加熱試験と同じ材齢で供試体を粉砕し、 105°C で24hrの炉乾燥を実施した。炉乾燥前後のコンクリートの重量変化から含水率を求めた。引張強度は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ を用いて、割裂引張強度試験を実施した。载荷方法はJIS A 1113³³⁾に準拠した。繊維混入率を確認した結果、A-PP-1は目標混入率が0.15%volに対して0.19%volとなった。A-PP-2は、目標混入率が0.075%volに対して0.113%volとなり、目標値より大きな値となった。A-J-1は目標混入率が0.15%volに対して0.10%volとなった。B-J-2は、目標混入率が0.075%volに対して0.068%volとなった。A-PP-1とA-J-1およびA-J-2は妥当な範囲と考えるが、A-PP-2はバラつきが大きい結果となった。繊維混入率のばらつきについては、練り混ぜ方法と繊維の分散性などの影響を今後、検討する必要があると考えられる。

AシリーズとBシリーズで骨材の岩種の違いやセメントの種類の違いなどの影響はあるが、強度レベルが55-75MPaの範囲となっていることより、同等のものとみなして繊維の種類と混入率の影響を検討した。

(3) ジュート繊維の特性

表-4に使用したジュート繊維の特性を示す。比較のために、PP繊維の特性を示す。PP繊維は繊維長：12mm、繊維径：110 μm で、密度：0.91g/cm³である。ジュート繊維は、繊維長：12mm、繊維径：50 μm で、平均密度：1.38g/cm³(密度範囲：1.3~1.45g/cm³)である。原産国はインドおよびバングラデッシュである。本研究では、このジュート繊維を裁断することで短繊維を作製した。写真-1,2にジュート繊維単体とコンクリート中のジュート繊維のSEM写真を示す。ジュート繊維は天然繊維であり、SEM写真からストロー(中空)構造であることが確認できる。コンクリートが加熱された場合、ジュート繊維のストロー構造が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できるものである。図-5にジュート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°C であった。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 から急激な重量変化を示し、 360°C までに炭化していることがわかる。PP繊維は、繊維補強コンクリートの材料として一般的に使用されている材料である。図-6にPP繊維の熱分析結果(DSCとTGA)を示す。図より、 170°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。

図-7 供試体の形状・寸法

図-8 加熱試験装置

図-9 加熱曲線の実測値の例

図-10 蒸気圧の校正関数

(4) 加熱試験および蒸気圧の計測方法

図-7 に供試体の形状寸法を示す。図より、寸法は $400 \times 400 \times 100\text{mm}$ とした。供試体数はそれぞれ 2 体とした。本研究では、予備試験^{18,19)}の結果から、図-3 の蒸気圧計測方法のうち TypeE を採用した。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)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のために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-8 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 $350 \times 350\text{mm}$ の範囲とした。図-9 に加熱曲線の実測値(炉内)の一例を示す。加熱条件は、初期加熱速度にお

いて RABT 曲線を目標とした¹⁾。電気炉の性能を勘案し、加熱開始から 10min で 1200°C まで上昇させ、その後 1200°C を 10min 保持した。その後、ヒーター電源を遮断して除熱した。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除熱した。今回の加熱試験において、初期の加熱速度は RABT 曲線よりも早くなっているが、全ての供試体において、ほぼ同様な加熱状況となったため、加熱試験結果を相対比較することに大きな問題は無いと判断した。

(5) 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-10 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°C から膨張し始め、曲線的に上昇し、炉内温度 400°C で 0.06MPa を示した。この実測値をもとに、校正

図-11 内部温度と蒸気圧の関係(A,B シリーズ)

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。

$$y = -1.954 \times 10^{-2} + 3.54 \times 10^{-4} x - 1.813 \times 10^{-4} x^2 + 3.55 \times 10^{-9} x^3 \quad (1)$$

ここに、 y ：蒸気圧の補正分(MPa),

x ：供試体の温度(°C) ($0 \leq x \leq 400^\circ\text{C}$)

4. 結果および考察

(1) 内部温度と蒸気圧の経時変化

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。

a) Aシリーズ

図-11a)～d)にAシリーズの内部温度(加熱面から10, 20,

30, 40, 50mm)と蒸気圧(加熱面から10, 20mmの位置)の経時変化を示す。図-11a)よりA-Control-1供試体は、加熱後7分で深さ10mmの位置が200°Cに達した。この時点から爆裂が始まり、18分まで断続的に発生した。蒸気圧は加熱面から深さ10mmで、温度が150°C程度から上昇し始めた。そして、深さ10mmの温度が300°Cの時に7.5MPaに達した。加熱面から深さ20mmの蒸気圧は、同位置の温度が100°Cに達する8分から上昇し始め、15分で3MPaに達した。図-11b)より、A-J-1供試体は加熱後10分で深さ10mmの温度が400°Cに達した。蒸気圧は加熱面から深さ10mmの温度が150°Cから上昇し始め、311°Cの時に1.1MPaに達した。加熱面から深さ20mmの蒸気圧は、同位置の温度が120°Cに達する8分から上昇し始め、12分で1.0MPaに達した。ジュート繊維を混入した供試体は、蒸気圧の上昇はみられたが爆裂は生じなかった。

図-12 蒸気圧の計測値と SVP の比較

写真-3 供試体側面の温度ひび割れ
(例：A-PP-2)

図-13 蒸気圧の最大値と SVP の比較

図-14 蒸気圧と繊維混入率の関係

図-11c)より、A-PP-1供試体は加熱後10分で10mmの位置が230℃に達した。蒸気圧は加熱面から10mmの位置で、温度が90℃から上昇し始め、166℃の時に1.0MPaに達した。加熱面から20mmの位置の蒸気圧は加熱後5分から上昇し始め、11分で0.54MPaに達した。A-PP-1供試体は、加熱後7分で爆裂が生じた。蒸気圧の上昇は、A-Control-1供試体よりも小さいが、小規模な爆裂が生じた。

図-11d)より、A-PP-2供試体は加熱後5分で深さ10mmの温度が124℃に達した。蒸気圧は加熱面から深さ10mmの温度が50℃の時点から上昇し始め、温度が176℃の時に1.5MPaに達した。加熱面から深さ20mmの蒸気圧は加熱後5分から上昇し始め、8分で0.44MPaに達した。A-PP-2供試体は、加熱後7分で爆裂が生じた。蒸気圧の上昇は、A-Control-1供試体よりも小さいが、小規模な爆裂が生じた。

b) Bシリーズ

図-11e, f)にBシリーズの内部温度(加熱面から10, 20, 30, 40, 50mmと蒸気圧(加熱面から10, 20mmの位置)の経時変化を示す。図-11e)より、B-Control-2供試体は内部温度は、加熱面から10mmの位置において加熱後4分で130℃に達し、1回目の爆裂が生じた。その後、加熱の継続とともに、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。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。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。

図-11f)より、B-J-2 供試体は、加熱面から 10mm の位置において加熱後 5 分で温度が 125℃に達した。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、加熱面から 10mm の位置の蒸気圧は、温度が 100℃に達する 5 分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 の位置の温度が 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。B-J-2 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。

A, B シリーズともに Control 供試体(繊維無し)が爆裂を

a) A-Control-1

b) A-J-1

c) A-PP-1

d) A-PP-2

e) B-Control-2

f) B-J-2

写真-4 加熱面の損傷状況

生じた。爆裂が生じる直前までは深さ 10mm よりも浅い領域で、加熱に伴い熱応力が生じる。その際、マイクロクラックが生じると考えられる²⁰⁾。内部温度が 100℃を超えると蒸気圧の急激な上昇が生じる。熱応力と蒸気圧およびマイクロクラックの影響により、爆裂が生じたと考えられる。爆裂発生後は、熱応力によるひび割れから蒸気の噴出が確認された(写真-3)。

(2) 蒸気圧の計測値と飽和蒸気圧(SVP)の関係

既往の研究より、加熱試験で計測されたコンクリートの蒸気圧と飽和蒸気圧の比較を行ったものが報告されている²¹⁾²⁴⁾³³⁾³⁴⁾。図-12に各シリーズの加熱面から 10mm と 20mm 位置にを比較した結果を示す。図より、各シリーズともに SVP 曲線と蒸気圧の計測値は途中までよく一致していることがわかる。蒸気圧の計測値は途中から SVP 曲線を外れているが、これは加熱に伴う熱膨張や水和生成物の分解により計測位置近傍においてひび割れが生じ、蒸気圧が外部に逸散していることが考えられる。

A-J-1 供試体は、初期から SVP 曲線と計測値にズレが生じている。この点について、計測位置近傍の水分相と空気相の加熱に伴う分圧によって、SVP 曲線と一致せず、蒸気圧と温度の関係にズレが生じたものと考えられる。SVP 曲線と蒸気圧の計測値にズレが生じる点については、Kalifa¹⁵⁾や Mindeguia³⁴⁾もその原因を水蒸気と空気分圧が関係していると指摘している。

図-13に各供試体の蒸気圧の最大値と SVP 曲線との比較を示す。図より、繊維無し供試体(A-Control-1, B-Control-2)の蒸気圧は、7.5MPa(温度: 300℃)が最大である。PP 繊維混入供試体(A-PP-1,2)は、いずれの繊維混入率においても 2MPa 以下である。ジュート繊維混入供試体(A-J-1, B-J-2)は SVP 曲線から外れる場合があるが、計測値は 2.5MPa 以下である。PP 繊維とジュート繊維は繊維混入無しと比較して、蒸気圧の低減効果を確認できた。ジュート繊維混入供試体と PP 繊維混入供試体と比較すると、ジュート繊維混入供試体は 0.5MPa 程度、蒸気圧が大きい結果となったが爆裂を生じていない。ジュート繊維に蒸気圧低減効果があると考えられる。

(3) 繊維添加率と蒸気圧低減効果の関係

図-14に蒸気圧の最大値と繊維添加率の関係を示す。図は、各供試体の蒸気圧の最大値を平均したものと繊維混入率の関係である。繊維混入無しは、A-Control-1 と B-Control-2 供試体における蒸気圧の最大値の平均をとったものである。図より、PP 繊維とジュート繊維混入供試体はともに、繊維添加率が大きくなると蒸気圧の最大値も低下することがわかる。また、加熱面からの距離が深くなるほど、蒸気圧の最大値は小さくなることがわかる。

(4) 各供試体の加熱面のひび割れ性状

写真-4 に加熱試験後の供試体加熱面の状況を示す。写真より、A-Control-1 と B-Control-2 供試体は、加熱面の全面に爆裂が生じていることがわかる。爆裂深さは A-Control-1 と B-Control-2 それぞれ 8mm と 7mm である。一方、A-PP-1 と A-PP-2 供試体も爆裂を生じている。A-PP-1 と A-PP-2 供試体の爆裂深さは、それぞれ 10mm と 6mm 程度であり、加熱面的一部分に爆裂が生じる結果となった。次に、A-J-1 と B-J-2 供試体はいずれも爆裂を生じておらず、表面に亀甲状のひび割れが観察された。PP 繊維混入供試体は既往の知見と異なり、爆裂が生じた。この点については、含水率(表-3)が他の供試体よりも大きいことが影響したと考えられる。A シリーズの供試体で使用した骨材は単一岩種ではなく、川砂利であったため、爆裂しやすい骨材が含まれていた可能性も考えられる。一方、図-11 に示すように、A-Control-1 と B-Control-2 は加熱後 5min から 10min まで爆裂が継続した。PP 繊維混入供試体は加熱後 7min で 1 回爆裂が生じたのみであり、断続的な爆裂は抑制できている。加えて、爆裂範囲を a) と c), d) で比較すると、PP 繊維の混入率が大きくなるほど爆裂範囲が小さくなっていることがわかる。以上より、PP 繊維混入によって、爆裂の抑制効果は確認できたと考えられる。

5. ジュート繊維の爆裂抑制効果

ここでは、ジュート繊維の爆裂抑制効果について、考察する。PP 繊維は、一般的に爆裂抑制効果が期待できるとして報告されている。既報²⁾より、繊維径は 50 μ m で繊維長が 10~20mm の範囲で使用されている。設計基準強度の適用範囲は 80~150MPa である。繊維混入率は 0.05~0.3vol% であり、混入量に換算すると 0.45~2.73kg/m³ が実用化されている。今回使用したジュート繊維の実際の混入量は B-J-2 が 0.94kg/m³ と A-J-1 が 1.43kg/m³ でありその範囲内となっている。今回使用したジュート繊維と PP 繊維は、繊維の直径が異なる(図-15)。ジュート繊維は直径が 50 μ m であり、PP 繊維は 110 μ m である。繊維長は 12mm で同等であるが、繊維 1 本あたりの断面積を比較するとジュート繊維は PP 繊維の約 1/5 である。繊維の断面積が小さいことから、蒸気圧は PP 繊維よりも高くなったと考えられる。一方で、ジュート繊維はストロー構造をすでに有しているが、PP 繊維は繊維が 170℃で溶融することで蒸気圧逸散ネットワークを形成する点で違いがある。今回、PP 繊維は爆裂を生じたが繊維が溶融して蒸気圧逸散ネットワークが形成される前に爆裂が生じた可能性が考えられる。

図-16 にジュート繊維を混入した場合の蒸気圧逸散ネットワークの概念図を示す。これまでに蒸気圧逸散ネッ

量的な評価が必要であると考えられる。

a) PP繊維(融点 170°C)

b) ジュート繊維

図-15 繊維の形状比較

図-16 PITs (Pressure-induced tangential space)

a) 加熱前

b) 加熱後(400°C)

写真-5 加熱前後のジュート繊維の状況：PITsの形成

トワークについて Khoury²²⁾と Khoury & Willoughby²³⁾が PP 繊維を対象として、PITs (Pressure-induced tangential space)を形成するとして提案している。ジュート繊維に関しては PITs の形成に加えて、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。DSC-TGA の結果においても、100°C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。SEM 観察においても、加熱無と 400°C 加熱において、ジュート繊維の収縮およびモルタルマトリックスとの付着が切れることで隙間ができていることを確認している(写真-5)。以上のことから、天然繊維のジュート繊維は繊維混入無しと比較して、蒸気圧低減効果と爆裂抑制効果が確認できた。今後は、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

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 繊維混入なしの供試体とPP繊維混入供試体は爆裂を生じたが、ジュート繊維を混入した供試体は爆裂を生じなかった。
- 2) 各供試体の蒸気圧と温度との関係は、飽和蒸気圧曲線(SVP)と温度の関係と途中までよく一致した。
- 3) PP繊維とジュート繊維の繊維添加率を大きくすると蒸気圧が低減することが確認できた。
- 4) 天然のジュート繊維は繊維混入無しと比較して、蒸気圧低減効果と爆裂抑制効果が確認できた。
- 5) ジュート繊維は、その繊維の特徴である中空構造と繊維とモルタルマトリックスが加熱時に付着が切れることによって、蒸気圧逸散ネットワークを形成し、爆裂を抑制できるものと考えられる。

謝辞：本研究に対して、岐阜大学 六郷恵哲教授に貴重なご意見を頂いた。ここに謝意を表する。供試体作製にあたり、(株)昭和コンクリート工業 宮澤聡氏に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とPP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。
- 3) 松尾栄治，高海克彦：コンクリート補強材としての竹材の適用性，土木学会論文集 F，Vol. 65，No.2，pp.190-195，2009。
- 4) Ozawa, M., Iizuka, T., Rokugo, K. and Morimoto, H.: Relationship between spalling behavior and internal vapour pressure of high-strength concrete reinforced with natural fiber under high temperature, *Proceeding of 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, pp.140-149, 2009.
- 5) 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繊維およびジュート 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。
- 6) Ozawa, M. and Morimoto, H. : High-Strength Concrete Reinforced Jute Fiber and Water-Soluble PVA Fiber under High Temperature, *Proceeding of Sixth International Conference on Structures in Fire*, USA, Michigan, pp.864-871,

- 2010.
- 7) 斎藤光：プレストレスコンクリート部材の爆裂について，日本建築学会論文報告集号外，pp.688, 1966. 10.
- 8) Harmathy, T.Z. : Effect of moisture on the fire endurance of building elements, *ASTM special technical publication*, No.385, pp.74-95, ASTM, 1965.
- 9) Anderberg, Y. : Spalling phenomena of HPC, International workshop on Fire Performance of High Strength Concrete, Maryland, *NIST Special Publication* 919, Feb., pp.13-14, 1997.
- 10) Bailey, C. and Khoury, G.A. : Performance of Concrete Structures in Fire, *A cement and concrete industry publication*, MPA-The Concrete Centre, 2011.
- 11) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.98-109, 2009.
- 12) Schneider, U., Alonso, M.C., Pimienta, P. and Jansson, R.: Physical Properties and Behaviour of High-Performance Concrete at High Temperatures, *Proceeding of Sixth International Conference on Structures in Fire*, USA, Michigan, pp.800-816, 2010.
- 13) Jansson, R. and Boström, L.: The influence of pressure in the pore system on fire spalling of concrete, *Fire Technology*, Vol.46, No. 1, pp.217-230, 2010.
- 14) Ko, J., Ryu, D. and Noguchi, T. : The spalling mechanism of high-strength concrete under fire, *Magazine of Concrete research*, Vol. 63, No.5, pp. 357-370, 2011.
- 15) 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.
- 16) Phan, L.T. : Pore pressure and explosive spalling in concrete, *Materials and Structures*, Vol.41, pp.1623-1632, 2008.
- 17) Consolazio, G.R., McVay, M.C. and Rish, J.W. : Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating, *ACI Materials Journal*, Vol.95, pp.525-536, 1998.
- 18) 川上寛正，北村正仁，小澤満津雄，森本博昭：コンクリートの爆裂に関する研究，第 60 回土木学会年次講演会概要集 CD-ROM, V-413, pp.413-414, 2005.
- 19) 小澤満津雄，王若平，坂昇，森本博昭：高温加熱によるコンクリートの爆裂現象に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.753-758, CD-ROM, 2007.
- 20) 小澤満津雄，内田慎哉，王若平，鎌田敏郎，森本博昭：AE法による高強度コンクリートの爆裂発生過程の評価，土木学会論文集E, Vol. 65, No. 1, pp.16-29, 2009.
- 21) Mugume, R.B. and Horiguchi, T. : Pore pressure development in hybrid Fiber-reinforced high strength concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol.41, pp.1150-1156, 2011.
- 22) Khoury, G.A.: Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria, *Magazine of Concrete Research*, Vol.60, No.3, pp.189-204, 2008.
- 23) Khoury, G.A. and Willoughby, B. : Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behaviour, *Magazine of Concrete Research*, Vol.60, No. 2, pp.125-136, 2008.
- 24) Kalifa, P., Grégoire, C. and Galle, C. : High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.1487-1499, 2001.
- 25) Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R. and Mang, H.A.: How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, *Cement and Concrete Research*, Vol.36, pp.929-942, 2006.
- 26) Long, T.P. : High-Strength Concrete at High Temperature An Overview, Utilization of High Strength/High Performance Concrete, *6th International Symposium Proc.*, Vol.1, pp.501-518, 2002.
- 27) 森田武，西田朗，橋田浩，山崎庸行：火災時における高強度コンクリート部材の爆裂性状の改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.544, pp.171-178, 2001.
- 28) 木村和広，小澤満津雄，森本博昭，六郷恵哲：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.
- 29) Heo, Y.S., Sanjayan, J.G., Han, C.G. and Han, M.C. : Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire, *Cement and Concrete Research*, Vol.40, pp.1547-1554, 2010.
- 30) 三井健郎，米澤敏男，小島正朗，三橋博三：設計基準強度80～200N/mm²超高強度コンクリート柱の耐火性能に及ぼす有機繊維および鋼繊維の影響に関する研究，日本建築学会，構造系論文集，No.648, pp.461-468, 2010.
- 31) Watanabe, K., Mugume, R.B. and Horiguchi, T. : Effect of elevated temperatures on flexural behaviour of hybrid fibre reinforced high strength concrete, *Journal of Structural Fire Engineering*, Vol. 1, No. 1, Multi-Science Publishing Co Ltd, pp.16-27, 2010.
- 32) 川西貴士，屋代勉，田中善広，小林一博：ポリプロピレン短繊維による鋼繊維補強コンクリートの耐火性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.333-338, 2008.
- 33) 日本工業規格：JIS A 1113, コンクリートの割裂引張強度試験，2006.
- 34) 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.
- 35) 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.

(2012. 8. 23 受付)

PREVENTIVE EFFECTS OF NATURAL FIBERS ON HIGH-STRENGTH CONCRETE SPALLING AT HIGH TEMPERATURES

Mitsuo OZAWA and Hiroaki MORIMOTO

We investigated the relationship between the spalling behavior and internal vapor pressure of high strength concrete (HSC) with natural fiber when heated. The concrete specimens had a water-cement ratio of 0.30 ($f_c \approx 70$ MPa). The fibers used were natural jute fiber and PP fiber. The length of the jute and was 12 mm and its addition rates were 0.075% and 0.15% by volume, respectively. The HSC specimens were heated and their internal temperature and vapor pressure were then measured. Explosive spalling did not occur in the jute specimens.