論文　火災時における天然繊維混入 PC はりの爆裂抑制効果

橋田美知花[*1]・池谷拓由紀[*2]・藤本謙太郎[*3]・小澤満津雄[*4]

要旨：本研究では，2 種の繊維を混入したプレストレストコンクリートはりを作製し加熱試験を実施し，爆裂抑制効果を確認した。使用した繊維はポリプロピレン繊維(PP)と天然 Jute 繊維(Jute)とした。加熱曲線は RABT30 加熱曲線を用いた。その結果，繊維無混入のケースと比較して PP と Jute とともに爆裂抑制効果が確認できた。加えて，併せて実施したリング拘束供試体加熱試験の爆裂深さは，PC はりの爆裂深さと同様の傾向を示した。更に，リング試験で拘束応力と水蒸気圧を計測することにより，爆裂メカニズムの検討可能性が示された。

キーワード：プレストレストコンクリート，リング拘束供試体，爆裂，Jute 繊維，PP 繊維

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下，PC）構造は，圧縮応力を導入することで部材内部に生じる引張応力とひび割れを制御することができるため，構造物の長大化と高機能化に貢献してきた。一方で，PC 構造は導入されるプレストレスの影響により，火災時にコンクリート表層部が爆発的に剥離・剥落する爆裂現象が生じやすいという報告がある[1)2)3)4)]。コンクリートの爆裂発生メカニズムは，熱応力説と水蒸気圧説およびそれらの複合説がある[5)]。これまでに本研究グループでは，爆裂を評価する方法としてリング拘束供試体加熱試験法を提案している[6)7)]。この試験方法は，日本コンクリート工学会の試験法の一部として基準化がなされている[8)]。爆裂抑制方法としてはポリプロピレン（以下，PP）繊維などの合成繊維をコンクリートに混入する方法が多数，報告されている[9)10)]。一方，本研究グループでは，持続可能な天然資源の活用を目指して天然繊維である Jute 繊維を爆裂抑制繊維として用い，効果があることを報告している[11)12)]。PC はりを対象としたケースにおいても合成繊維を用いた場合の爆裂防止効果の検討がなされている[13)]。しかしながら，PC 部材における Jute 繊維の爆裂抑制効果の検討がなされていないのが現状である。

そこで，本研究では天然の Jute 繊維を混入したコンクリートを用いて，PC はりを作製し，加熱試験を実施した。比較対象として，繊維混入なしと PP 繊維を混入したケースについても，検討を行った。更に，PC はりと同配合でリング拘束供試体を作製して加熱試験を行い，爆裂性状と拘束応力及び水蒸気圧の発現性状を評価した。リング拘束加熱試験と PC はりの加熱試験の爆裂状況を比較することで，リング拘束供試体加熱試験の信頼性向上に寄与するものである。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの配合

表－1 にコンクリートの配合を示す。コンクリートの配合は①繊維なし（以下，N）と②PP 繊維混入(以下，PP)および③Jute 混入(以下，Jute)の 3 種類とした。使用した繊維は PP 繊維および Jute 繊維とし，混入率は 0.1vol%とした。W/C は繊維無混入が 34.4%で PP 繊維混入型と Jute 繊維混入型が 36.3%である。今回は，呼び強度が 50MPa のコンクリートを使用した。表－2 にコンクリートのフレッシュ性状と加熱試験時の強度特性および含水率を示す。コンクリートの圧縮強試験体は，コンクリート打設翌日に脱型して， 材齢 3 日まで湿布養生を行った。その後は加熱試験開始まで実験室内での気中養生とした。加

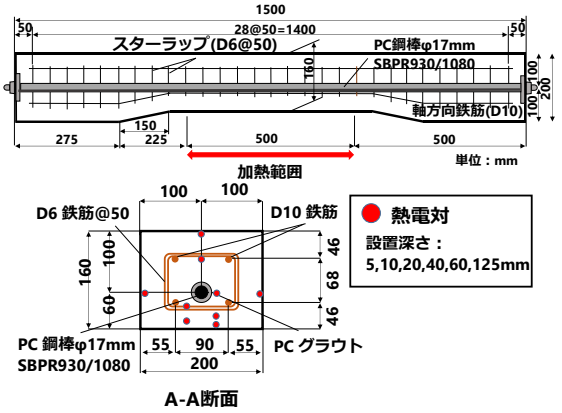
表－1　コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)							
			W	C	S1	S2	G	Ad	PP	Jute
N	34.4	42.6	165	480	488	221	998	3.84	-	-
PP	36.3	46.0	170	469	378	378	912	4.69	0.9	0
Jute									0	1.38

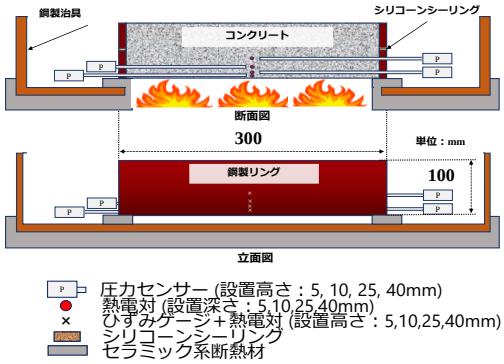
表－2　フレッシュ性状および強度特性・含水率

	空気量 (%)	スランプ (cm)	温度 (℃)	圧縮強度 (MPa)	含水率 (%)
N	3.5	13.0	27.6	59.8	4.3
PP	4.7	20.5	22.2	47.0	3.2
Jute	4.7	20.5	22.2	55.5	4.0

*1 群馬大学　理工学部環境創生理工学科　(学生会員)
*2 群馬大学大学院　理工学府環境創生理工学プログラム　(学生会員)
*3 ピーエス三菱(株)　東京土木支店　土木技術部　設計グループ
*4 群馬大学大学院　理工学府環境創生部門　准教授　博士(工学)



図－1　PC はり試験体概要



図－2　リング拘束供試体概要

熱試験実施時にそれぞれの試験体の含水率の計測を行った。φ100mm×H200mm の円柱供試体を用いて，各種類それぞれ供試体 3 体の平均を含水率とした。PP 供試体の含水率が，Jute 供試体と比較して低い点については，PP 繊維の疎水性が影響したことが考えられるが今後の検討課題としたい。

2.2 使用した試験体の概要

本研究では，PC はり試験体とリング供試体を使用した。図－1 に PC はり試験体の形状寸法を示す。PC はり試験体は幅が 200mm，支間中央部の高さが 160mm，長さ 1500mm の PC 梁部材とした。PC 鋼材には SBPR930/1080 φ17mm の PC 鋼棒を，試験体の軸方向鉄筋には D10（SD345）を，スターラップには D6（SD295A）をそれぞれ用いた。熱電対は支間中央部に加熱面から 5，10，20，40，60，125mm の位置に設置した。プレストレスは材齢 3 日で所定の強度発現を確認後，下縁の圧縮応力が 5MPa となるように，PC 鋼材を緊張した。初期緊張力は 113.5kN とした。図－2 にリング供試体の寸法形状を示す。拘束リングは外径 300mm×高さ 100mm×厚さ 8mm の鋼製リングにコンクリートを内部に充填した。内部に は温度計測用の熱電対を設置した。リングの外周にひずみゲージ(許容温度：80℃)を底面から 5，10，25，40mm 位置に設置し，コンクリートの拘束応力を算出した。また，ステンレスパイプ(内径 2mm×外径 5mm×長さ 180mm)を同様に底面から 5, 10, 25, 40mm 位置に設置し，コンクリート内部の水蒸気圧を計測した。加熱試験前にステンレスパイプ内部にはシリコンオイルを充填し，圧力センサー(許容値：10MPa)に接続した。本研究では，PC はり試験体とリング拘束供試体について，N, PP，Jute の 3 種類ずつ，計 6 体作製した。

2.3 使用した繊維の特性

本研究では PP 繊維の密度を 0.91g/cm^3，Jute 繊維の密度を平均密度 1.38g/cm^3（密度範囲：1.3～1.45g/cm^3）として，0.1vol%をコンクリートに混入した。PP 繊維は繊維長：12mm，繊維径：110μm で，融点は 170℃である [11]。Jute 繊維は，繊維長：12mm，繊維径：50μm であり，360℃で炭化することが報告されている [11]。Jute 繊維は天然繊維でありストロー（中空）構造であることから，コンクリート加熱時に蒸気の逸散ネットワークを形成し，蒸気圧の低減効果が期待できるとされている [11]。

2.4 加熱試験

加熱試験にはガス水平炉を用いた。加熱試験は RABT30 加熱曲線を用いた。リング拘束供試体は下面開口部の一面加熱とした。PC はりでは試験体中央 500mm の範囲を下面からの 一面加熱とした。加熱試験中の爆裂状況をガス水平炉に取り付けられた小窓から観察した。すなわち，爆裂によるコンクリート片の飛散状況，および爆裂時に生じる音によって確認した。また，その時の経過時間を記録した。

2.5 リング拘束供試体の拘束応力の算出方法

リング拘束供試体では加熱中のコンクリートの熱膨張を鋼管によって拘束しているため，拘束応力を算出できる。拘束応力は，測定した鋼製リングの円周方向ひずみを用いて算出した。算出方法を式(1)に示す。

$$\sigma_{re} = \varepsilon_\theta \cdot E_s \cdot t/R \qquad (1)$$

σ_{re}：コンクリートに生じる拘束応力(N/mm^2)

ε_θ：リング円周方向ひずみ

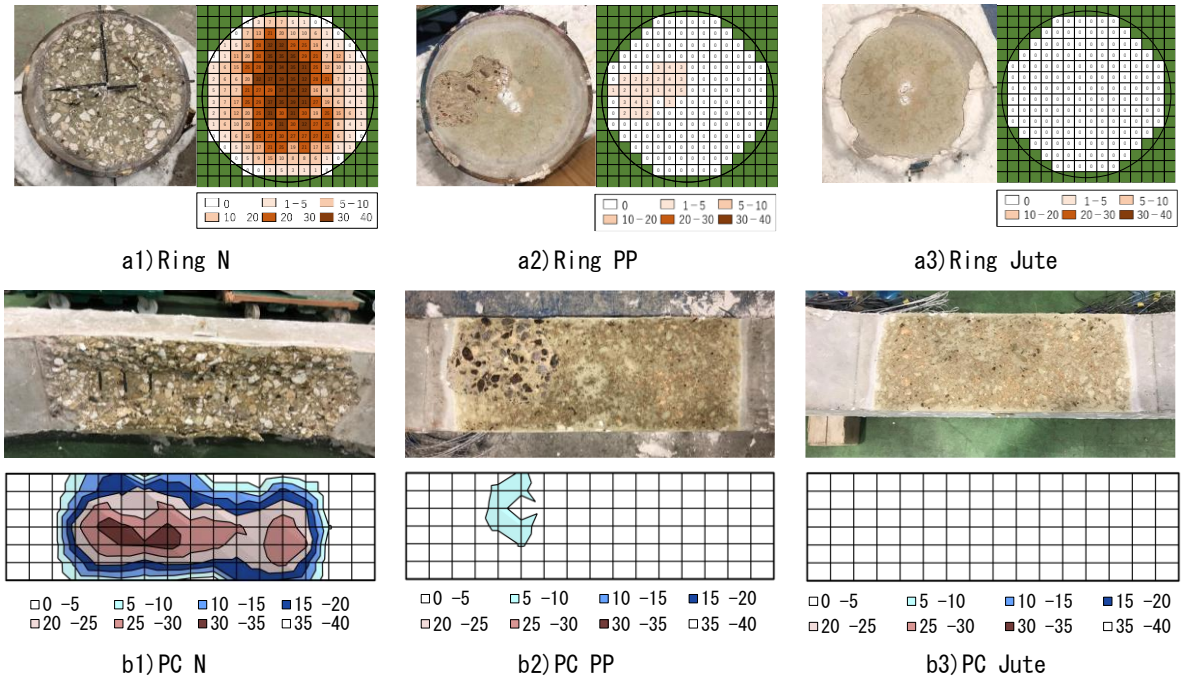
E_s：リング材弾性係数(N/mm^2)

t：リング材厚み(mm)

R：リング材内径(mm)

2.6 PC はりとリング供試体の爆裂規模の評価方法 [5)]

ここでは，JCI の爆裂試験法に記載されている爆裂規模評価法を参考にして，PC はりとリング供試体の加熱試験後の爆裂規模を評価する方法を示す。各試験体と供試体の加熱面の状況より，コンクリートの爆裂規模のグレーディングを行った。グレーディングの項目は，指標 1: 最大爆裂深さと指標 2：爆裂面積率および指標 3：爆裂容積率とした。測定した全データの中で最も大きい欠損深さを最大爆裂深さ(D_{max})とした。また，爆裂面積率(A_{sp})



図－3　加熱面状況およびコンター図（単位：mm）

表－3　グレーディング実施結果

	爆裂状況			グレード		
	最大爆裂深さ(mm)	爆裂面積率(%)	爆裂容積率(%)	指標 1	指標 2	指標 3
Ring N	39	90.7	14.7	E	E	D
Ring PP	5	14.7	0.4	C	D	C
Ring Jute	0	0.0	0.0	B	B	B
PC N	32.5	85.7	9.4	E	E	D
PC PP	8.3	14.3	0.4	C	D	C
PC Jute	0	0.0	0.0	B	B	B

および爆裂容積率(V_{sp})の算出方法を式(2)，(3)に示す。

$$A_{sp} = N_i / N \quad (2)$$

$$V_{sp} = \Sigma D_i / (N \times H) \quad (3)$$

N_i　：欠損深さが 0 より大である測定点数

N　：測定点数

ΣD_i：合計欠損深さ

H　：供試体高さ（mm）

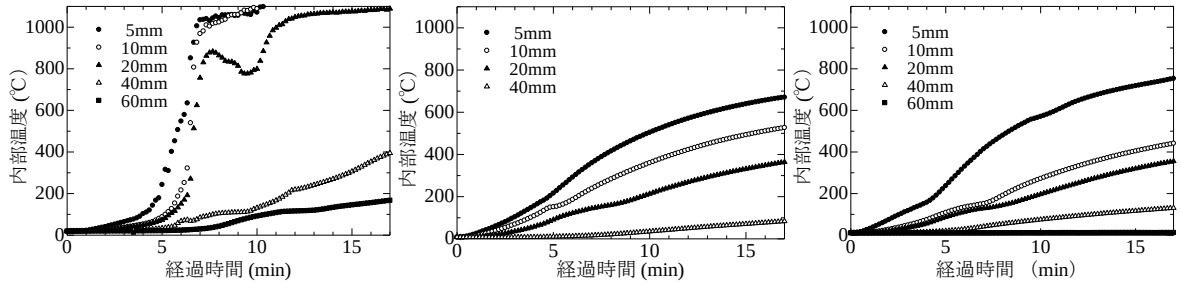
3. 試験結果及び考察

3.1 PC はり試験体とリング供試体爆裂性状および爆裂

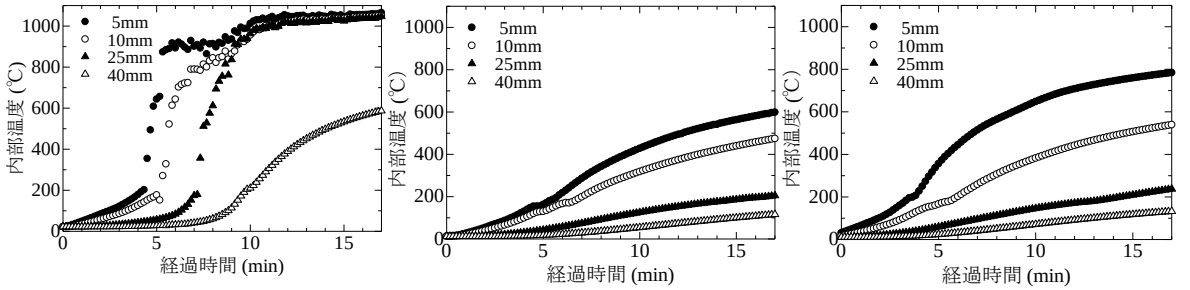
図-3 に PC はり試験体とリング供試体の加熱試験後における加熱面の性状および爆裂深さコンター図を示す。PC はり試験体は，N シリーズが加熱面全体にわたって爆裂が生じ，内部のスターラップが目視で確認できた。最大爆裂深さは 32.5mm であった。PP シリーズは，加熱面の端部で一部爆裂が確認できた。最大爆裂深さは 8.3mm であった。Jute シリーズは，爆裂は確認できなったが，表面に亀甲状のひび割れが確認できた。次 にリング供試体について説明する。N シリーズは加熱面全体にわたって爆裂が生じた。最大爆裂深さ 39mm であった。PP シリーズは，加熱面の一部爆裂が確認できた。最大爆裂深さは 5mm であった。Jute シリーズは，爆裂は確認できなったが，表面に亀甲状のひび割れが確認できた。表-3 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。N シリーズについては PC はりとリング供試体ともに指標 1，2 で最大爆裂深さが 30mm 以上，爆裂面積率が総面積の 50%である E 評価となり，指標 3 は爆裂容積率が総容積の 10～20%の D 評価となった。PP シリーズは，PC はりとリング供試体ともに指標 1，3 が C 評価となり，指標 2 が D 評価となった。Jute シリーズは PC はりとリング供試体ともにすべての項目で「爆裂はないが，亀甲状のひび割れがあり」の B 評価となった。

3.2 PC はりの内部温度の経時変化

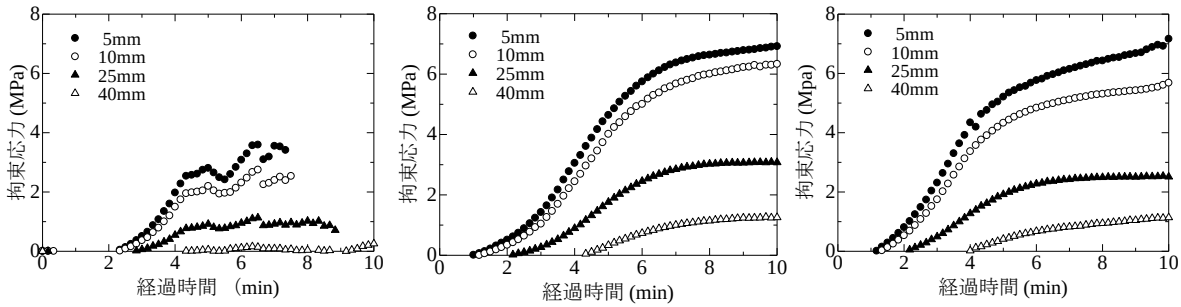
図-4 に PC はりの加熱試験時における内部温度の経時変化を示す。N シリーズでは，加熱開始後 4 分程度で 5mm 位置の温度が 200℃から急激に上昇していることがわか



図－4　PC はり試験体における内部温度の経時変化



図－5　リング拘束供試体における内部温度の経時変化



図－6　拘束応力の経時変化

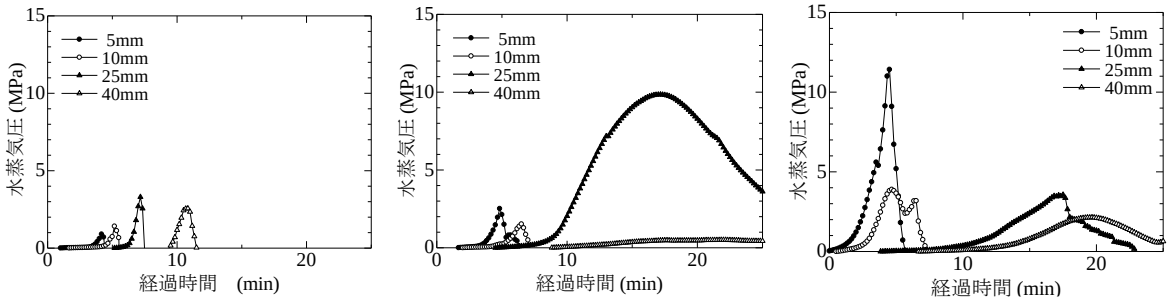
る。これは，爆裂によって 5 ㎜位置の熱電対が炉内に曝されたことによるものと考えられる。同様な傾向が 20mm 位置の深さまで生じている。40mm と 60mm は加熱に伴い，徐々に温度が上昇していることがわかる。PP シリーズは，加熱表面で小規模な爆裂が確認されたが，加熱面に近い 5mm 付近には大きな変化は見られなかった。傾向としては，加熱に伴い浅い位置から順番に温度が上昇していることがわかる。Jute シリーズでも，爆裂は生じず, PP シリーズと同様に加熱面に近い位置から温度が上昇していることがわかる。

3.3 リング供試体の内部温度の経時変化

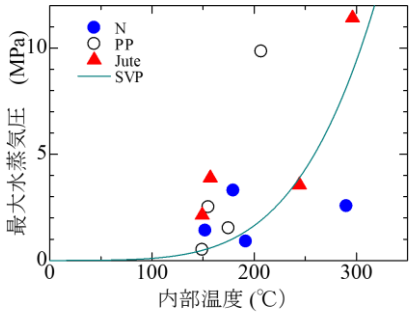
図－5 にリング拘束供試体における各供試体の内部温度の経時変化を示す。N シリーズでは，加熱開始後 4 分程度で，5mm 位置の温度が 200℃から急激に上昇していることがわかる。これは，爆裂によって 5mm 位置の熱電対が炉内に曝されたことによるものと考えられる。同様に 10mm と 25mm 位置の深さでも爆裂が生じ，急激に温度上昇していることがわかる。40mm は爆裂が生じていないが，加熱に伴い徐々に温度が上昇していることがわかる。PP シリーズは，加熱表面で小規模な爆裂が確認されたが，加熱面の近い 5mm 付近には大きな変化は見られなかった。傾向としては，加熱に伴い浅い位置から順番に温度が上昇していることがわかる。Jute シリーズでも，爆裂は生じず PP シリーズと同様に加熱面に近い位置から順番に温度が上昇していることがわかる。なお，60mm 位置のデータは計測不備でデータがとれなかった。

3.4 拘束応力の経時変化

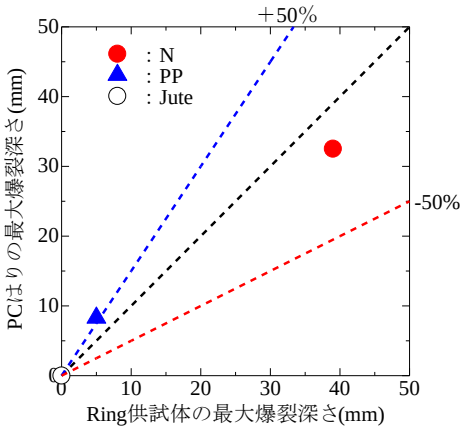
図－6 に各供試体における拘束応力の経時変化を示す。図－6a)より，N シリーズでは 5，10，25mm 位置で爆裂の影響による拘束応力の増減が見られる。これは，爆裂が断続的に発生していることを示すものである [12)]。拘束応力があまり上昇しなかったと考えられる。5mm 位



図－7　水蒸気圧の経時変化



図－8　水蒸気圧の最大値と内部温度の関係



図－9　PC はりとリング拘束供試体の爆裂深さ

置での拘束応力の最大値は 3.6MPa であった。これに対して，図－6b)，c) より，PP シリーズおよび Jute シリーズでは拘束応力は加熱に伴い，上昇傾向を示した。これは，爆裂による断面欠損の影響がなく，コンクリートの熱膨張変形により，拘束応力が上昇したと考えられる。5mm 位置での拘束応力の最大値は PP シリーズおよび Jute シリーズそれぞれにおいて，7.1MPa と 7.5MPa であった。

3.5 水蒸気圧の経時変化

図－7 に，各供試体における水蒸気圧の経時変化を示す。図－7a)より，N シリーズでは加熱に伴い加熱面から浅い位置より順番に水蒸気圧が上昇していることがわかる。水蒸気圧が上昇し，爆裂発生した時点で，急減していることがわかる。水蒸気圧の最大値は，25mm 位置で 3.3Mpa であった。図－7b)より PP シリーズの水蒸気圧は加熱面から 5mm と 10mm 位置で，急激な上昇下降が確認できる。最大爆裂深さは 5mm であり，水蒸気圧が爆裂に影響したものと考えられる。一方，25mm 位置の最大値は，10MPa 程度であるが，最大値以降の低下は緩やかである。これは，PP 繊維が加熱により溶融したことで，コンクリート内部に空隙が形成され，水蒸気圧が逸散したと考えられる [10]。一方，図－7c)より Jute シリーズは 5mm 位置では，水蒸気の最大値が 11.4MPa を示したが，爆裂は生じなかった。これは，ストロー構造を有する Jute 繊維がコンクリート内部に分散していることで，加熱前からコンクリート内部に空隙ネットワークを形成していることに起因すると考えられるが，詳細については検討が必要である。一方，PP 繊維が加熱により溶融することで空隙ネットワークを形成し，水蒸気を外に逃がす構造とは異なると考えられる。水蒸気圧が上昇しても，爆裂が生じない点については既報でも，同様な報告がある [12]。

爆裂の程度が小さかった PP と Jute を比較すると，水蒸気圧の最大値は PP よりも Jute のほうが大きかった。これは含水率が影響したと考えられる。しかしながら，Jute シリーズで水蒸気圧が大きくなった点については今後更に検討が必要である。

3.6 水蒸気圧の最大値と温度の関係

図-8 に，N と PP および Jute シリーズで計測された各測定位置における水蒸気圧の最大値と内部温度の関係を示す。Ichikawa らの報告では，SVP 曲線を境として左を過飽和領域，右を不飽和領域として評価できるとしている [14]。N シリーズは，水蒸気圧の最大値は，4MPa 以下の値となっているが，PP と Jute は最大値で 10MPa 程度をとっている。PP と Jute では爆裂抑制効果によって水

蒸気圧が高くても，爆裂を抑制できることがわかる。一方，繊維無混入の場合は，水蒸気圧が低い状況でも，爆裂が生じる結果となった。

3.7 PC はりとリング供試体の爆裂深さの比較

配合レベルのスクリーニング試験の位置付けであるリング供試体試験法の爆裂深さと部材レベルの爆裂深さを比較することは，リング試験の有効性を示す意味でも重要であると考える。図－9 に，PC はりの爆裂深さとリング供試体の爆裂深さを比較したものを示す。

N では，PC はりとリングの最大爆裂深さはそれぞれ 32.5mm と 39mm であった。PP では 8.3mm と 5mm である。Jute は PC はりとリングともに爆裂は生じなかった。PC はりの爆裂深さについて, PP 繊維を 0.1%混入することで，74%爆裂深さを低減できる結果となった。また，Jute 繊維を混入することで，爆裂が生じない結果となった。本研究の範囲では，PC はりとリング試験の爆裂深さは±50%の範囲で評価できる可能性を示した。今後は，プレストレスの導入量と爆裂深さへの影響を検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) Jute 繊維を混入した PC はりの加熱試験では，爆裂が生じなかった。PP 繊維を混入したケースでも，爆裂規模が低減する効果を確認した。
2) リング拘束供試体の加熱試験で拘束応力を測定した結果, 最大値は繊維無混入(N)と PP および Jute でそれぞれ 3.6MPa，7.1MPa，7.5MPa となった。水蒸気圧の最大値は, 繊維無混入(N)と PP および Jute でそれぞれ 3.3MPa，9.8MPa，11.4MPa となった。
3) リング試験と PC 部材の爆裂規模を比較したところ, 爆裂の有無と規模が同程度となった。これは，材料試験としてのリング試験の有効性を示すものであると考えられる。

今後の検討課題として，リング試験と PC 部材の加熱試験における内部の応力状態を解析的に検討することと PC 部材の曲げ耐力の評価および PC 部材の加熱前後の残存プレストレスの評価が挙げられる。

参考文献

1) 川越邦雄：PS コンクリート床版の耐火性，建築技術，No.40，pp.34-42，(1956)
2) 斎藤光 : プレストレスト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，pp.688，1966.10
3) N.H. Yi，S.J.Choi，S.W.Lee，J.HJ.Kim : Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading，Fire Safety Journal，Vol.71，pp.123-133，2015
4) 吉田正友 : プレストレストコンクリート構造の耐火性に関する研究の動向，Journal of the Society of Materials Science，Japan，Vol.63，No.8，pp.571-581，Aug.2014
5) 日本コンクリート工学会 : 高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書，2017 年 9 月
6) 谷部，小澤満津雄，鎌田亮太，六郷恵哲：拘束リング試験法を適用したコンクリートの高温環境下における耐爆裂性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No1, pp1138-1143, 2012
7) 谷部徹，小澤満津雄，鎌田亮太，六郷恵哲：拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No1, pp.1135-1140, 2013
8) 日本コンクリート工学会 : コンクリートの爆裂試験方法，JCI-S-014-2018，2018
9) 韓千求，韓ミンチョル，李建哲，許榮善：有機繊維を調合使用した高強度コンクリートの爆裂防止，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No2, pp.151-156, 2007
10) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止策，コンクリート工学年次論文集，Vol.45, No9, pp.87-91, 2007
11) 小澤満津雄，森本博昭：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，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol69, No.3, pp.324-336, 2013
12) 赤坂春風，小澤満津雄，Sirjana Subedi Parajuli，杉野雄亮 : リング拘束供試体加熱試験による天然繊維を混入した高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No1，pp1029-1034, 2018
13) 飯田良夫，遊佐秀逸，須藤昌照，藤井和俊，鈴木雅博，中瀬博一：有機繊維を混入した PS コンクリートの RABT 加熱による耐火性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.143-144, 2005
14) Y. Ichikawa，G.L. England: Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperature，Nuclear Engineering and Design 228，pp.245-259，2004