

論文 火災時における天然繊維混入型高強度コンクリートはりの爆裂性状と火害後の曲げ耐力の評価

富士田 玲*1・赤坂 春風*2・杉野 雄亮*3・小澤 満津雄*4

要旨: 本研究では、天然繊維型高強度コンクリートはりの加熱試験を行い、爆裂性状の評価を行った。爆裂抑制繊維はポリプロピレン繊維と天然の Jute 繊維とし、加熱曲線は RABT30 とした。加えて、曲げ荷重試験を行い、はりの加熱領域および繊維の有無が曲げ耐力に与える影響を検討した。その結果、圧縮領域を加熱した繊維無混入高強度コンクリートはりの爆裂深さが最も大きく、Jute 繊維を混入したはりは爆裂が生じなかった。曲げ耐力については、圧縮領域を加熱した繊維無混入高強度コンクリートはりの初期剛性と鉄筋降伏耐力および終局耐力が最も小さくなった。

キーワード: 高強度コンクリート, 爆裂, PP 繊維, Jute 繊維, リング拘束供試体, RABT30 加熱曲線

1. はじめに

高強度コンクリート(以下, HSC)は、火災などにより高温に曝された場合、表層部が爆発的に剥離剥落する爆裂現象を生じることがある。既報では、コンクリートの爆裂現象の発生原因として、熱応力説と水蒸気圧説およびその複合説が提案されているが、未だに確たる結論に至っていないのが現状である¹⁾。日本コンクリート工学会(以下, JCI)では、コンクリートの材料レベルにおける爆裂スクリーニング試験法として、リング拘束試験法と角柱拘束試験法が基準化された²⁾。また、爆裂現象を抑制する方法として、一般的にポリプロピレン(以下, PP)繊維の混入が報告されている³⁾。一方、本研究グループでは、資源の有効利用の面から、再生可能な天然の Jute(麻)繊維による爆裂抑制効果について報告を行っている^{4)~7)}。Jute 繊維は、インドやバングラディッシュを原産国とす

る植物繊維であり、再生可能な天然資源である。これまでに、ブロック供試体およびリング拘束供試体による爆裂評価法を用いて、材齢の影響と混入する繊維の影響を検討してきた。その結果、Jute 繊維に PP 繊維と同等以上の爆裂抑制効果があることを確認している。一方、Jute 繊維を混入した高強度コンクリートの RC 部材レベルにおける加熱試験は実施されていなかった。そこで本研究は、既報⁷⁾と同配合のコンクリートを用いて RC はりを作成後、加熱試験を実施し、爆裂性状を評価した。供試体は HSC, HSC+PP, HSC+Jute の 3 種類を対象とし、既報より、リング拘束供試体加熱試験の爆裂深さとの比較を行った。さらに、加熱試験後の RC はりを用いて曲げ荷重試験を行い、加熱領域の違いと繊維混入の有無が曲げ破壊挙動に与える影響を検討した。

表-1 コンクリートの配合

	W/C	単位量(kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G	Ad	PP	Jute
HSC	0.3	150	500	359	372	1169	7	0	0
HSC+PP							8	0.9	0
HSC+Jute							8	0	1.38

表-3 PP 繊維と Jute 繊維の特性

種類	繊維長 (mm)	繊維 径(μm)	融点 (°C)	密度 (g/cm ³)	特性
Jute	12	50	-	1.38	炭化
PP		110	170	0.91	熔融

表-2 フレッシュ性状および強度特性・含水率

	空気量 (%)	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	温度 (°C)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	含水率 (%mass)
HSC	2.6	-	65.3×63.0	27.9	100.7	42.4	5.87	2.95
HSC+PP	0.7	-	55.5×59.2	28.5	107.5	44.4	6.02	3.39
HSC+Jute	3	19.2	48.5×48.0	29.4	105	44.5	5.84	3.35

*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 2年(学生会員)

*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 修士(工学) (正会員)

*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) (正会員)

2. 実験概要

2.1 はり供試体概要

図-1 に、はり供試体の概要と本研究で使用した供試体の種類を示す。供試体は、高強度コンクリート HSC および HSC に 2 種類の繊維を混入したものとした。すなわち、①HSC と②PP 繊維を混入した HSC+PP および③ Jute 繊維を混入した HSC+Jute とした。供試体は、幅 100mm×高さ 150mm×長さ 1100mm とし、有効高さ 125mm の位置に主筋として D10(SD345)の鉄筋を 2 本配置した。鉄筋比は 1.1%とした。使用した鉄筋の降伏強度は、379MPa であった。加熱の影響を確認するために、3 種類のはり供試体を作製した。すなわち、①加熱なし(以下、Control)と②圧縮領域加熱(以下、UH)および③引張領域加熱(以下、LH)とした。UH と LH 供試体は、供試体内部の温度を計測するために熱電対をはり中央部に設置した。すなわち、UH は加熱面から 25, 50, 75, 125mm(主筋位置)とした。LH は加熱面から 25(主筋位置), 50, 75mm とした。UH は、主筋位置の温度を測定するために 125mm に熱電対を設置した。LH は、主筋位置(25mm)を含む 75mm 位置までの内部温度を測定した。

2.2 配合及びフレッシュ性状

表-1 に、使用したコンクリートの配合を示す。コンクリートは HSC と HSC+PP および HSC+Jute の 3 種類とした。本試験で使用したコンクリートの配合は、赤坂らが実施したリング拘束供試体加熱試験のコンクリートと同配合とした。W/C は 0.3 とし、セメントの種類は早強ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm³)とした。細骨材は佐野市中町産細目砕砂(S1:吸水率 1.06%, 絶乾密度 2.60g/cm³)と大間々町小平産砕砂(S2:吸水率 1.93%, 絶乾密度 2.68g/cm³)を用いた。粗骨材は大間々町小平産輝緑凝灰岩(G:吸水率 0.94%, 絶乾密度:2.83g/cm³)を使用した。混和剤 Ad は高性能減水剤(ポリカルボン酸系)を使用した。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。表-2 に、コンクリートのフレッシュ性状と力学特性および含水率を示す。強度試験は、φ100mm×L200mm の円柱供試体を 3 本ずつ作製し、材齢 5 カ月時に圧縮強度試験を行った。含水率は φ50mm×L100mm の円柱供試体を 2 本ずつ作製し、105°C で炉乾燥し恒量になるまで乾燥後、質量減少量から算出した。コンクリートの圧縮強度は 100~107MPa の範囲となった。加熱試験時の含水率は 2.95~3.39%mass となった。

2.3 使用した繊維の特性

表-3 に、PP 繊維および Jute 繊維の特性を示す。PP 繊維は、コンクリートに混入すると高温化で熔融し、コンクリート中に空隙を形成するため、水蒸気圧および熱応力を緩和させ、爆裂を抑制できる³⁾。Jute 繊維は、ストロ

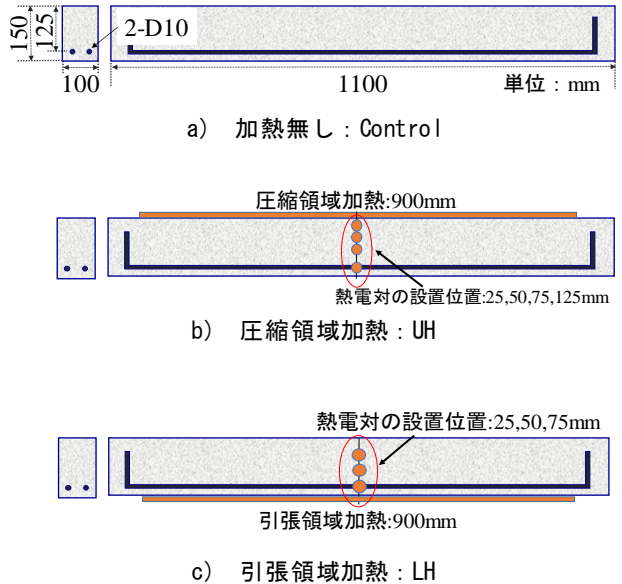


図-1 はり供試体概要

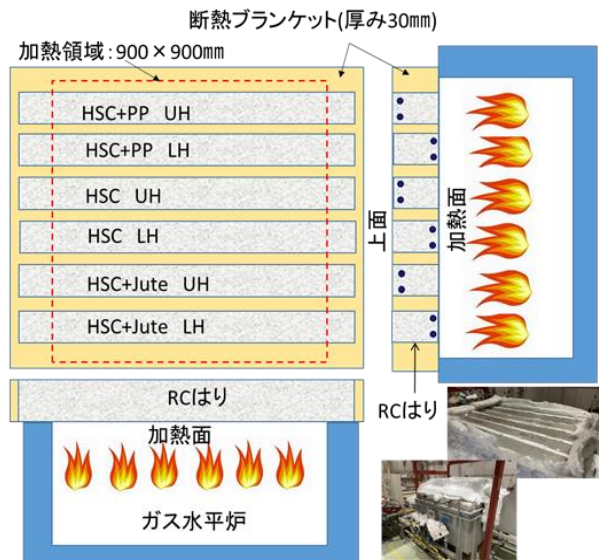


図-2 RC はりの加熱試験

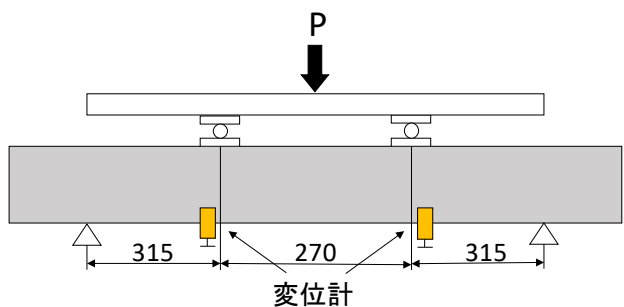


図-3 RC はりの曲げ载荷試験(単位: mm)

一(中空)構造を有していることに加え、高温下で繊維が炭化することにより、蒸気の逸散ネットワークを形成するため、水蒸気圧の低減に繋がり、爆裂抑制効果が期待される⁸⁾。

2.4 RC はりの加熱試験

図-2 に、RC はりの加熱試験の状況を示す。加熱試験時の材齢は 4 カ月とした。本試験では加熱条件として RABT30 加熱曲線を用いた。加熱にはガス水平炉を使用した。ガス水平炉(開口部 900mm×900mm)の上面に、RC はり供試体を設置した。その際、所定の加熱面(圧縮領域または引張領域)の 1 面加熱となるように 6 本を配置した。RC はりの上下面以外の周囲 4 面には断熱用ブランケット(厚み 30mm)を設置した。炉内温度を測定するために、供試体下面から 100mm 位置の炉内に熱電対を 6 本設置した。供試体それぞれ、圧縮領域加熱と引張領域加熱の 2 種類で加熱を行い、加熱面は長さ 900mm×幅 100mm とした。加熱試験中の爆裂状況は、ガス水平炉の小窓から爆裂したコンクリート片の落下状況を目視で観察し、爆裂発生時刻を記録した。加熱試験後、厚み計を用いて爆裂深さを計測した。はりの加熱面を 10mm 四方に分割し、区画された範囲において、非爆裂面からの欠損深さの計測を行った。

2.5 加熱した RC はりの曲げ載荷試験

図-3 に、加熱した RC はりの曲げ載荷試験の概要を示す。載荷スパン L は 900mm とし、せん断スパン a は 315mm とした。RC はり中央部の等モーメント区間は 270mm とし、2 点中央載荷とした。計測項目は、荷重と等モーメント区間の変位とした。荷重の測定には、荷重計(容量 300kN)を用いた。変位は、等モーメント区間両端の計測治具を設置し、ストローク 100mm の変位計を設置し、変位の平均値を算出した。供試体数は、HSC と HSC+PP および HSC+Jute で、それぞれ加熱なし 1 本および加熱あり 2 本とし、合計 9 本とした。

3. 実験結果および考察

3.1 RC はりの爆裂性状

写真-1 に、RC はりの加熱表面の状況を示す。HSC はりの UH の場合は、はり長手方向の隅角部で爆裂が生じ、最大爆裂深さが 34mm となった。これは、加熱に伴い、隅角部で応力が集中することによる Corner spalling が生じたと考えられる。既往の文献¹⁹⁾では、柱やはりの隅角部で Corner spalling を生じることが報告されている。HSC の LH と HSC+PP の LH で一部爆裂が生じ、最大爆裂深さが 6mm 程度となった。その他 HSC+PP の UH と HSC+Jute の UH および LH については爆裂が生じなかったが、加熱面全体に亀甲状のひび割れが生じた。

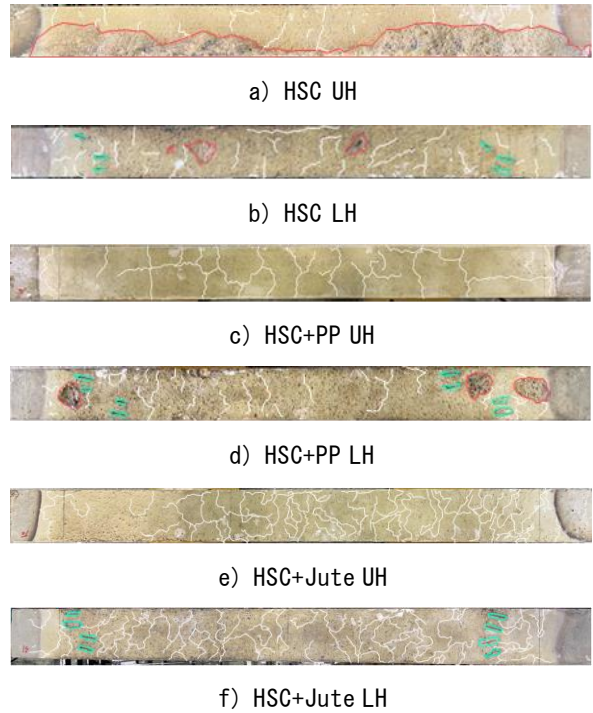


写真-1 RC はりの加熱表面の状況

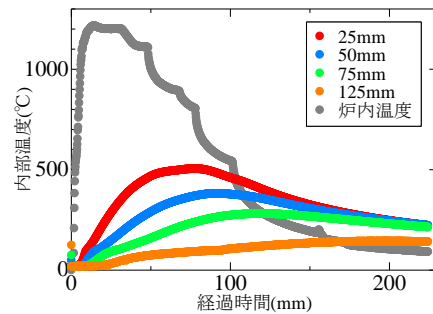


図-4 RC はりの内部温度 (HSC UH)



写真-2 リング拘束供試体加熱試験の爆裂状況⁷⁾

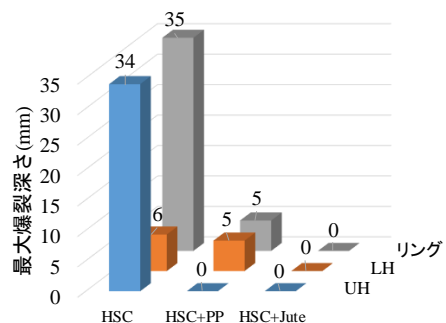


図-5 RC はりとリング拘束供試体の最大爆裂深さ

3.2 RC はりの内部温度の経時変化

図-4 に、RC はり供試体 HSC UH の加熱試験時における内部温度の経時変化を一例として示す。その他の RC はり供試体も、同様な温度計測結果を示した。炉内温度の上昇とともに内部温度も上昇していることがわかる。加熱面から 25mm 位置の温度は、爆裂によるコンクリートの剥離で、熱電対が炉内に曝されて生じる急激な温度上昇はみられなかった。この点について、熱電対は RC はり中央部に設置したが、爆裂箇所は中央部ではなく端部付近で生じたことに起因すると考えられる。

3.3 RC はりとリング拘束供試体の爆裂深さの比較

ここでは、赤坂ら⁷⁾が実施したリング拘束供試体加熱試験の爆裂状況をもとに、RC はりの加熱試験後の加熱面の損傷状況との比較を行った。写真-2 に、リング拘束供試体加熱試験の爆裂状況を示す⁷⁾。写真-2 より、HSC は最大爆裂深さが 35mm であり、加熱面全体が損傷を受けた。一方、HSC+PP は最大爆裂深さが 5mm であり、一部で断面欠損が生じた。HSC+Jute は爆裂が生じず、亀甲状のひび割れが生じた。図-5 に、HSC と HSC+PP および HSC+Jute について、RC はりとリング拘束供試体加熱時の最大爆裂深さを比較したものを示す。HSC の UH の最大爆裂深さは 34mm、LH は 6mm であった。リング拘束供試体の最大爆裂深さは 35mm であったことから、UH とリング拘束供試体の爆裂規模が同程度となった。PP 繊維を混入した UH は爆裂が発生せず、LH の最大爆裂深さは 5mm であった。リング拘束供試体の最大爆裂深さは 5mm であったため、LH とリング拘束供試体の爆裂規模が同程度となった。Jute 繊維を混入したものは、UH と LH およびリング拘束供試体で爆裂が生じず、同様な結果となった。以上より、RC はりとリング拘束供試体の比較では、加熱面の損傷程度が同様な傾向となった。既往の知見においても、RC 柱部材と RC 床板および PC はり部材とリング拘束供試体の爆裂規模の比較を行っている。一方で、拘束条件が爆裂に与える影響を検討するまでには至っていないため、リングと RC はりの加熱時の応力状態を解析する必要がある。

PP 繊維と Jute 繊維を混入することで、RC はりでもリング試験と同様に爆裂を抑制することができた。これについては、各繊維の蒸気圧低減効果が影響したものと考えられる。

次に、RC はりの加熱領域の違いが爆裂に与える影響について考察する。まず、HSC を用いた RC はりについて、UH の爆裂損傷が他と比較して大きい点について考察する。ガス水平炉の小窓から爆裂を確認した際、爆裂は加熱後 4.6min-7.6min の範囲で生じたことを確認している。爆裂損傷が激しいものは HSC の UH であることから、観察した爆裂現象は HSC の UH のものと仮定する。

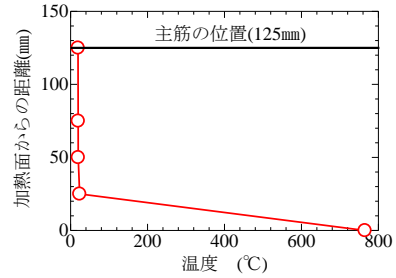


図-6 RC はりの内部温度分布(HSC UH, 4.6min)

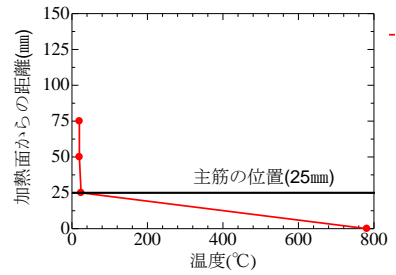
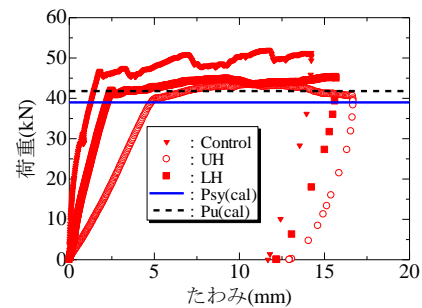
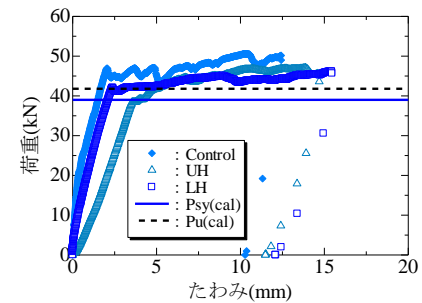


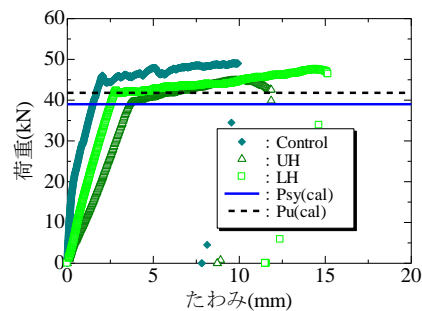
図-7 RC はりの内部温度分布(HSC LH, 4.6min)



a) HSC



b) HSC+PP



c) HSC+Jute

図-8 荷重-たわみ関係



a) UH



b) LH

写真-3 加熱後の RC はりの側面の状況 (HSC)

表-4 RC はり曲げ試験結果 (加熱の有無、繊維の有無)

	Type	Psy(ex)	Psy(cal)	Psy	加熱による	Pu(ex)	Pu(cal)	Pu	加熱による
		kN	kN	実験値/計算値	Psy の 低下率%	kN	kN	実験値/計算値	Pu の 低下率%
HSC	Control	46.7	38.8	1.20	-	52	41.8	1.24	-
	UH	40	38.8	1.03	14	43.4	41.8	1.04	17
	LH	41.8	38.8	1.08	10	45.3	41.8	1.08	13
HSC+PP	Control	46.8	38.8	1.21	-	50.6	41.9	1.21	-
	UH	38.4	38.8	0.99	18	47	41.9	1.12	7
	LH	42	38.8	1.08	10	46.2	41.9	1.10	9
HSC+Jute	Control	46	38.8	1.19	-	49.1	41.9	1.17	-
	UH	39.3	38.8	1.01	15	44.8	41.9	1.07	9
	LH	42.3	38.8	1.09	8	47.6	41.9	1.14	3

図-6 に、HSC の UH 供試体を対象として、爆裂を生じた 4.6min 時の内部温度分布を示す。炉内温度と 25mm 位置の温度は 760℃および 25℃であり、主筋位置 125mm は 19℃程度である。炉内温度と供試体表面温度が等しいと仮定すると、加熱面から 25mm の範囲の温度差は約 735℃であり、加熱面付近のコンクリートは熱膨張変形が生じていると考えられる。一方、主筋位置は 19℃で鉄筋が加熱領域付近の熱膨張を拘束するため、爆裂損傷が大きくなったと考えられる。図-7 に、HSC の LH 供試体について、4.6min 時の内部温度分布を示す。炉内温度と 25mm (主筋位置) の温度は、781℃と 24℃であった。主筋の位置が加熱面に近いため、主筋の温度が上昇し、コンクリートと鉄筋が同様に熱膨張して拘束が緩和されたことで、爆裂損傷が UH と比べ小さくなったと考えられる。今回使用した RC はりは、加熱の影響をシンプルに検討するため、主筋のみの配置とした。今後は、鉄筋比の影響とせん断補強筋を配置したケースについても検討し、鉄筋の拘束が爆裂に与える影響を検討する必要があると考えられる。

以上より、リング拘束供試体と RC はりの最大爆裂深さはおよそ等しくなった。また、RC はり部材においてもリング拘束供試体と同様に、Jute 繊維の爆裂抑制効果を確認することができた。

3.4 曲げ載荷試験結果

図-8 に、RC はりの加熱の有無における曲げ載荷試験結果の荷重-たわみ曲線を示す。併せて、加熱無しの鉄筋

降伏耐力(Psy)と終局耐力(Pu)の計算値を示す。全てのシリーズで曲げ破壊が生じた。Control と比較し、加熱あり (UH, LH) のケースで初期剛性が低下していることがわかる。加熱したはりが加熱無しのはりと比べ初期剛性が大きく低下した要因として、高温作用によるひび割れ発生および弾性係数の低下⁹⁾が挙げられる。また、高温時、コンクリートの強度は大きく低下するため⁹⁾、UH は圧縮領域の圧縮強度は大きく低下したことが RC はりの耐力低下に繋がったと考えられる。LH の場合、高温作用で引張側にひび割れが入ったことで曲げひび割れ発生と同等の条件となり、UH よりも初期剛性の低下が小さかったと考えられる。HSC の UH は、隅角部に爆裂が生じているため(写真-1)、断面欠損が大きく、載荷試験時の圧縮側の分担力が小さくなるため、PP や Jute 繊維を混入したはりと比べ初期剛性が小さくなったと考えられる。写真-3 に、加熱後の HSC の UH 供試体と LH 供試体の側面の状況を示す。加熱領域は褐色に変色し、熱膨張によるひび割れが確認できる。加熱によって初期剛性が低下する点については、既往の知見でも同様な報告がある¹⁰⁾⁻¹²⁾。

表-4 に、RC はりの加熱の有無による曲げ試験結果をまとめたものを示す。すなわち、鉄筋降伏耐力(Psy)と終局耐力(Pu)それぞれの実験値と計算値および実験値/計算値の比と Control を基準とした加熱に伴う耐力の低下率を示す。Psy と Pu とともに実験値/計算値の比は 1.2 程度となり、安全側の評価となった。一方、加熱時の UH と LH

を見てみると 1.0 を切るものが HSC+PP の UH で確認できる。その他は 1.1 以上程度であった。

Psy の加熱に伴う荷重の低下率を見てみると、UH が LH と比べて低下率が大きいことがわかる。Pu の加熱による低下率でも UH が LH より低下率が大きい。特に、HSC は爆裂深さが大きく、圧縮領域のコンクリートの損傷が顕著であるためと考えられる。一方、HSC+PP および HSC+Jute は爆裂抑制繊維を混入することで、加熱によるコンクリートの損傷程度が HSC と比較して抑制できたことから、Pu の低下率が小さかったと考えられる。

4. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 単鉄筋の RC はりの加熱試験結果より、HSC および HSC+PP は爆裂が生じたが、HSC+Jute は爆裂が生じなかった。このことから、RC 部材においても Jute 繊維混入は爆裂抑制効果があると考えられる。
- 2) 材齢 2 カ月のリング拘束供試体と単鉄筋の RC はりの爆裂性状を比較したところ、爆裂の有無および最大爆裂深さが一致した。今後、拘束条件が爆裂に与える影響を検討し、さらにデータを蓄積する必要がある。
- 3) 加熱無しおよび加熱した RC はりの曲げ載荷試験を行った。その結果、加熱した RC はりは加熱無しの RC はりと比べ、耐力および初期剛性が低下した。

謝辞

本研究は、科学技術研究補助金(基盤研究(C)16K06437)の補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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：日本コンクリート工学会，p.66-68，2017.9
- 2) 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
- 3) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.9，pp.87-91，2007

- 4) 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)，Vol.69，No.3，pp.324-336，2013
- 5) Ozawa, M., Tanibe, T., Kamata, R., Uchida, Y., Rokugo, K., Parajuli, S.S.: Behavior of ring-restrained high-performance concrete under extreme heating and development of screening test, Construction and Building Materials, 162, pp.215-228, 2018
- 6) 祐川真紀帆，小澤満津雄，赤坂春風，杉野雄亮：火災時における各種繊維を混入した高強度コンクリートの爆裂性状に与える材齢の影響：リング拘束試験法による検討、コンクリート工学年次論文集，pp.995-1000，Vol.41，No.1，2019
- 7) 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，pp.1029-1034，Vol.40，No.1，2018
- 8) Ozawa, M., Morimoto, H.: Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete, Construction and Building Materials, Vol.71, pp.83-92, 2014
- 9) 構造材料の耐火性ガイドブック：日本建築学会，2017
- 10) 迫井裕樹，小澤満津雄，山本哲，阿久津裕亮：高温加熱を受けた RC はりの損傷評価および耐荷力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1025-1030，Vol.41，No.1，2019
- 11) 原田有：高温を受けた鉄筋コンクリート梁の強度の低減に関する実験的研究（第2報 内部温度不均一の場合-I），日本建築学会論文報告集，第56号，pp.105-108，1956
- 12) 原田有：高温を受けた鉄筋コンクリート梁の強度の低減に関する実験的研究（第3報 引張側から急熱された場合），日本建築学会論文報告集，第66号，pp.149-152，1960