

論文 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

赤坂 春風*1・小澤 満津雄*2・Sirjana Subedi Parajuli*3・杉野 雄亮*4

要旨: 本研究では、異なる 2 種の繊維を用いた高強度コンクリートを対象としてリング拘束供試体の加熱試験を実施し、爆裂抑制効果を検討した。すなわち、爆裂抑制繊維はポリプロピレン繊維と天然の Jute 繊維を用い、加熱曲線は RABT30 加熱曲線とした。計測項目は拘束応力と水蒸気圧および爆裂深さとした。その結果、天然繊維を用いた場合、繊維混入無しと比較して爆裂が生じなかった。また、Jute 繊維を用いた場合、拘束応力の抑制効果が確認できた。

キーワード: 高強度コンクリート, 爆裂, Jute 繊維, PP 繊維, リング拘束供試体, 飽和水蒸気曲線

1. はじめに

高強度コンクリート(以下、HSC)は高層建築物や橋梁、その他の重構造物に広く用いられているが、火災などによる急激な高温作用を受けた場合コンクリートかぶり部分が剥離・剥落する爆裂現象が生じる可能性がある。爆裂現象の発生メカニズムとしては熱応力説や水蒸気圧説、およびその複合説が挙げられるが、未だ確たる結論は得られていない。これまで著者らの研究グループでは、爆裂現象の主要因として挙げられる拘束応力と水蒸気圧を測定する方法として、リング拘束供試体を用いた加熱試験を検討している¹⁾²⁾。この手法は、日本コンクリート工学会の TC154A 委員会で議論がなされ、爆裂現象の配合レベルのスクリーニング試験として提案されている³⁾。爆裂を抑制する方法として、一般的にポリプロピレン(以下、PP)繊維の混入による爆裂抑制方法が多く報告されている⁴⁾。一方で著者らの研究グループでは、資源の有効利用の面から再生可能な天然繊維である Jute 繊維に着目

し、Jute 繊維による爆裂抑制効果について種々の報告を行っている⁵⁾。しかしながら、Jute 繊維による爆裂抑制効果についての報告では、供試体内部温度や水蒸気圧についての検討が主であり、HSC の爆裂抑制効果について拘束力(熱応力)と水蒸気圧を統合的に検討した報告は少ないのが現状である。そこで本研究では、HSC を対象に異なる 2 種の繊維を混入したリング拘束供試体の加熱試験を実施した。すなわち、HSC、HSC+PP、HSC+Jute の 3 種類で加熱試験を実施し①繊維の有無、および②繊維の違いによる爆裂性状の違いを比較した。加えて、拘束応力および水蒸気圧の発現性状が爆裂に与える影響を検討した。加えて、爆裂規模のグレーディングを行った。

2. 実験概要

2.1 リング拘束供試体

図-1 に、本研究で用いたリング拘束供試体の概要を示す。拘束リングは外径 300mm×高さ 50mm×肉厚 8mm

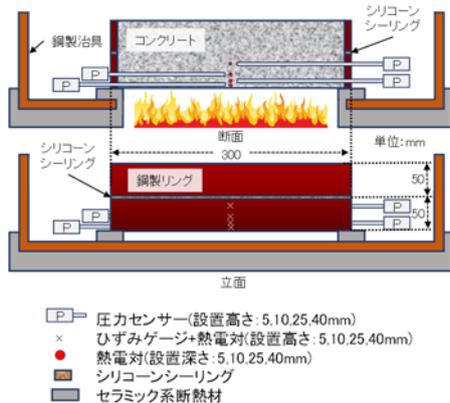


図-1 リング拘束供試体概要

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	4	0	0
HSC+PP								0.9	0
HSC+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 (°C)	圧縮強度 (MPa)	含水率 (%)
HSC	0.9	21.0	27.0	102.0	3.29
HSC+PP	0.8	20.4	27.6	90.2	3.11
HSC+Jute	2.9	20.0	27.7	100.1	3.54

*1 群馬大学理工学部環境創生理工学科 4年(学生会員)

*2 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)

*3 群馬大学大学院 理工学府 環境創生理工学プログラム 修士2年

*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 修士(工学) (正会員)

表-3 使用した繊維の特性

繊維の種類	繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	融点 (°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

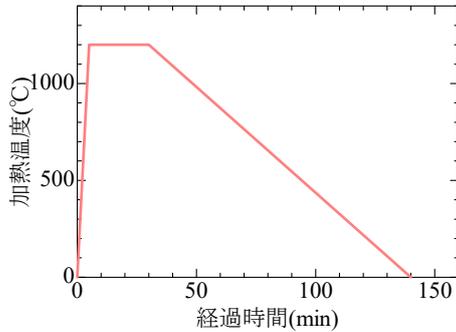


図-3 RABT30 加熱曲線

の鋼製リングを2段重ねにしたものとし、拘束リング内部にコンクリートを充填した。また拘束リングの内部には温度測定用の熱電対を設置した。加えて、水蒸気圧測定用に外径5mm×内径2mm×長さ170mmのステンレスパイプを4本設置した。このステンレスパイプにシリコンオイルを充填した後、圧力センサー(許容値:10MPa)を接続して、水蒸気圧の計測を行った。鋼製リング表面にはひずみゲージと熱電対を対極に設置した。供試体内部の熱電対とステンレスパイプ、および鋼製リング表面のひずみゲージと熱電対の設置位置はいずれも供試体底面から5、10、25、40mmとした。

2.2 配合およびフレッシュ性

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鎌田ら⁶⁾のものと同様にし、HSC、HSC+PP、HSC+Juteの3種類とした。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はポリカルボン酸系の高性能減水剤とした。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。表-2にコンクリートのフレッシュ性状と材齢2ヶ月時における強度特性および含水率を示す。強度試験にはφ100mm×L200mmの円柱供試体を3本ずつ使用し、含水率測定にはφ50mm×L100mmの円柱供試体を各種2本ずつ使用した。測定方法はJIS規格に準拠した。なお、強度試験および含水率測定用供試体は、リング拘束供試体と同様に試験に供するまで封緘養生とし

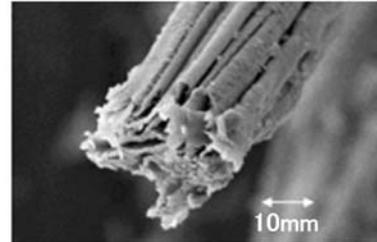


図-2 Jute 繊維の SEM 写真



図-4 ガス水平炉

た。また空気量についてはHSC+Juteのみ大きい値となった。これはJute繊維のストロー構造により空気を巻き込み易いことに起因すると考えられる。空気量は爆裂規模に影響すると考えられるが、今後の検討課題としたい。

2.3 使用した繊維の特性

表-3に、Jute繊維およびPP繊維の特性を示す。本研究ではJute繊維の密度を平均値である1.38g/cm³として、0.1vol%をコンクリートに混入した。図-2に、Jute繊維のSEM写真を示す。Jute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。熱分析により、Jute繊維は360°Cで炭化することが確認されている⁵⁾。また、Jute繊維には炭化に加えPITS(Pressure-induced tangential space)形成などの特徴も挙げられるが、特にストロー構造が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⁷⁾。

2.4 加熱試験

図-3に本研究で用いたRABT30加熱曲線を示す。RABT30加熱曲線は5分間で1200°Cまで升温し25分間保持後、110分間で常温まで徐冷するものである。本試験ではガス水平炉を用いた(図-4)。加熱試験はリング供試体の底面を加熱した。鋼製リング部分は断熱材ブランケットを設置し、リング自体の温度上昇を抑制した。加熱中の爆裂状況の観察は爆裂音の確認およびガス炉の小窓から爆裂によるコンクリート片の落下を確認し、その時の経過時間を記録した。

2.5 拘束応力の算出方法

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。

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

表-4 グレーディング指標

	指標 1：最大爆裂深さ	指標 2：爆裂面積率	指標 3：爆裂容積率
A	爆裂なし，ひび割れなし	爆裂なし，ひび割れなし	爆裂なし，ひび割れなし
B	爆裂はないが， 亀甲状のひび割れあり	爆裂は無いが， 亀甲状のひび割れあり	爆裂は無いが， 亀甲状のひび割れあり
C	10mm 未満	総面積の 10%未満	総容積の 10%未満
D	10～30mm 未満	総面積の 10～50%未満	総容積の 10～20%未満
E	30mm 以上	総面積の 50%以上	総容積の 20%以上

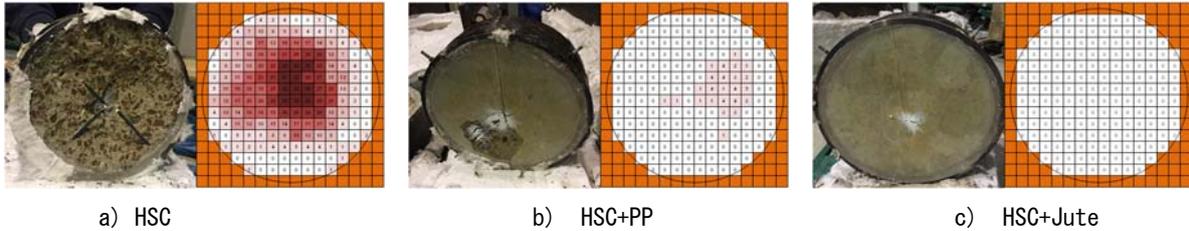


図-5 加熱面状況およびコンター図

表-5 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
HSC	35	80	11	E	E	D
HSC+PP	5	14	0.3	C	D	C
HSC+Jute	0	0	0	B	B	B

σ_{re} : コンクリートに生じる拘束応力(N/mm²)

ε_{θ} : リング円周方向ひずみ

E_s : リング材弾性係数(N/mm²)

t : リング材厚み(mm)

R : リング材内径(mm)

2.6 爆裂規模の評価方法³⁾

加熱試験後の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。表-4 に，爆裂規模のグレーディング指標を示す。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})および爆裂容積率(V_{sp})の算出方法を式(2)，(3)に示す。

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

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

N_i : 欠損深さが 0 より大である測定点数

N : 測定点数

$\sum D_i$: 合計欠損深さ(mm)

H : 供試体高さ(mm)

3. 実験結果および考察

3.1 爆裂性状および爆裂規模の評価

図-5 に，リング拘束供試体の加熱表面状況および爆

裂コンター図を示す。図-5a)より，HSC では加熱面全体で爆裂が生じ，最大爆裂深さは 35mm であった。また図-5b)より，HSC+PP では最大爆裂深さは 5mm であった。一方，図-5c)より，HSC+Jute では爆裂は生じなかった。このことから，Jute 繊維には爆裂抑制効果があると確認できた。表-5 に，各供試体における爆裂規模のグレーディング結果を示す。なお，指標 2 (爆裂面積率) および指標 3 (爆裂容積率) の算出には式(2)(3)を用いた。表-5 より，HSC では加熱表面の 80% で爆裂が生じており，爆裂容積率は 11% で D 評価であった。一方，HSC+PP では加熱表面の 14% で爆裂が生じていたが，爆裂容積率はほぼ 0% であり，C 評価となった。PP 繊維は一部で爆裂が生じているが程度は小さく，爆裂抑制効果が確認できた。これに対し HSC+Jute では加熱表面のひび割れのみで爆裂は発生しておらず，全ての指標で B 評価であった。これより，PP 繊維と比較して Jute 繊維の爆裂抑制効果が非常に高いことが確認できた。

3.2 供試体内部温度の経時変化

図-6 に，各供試体における内部温度の経時変化を示す。図-6a)より，HSC では 5，10，25mm 位置で温度が急上昇している。一方，図-6b)，c)より，最大爆裂深さが 5mm である HSC+PP および爆裂なしの HSC+Jute では

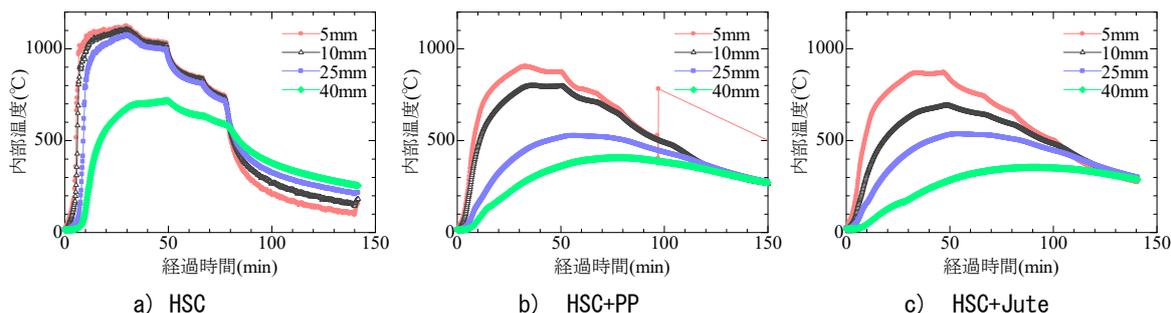


図-6 供試体内部温度

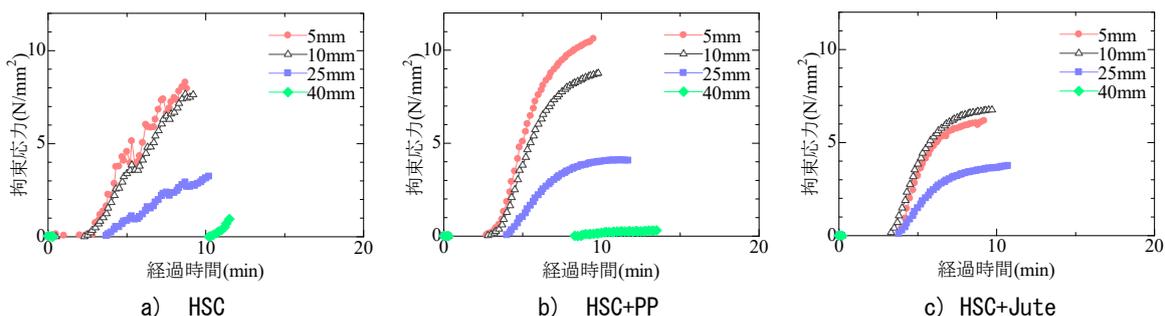


図-7 拘束応力の経時変化

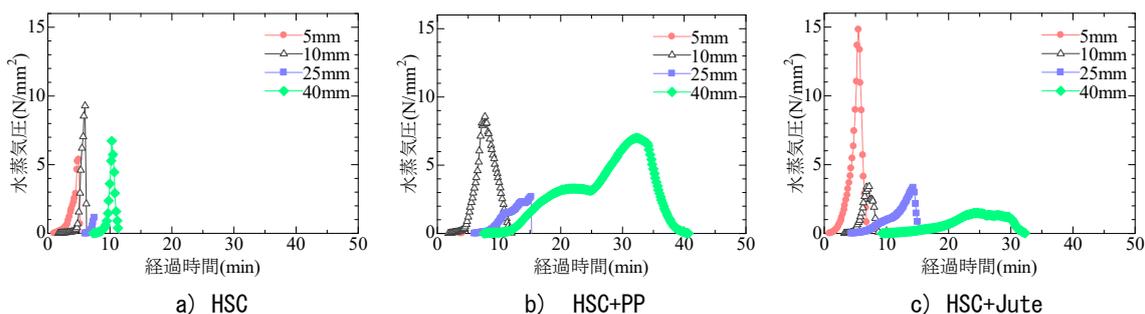


図-8 水蒸気圧の経時変化

温度の急上昇は見られない。これより、供試体内部の急激な温度変化は爆裂によりかぶり部分が剥落し、熱電対が炉内に露出されることで生じると考えられる。

3.3 拘束応力の経時変化

図-7 に、各供試体における拘束応力の経時変化を示す。なお、拘束応力の算出には式(1)を用い、値はひずみゲージの耐熱温度である 80°C までとした。図-7a) より、HSC 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。また図-7a), b) を比較すると、HSC+PP の最大値 10.6MPa に対し HSC の最大値が 8.3MPa と小さいことがわかる。これは HSC が爆裂による微細ひび割れや断面欠損の影響で、拘束応力があまり上昇しなかったことが原因と考えられる。一方、図-7c) より、HSC+Jute における拘束応力の最大値は HSC, HSC+PP と比較し 6.7MPa と小さくなっている。このことから、Jute 繊維には爆裂抑制効果だけでなく拘束応力の緩和効果も期待できる可能性があると考えられる。

3.4 水蒸気圧の経時変化

図-8 に、各供試体における水蒸気圧の経時変化を示

す。水蒸気圧の最大値は HSC, HSC+PP, HSC+Jute でそれぞれ 9.3MPa, 8.6MPa, 14.8MPa となった。コンクリートの含水率(表-2)が高いほど水蒸気圧の最大値も大きいと分かる。図-8a), b) を比較すると、HSC では各深さにおいて水蒸気圧が急上昇・急降下している。HSC+PP では、5mm 位置の水蒸気圧の計測が不調であった。10mm 位置の水蒸気圧は急上昇後、緩やかに低下しているが、これは PP 繊維が溶融することでコンクリート内部に空隙が形成され、水蒸気の逃げ道となり HSC に比べ爆裂が抑制された為と考えられる。一方、図-8c) より、HSC+Jute は HSC, HSC+PP と比べ水蒸気圧が最も大きいが爆裂が生じなかった。これは、Jute 繊維のストロー構造により爆裂が抑制されたものと考えられる。一方で、Jute 繊維の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と考えられる。

3.5 供試体内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係

図-9 に各供試体における拘束応力と内部温度の関係を示す。全体の傾向として、加熱温度が高くなると拘束応力が大きくなるのがわかる。HSC では、5mm と 10mm

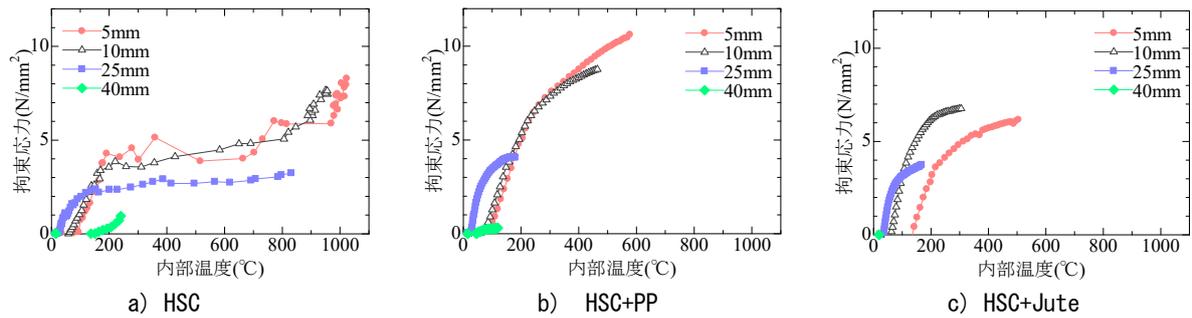


図-9 拘束応力と供試体内部温度の関係

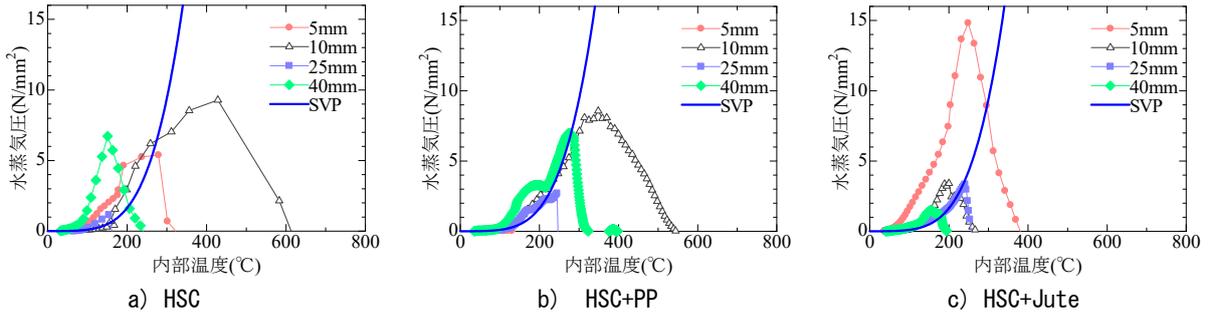


図-10 水蒸気圧と供試体内部温度の関係

位置の拘束応力が 200°C前後で変極点を示し、拘束応力の増加率が緩やかとなっている。これは爆裂の発生によって断面が欠損したこと起因すると考えられる。また HSC+PP および HSC+Jute とともに拘束応力が任意の温度で変極点を示している。これは、加熱に伴う微細ひび割れの発生と水和生成物の熱分解により剛性の低下が影響したと考えられる。

図-10 に水蒸気圧と内部温度の関係を示す。併せて飽和水蒸気圧曲線(以下、SVP)を示す。各供試体ともに加熱に伴い、水蒸気圧の上昇が確認でき、SVP 近傍での変化となっている。

Ichikawa らはコンクリート内部の水蒸気圧と温度変化について、考察を行っている⁸⁾。SVP を境界として左側を過飽和領域(Saturated zone)とし、右側を不飽和領域(Dry Zone)としている。今回の試験結果では、加熱温度の上昇時に SVP から左側の過飽和領域にあり、途中から不飽和領域に移動するケースが多い。この点について、初期の過飽和領域のある点は材齢が 2 ヶ月で含水率が高いことが要因と考えられる。温度の上昇とともに不飽和領域に移動する点については、HSC に生じた微細ひび割れと爆裂が影響したと考えられる。HSC+PP と HSC+Jute については、PP 繊維の熔融や Jute 繊維のストロー構造が影響したと考えられる。

図-11 に、各供試体の 5mm と 10mm 位置における内部温度と拘束応力および水蒸気圧の関係を示す。

図-11a1), b1) より、HSC のケースでは拘束応力が 180°C 付近(5MPa)で変極点を示している。これは前述のように加熱に伴う微細にひび割れの影響によってコンクリート

の剛性の低下が原因と考えられる。一方水蒸気圧は過飽和領域にあり、180°C(5MPa 程度)で横ばいとなっている。その後、拘束応力と水蒸気圧が一定を保ち、300°C付近で最初の爆裂が生じる結果となった。この点について、加熱に伴う拘束応力の上昇と微細ひび割れが発生し、そこに水蒸気圧が作用したことで、爆裂が生じたと考える。また今回、爆裂直前の拘束応力と水蒸気圧が約 5.0MPa 程度であった。10mm 位置では拘束応力が 180°C 付近(4MPa)で一定となり、そこに水蒸気圧が上昇することで、250°C で爆裂が生じたことが確認できた。

図-11a2), b2) より HSC+PP では、5mm 位置の拘束応力が 250°C 付近で傾きが緩やかとなっている。しかし、爆裂は 200°C 付近で生じ、拘束応力の上昇中に生じている。また、水蒸気圧の計測について有意な計測ができなかった。10mm 位置においては、拘束応力の傾きは 200°C 付近で緩やかとなっている。しかし、爆裂は 170°C 付近で生じ、拘束応力の上昇中に生じている。水蒸気圧は 170°C 付近で 2MPa 程度生じている。HSC+PP は PP 繊維の混入率が 0.1vol% であるが、十分な爆裂抑制効果を発揮するのに必要な混入率ではなかったことが考えられる。PP 繊維混入率と爆裂抑制効果については、これまでに種々の報告があり、繊維混入率が少ないと爆裂が抑制できないことが報告されている⁹⁾。この点については、今後更に検討が必要と考えられる。

図-11a3), b3) より、HSC+Jute では 5mm 位置の拘束応力が 200°C(4MPa 程度)で変極点を示している。水蒸気圧は過飽和領域にあるが爆裂が生じなかった。10mm 位置においても、拘束応力が 150°C 付近で横ばいとなり、

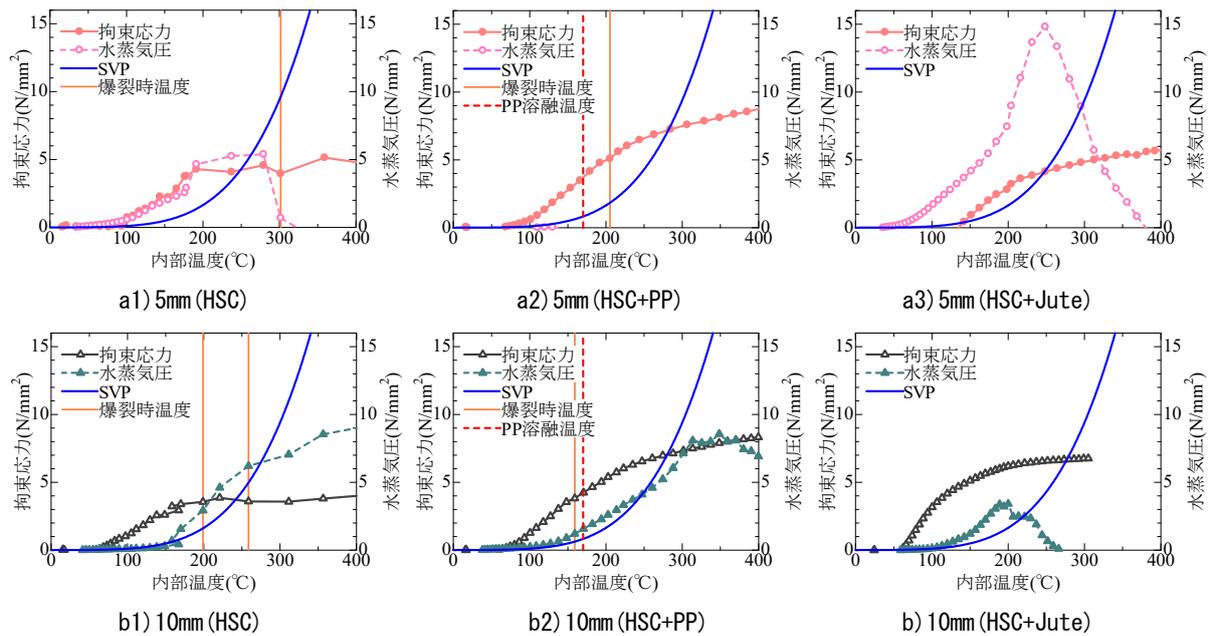


図-11 拘束応力、水蒸気圧と内部温度の関係

その後、水蒸気圧の上昇がみられる。また、水蒸気圧は過飽和領域にあるが、爆裂は生じていない。この点については Jute 繊維のストロー構造に起因していると考えられるが、今後更に検討が必要であると考えられる。

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 HSC+Jute では加熱表面に微細ひび割れが発生したが、爆裂を抑制することができた。
- 2) 加熱試験後の爆裂規模のグレーディングを行った結果、HSC と HSC+PP および HSC+Jute はそれぞれ、E と C および B となった。
- 3) リング拘束加熱試験で得られた拘束応力および水蒸気圧と内部温度の関係より、爆裂が生じる際の拘束応力と水蒸気圧の関係を評価できる可能性がある。

謝辞

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

参考文献

- 1) 谷辺徹, 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, No.1, pp1138-1143, 2012
- 2) 谷辺徹, 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, No.1, pp1135-1140, 2013

- 3) 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, pp.231-252, 2017.9
- 4) 森田武: コンクリートの爆裂とその防止対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.9, pp.87-91, 2007
- 5) 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
- 6) 鎌田亮太, 小澤満津雄, 明石孝太, 谷辺徹: リング拘束試験法における高強度コンクリートの爆裂性状におよぼす養生期間の影響, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp1305-1310, 2016
- 7) Mitsuo Ozawa, Hiroaki Morimoto: Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete, Construction and Building Materials, Vol.71, pp.83-92, 2014
- 8) Y. Ichikawa, G.L. England: Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperature, Nuclear Engineering and Design, Vol.228, Issues 1-3, pp.245-259, 2004
- 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, No.2, pp.151-156, 2007