

論文 簡易型リング拘束加熱試験による耐熱性断面補修材の爆裂評価

武井 祐哉*1・富山 隆彦*2・福井 拓也*3・小澤 満津雄*4

要旨：本研究では、耐熱性断面補修材(受熱温度 300℃以下における耐熱性を有する補修用モルタル)を対象として、小型円筒型電気炉を用いたリング拘束加熱試験による爆裂評価を行った。供試体の寸法は外径 300mm×高さ 50mm×厚さ 8mm の鋼製リングを用い、モルタルを充填した。爆裂抑制繊維は天然の Jute 繊維を用いた。繊維の混入率は 0.1～0.2vol%とした。加熱には小型円筒形電気炉を用いた。加熱は炉内温度 850℃一定とした。その結果、繊維混入なしでは爆裂が生じたが、Jute 繊維を混入したケースでは、爆裂を生じなかった。

キーワード：補修用モルタル, 爆裂, Jute 繊維, リング拘束供試体, 水蒸気圧, 拘束応力

1. はじめに

社会資本の老朽化に伴い、劣化した鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物が増加している。劣化した RC 構造物の断面修復には、補修用モルタルが用いられる。補修された RC 構造物が火災を受けると、コンクリートと同様に爆裂現象を生じる危険性がある。コンクリートの爆裂発生メカニズムは熱応力説、水蒸気圧説およびそれらの複合説が挙げられる¹⁾。既往の研究では、モルタルの爆裂評価として小型の円柱および角柱供試体を温度一定の電気炉を用いた投げ込み試験を実施している²⁾。この方法では、無拘束における爆裂の有無を評価したものである。実構造物では、拘束を受けた状態で火災を受けるため、爆裂評価として適切とは言い難い。一方、日本コンクリート工学会では、小型の拘束供試体を用いた爆裂試験法が基準化され、本研究グループで検討を進めているリング拘束加熱試験もその一部として組み込まれている³⁾。既往の研究において、リング拘束供試体加熱試験の検討事例が報告されている⁴⁾。リング拘束加熱試験を用いて Jute 繊維を高強度コンクリートに混入し爆裂抑制を確認しているが⁵⁾、補修用モルタルへの適用性は検討されていない。加えて、より簡易にリング拘束加熱試験を実

施する方法については、十分な検討がなされていない。

一方、本研究グループでは、300℃以下の適用範囲で利用できる耐熱性断面修復材(以下、HRM)の開発を進めている。しかしながら、300℃以上の温度でも適用できるかを検討していない。以上のことから、本研究では簡易的に HRM の爆裂を評価する方法を検討するために、小型円筒型電気炉を用いたリング拘束試験の検討を行った。対象は耐熱性断面修復材とした。すなわち、繊維無混入および Jute 繊維を 0.1, 0.2vol%混入した 3 種類のリング拘束供試体を作成し、加熱試験を実施した。併せて、内部温度と水蒸気圧および拘束応力の計測、爆裂規模のグレーディング評価を実施した。

2. 実験概要

2.1 配合

表－1 に本研究で用いた HRM の配合を示す。W/B は 38.7%とした。セメントは普通セメントを使用し、混和材として高炉スラグ微粉末を使用した。混和剤は、高性能 AE 減水剤を使用した。爆裂抑制繊維には Jute 繊維を使用した。混入率は 0.1 と 0.2vol%とした。Jute 繊維は繊維長 12mm、繊維径 50μm である。植物繊維のため、スト

表－1 HRM の配合

供試体	W/B	S/B	単位量 (kg/m ³)					Jute 繊維
	(%)		水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	化学混和剤	(Vol %)
			W	C	BFS	S	Ad.	
Control	38.7	2.5	198	399	112	1425	3.7	0
Jute0.1							5	0.1
Jute0.2								0.2

*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 環境創生理工学プログラム 修士1年(学生会員)

*3 (株)ケミカル工事 技術開発部(正会員)

*4 群馬大学大学院 理工学府 物質環境類 土木環境プログラム 教授(正会員)

表-2 材料特性

	フロー値	練り上がり温度	圧縮強度	含水率
種類	(mm)	(°C)	(MPa)	%wt
Control	179.5	26.7	68.4	/
Jute0.1%	187.5	19.8	56.1	7.1
Jute0.2%	178.5	19.7	45.5	7.1

表-3 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	爆裂無し、ひび割れ無し	爆裂無し、ひび割れ無し	爆裂無し、ひび割れ無し
B	爆裂はないが、 亀甲上のひび割れあり	爆裂はないが、 亀甲上のひび割れあり	爆裂はないが、 亀甲上のひび割れあり
C	10mm未満	総面積の10%未満	総容積率の10%未満
D	10~30mm未満	総面積の10~50%未満	総容積率の10~20%未満
E	30mm以上	総面積の50%以上	総容積率の20%以上

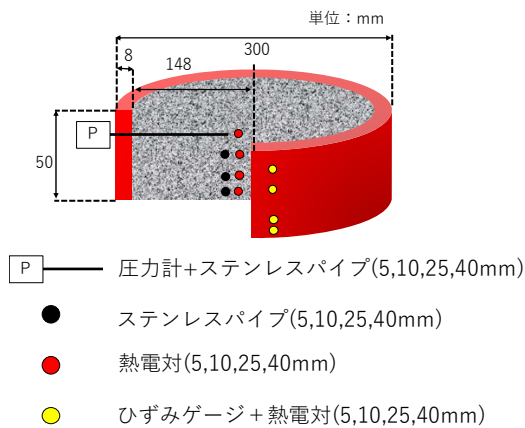


図-1 リング拘束供試体概要

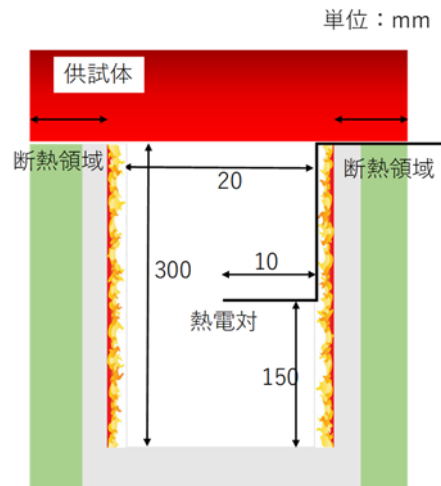


図-2 加熱試験装置（円筒型電気炉）

ロー（中空）構造を有し、加熱時に蒸気圧逸散ネットワークを形成することによって水蒸気圧の低減効果が期待できるとされている⁶⁾。繊維の混入率に応じて、混和剤の量を調整した。フレッシュ性状及び強度特性を表-2に示す。繊維の混入率が大きくなるとフロー値は低下した。圧縮強度は繊維の混入率が大きくなると低下する傾向が確認できた。また、Control 供試体の含水率については測定不備のため割愛する。

2.2 リング拘束供試体概要

図-1 に本研究で用いたリング拘束供試体概要を示す。拘束リングは外径 300mm×高さ 50mm×厚さ 8mm の鋼製リングを使用した。測定項目は内部温度と水蒸気圧および拘束応力とした。供試体内部には K 型熱電対と水蒸気圧測定用のステンレスパイプを加熱面から 5, 10, 25, 40mm 位置に設定した。供試体の作製は下記のとおりである。①上述のリングを型枠に固定し、所定の HRM を

練り混ぜて打設した。打設から 1 日経過後に、型枠を外し、ビニール袋に入れて封緘養生を 1 か月実施した。加熱試験の直前にリング側面の対局に熱電対とひずみゲージ（温度限界：80°C）を加熱面から 5, 10, 25, 40mm 位置に設定した。ステンレスパイプと圧力計を接続し、パイプの中にシリコンオイルを充填して圧力伝達媒体とし、加熱中に生じる水蒸気圧を測定した。

2.3 加熱試験

図-2 に加熱試験装置の概要を示す。加熱試験では、円筒型電気炉を使用した。電気炉の開口部はφ200mmである。また、電力は単相 200V1.8KW、最高温度は 1150°C である。リング供試体を電気炉の開口部にセットすることで加熱を実施した。以下に加熱試験の方法を示す。①炉内温度を 850°C 一定に設定する。②リングの側面にひずみゲージと熱電対を貼付する。③リング供試体のステンレスパイプに圧力計を接続し、水蒸気圧を測定できる



a) Control

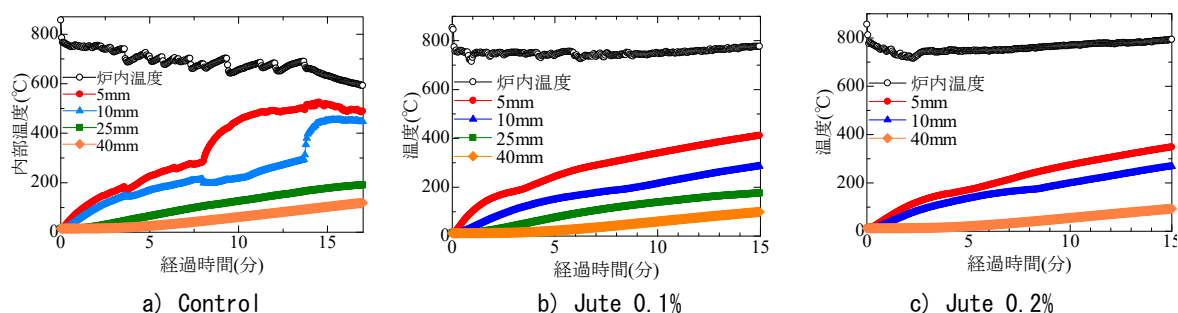
b) Jute 0.1%

c) Jute 0.2%

図-3 各供試体の加熱面の性状

表-4 グレーディング実施結果

	No	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
control	1	12	78	9.1	D	E	C
jute0.1%	1	0	0	0	B	B	B
jute0.2%	1	0	0	0	B	B	B



a) Control

b) Jute 0.1%

c) Jute 0.2%

図-4 各供試体における内部温度と炉内温度の経時変化

状態にする。④その後、リング供試体をクレーンで吊り上げ、電気炉の上部に移動させ待機させる。⑤電気炉の上蓋を開け、リング供試体を開口部にセットする。電気炉に設置した時間を加熱開始時間とした。従来法では、供試体をガス炉にセットしたあと、炉内温度を所定の温度曲線に従って昇温することで爆裂試験を実施する方法が一般的であるが、本実験では予め電気炉を所定の温度に加熱しておき、供試体をセットする方法を選定した。加熱時間は 15 分とした。加熱試験中は爆裂時に発生する破裂音を確認することで、爆裂発生時間を記録した。なお、850℃に設定した理由として、事前検討で、予備供試体が爆裂を生じたことより判断した。

2.4 拘束応力

加熱中に生じる拘束応力は、薄肉円筒理論から式(1)より算出した。加熱面から高さ方向に設置したひずみゲージの測定値より、拘束応力を算出した。

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

σ_{re} : コンクリートに生じる拘束応力(N/mm²)

ε_{θ} : リング材の円周方向ひずみ

E_s : リング材の弾性係数(N/mm²)

t : リング材の厚み(mm)

R : リング内半径(mm)

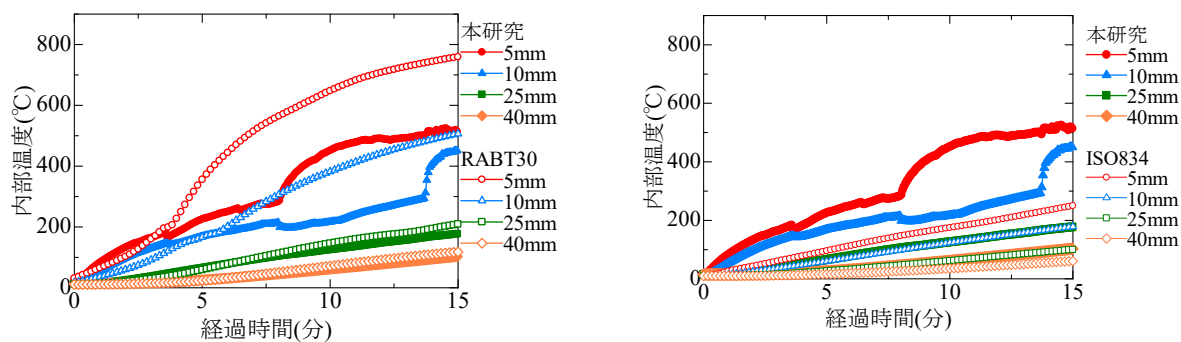
2.5 爆裂規模の評価方法

表-3 に爆裂規模のグレーディング指標を示す。本研究では爆裂規模のグレーディング評価を、日本コンクリート工学会の規準に基づき実施した³⁾。測定間隔については加熱範囲を 10mm メッシュで分割した時の各メッシュの交点とした。爆裂規模は、指標 1 : 最大爆裂深さ、指標 2 : 爆裂面積率、指標 3 : 爆裂容積率とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 各供試体の加熱面の状況

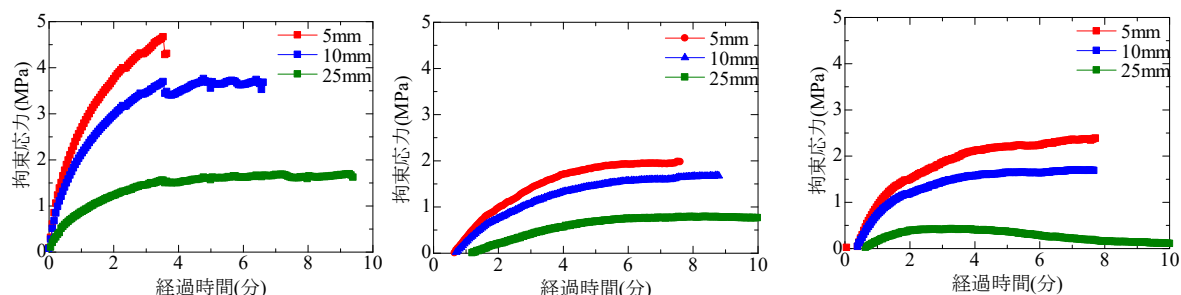
図-3 に各供試体の加熱面の状況の一例を示す。Control 供試体は加熱面全体で爆裂が生じ、最大爆裂深さ



a) RABT30 加熱曲線との比較

b) ISO834 加熱曲線との比較

図-5 内部温度の経時変化(既往の研究との比較)



a) Control

b) Jute 0.1%

c) Jute 0.2%

図-6 拘束応力の経時変化

が 12mm となった。Jute 繊維を混入した供試体は混入率が 0.1vol% と 0.2vol% とともに爆裂を生じることはなかった。加熱面には亀甲上のひび割れが確認できた。表-4 に爆裂規模のグレーディング評価結果を示す。

表より、Control 供試体では指標 1：最大爆裂深さが D となり、指標 2：爆裂面積率は E であった。なお、爆裂面積率は加熱領域 $\phi 200\text{mm}$ の面積を基準とした。指標 3：爆裂容積率は C という結果となった。また、Jute 繊維を混入した供試体では混入率によらず、すべての指標が B となった。これは加熱面に亀甲状のひび割れが生じたためである。

3.2 内部温度の経時変化

図-4 に各供試体の内部温度と炉内温度の経時変化の一例を示す。全体の傾向を見ると、底面を加熱することで、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。Control 供試体は、加熱開始後 2 分から爆裂が発生しはじめ、13 分 30 秒まで継続した。炉内の温度は供試体を設置後、小刻みに温度変化を生じているが、全体的には緩やかに低下している。これは爆裂時にモルタル中の水分が急激に蒸発するためと考えられる。一方、Jute 繊維混入供試体においても、加熱中に生じるひび割れからの水分の蒸発によって炉内温度の低下が確認できたが、Control 供試体よりもその程度は小さかった。

次に 5mm 位置と 10mm 位置の温度がそれぞれ、7 分 50 秒と、13 分 30 秒で急激な温度上昇を生じている。こ

れは、爆裂が生じたことにより熱電対が直接炉内に曝され、直接加熱を受けたことによるものと考えられる。

Jute 繊維を混入した供試体では爆裂が生じなかったため、緩やかに温度が上昇していることがわかる。また、繊維混入率が 0.1vol% と 0.2vol% で 5mm 位置の 15 分における最高温度に差異が生じた。蒸発潜熱の影響は Jute 繊維を混入した供試体でも確認できたものの、それ以上に爆裂時にモルタル中の水分が急激に蒸発する影響のほうが大きいので Jute 繊維を混入した供試体では温度の大きな低下はみられなかったと考える。

次に、本実験の加熱方法の適用性を検討するために、本研究の結果と、ガス炉により RABT30 と ISO834 加熱曲線で加熱したリング加熱試験の内部温度の計測結果を比較した。比較対象はリング拘束加熱試験として、橋田ら⁷⁾と杉野ら⁸⁾の結果を参考にした。使用したリング供試体は外径 300mm×厚さ 8mm×高さ 100mm とした。橋田らの供試体は、50MPa のコンクリートで含水率は 4.0% で Jute0.1vol% 混入である。杉野らの供試体は、44.1MPa の普通セメントモルタル(NCM)で含水率は 6.2% である。本研究では供試体の高さが 50mm であり、比較対象と熱容量に差異があることを記載しておく。

図-5 に本研究の Control 供試体と RABT30 加熱曲線および ISO834 加熱曲線で加熱した供試体内部の温度変化の比較を示す⁷⁾⁸⁾。本研究では、850℃一定に熱した電気炉の上面に供試体を設置したが、5mm 位置と 10mm 位

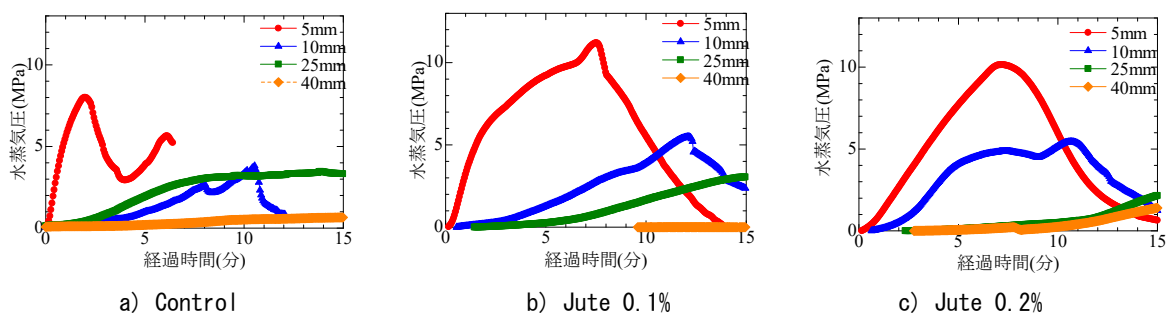


図-7 水蒸気圧の経時変化

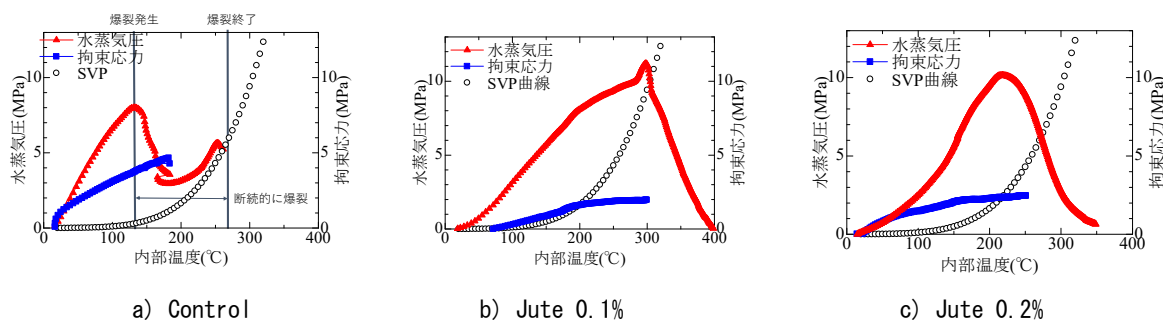


図-8 拘束応力及び水蒸気圧と内部温度の関係(加熱面から 5mm 位置)

置で、それぞれ加熱から 4 分と 6 分まで RABT30 加熱曲線よりも、昇温速度が速いことがわかる。5mm 位置の温度は 4 分以降で、電気炉の方が昇温速度は小さいことがわかる。次に、ISO834 加熱曲線で加熱を行ったものと比較すると、本研究の加熱試験方法による結果で、すべての位置において内部温度は昇温速度が早いことがわかる。すなわち、すでにリング拘束加熱試験で用いられている加熱曲線と同様の加熱を実施することが可能であると考えられる。前述のように、供試体の高さや含水率など、熱容量に違いはあるが、Control 供試体は爆裂が生じ、Jute 繊維を混入した供試体では爆裂が生じなかったことから、爆裂評価に対して有効であることを示すと考えられる。

3.4 拘束応力の経時変化

図-6 に各シリーズの拘束応力の経時変化を示す。拘束応力はリングの温度が 80℃以下の範囲で算出した。全体の傾向として、供試体の内部温度が上昇するとともに、拘束応力が大きくなっていることがわかる。Control 供試体に着目すると 5mm と 10mm 位置において爆裂の影響による拘束応力の増減が確認できた⁵⁾。Jute 繊維を混入した供試体の拘束応力は Control 供試体と比較して小さい結果となった。これは、Control 供試体と比較して、Jute 繊維を混入した供試体の圧縮強度が小さく、剛性が低いこと推察される。

3.5 水蒸気圧の経時変化

図-7 に各ケースにおける水蒸気圧の経時変化を示す。全体の傾向に注目すると、概ね加熱面に近い 5mm 位置から水蒸気圧が上昇していることがわかる。これは、モ

ルタルマトリックス中の水分が高温に加熱されることで水蒸気圧が上昇していることを示すものである。水蒸気圧の最大値に着目すると、Control 供試体と Jute0.1vol% と Jute0.2vol%それぞれにおいて、8MPa と 12MPa および 11MPa となり、Control 供試体の値が小さかった。これは、爆裂の発生により、水蒸気圧が抜けたことが影響していると考えられる。Jute 繊維を混入したケースでは、既往の研究でも繊維混入無と比較して水蒸気圧が高くなる傾向を示した⁵⁾⁷⁾。

3.6 拘束応力および水蒸気圧と内部温度の関係

図-8 に 5mm 位置における各供試体の拘束応力および水蒸気圧と温度の関係を示す。併せて、飽和水蒸気圧曲線(以下、SVP)を示す。

Control 供試体では爆裂発生時の温度も併せて示す。まず、Control 供試体に着目すると、拘束応力は加熱に伴い増加していることがわかる。水蒸気圧も増加し、140℃付近で低下している。爆裂は、140℃から断続的に発生し始めた。その際に、水蒸気圧の低下が生じる結果となった。

一方、Jute0.1vol%供試体と Jute0.2vol%供試体では、拘束応力の最大値は Control と比較して、2～3MPa の範囲で小さい。また、途中から拘束応力が停滞する傾向を示した。一方、水蒸気圧は Control よりも高いことがわかる。しかし、水蒸気圧は高いが爆裂は生じていない。

Ichikawa らによると SVP 曲線を境に左側を過飽和領域、右側を不飽和領域としている⁹⁾。加熱面から 5mm 位置の水蒸気圧は最大値までは過飽和領域にある。この点について、供試体の含水率が高いことが理由として考えられる。

3.7 Jute 繊維の爆裂抑制効果

ここで、Jute 繊維の爆裂抑制効果について考察する。本研究グループでは、引張ひずみ破壊と水蒸気圧を考慮した爆裂モデルを提案している¹⁰⁾。このモデルでは、加熱に伴う拘束応力によって、リング供試体の高さ方向に引張ひずみが生じ、層状ひび割れが発生する。層状ひび割れの部分に、水蒸気圧が作用して爆裂が生じると考えている。Jute 繊維を混入したケースでは、ある温度から拘束応力が停滞する領域が確認できるが、これは Jute 繊維が加熱により熱劣化することで、拘束応力の緩和効果が生じると考えられる。Jute 繊維は親水性のため、練り混ぜ時に水分をストロー構造に保水すると考えられる。ストロー構造の保有水の部分が、加熱によって蒸発し水蒸気圧の増加分に寄与していると考ええる。既報より、Jute 繊維の熱分析の結果から、50℃付近で繊維の脱水による質量変化も生じるとされている⁹⁾。加えて、Jute 繊維は練り混ぜ時に空気を巻き込むため、繊維周辺に気泡の領域ができるとされている¹¹⁾。この気泡の応力緩和も考えられる。加熱に伴うセメントマトリックスと Jute 繊維の熱膨張の差異により、付着切れが生じる(PITS 効果)。これらの効果によって、水蒸気圧は高くなるが、爆裂を抑制できると考えられるが、今後更に検討を進める必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 円筒型電気炉と加熱方法を考慮することで、簡易型リング拘束加熱試験によるセメント系材料の爆裂評価方法を提案した。内部の温度上昇は、加熱初期で、RABT30 加熱曲線よりも早くなる傾向を示した。
- 2) 簡易型リング拘束加熱試験をセメント系材料に適用することで、火災時の爆裂評価を実施できることがわかった。
- 3) HRM を 850℃一定で加熱実験を実施した結果、爆裂現象が生じた。一方、Jute 繊維を混入した供試体は混入率が 0.1vol%、0.2vol%ともに爆裂を生じることとはなかった。HRM に Jute 繊維を 0.1vol%以上混入することで 300℃以上の高温環境下においても使用できる可能性を示すことができた。
- 4) 水蒸気圧は、繊維無混入供試体で爆裂の発生により水蒸気が抜けるため、Jute 繊維混入供試体よりも低い結果となった。これは、既往研究と同様の結果であった。

謝辞

本研究の実施にあたり、科学技術研究補助金(基盤研究 C : 19K04546) と鹿島学術振興財団の補助を受けて実施

した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 濱崎仁，鹿毛忠継，荻原一郎，吉田正志，茂木武，根本かおり：鉄筋コンクリート造建築物のかぶり厚さ確保に関する研究，建築研究所，No147，2013.3
- 3) 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
- 4) 杉野雄亮，谷辺徹，高間孝一郎，小澤満津雄：火災時における補修用モルタルの爆裂性状評価手法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp1035-1040，2018
- 5) 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，No.1，pp.1029-1034，2018
- 6) 小澤満津雄，森本博昭：高温環境下におけ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，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
- 7) 橋田美知花，池谷拓由紀，藤本謙太郎，小澤満津雄：火災時における天然繊維混入 PC はりの爆裂抑制効果，コンクリート工学年次論文集，vol.43，No.1，pp730-735，2021
- 8) 杉野雄亮，祐川真紀帆，谷辺徹，小澤満津雄：リング拘束下にあるアクリル系ポリマーセメントモルタルのポリマー高添加領域における高温下の爆裂性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.893-898，2020
- 9) 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
- 10) M.Ozawa, K.Fujimoto, H.Ikeya : Comparison of fire spalling behaviours between ring-restraint and pre-stressed concrete specimens during fire, Cement and Concrete Composites, Vol.126, February 2022, 104341
- 11) Dong Zhang, Kang Hai Tan, Aravind Dasari, Yiwei Weng: Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 109, May 2020, 10351