

# 論文 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

杉野 雄亮\*1・谷辺 徹\*2・高間 孝一郎\*3・小澤 満津雄\*4

**要旨：**火災時における補修用モルタルの爆裂性状をリング拘束加熱試験と簡易加熱試験により評価した。補修用モルタルは普通モルタル（NCM）とポリマーセメントモルタル（PCM）とした。リング拘束加熱試験では、加熱曲線は RABT30 と ISO834 の 60 分加熱とした。簡易加熱試験では 800℃一定値で 20 分加熱した。その結果、NCM でリング拘束供試体を作製し RABT30 で加熱した場合に爆裂が生じたが、他のケースで爆裂は生じなかった。NCM のリング拘束供試体の RABT30 加熱を対象にコンクリートの熱間データを適用して引張ひずみ破壊指数による爆裂深さの推定を行った結果、実験値をよく推定できていることが確認された。

**キーワード：**火害、爆裂性状、補修用モルタル、ポリマー、リング拘束加熱試験、熱応力、水蒸気圧

## 1. はじめに

プレミックスタイプの補修用モルタルは、施工性の良さから RC 構造物の断面修復材としての使用されることが多い<sup>1)</sup>。特に、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）は下地コンクリートとの付着性向上を目的としてポリマーが混入されている。しかし、ポリマー含有量が多くなると火災時に爆裂が生じる危険性が指摘されている<sup>2)</sup>。これまで、ポリマーセメントモルタルの高温特性や耐火性に関する様々な研究が行われている。濱崎らが、PCM を対象として寸法 φ50×100mm の円柱供試体を用い 800℃ の一定温度で 20 分加熱する方法を提案している<sup>3)</sup>。しかし、この方法では、無拘束条件下での爆裂性状を評価するにとどまっている。その他、補修モルタルで補修した模擬 RC 実部材の加熱試験を実施した例もあるが、最終的な性能確認試験としての位置付けであると考えられる<sup>4)</sup>。一方、日本コンクリート工学会の「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：TC154A」ではコンクリートの爆裂性評価法の検討を行い、委員会法のひとつとしてリング拘束加熱試験法を提案している<sup>5)</sup>。この手法は、一定の拘束条件下で爆裂に起因する熱応力と水蒸気圧を測定し、爆裂深さを評価できる点の特徴である。以上のことから、本研究では、火災時

における補修用モルタルの爆裂評価手法提案のために基礎資料を得るため、JCI TC154A で提案されたリング拘束加熱試験と簡易加熱試験を実施して爆裂性状を比較した。リング拘束加熱試験では拘束応力と水蒸気圧を測定し、爆裂深さの経時変化を求めた。加えて、引張ひずみ破壊基準を用いて爆裂深さを評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験のフロー

図-1 に実験のフローを、表-1 に試験水準を示す。爆裂性状の評価は、モルタルの打設から 2 ヶ月が経過した時点で簡易加熱試験とリング拘束加熱試験の 2 種類を実施した。簡易加熱試験は濱崎らの試験方法を参考にした<sup>3)</sup>。爆裂状況の確認では簡易加熱試験とリング拘束加熱試験の加熱面を比較した。爆裂深さは、リング拘束加熱試験の拘束応力から推定される爆裂深さと実際の爆裂現象を比較して検証した。さらに、引張ひずみ破壊基準による評価により、材料および加熱条件が爆裂性状に与える影響を評価した。

### 2.2 使用材料

普通セメントモルタル（以下、NCM）は、砂セメント

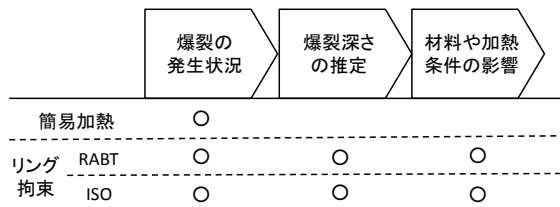


図-1 実験のフロー

表-1 試験水準

水準	記号	材料	試験方法	加熱条件
1	NS	NCM	簡易加熱	800℃
2	PS	PCM		一定値
3	NR	NCM	リング拘束加熱	RABT30
4	NI	NCM		ISO60
5	PR	PCM		RABT30
6	PI	PCM		ISO60

\*1 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 修士(工学) (正会員)

\*2 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 博士(工学) (正会員)

\*3 群馬大学 工学部環境創生理工学科 (非会員)

\*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)

比（以下、S/C）3.0、水セメント比 50%の配合とした。他方、PCM は、市販されている製品から、濱崎らの研究のなかで提案されている「かぶり厚さ確保のための補修材料・工法選定マニュアル（案）」の要求性能を満たす材料を選定して用いた<sup>3)</sup>。表-2 にマニュアルの耐火性能に関する要求性能を示す。表-3 にモルタルのフレッシュ性状および強度特性を示す。モルタルの打設時は暑中であったため、事前の配合調整により充填に必要な流動性を確保し、打設後は湿布養生した。表中の含水率は、供試体が恒量になるまで 105°C の炉内で乾燥させ、加熱前の供試体質量との差から求めた。NCM と PCM の強度特性は同じレベルであることが分かる。また、PCM には 0.1vol%ほど繊維が含まれており、IR 分析によりナイロン繊維であると推定された。

### 2.3 爆裂性状評価試験

#### (1) 簡易加熱試験

Φ50×100mm の供試体を 800°C の電気炉に投げ込み、

表-2 耐火性に関する要求性能<sup>3)</sup>

試験項目	試験方法	規準値
発熱性	ISO 5660-1	不燃材料の要件を満たす。
耐爆裂性	壁部材の耐火試験	損傷区分による評価で状態 I, II, III（剥落無し～表層のみ爆裂）かつ遮熱性がある。
荷重支持性能	載荷加熱試験	部材として必要な耐火時間を有する。

表-3 材料特性

材齢	項目	NCM	PCM
練り直後	フロー(mm)	154	172
	空気量(%)	10.6	8.0
	温度(°C)	30.6	28.1
加熱試験時	圧縮強度(MPa)	46.0	56.9
	引張強度(MPa)	2.3	1.9
	弾性係数(GPa)	26.0	27.3
	ポアソン比	0.18	0.22
	含水率(%)	6.3	9.5

20分経過して取り出した。1水準につき n 数を 3 とした。爆裂の状態は取り出した試験体を目視観察して確認した。

#### (2) リング拘束加熱試験

リングの形状や測定方法は、「コンクリートの爆裂試験方法—リング拘束供試体編（試案）」を参考とした<sup>5)</sup>。n 数は 1 とした。図-2 に供試体の形状寸法を示す。鋼製リングは、寸法 300×50×8mm（外径×高さ×厚さ）のリングを 2 段重ねにしてシリコンシーリングで一体化した。水蒸気圧の測定用パイプは、打設前にリング外側から加熱面に対して 5,10,25,40mm の深さで試験体中央部まで差し込んだ。パイプは深さ方向の温度勾配を考慮して加熱面と平行に設置した。また、水蒸気圧の測定感度を上げるため、加熱前にシリコンオイルをパイプ内に注入して充填し、0.05MPa 以上圧力をかけた状態で加熱を始めた。試験体内部温度は、K 型熱電対を埋め込み、試験体中心部の深さ 5,10,25,40mm の位置にて測定した。リングのひずみは自己温度補償型の常通用ゲージにより測定し、ゲージ付近に熱電対を設置してリングの温度を測定した。リング材のひずみと温度は、深さ 5,10,25,40mm の位置にて測定した。加熱曲線は RABT30 と ISO834 標準加熱曲線で 60 分加熱とした。図-3 に加熱曲線と炉内温度を示す。

#### 2.4 拘束応力の計算方法

拘束応力の測定は、「付属書 A（参考）コンクリートの爆裂試験における拘束応力測定方法」を参考とした<sup>5)</sup>。式(1)に拘束応力の算出方法を示す。また、リングひずみは熱応力と水蒸気圧の和となるが、コンクリートの評価

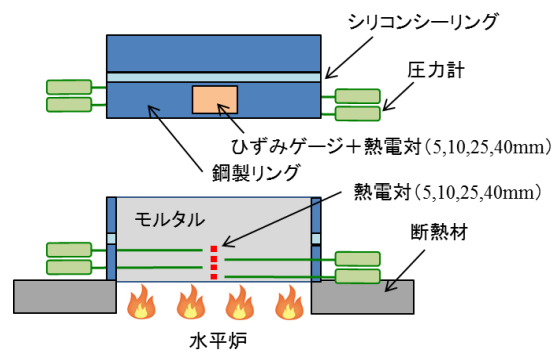


図-2 リング拘束供試体

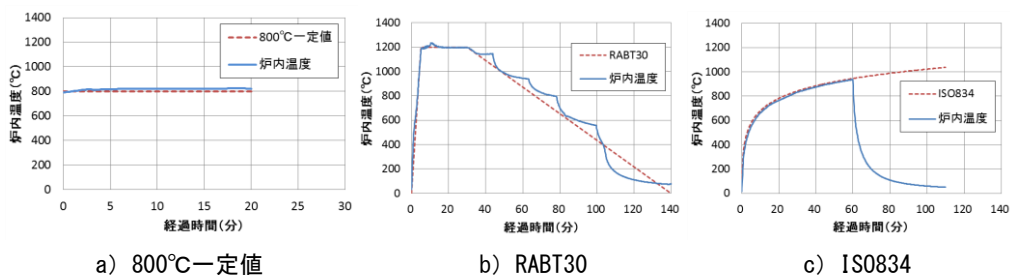


図-3 加熱曲線と炉内温度

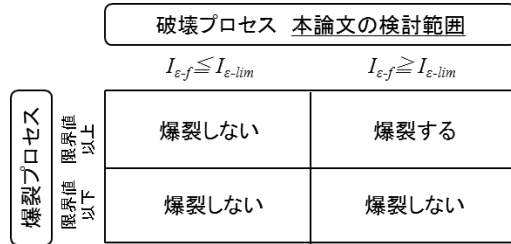


図-4 爆裂発生指標

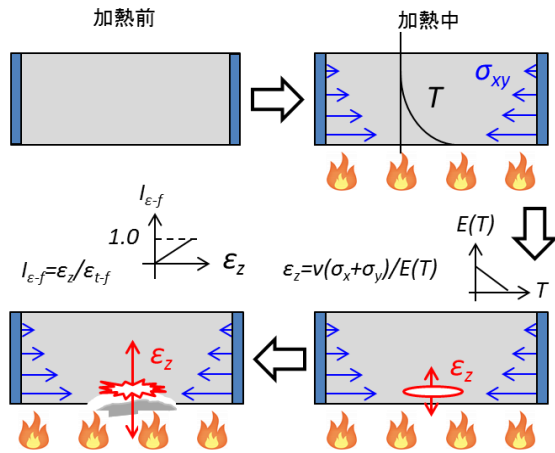


図-5 引張ひずみ破壊のイメージ

検討において水蒸気圧は熱応力に比べて非常に小さいという実験結果を踏まえ、リングひずみは熱応力の作用によるものとした<sup>6)</sup>。

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

$\sigma_{re}$ : モルタルに生じる拘束応力  $\varepsilon_{\theta}$ : リング円周方向のひずみ

$E_s$ : リング材の弾性係数  $t$ : リングの厚み  $R_s$ : リング内半径

### 2.5 引張ひずみ破壊指数による破壊条件

図-4 に爆裂発生指標を、図-5 に引張ひずみ破壊のイメージをそれぞれ示す。リング拘束加熱試験では、爆裂の発生メカニズムを破壊プロセスと爆裂プロセスの複合現象と仮定している<sup>6)</sup>。破壊プロセスにおいてひずみ破壊指数が限界値である1を超え、さらに爆裂プロセスで水蒸気圧等の圧力条件が加わることで破壊片が面外へ吹き飛び爆裂が発生する。本論文では、破壊プロセスを検討する範囲とした。モルタルが熱膨張すると、xy 軸方向にリングの拘束応力が発生する。さらに、拘束応力により z 軸方向に引張ひずみが生じる。z 軸方向の引張ひずみと引張破壊ひずみから、ひずみ破壊指数を定義した。式(2),(3),(4),(5)にひずみ破壊指数を示す。

$$\varepsilon_z = \frac{\nu(\sigma_x + \sigma_y)}{E(T)} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sigma_y \quad (3)$$

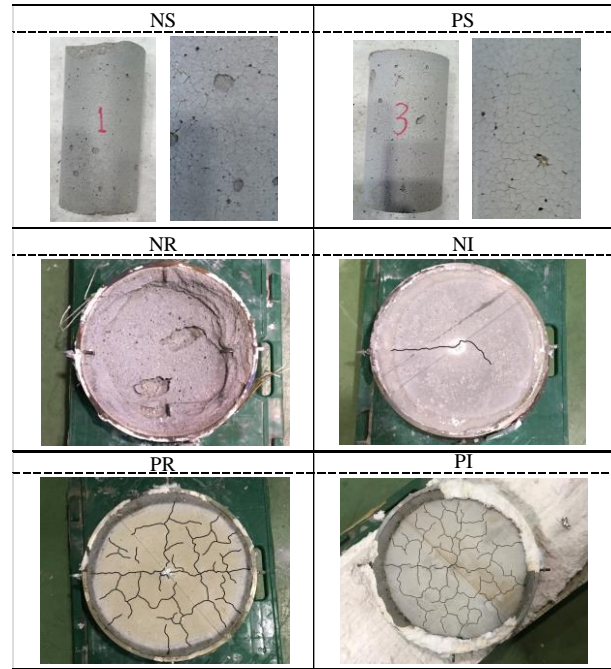


図-6 加熱面の状況

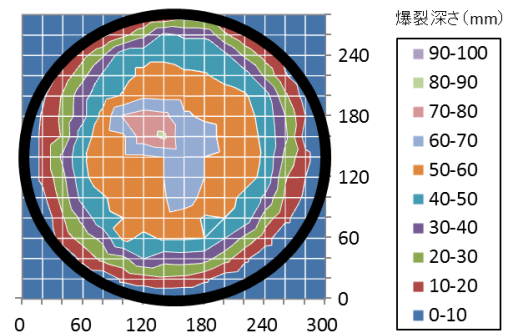


図-7 NRの爆裂深さ

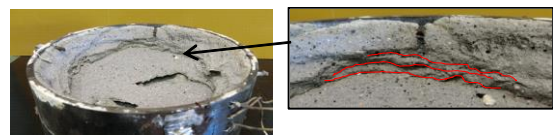


図-8 NRの剥落痕

$$\tau_{xy} = 0 \quad (4)$$

$$I_{\varepsilon-f} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{t-f}} \quad (I_{\varepsilon-lim} = 1) \quad (5)$$

$\varepsilon_z$ : 鉛直方向ひずみ  $\sigma_x, \sigma_y$ : 水平方向ひずみ  $\tau_{xy}$ : せん断応力

$E_m$ : 弾性係数  $\nu$ : 見かけのポアソン比  $I_{\varepsilon-f}$ : 引張ひずみ破壊指数

$\varepsilon_{t-f}$ : 引張破壊ひずみ  $I_{\varepsilon-lim}$ : 引張ひずみ破壊限界値

## 3. 試験結果

### 3.1 爆裂の発生状況

図-6 に簡易加熱試験とリング拘束加熱試験の加熱面

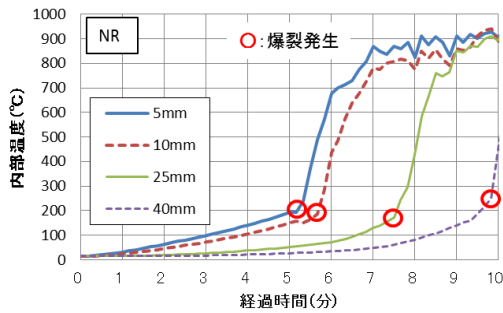


図-9 NR の内部温度

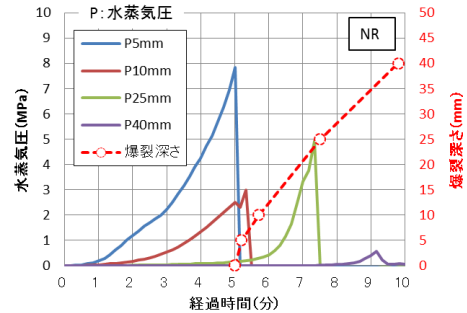
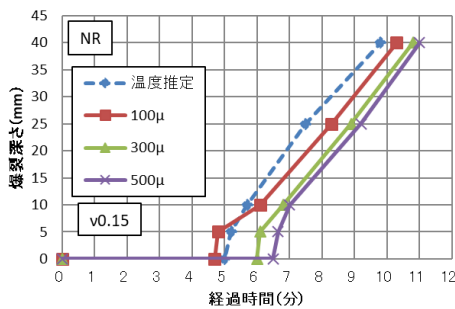
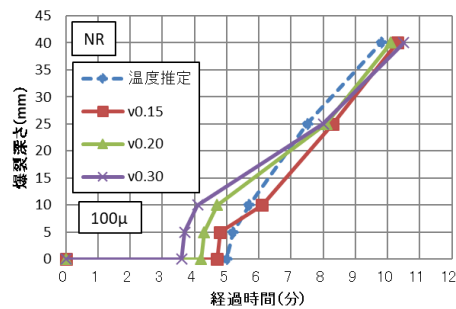


図-10 NR の水蒸気圧と爆裂深さ



a) 引張破壊ひずみ



b) 見かけのポアソン比

図-11 爆裂深さ推定値の検討

の状況を、図-7 に NR の爆裂深さを、図-8 に NR の剥落痕をそれぞれ示す。NR は爆裂し、その他の水準は爆裂しなかった。NR の加熱面には層状の剥落痕があり、表層から徐々に爆裂が進行したと考えられる。全面にわたって爆裂がみられ、最大爆裂深さは 82mm であった。NS は微細なひび割れと角欠けみられるが、爆裂による大きな損傷は認められなかった。NI は埋設したパイプ位置に沿って 1 本ひび割れが発生していた。NCM シリーズは、拘束条件や加熱条件によって耐爆裂性の試験結果に差異が生じることが分かった。一方、PCM シリーズはいずれの試験条件も爆裂が生じていなかった。PS は表面に微細なひび割れがみられ、PR および PI は網目状にひび割れが発生していた。なお、NR は爆裂深さがリングの継ぎ目部分に達し、加熱開始から 17 分後に継ぎ目でせん断破壊したため、その段階で試験を終了した。リングを 2 段とすると境目でせん断破壊の可能性があるため、今後検討する必要があると考えられる。

### 3.2 爆裂の経時変化

リング拘束加熱試験の結果、NR のみ爆裂したため、NR の爆裂の経時変化を内部温度と水蒸気圧から評価した。図-9 に NR の内部温度を示す。NR は爆裂により熱電対を覆っていたモルタルが剥落し、熱電対が直接加熱されて急激に温度上昇した。温度勾配が急激に大きくなる点を温度推定による爆裂発生時間とした。図-10 に NR

の水蒸気圧と温度推定による爆裂深さを示す。内部温度の上昇によりモルタル内部の水蒸気圧が上昇することが分かる。また、爆裂が発生したときに水蒸気圧が急激に減少しており、水蒸気圧が爆裂プロセスの圧力条件として作用したと考えられる。

### 3.3 爆裂深さ推定値の検討

本節では、見かけのポアソン比と引張破壊ひずみにコンクリートの熱間データを用い、NCM の爆裂深さを推定した。見かけのポアソン比と引張破壊ひずみは一定値と定義し、温度依存性は爆裂の発生しやすい温度域における平均的な値として考慮した。弾性係数残存比は、所定の温度における弾性係数と 20°C の弾性係数の比と定義した。NR の引張ひずみ破壊指数が限界値に達する時間と温度推定による爆裂発生時間を比較し、NCM の見かけのポアソン比と引張破壊ひずみの最適な条件を検討した。引張破壊ひずみは、道越らの研究より、爆裂が発生しやすい 200°C の弾性域におけるコンクリートの横ひずみの最大値をグラフから読み取り、100~500μ の範囲とした<sup>7)</sup>。弾性係数残存比は日本建築学会の提案式を用いた<sup>8)</sup>。見かけのポアソン比も道越らのデータを参考にした<sup>7)</sup>。図-11 に見かけのポアソン比と引張破壊ひずみをパラメータとし、爆裂深さを推定した結果を示す。図より、ポアソン比 0.15、引張破壊ひずみ 100μ のとき、設定した範囲において実際の爆裂の経時変化と引張破壊

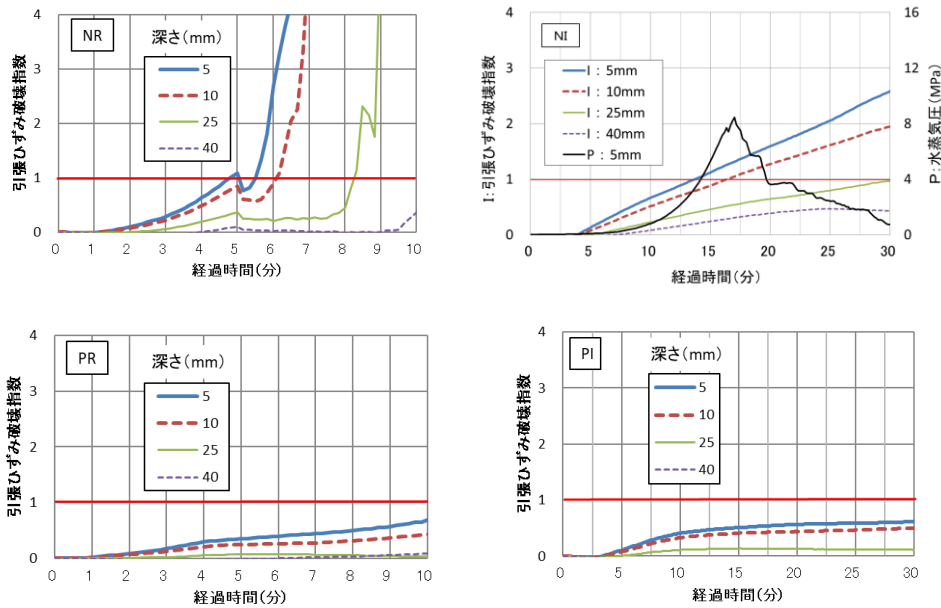


図-12 引張ひずみ破壊指数の経時変化

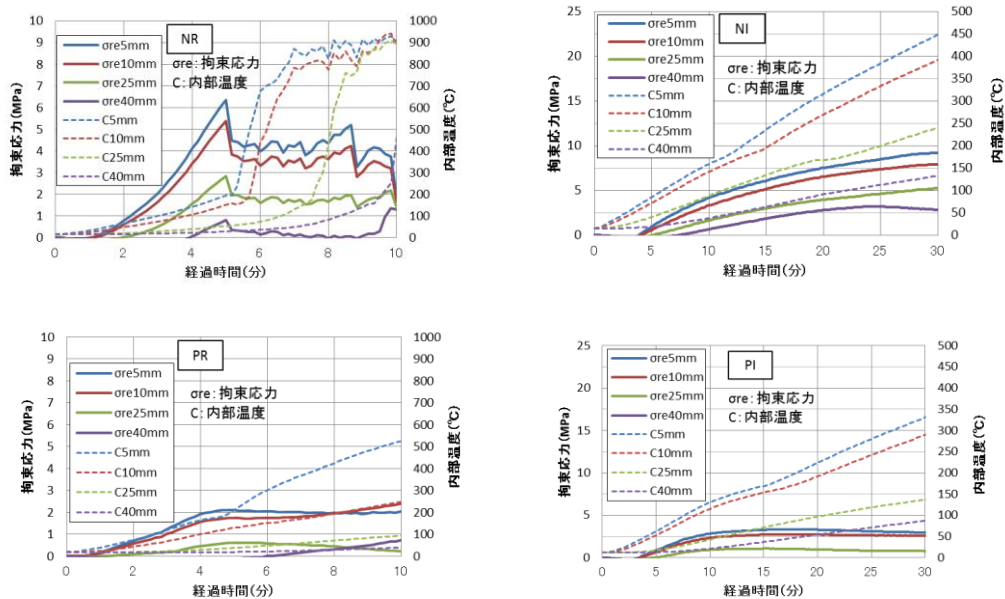


図-13 拘束応力と内部温度

ひずみによる計算上の爆裂深さ推定値がよく一致した。すなわち、コンクリートの熱間データを用いて NCM の爆裂の経時変化を推定できる可能性が確認できた。しかし、PCM については爆裂する配合により爆裂性状を検証する必要があり、今後の課題としたい。

### 3.4 引張ひずみ破壊指数の経時変化

図-12 に引張ひずみ破壊指数の経時変化を示す。NI には深さ 5mm の水蒸気圧を併せて示す。NR は引張ひずみ破壊指数が上昇し、限界値を超えた。温度推定による爆裂深さの発生時間との関係は前節に述べたとおり一致した。一方、NI も引張ひずみ破壊指数が限界値を超えたが、爆裂は生じなかった。NR の水蒸気圧は、図-10 に示す

ように爆裂の発生と同じタイミングで急激に低下する。一方、NI の水蒸気圧は徐々に低下する傾向を示し、ひび割れから水蒸気が徐々に抜けた可能性があると考えられる。しかし、引張ひずみ破壊指数が限界値を超えた時点では水蒸気圧は抜けておらず、引張ひずみ破壊と水蒸気圧の発生タイミングの影響については、さらにデータを積み上げて検証する必要がある。PR および PI は、引張ひずみ破壊指数が限界値を超えなかったため、爆裂が発生しなかったと考えられる。

### 3.5 拘束応力と内部温度

図-13 に拘束応力と内部温度を、表-4 に NR の爆裂音発生時間をそれぞれ示す。NR は、内部温度の上昇により

表-4 NR の爆裂音発生時間

発生時間(分)					
5.1	5.8	7.0	8.0	10.0	12.1
5.4	6.0	7.1	8.3	10.3	12.4
5.5	6.5	7.3	8.9	11.1	13.1
5.6	6.7	7.5	9.3	11.7	17.6

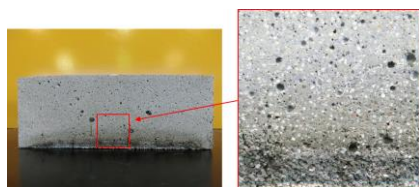


図-14 PI の切断面

拘束応力が増加する。内部温度が 200°C に達し、深さ 5mm の位置で爆裂が発生したとき、他の位置の拘束応力も減少したことが分かる。各位置のひずみゲージは同一の拘束リング上に貼り付けているため、一か所で発生した爆裂が、他の深さで測定する拘束応力にも影響したと考えられる。加熱中は、爆裂音は 1 回目の爆裂が発生してから断続的に続いていた。拘束応力は 1 回目の爆裂で 1 度減少した後、上下に小刻みに振動する挙動を示しており、爆裂が連続して発生した影響であると考えられる。次に、爆裂の生じていない PI と NI を比較した。PI は NI に比べて温度勾配が緩やかであり、同経過時間における拘束応力は NI よりも PI の方が小さい。既往の研究では、200°C 付近からポリマーが燃焼し、空隙率が増え、PCM の熱伝導率がコンクリートや NCM に比べて低下している<sup>9)</sup>。図-14 に PI の切断面を示す。加熱面付近のモルタルは炭化した跡がみられ、空隙が多く、組織が疎になっていた。また、簡易加熱試験後の質量減少率を確認すると、NCM が 9.8% であるのに対し、PCM は 15.0% と大きく、ポリマーの燃焼が影響したと考えられる。なお、ポリマーの熱分解により発生するガス圧の影響は、既往の文献に爆裂の影響因子として示されている<sup>8)</sup>。しかし、そのメカニズムについては、現状では不明な点が多い。本論文では市販品の PCM を用いており、ポリマーの種類や添加量が分からず、有機繊維が含まれていた。今後は、既知の配合により評価する予定であり、ポリマー燃焼時のガス圧の影響についても確認できる可能性があると考えている。

#### 4. まとめ

(1) NCM で作製した拘束リング供試体を RABT30 で加熱すると爆裂が発生したが、他の試験条件では爆裂は発生しなかった。すなわち、同じ材料であっても拘束条件や加熱条件により試験結果に差異が生じた。

(2) NR は、引張ひずみ破壊指数による爆裂推定により爆裂の経時変化を推定できた。また、爆裂発生時に水蒸気圧が急減し、爆裂プロセスの圧力条件として作用したと考えられた。

(3) NCM は、引張破壊ひずみと見かけのポアソン比にコンクリートの熱間データを用いることで爆裂の経時変化を推定できる可能性が確認できた。

本論文では、NCM と市販品の PCM の爆裂性状を拘束応力と水蒸気圧から評価したが、爆裂に関する実験データを材料レベルの設計に応用するためには、定量的な爆裂性状評価手法の構築が必要であると考えられる。すなわち、爆裂性状評価手法の確立により、供用条件に応じたスペックの最適化、解析精度の向上など、より合理的な設計が可能となると考えられる。今後、上述の点について、更に検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル (案) : 土木研究所, III-6, 2017.8
- 2) 建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説 : 日本建築学会, pp.184, 2015.2
- 3) 濱崎仁, 鹿毛忠継, 萩原一郎, 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, No.147, 2013.3
- 4) 濱崎仁, 茂木武, 野口貴文, 王徳東, 金亨俊 : ポリマーセメントモルタルを用いて補修した部材の耐火性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 75 巻, 652 号, pp.1065-1071, 2010.6
- 5) 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, 2017.9
- 6) 谷辺徹 : 高温下におけるコンクリートの爆裂発生指標とリング拘束試験方法, 岐阜大学大学院学位論文, 2014.9
- 7) 道越真太郎, 小林祐, 黒岩秀介 : 圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動, 日本建築学会構造系論文集, 72 巻, 621 号, pp.169-174, 2007
- 8) 構造材料の耐火性ガイドブック : 日本建築学会, 2009.3
- 9) 王徳東, 野口貴文, 濱崎仁, 成瀬友宏, 長井宏憲, 金亨俊 : ポリマーセメントモルタルの燃焼特性および熱伝導率に関する研究 その 3 熱伝導率の温度依存性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2008