

論文 リング拘束供試体を適用したアクリル系ポリマーセメントモルタルの火災時の爆裂性状に関する実験的検討

杉野 雄亮*1・谷辺 徹*2・六本木 日菜子*3・小澤 満津雄*4

要旨: コンクリートの爆裂試験方法である、リング拘束供試体法をアクリル系ポリマーセメントモルタル (以下, PCM) に適用し, 加熱中の拘束応力と蒸気圧を測定し, 加熱後の爆裂規模を評価した。加熱後の爆裂規模を上述の試験法のグレーディング指標に従い評価すると, PCM はポリマー無添加の水準よりもグレードが低下し, 既往の研究と同じ傾向を示した。また, 爆裂深さ推定も, コンクリートの高温特性値を用いた結果, 実際の爆裂深さの経時変化とよく一致した。これらの結果から, リング拘束供試体法は, コンクリートと同様に PCM の爆裂性状を評価できる可能性があることを確認した。

キーワード: ポリマーセメントモルタル, 火災, 爆裂, リング拘束供試体, 拘束応力, 蒸気圧

1. はじめに

RC 構造物の機能維持や高耐久化を目的として, 補修用モルタルが適用される。これらの補修用モルタルは, 母材コンクリートとの付着を高めるため, ポリマーが添加されることが多い。しかし, ポリマーセメントモルタル (以下, PCM) は火災時に爆裂が生じやすくなることが報告されており¹⁾, 防火上問題となる恐れがある。コンクリートの耐爆裂性の評価は, 配合のスクリーニングを供試体レベルの加熱試験で行い, 最終評価を実大部材レベルの耐火試験により行う手順にて一般的に行われている。供試体レベルのスクリーニング試験では, 無拘束の円柱や角柱供試体が用いられることが多いが, 拘束状態にある実大部材レベルの荷重加熱試験とは異なる爆裂性状を示す場合があることが報告されている²⁾。他方,

JCI-S-014-2018 「コンクリートの爆裂試験方法³⁾」が JCI 規準として制定されている。この規準に示される, リング拘束供試体法 (A 法) は, 簡易に拘束状態の爆裂性状を評価できる点に特徴がある。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では, RC 造柱の荷重加熱試験結果と供試体のスクリーニング試験の爆裂性状の関係を把握する目的で共通試験を実施している。共通試験により爆裂規模を比較した結果, リング拘束供試体が最も RC 造柱に近い結果となったことが報告されている²⁾。本論文では, 上述の爆裂試験方法を PCM に適用し, 爆裂性状の評価を試みることにした。加熱後の爆裂規模は, リング拘束供試体法に示されているグレーディング指標に従い評価した。また, 加熱中の拘束応力から PCM に引張ひずみ破壊が生じる時間を計算し, 爆裂深さの経時変化を推定した。さらに, PCM の蒸気圧を経時測定し, 爆裂への作用を調べた。PCM は, 断面修復材の一般的な配合とされる水セメント質量比, 砂セメント質量比とし, セメント混和用ポリマーはアクリル系粉末樹脂を用いた。なお, 粉末樹脂を添加しない普通セメントモルタル (以下, NCM)

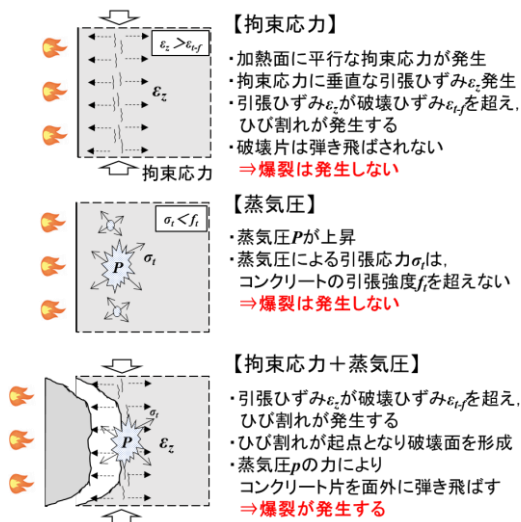


図-1 爆裂の発生イメージ

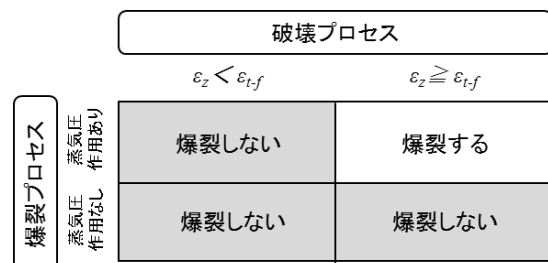


図-2 爆裂の発生条件

*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 (学生会員)

*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)

を比較対象とした。

2. 試験概要

2.1 爆裂試験方法

(1) 爆裂の発生条件

図-1 にコンクリートの爆裂発生イメージを、図-2 に爆裂の発生条件をそれぞれ示す。谷辺らは、コンクリートの爆裂を、熱応力と蒸気圧が複合的に作用することで発生するとしており、それぞれを破壊プロセスおよび爆裂プロセスと定義している⁴⁾。2つのプロセスを満たす時、爆裂が発生すると判定される。本論文では、これらのプロセスに基づき、PCMの爆裂性状を確認することとした。破壊プロセスは、温度上昇によるPCMの熱膨張に伴い加熱面に平行な拘束応力が発生し、加熱面と垂直方向に引張ひずみ (ϵ_z) が生じる現象である。拘束応力による引張ひずみが、コンクリートの引張破壊ひずみ ($\epsilon_{t,f}$) に達したとき、破壊プロセスを満たすとしている。一方、爆裂プロセスは、蒸気圧の作用であり、破壊片を押し出す力として作用するとしている。しかし、爆裂プロセスを評価する指標は、谷辺らの研究では定義されていない。そこで、蒸気圧が爆裂発生時に急激に低下する挙動を示すか確認し、爆裂プロセスの作用を判断することとした。

(2) リング拘束供試体

図-3 にリング拘束供試体の形状を示す。リング拘束供試体法³⁾を参考にし、拘束リング（鋼製）にモルタル

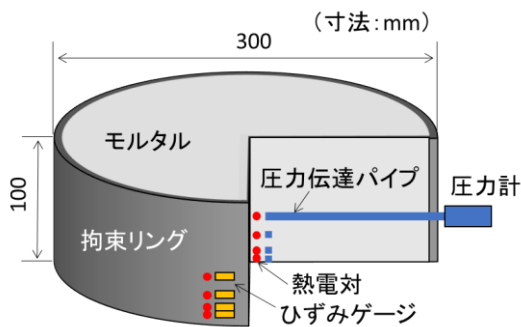


図-3 リング拘束供試体の形状

を充填して作製した。拘束応力は、「付属書 A (参考) コンクリートの爆裂試験 A 法 (リング拘束供試体法) における各種測定方法³⁾」を参考にし、測定した。拘束リングにひずみゲージと熱電対を加熱面から深さ方向に 5,10,25,40mm の位置に設置した。また、蒸気圧は上述の付属書 A³⁾に従い測定した。圧力伝達パイプは、加熱面から深さ方向に 5,10,25,40mm の位置に設置した。さらに、圧力伝達パイプの先端には熱電対を設置し、内部温度を測定した。モルタル内部に埋め込んだ熱電対が爆裂により炉内に露出すると、急激な温度上昇が生じる。この時間をプロットし、内部温度から推定した爆裂深さの経時変化とした。図-4 に爆裂深さの経時変化の一例を示す。

(3) 爆裂規模の評価方法

表-1 に爆裂規模のグレーディング指標³⁾を示す。爆裂規模のグレーディングは、最大爆裂深さ、爆裂面積率、爆裂容積率により行った。これらの指標は、リング拘束供試体法で定められた標準を引用した。

(4) 引張ひずみ破壊指数による爆裂深さ推定方法

爆裂深さの推定は、リング拘束供試体法の付属書 A³⁾に準じて行った。なお、爆裂深さ推定に必要な材料の熱間物性については、PCM に関するデータが少ないため、既報の報告書や論文に示されているコンクリートの熱間データを用いることとした。爆裂深さの推定方法に関す

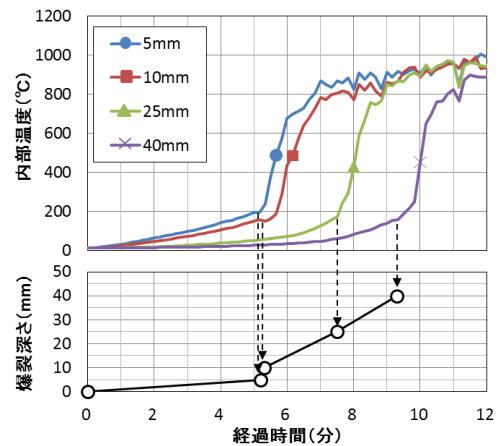


図-4 爆裂深さの経時変化例

表-1 爆裂規模のグレーディング指標³⁾

	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	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

る詳細は、3.2 節に示す。

2.2 試験水準

表-2 に試験水準を示す。PCM は、断面修復材に一般的に用いられる配合として水セメント質量比 50%，砂セメント質量比 2.0 とした⁵⁾。また、ポリマーセメント質量比 (P/C) は 5%，10% とした。他方、ポリマーを添加しない NCM を比較用の水準とした。

2.3 加熱方法

図-5 にリング拘束供試体を用いた加熱イメージを示す。供試体は下面より 1 面加熱されるように加熱炉に設置し、下面の拘束リングが加熱に直接曝されることを防ぐため、断熱材で被覆した。加熱によりモルタルが熱膨張するのに伴い、拘束応力が発生する。図-6 に RABT30 加熱曲線と炉内温度の測定結果の一例を示す。加熱曲線を RABT30 とした設定値と炉内温度の測定結果はおおむね一致していることを確認した。

2.4 材料仕様およびモルタル特性

表-3 に PCM と NCM に使用した材料仕様を示す。セメント混和用ポリマーは、JIS A 6203:2015「セメント混和用ポリマーディスページョン及び再乳化形粉末樹脂」に定義されている再乳化可能なアクリル系粉末樹脂を使用し、外割添加した。また、細骨材は絶乾状態の珪砂を用い、水以外の材料は、すべてプレミックスした。モル

表-2 試験水準

水準	P/C (%)	単位ポリマー量 (kg/m ³)	加熱曲線
NCM	0	0	RABT30
P5	5	28	
P10	10	56	

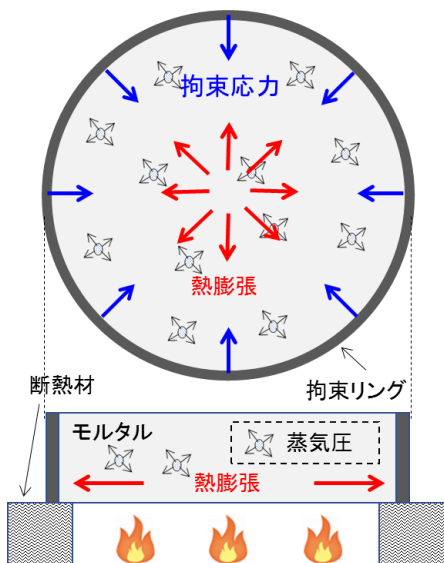


図-5 リング拘束供試体を用いた加熱イメージ

タルの練混ぜは、所定量の水を加え、強制練りパン型ミキサーで 3 分間攪拌した。表-4 にモルタルのフレッシュ性および強度特性を示す。なお、含水率は、φ50×100mm の供試体を 105°C の乾燥炉に入れ、一定の質量になるまで乾燥し、乾燥前の質量との差から算出した。モルタルのフレッシュ性は、フロー試験において良好な流動性を有することを確認し、材料分離などは見られなかった。成型作業時は、いずれの水準においても拘束リング内へのモルタルの充填は良好であった。モルタルの打設後、20°C 環境にて 2 ヶ月間湿布養生し、養生後に強度試験を実施した。試験の結果、ポリマーを添加した水準は、無添加に比べ、モルタルの割裂引張強度と弾性係数が若干低下することを確認した。圧縮強度と含水率は、いずれの水準も同程度であった。

3. 実験結果

3.1 爆裂の規模

図-7 に爆裂の発生時間を示す。爆裂の発生時間は、

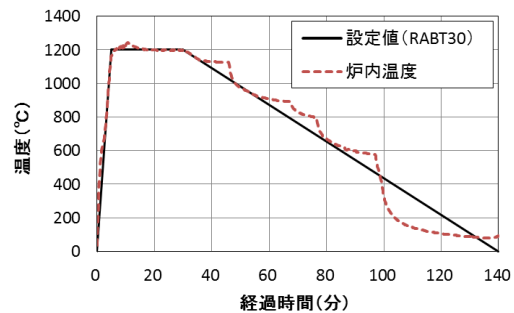


図-6 加熱曲線と炉内温度

表-3 材料仕様

名称	仕様
ポリマー	アクリル共重合体粉末樹脂 密度 0.4~0.6 g/cm ³
セメント	普通セメント, 密度 3.16g/cm ³
細骨材	珪砂 (絶乾), 密度 2.64 g/cm ³ 吸水率 0.3%

表-4 フレッシュ性および強度特性

材齢	項目	NCM	P5	P10
練り直後	15 打フロー(mm)	159	170	181
	空気量(%)	5.2	5.4	6.2
	温度(°C)	25.5	25.1	26.0
2 ヶ月	圧縮強度(MPa)	45.3	44.1	43.0
	引張強度(MPa)	3.6	2.8	2.8
	弾性係数(GPa)	26.3	23.5	22.0
	含水率(%)	6.1	6.2	6.1

観察窓から爆裂に伴うモルタルの剥落を観察し、剥落が確認された時間とした。NCM と PCM は、いずれも 4 分 30 秒付近で 1 回目の爆裂が生じ、最初の爆裂発生時間はあまり変わらなかった。NCM は爆裂が加熱途中で止まったが、P5 および P10 は爆裂が続き、ひび割れが上面まで貫通して火炎漏れが生じる恐れがあったため、途中で加熱を止めた。図-8 に加熱冷却後の爆裂の発生状況を、表-5 に爆裂規模のグレーディング結果をそれぞれ示す。RABT30 のとき、指標 1 と指標 3 のグレーディング指標から、ポリマーを添加すると爆裂規模が大きくなることが認められた。なお、P5 の最大爆裂深さや爆裂容積率は

は P10 よりも大きくなったが、加熱を中断した時間が P5 の方が遅かったためであると考えられる。グレードに関して、P5 と P10 は同じであった。

3.2 引張ひずみ破壊指数による爆裂深さ推定

引張ひずみ破壊指数は平面応力状態を仮定し、式(1)から(4)⁶⁾により算出した。見掛けのポアソン比、引張破壊ひずみ、弾性係数残存比は、既往の研究におけるコンクリートの熱間データを参考にして検討した。見掛けのポアソン比と引張破壊ひずみは一定値であると定義し、温度依存性については、道越らの実験データで示されているグラフを読み取り、爆裂の発生しやすい温度領域における平均的な値として考慮した⁷⁾。見掛けのポアソン比を 0.15、見掛けの引張破壊ひずみを 150 μ とした。また、弾性係数残存比は、所定の温度の弾性係数と 20 $^{\circ}$ C における弾性係数の比と定義した。所定の温度における弾性係数は、日本建築学会の弾性係数残存比の提案式を用いて算出した¹⁾。

$$\sigma_{re} = \sigma_x = \sigma_y \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (2)$$

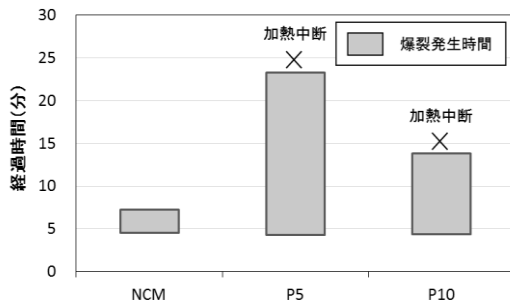


図-7 爆裂の発生時間

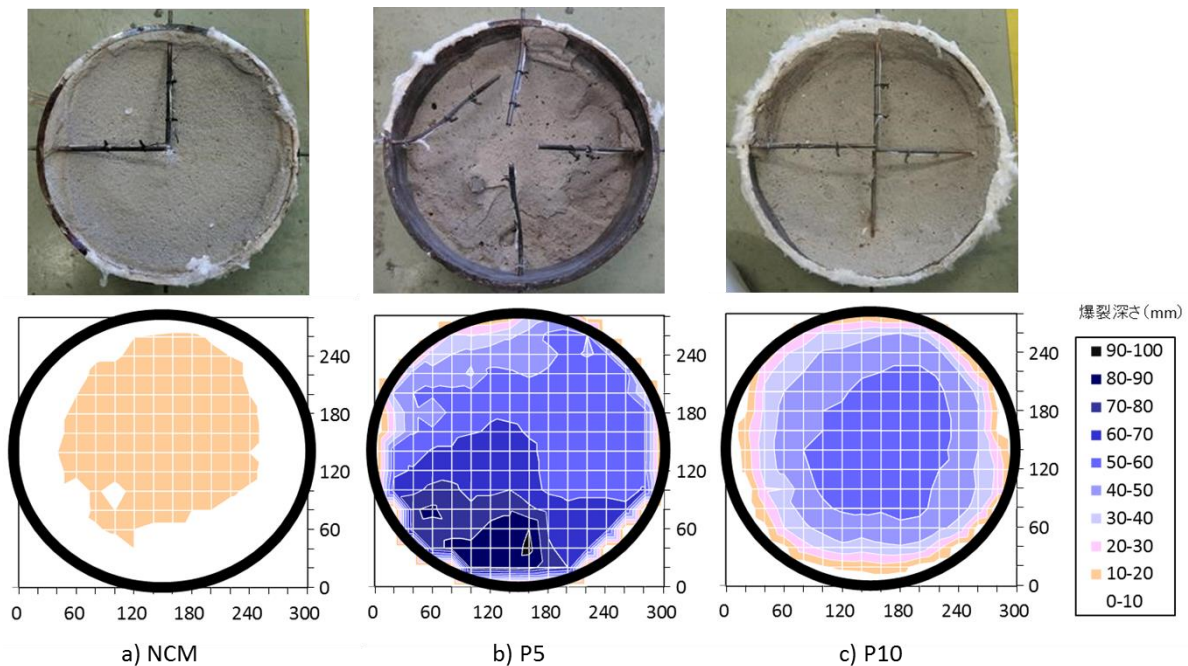


図-8 加熱冷却後の爆裂の発生状況

表-5 爆裂規模のグレーディング

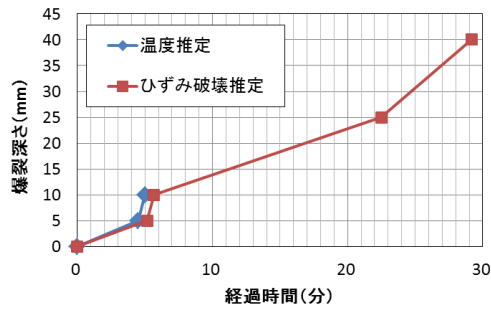
水準	爆裂状況			グレード		
	最大爆裂深さ(mm)	爆裂面積率(%)	爆裂容積率(%)	指標 1	指標 2	指標 3
NCM	18	93	9	D	E	C
P5	93	95	53	E	E	E
P10	56	98	36	E	E	E

$$\varepsilon_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) / E_c(T) \quad (3)$$

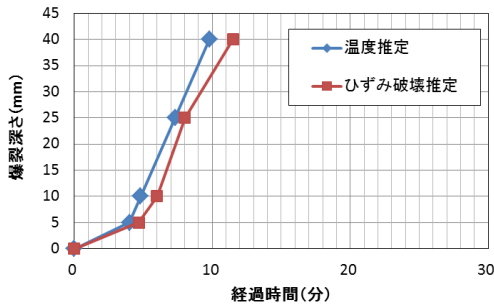
$$I_{\varepsilon-f} = \varepsilon_z / \varepsilon_{t-f} \quad (I_{\varepsilon-lim} = 1) \quad (4)$$

ここで、 σ_{re} : 拘束応力(MPa), σ_x, σ_y : X方向とY方向の拘束応力(MPa), τ_{xy} : せん断応力(MPa), ε_z : 面外直ひずみ(引張), ε_{t-f} : 引張破壊ひずみ, $E_c(T)$: 加熱時の残存弾性係数(GPa), ν : 見掛けのポアソン比, $I_{\varepsilon-f}$: 引張ひずみ破壊指数, $I_{\varepsilon-lim}$: 引張ひずみ破壊発生の境界条件

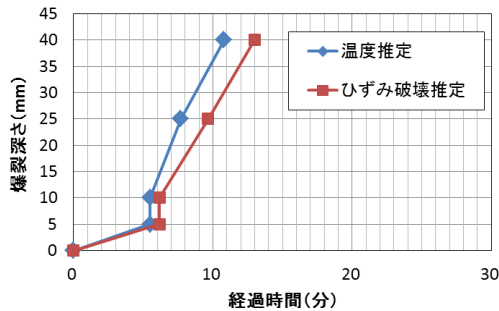
図-9 に引張ひずみ破壊指数による爆裂深さの推定結果を示す。拘束リングのひずみとモルタルの蒸気圧の測定は、加熱面からの深さ40mmを上限としており、40mmまで爆裂深さ推定を行った。なお、ひずみゲージや圧力



a) NCM



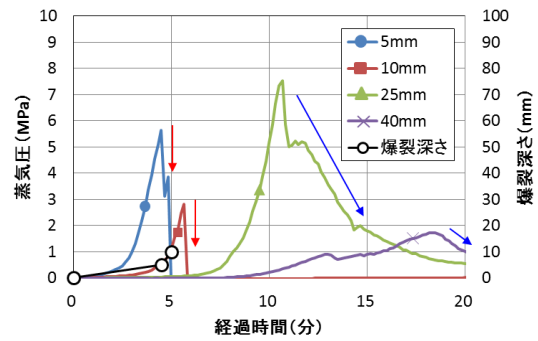
b) P5



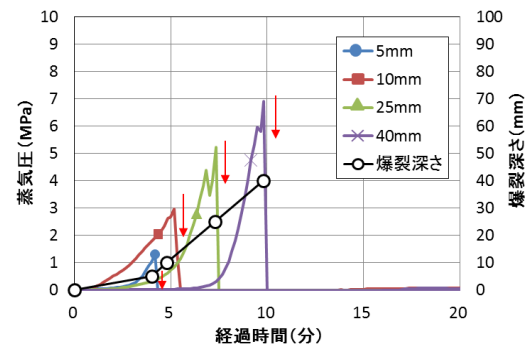
c) P10

図-9 引張ひずみ破壊指数による爆裂深さ推定

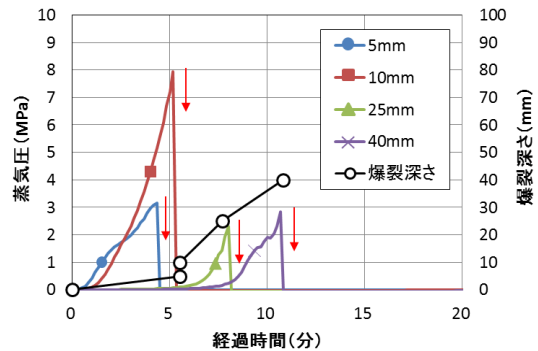
計を40mm以上の位置に設置すれば、さらに深い位置での爆裂深さ推定も可能であると考えられる。PCMの爆裂深さをコンクリートの熱間データを用いて推定した結果、内部温度から推定した爆裂深さの経時変化とよく一致することを確認した。なお、NCMは温度推定による爆裂深さが10mmで止まり、10mmまでは引張ひずみ指数による推定値と一致した。したがって、本論文の試験条件において、PCMおよびNCMは、コンクリートの熱間特性値を用いて爆裂深さ推定を行える可能性があると考えられた。しかしながら、PCMへの適用にあたっては、さらに、加熱条件、ポリマーの種類、配合および含水の影響など、適用可能な範囲を検討する必要があると考えている。



a) NCM



b) P5



c) P10

図-10 爆裂深さと蒸気圧の経時変化

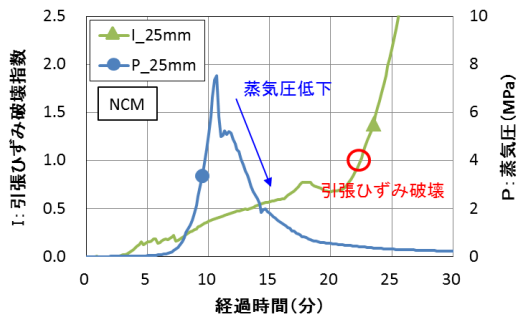


図-11 蒸気圧低下のタイミング (NCM)

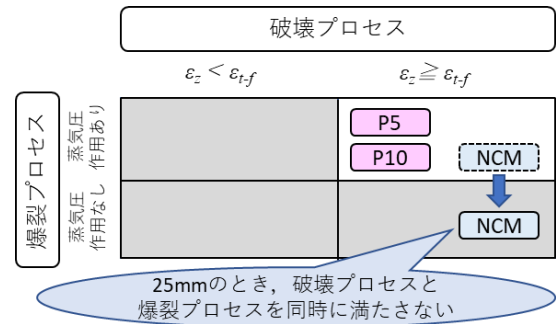


図-12 プロセスにおける位置付けのイメージ

3.3 蒸気圧の爆裂への作用

図-10 に温度推定による爆裂深さと蒸気圧の経時変化を示す。PCM の蒸気圧は、各測定位置で爆裂発生時に急減しており、蒸気圧が作用し、爆裂プロセスを満たしたと考えられる。3.2 節の結果より、爆裂発生時には引張ひずみ破壊が生じていると考えられ、PCM は破壊プロセスと爆裂プロセスの双方を満たしていると考えられる。一方、NCM は 10mm まで爆裂が生じたが、加熱途中で爆裂が止まった。NCM の 25mm の蒸気圧は、蒸気圧の低下途中から勾配が緩やかになっており、ひび割れ等から蒸気が少しずつ逸散した可能性がある。図-11 に NCM の蒸気圧低下のタイミングを、図-12 にプロセスにおける位置付けのイメージをそれぞれ示す。NCM の 25mm の蒸気圧は、引張ひずみ破壊指数が境界条件 ($I_{e,lim} = 1$) に到達した時間、すなわち、引張ひずみ破壊が生じた時間よりも早いタイミングで低下していたと考えられる。すなわち、NCM の 25mm 位置で爆裂が生じなかった理由は、破壊プロセスと爆裂プロセスを同時に満たさなかったためであると推察される。

4. まとめ

- (1) 加熱後の爆裂規模をグレーディング指標により評価すると、PCM は NCM よりもグレードが低下する傾向がみられた。
- (2) 見掛けのポアソン比、引張破壊ひずみ、弾性係数残存比にコンクリートの熱間データを用い、PCM の爆裂深さを推定した。その結果、本試験条件においては、爆裂深さの推定値は、実際の爆裂深さの経時変化とよく一致した。
- (3) PCM は、40mm までの各測定位置において爆裂が発生し、破壊および爆裂プロセス双方を満たしたと考えられた。他方、NCM の 25mm 位置は爆裂が発生しなかった。その理由として、引張ひずみ破壊が生じる前に蒸気圧が逸散しており、破壊プロセスと爆

裂プロセスを同時に満たさなかったことが推察される。

以上より、「コンクリートの爆裂試験方法ーリング拘束供試体法 (A 法)」の PCM への適用を試みた結果、コンクリートと同様に PCM の爆裂性状を評価できる可能性があることを確認できた。今後は、PCM の爆裂性状をより詳細に把握するため、加熱条件や配合条件が爆裂性状に及ぼす影響を検討する予定である。

参考文献

- 1) 構造材料の耐火性ガイドブック：日本建築学会，2017.3.
- 2) 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.
- 3) 日本コンクリート工学会 JCI 規準・指針画面参照：<http://www.jci-net.or.jp/jci/study/standard.html>（閲覧日：2019年1月10日）
- 4) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，内田裕市，六郷恵哲：高温環境下での高強度コンクリートの耐爆裂性評価における爆裂発生指標の提案，土木学会論文集 E2, Vol. 70, No.1, pp.104-117, 2014.
- 5) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針 (案)・同解説：日本建築学会，1997.1.
- 6) Mitsuo Ozawa, Toru Tanibe, Ryota Kamata, Yuichi Uchida, Keitetsu Rokugo : Behavior of ring-restrained high-performance concrete under extreme heating and development of screening test , Construction and Building Materials, pp.215-228, 2018.
- 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.