

論文 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

杉野 雄亮*1・祐川 真紀帆*2・谷辺 徹*3・小澤 満津雄*4

要旨：ポリマーセメントモルタル（PCM）の高温下における爆裂性状を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に適用して評価した。ポリマーセメント質量比は 20%とし、ISO834 標準加熱曲線 60 分加熱とした。加熱中は拘束応力と水蒸気圧を測定し、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基づき評価した。その結果、PCM はポリマー無添加のモルタル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、引張ひずみ破壊指数による爆裂深さ推定は、実際の爆裂深さと良く一致した。以上より、リング拘束供試体法をポリマー高添加領域の PCM に適用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、水蒸気圧

1. はじめに

コンクリートの断面修復に使用するモルタルは、コンクリートと一体化させるために、ポリマーを添加して付着力向上や収縮抑制を図ることが多い。ポリマーセメントモルタル（PCM）の配合は、一般に砂セメント質量比 2~3、ポリマーセメント質量比（P/C）10~20%とされる²⁾。一方で、ポリマーセメントモルタルは、ポリマー無添加のモルタルに比べて高温下で爆裂が生じやすくなることが報告されており、RC 構造物の防火上問題となる恐れがある³⁾。しかしながら、現状は PCM の爆裂性状に関するデータが少なく、将来的には、標準化された評価方法でデータが蓄積されることが望ましい。筆者らは既報⁴⁾にて、JCI-S-014-2018 「コンクリートの爆裂試験方法⁵⁾」のリング拘束供試体法（A 法）を PCM の爆裂試験に適用し、P/C=5~10%の配合で適用できる可能性があることを確認した。本稿では、PCM のポリマー高添加領域において、リング拘束供試体法の適用性を検討し、高温下の爆裂性状に関する基礎的なデータを得ることを目的とする。本稿のモルタル配合は、砂セメント質量比 2.5、水セメント質量比 0.5 とした。ポリマーは、アクリル系粉末樹脂を用い、P/C=20%とした。また、比較用として、ポリマー無添加のモルタルを評価した。加熱試験は、モルタルを打設して 2 か月後に実施し、ISO834 標準加熱曲線にて 60 分加熱した（ISO60）。さらに、加熱試験中は、モルタルに生じる拘束応力と水蒸気圧（P）を測定し、爆裂への作用を調べた。また、加熱冷却後に加熱面を観察し、爆裂規模のグレーディングを評価した。爆裂した水準については、引張ひずみ破壊指数から爆裂深さを推定し、実際の爆裂深さと比較評価した。

2. 高温下の爆裂に関する既往研究

2.1 コンクリートの爆裂発生メカニズム

近年、コンクリートの高温下の爆裂発生現象に関する仮説として、熱応力説と水蒸気圧説がある。熱応力説は、コンクリートの熱膨張に伴い加熱面と平行に拘束応力が発生し、圧縮応力が作用して爆裂が生じるとされる⁶⁾。一方、水蒸気圧説は、コンクリート細孔中の水が加熱されて水蒸気となり、水蒸気圧が引張力として作用し、爆裂が発生するとしている⁷⁾。また、これらが複合的に作用する複合説がある。

2.2 コンクリートの爆裂試験方法

RC 構造物の耐爆裂性は、実大部材レベルの耐火試験により確認され、最終的な評価が行われる。一方で、配合のスクリーニング段階では、小型コンクリート供試体を加熱し、加熱後の損傷やひび割れを確認して評価することが多い。しかしながら、小型コンクリート供試体の加熱試験と実大部材レベルの耐火試験は、拘束状態の違いから、爆裂性状に差異が生じる可能性があるといわれる。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委員会では、爆裂性の共通試験を実施し、爆裂規模のグレーディングを評価した。その結果、リング拘束供試体法は、RC 柱部材の載荷加熱試験に最も近い評価となったことが報告されている⁸⁾。

3. 試験概要

3.1 爆裂試験方法

(1) リング拘束供試体

図-1 にリング拘束供試体の形状寸法を示す。リング拘束供試体は、リング拘束供試体法に準じて作製した。

*1 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 修士(工学) (正会員)

*2 群馬大学 理工学部環境創生理工学科 (学生会員)

*3 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 博士(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)

リングのひずみは、リング表面に貼付したひずみゲージで測定し、上述の試験法にある付属書 A に準じて拘束応力を算出した。また、同位置に熱電対を取り付け、リングの温度を測定した。水蒸気圧は、供試体外側のパイプ端に接続した圧力計により測定した。なお、加熱試験時は、ステンレスパイプ内にシリコンオイルを充填し、圧力計にモルタル内部の圧力が伝達するようにした。また、水蒸気圧の測定位置と同じ位置に熱電対を設置し、モルタル内部の温度を測定した。

(2) 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を示す。爆裂規模の評価は、リング拘束供試体法 (A 法) 付属書 A に従った。爆裂深さは、加熱面を 10mm メッシュで分割したメッシュ交点の各位置における深さとした。

(3) 爆裂の発生条件

谷辺ら⁹⁾は、鋼製リングで拘束された高強度コンクリートを加熱し、加熱中のコンクリートの拘束応力と水蒸気圧を測定している。このとき、拘束応力により加熱面と垂直に引張ひずみが生じ、コンクリートの引張破壊ひずみを超えてひずみ破壊が生じるとしている。さらに、ひずみ破壊面に水蒸気圧が作用するとき、破壊片が面外に弾き飛ばされて爆裂が発生するとしている。図-2 に爆裂の発生イメージを示す。爆裂の発生条件は、谷辺らの研究を参考にし、引張ひずみ破壊と水蒸気圧が同時に作用するときとした。なお、リング拘束供試体法には、引張ひずみ破壊の発生条件が設定されているが、水蒸気圧については作用条件が示されていない。そこで、水蒸気圧の爆裂への作用については、爆裂発生時の水蒸気圧

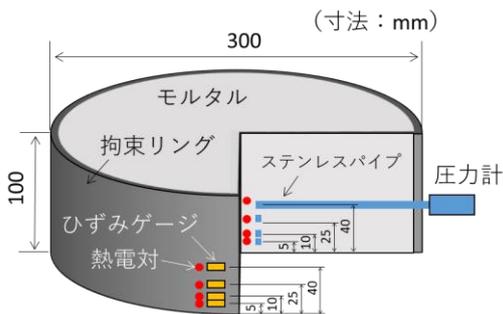


図-1 リング拘束供試体の形状

の挙動から判断することとした。

(4) 内部温度による爆裂発生時間の推定

爆裂発生時間は、モルタル内部に設置した熱電対から推定した。爆裂が発生すると、モルタルが剥落し、熱電対が直接炉内に晒されるため、温度が急激に上昇すると考えられる。そこで、温度が急上昇し始めた時間を熱電対の設置深さにおける実際の爆裂発生時間と定義した。

(5) 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)-(4)¹⁰⁾により算出した。見掛けのポアソン比と残存弾性係数は、PCM の熱間試験によるデータが無いため、コンクリートのデータを用いた。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た。見掛けのポアソン比は、既往の文献¹¹⁾を参考に、爆裂の発生温度域を考慮して平均的な値を定めた。残存弾性係数は、日本建築学会の提案式を用いた³⁾。また、モルタルの引張破壊ひずみは、拘束応力の挙動から引張ひずみ破壊により破壊面が形成されたと考えられるポイントを推定し、そのときの面外直ひずみ (引張) を参考にして数値を定めた。

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

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

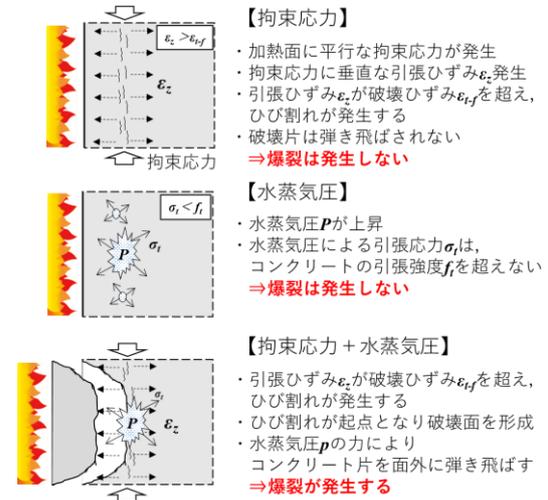


図-2 爆裂の発生イメージ

表-1 爆裂規模のグレーディング指標⁵⁾

グレード	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

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

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

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

3.2 試験水準

表-2 に試験水準を示す。モルタルは、いずれの水準も砂セメント質量比 2.5、水セメント質量比 0.5 とした。また、PCM は P/C=20% とし、NCM はポリマー無添加の配合とした。加熱条件は ISO834 標準曲線の 60 分加熱とした (ISO60)。

3.3 加熱試験

図-3 に加熱試験のイメージを示す。供試体は下面開口部から一面加熱し、リング下端は断熱材で被覆してリングが直接加熱されないようにした。図-4 に加熱曲線

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	ISO60
PCM	20	112	

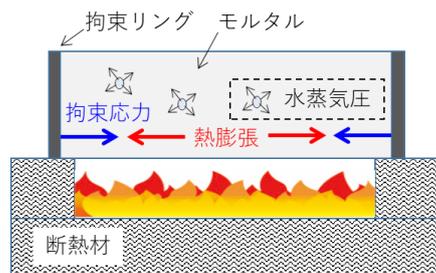


図-3 リング拘束供試体の加熱イメージ

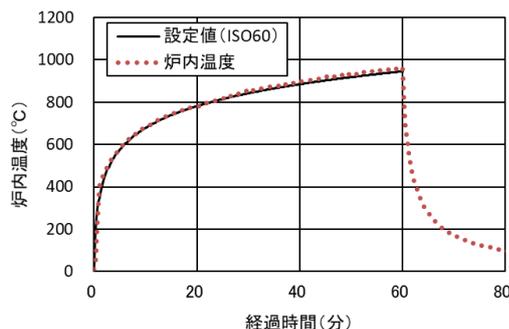


図-4 設定値 (ISO60) と炉内温度

と炉内温度を示す。図より、加熱曲線と炉内温度は良く一致していることを確認した。

3.4 材料仕様とモルタル特性

表-3 に材料仕様を示す。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」に規定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。モルタルの練混ぜは、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。モルタルの打設後、供試体は 2 ヶ月間封かん養生し、強度試験および加熱試験を実施した。表-4 にモルタルのフレッシュ性状および強度特性を示す。表中に示す含水率は、供試体を 105°C の電気炉で恒量になるまで乾燥し、乾燥前後の質量から算出した。

4. 試験結果

4.1 爆裂規模のグレーディング

写真-1 に加熱冷却後の加熱面の状況を、図-5 に PCM の爆裂深さをそれぞれ示す。また、表-5 に爆裂規模のグレーディングを示す。表より、すべての指標において、PCM のグレードは E であった。一方、NCM は爆裂の発生は無いが、ひび割れが認められ、グレードはすべて B であった。したがって、いずれの指標においても PCM は NCM よりも爆裂規模のグレードが低下し、既往の文献³⁾と同じ傾向を示した。

4.2 内部温度と爆裂発生時間

図-6 にモルタル温度と爆裂深さの経時変化を示す。PCM は、加熱を続けるとひび割れが上面まで貫通して火炎漏れが起きる兆候がみられ、35 分後に加熱を中止した。

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 フレッシュ性状と強度特性

材齢	項目	NCM	PCM
練り直後	15 打フロー(mm)	170	196
	空気量(%)	5.4	3.0
	温度(°C)	25.1	26.3
2 ヶ月	圧縮強度(MPa)	44.1	49.3
	引張強度(MPa)	2.8	4.1
	弾性係数(GPa)	23.5	18.3
	含水率(%)	6.2	6.6

一方で、NCMは爆裂が発生しなかった。PCMの5,10mm位置の温度は、同じタイミングで急上昇した。以降、25,40mm位置の順に急激な温度上昇を確認した。PCMは、爆裂発声音が繰り返し起き、爆裂が断続的に生じたと考えられる。したがって、徐々に爆裂深さが大きくなり、加熱時間とともに、より深い位置の温度が急上昇したと考えられる。PCMの内部温度を示す図中には、内部温度から推定した爆裂深さの経時変化を併せて示す。PCMは、5,10mm測定位置でモルタルが同時に剥落したと考えられる。5,10mm位置で同時にモルタルが剥落した原因については、4.5節にて、拘束応力と水蒸気圧の測定結果とあわせて考察する。一方、NCMは爆裂が発生しなかったため、いずれの測定位置も温度上昇が緩やかであった。

4.3 ひずみ測定の実用範囲

リングに貼付したひずみゲージの許容温度は80°Cである。加熱試験時は、モルタルの温度上昇や爆裂に伴う

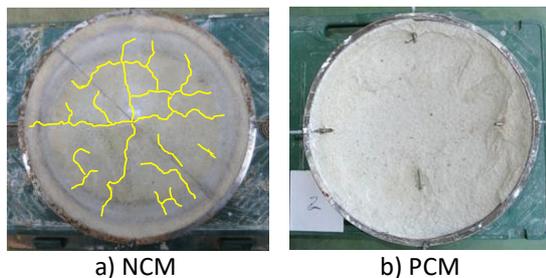


写真-1 加熱冷却後の加熱面

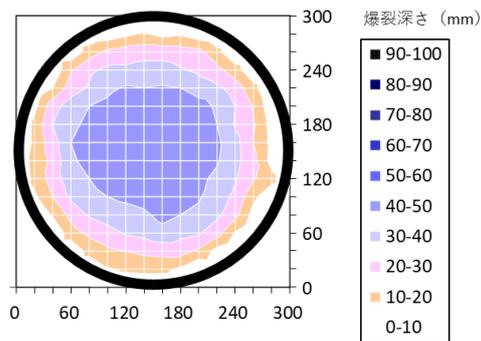


図-5 爆裂深さ (PCM)

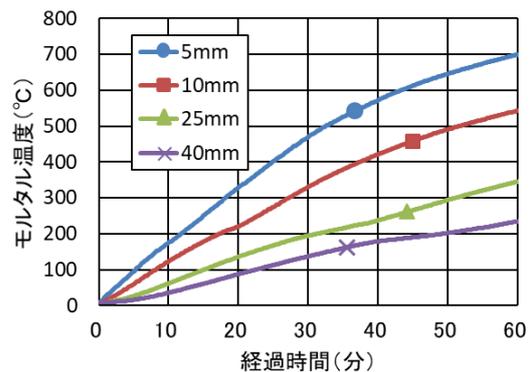
表-5 爆裂規模のグレーディング

爆裂状況	NCM	PCM
指標 1: 最大爆裂深さ(mm)	0	50
指標 2: 爆裂面積率(%)	0	94
指標 3: 爆裂容積率(%)	0	27
グレード	NCM	PCM
指標 1	B	E
指標 2	B	E
指標 3	B	E

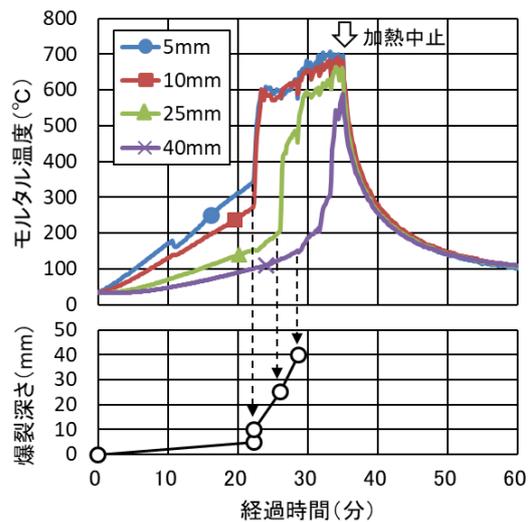
断面欠損により、リングの温度が上昇するため、リングの温度からひずみ測定の実用範囲を定めた。リングの温度がひずみゲージの許容温度に達する時間を確認し、PCMは加熱開始後25分までのデータ、NCMは加熱開始後30分までのデータを採用した。

4.4 引張ひずみ破壊指数による爆裂深さ推定

爆裂の生じたPCMにおいて、引張ひずみ破壊指数から爆裂発生時間を推定した。なお、ひずみ測定の実用範囲より、加熱開始後25分までに爆裂が発生した5,10mm位置の爆裂深さを推定した。既往の文献¹⁾より、ポアソン比は0.15とし、残存弾性係数は、建築学会の提案式を用いた³⁾。図-7に5,10mm位置の拘束応力と面外直ひずみを示す。両測定位置において、拘束応力はモルタルの温度上昇に伴い増加し、ある時点で急減した。さらに、拘束応力が急減して以降、モルタル温度の上昇に関わらず、一定値を示した。これらの結果から、拘束応力が急減するポイントで、引張ひずみ破壊により水平方向に生じた微細ひび割れを起点に破壊面が形成され、拘束応力の挙動が変化したと考えた。拘束応力が急減するポイン



a) NCM



b) PCM

図-6 モルタル温度と爆裂深さの経時変化

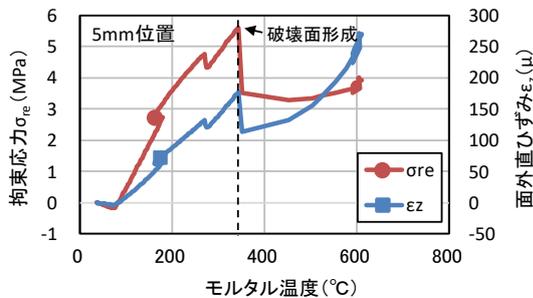
トにおける引張破壊ひずみは、5mm位置で177 μ 、10mm位置で118 μ であった。これらのデータを参考に、引張破壊ひずみを150 μ とし、爆裂深さを推定した。図-8に引張ひずみ破壊指数による爆裂深さの推定結果を示す。図より、温度推定による実際の爆裂は、5,10mm位置で同時に発生したが、5mm位置の引張ひずみ破壊はそれより前に生じたと考えられる。しかし、水蒸気圧が作用せず、爆裂に至らなかった可能性がある。4.5節に5mm位置の水蒸気圧の作用について考察する。

4.5 拘束応力、水蒸気圧の推移

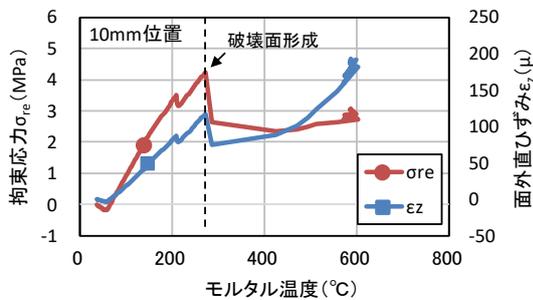
図-9にPCMの拘束応力と水蒸気圧を示す。拘束応力が急減したポイントで引張ひずみ破壊による破壊面が形成されたとすると、PCMの5mm位置では、破壊面形成前に水蒸気圧が完全に抜けており、爆裂が発生しなかったと考えられる。一方、10mm位置は、拘束応力から推

定した破壊面形成時に水蒸気圧が急減しており、10mm位置では、破壊面に水蒸気圧が作用して爆裂が発生したと考えられる。これらの結果から、5mm位置では爆裂が生じなかったが、10mm位置の爆裂が発生したことにより5mm位置のモルタルも同時に剥落した可能性が高いと考えられる。図-10にNCMの水蒸気圧を示す。拘束応力と水蒸気圧から、爆裂の発生条件における位置付けを考察するため、ひずみ測定の実用範囲より、加熱開始後30分までに水蒸気圧の増減がみられる5,10mm位置の拘束応力と水蒸気圧を確認することとした。図-11にNCMの5,10mm位置の拘束応力と水蒸気圧を示す。図より、水蒸気圧が減少するまでのタイミングにおいて、拘束応力の急減はみられず、引張破壊ひずみにより水平方向に生じた微細ひび割れを起点とする破壊面が形成されていないと推察される。すなわち、破壊面の形成前に水蒸気圧が抜け、爆裂が生じなかったと考えられる。なお、破壊面形成への水蒸気圧の作用については明確ではなく、まだ検討の余地がある点である。

以上より、断面修復材を想定したPCMのポリマー高添加領域(P/C=20%)において、P/C=5~10%のPCMと同様、リング拘束供試体法を適用できる可能性があることを確認できた。今後、加熱条件や他種ポリマーについて検討し、PCMにおけるリング拘束供試体法の適用条件を明確にすることを目標としている。



a) 5mm位置



b) 10mm位置

図-7 拘束応力と面外直ひずみ (PCM)

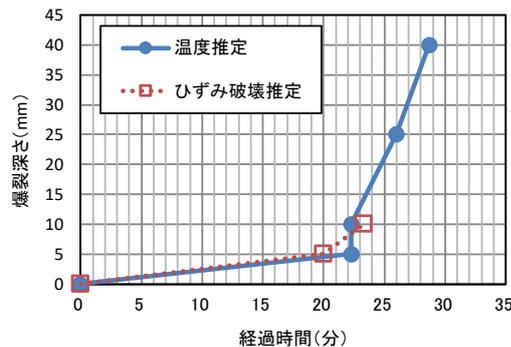
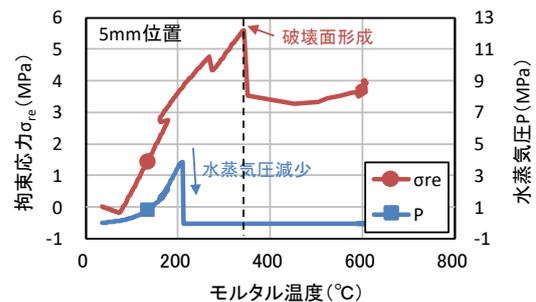


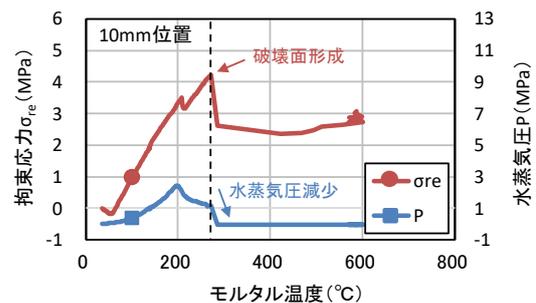
図-8 爆裂深さ推定 (PCM)

5. まとめ

(1) 加熱試験の結果、PCMはNCMよりも爆裂規模の



a) 5mm位置



b) 10mm位置

図-9 拘束応力と水蒸気圧 (PCM)

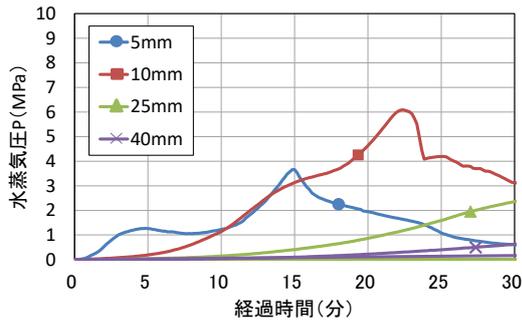


図-10 水蒸気圧 (NCM)

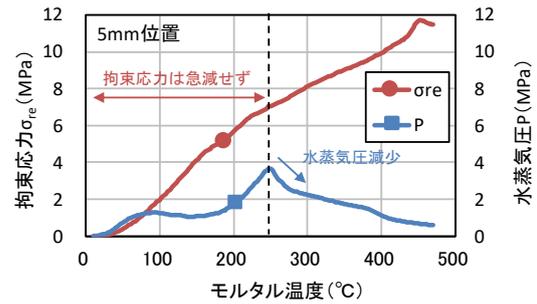
- グレードが低下し、既往の研究と同じ傾向を示した。
- (2) PCM は、引張ひずみ破壊発生と水蒸気圧減少のタイミングから、5mm 位置では爆裂が発生しなかったが、10mm 位置の爆裂により、5mm 位置のモルタルも剥落したと考えられる。
- (3) PCM の拘束応力の挙動からモルタルの引張破壊ひずみを定め、引張ひずみ破壊指数による爆裂深さを推定した結果、爆裂の発生した 10mm 位置において、推定値は実際の爆裂深さと良く一致した。
- (4) NCM は、面外直ひずみによる水平方向の微細ひび割れを起点とする破壊面形成に至らず、破壊面の形成前に水蒸気が抜けて爆裂しなかったと考えられる。

謝辞

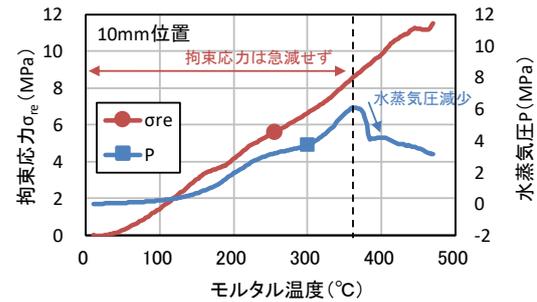
本研究は科学技術研究補助金基盤研究 C (番号: 19K04546: 代表小澤) の補助を受けて実施した。また、大林財団の支援を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 河野俊夫: ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートの特性, コンクリートジャーナル, 11 巻, 4 号, pp.18-26, 1973
- 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性評価・診断および補修指針 (案)・同解説: 日本建築学会, 1997
- 構造材料の耐火性ガイドブック: 日本建築学会, 2017
- 杉野雄亮, 谷辺徹, 六本木日菜子, 小澤満津雄: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1001-1006, 2019
- 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



a) 5mm 位置



b) 10mm 位置

図-11 拘束応力と水蒸気圧 (NCM)

日: 2020 年 1 月 5 日)

- Bazant, Z.P.: Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete. *Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete*, NIST, pp. 155-164, Gaithersburg, Maryland, 1997
- Anderberg, Y.: Spalling phenomena in HPC and OC. *Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-strength Concrete*, NIST, pp. 69-73, Gaithersburg, Maryland, 1997
- 高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する委員会報告書: 日本コンクリート工学会, 2017
- 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
- Ozawa, M., Tanibe, T., Kamata, R., Uchida, Y., Rokugo, K.: Behavior of ring-restrained high-performance concrete under extreme heating and development of screening test, *Construction and Building Materials*, Vol.162, pp.215-228, 2018
- 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