

論文 リング拘束加熱試験法を用いた若材齢期におけるポリマーセメントモルタルの爆裂リスクの評価

古賀丈太郎*1・小山拓*2・福井拓也*3・小澤満津雄*4

要旨：本研究では、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM, P/C5%）を対象として、若材齢期における火災時爆裂リスクの評価を行った。加熱試験の材齢は3, 7, 14, 42 日とした。加熱には小型円筒型電気炉を用い、加熱温度 1050℃一定とした。その結果、PCM は材齢 3, 7, 14 日では爆裂規模が大きい、42 日では爆裂規模が小さくなった。爆裂指標として引張ひずみを算出したところ、材齢の進行に伴い引張ひずみ値は大きくなった。爆裂速度は、1.07～2.53mm/min の範囲であった。

キーワード：ポリマーセメントモルタル, 爆裂, リング拘束供試体, 引張ひずみ

1. はじめに

高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート構造物は、経年劣化を生じている。材料劣化した RC 構造物の補修には、ポリマーセメントモルタル(PCM)が使われることが多い¹⁾。しかし、PCM は有機系のポリマーを混入しているため、高温環境下で爆裂しやすいとの報告がある²⁾³⁾。土木構造物の RC 部材は供用中の部材を対象として、補修を実施することが多い。このことは、十分な養生期間を設けるのが難しいことを意味し、若材齢期からの耐火性能を評価することが必要であるが、若材齢期における補修材の高温時における爆裂を評価した事例は少ないのが現状である。本研究グループでは、耐熱性断面補修材⁴⁾⁵⁾および高強度コンクリート⁶⁾の若材齢期における爆裂リスク、つまり爆裂規模や爆裂までの時間などの耐爆裂性能の評価を実施しているが PCM については、報告例が少ないのが現状である。そこで本研究では、PCM を対象として、リング拘束加熱試験法による若材齢期の爆裂リスクを評価した。

2. 実験概要

2.1 配合

表-1 に本研究で用いた PCM の配合を示す。PCM は W/C が 0.31 とし、セメントは普通セメントを使用した。ポリマーセメント比 P/C は 5%とし、エチレン酢酸ビニルを使用した。練り混ぜにはパン型ミキサーを用いた。練り混ぜ後に、練上がり温度とモルタルフロー値を測定した。その後、後述するリング拘束型枠にモルタルを打設した。翌日に脱型後、供試体が乾燥しないように封緘養生を行った。加熱試験の直前に加熱面の表面含水率を高周波容量式水分計で計測した。各材齢で加熱試験後に、

φ100×L200mm の円柱供試体を用いて圧縮強度と弾性係数を測定した。練上がり温度は 21℃でモルタルフローおよび単位容積重量はそれぞれ 167×168mm と 2.2g/cm³であった。

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図を示す。本試験は、JCI 試験規準コンクリートの爆裂試験法⁷⁾を参考にして実施した。拘束リングは外径 300mm×高さ 50mm×厚さ 8mm の鋼製リングを用いた。供試体内部には、内部温度測定用 K 型熱電対と水蒸気圧測定用ステンレスパイプを配置した。リング側面には拘束応力測定のためのひずみゲージ（常温用、耐熱温度 80℃）と T 型熱電対を対極に配置した。ひずみゲージの計測値は 80℃以下の値を用いた。配置位置は加熱面から 5, 10, 25, 40mm とした。加熱試験時には、ステンレスパイプにシリコンオイルを充填した後に、ステンレスパイプと圧力センサーを接続して水蒸気圧を測定した。なお、本試験法は、材料の爆裂スクリーニング試験として位置付けている。

2.3 加熱試験

図-2 に加熱試験の概要図を示す。加熱試験では、小型円筒型電気炉を用いた。電気炉の開口部に内径 160mm の保護容器を設置した。炉内の設定温度は 1050℃一定とし 30 分加熱を実施した。加熱温度について、本試験では電気炉を使用する点から出力がガス炉と比較して小さいた

表-1 PCM の配合

W/C	P/C	kg/m ³			
%	%	W	C	S	Polymer
31	5	282	905	1138	45.25

*1 群馬大学 理工学部環境創生理工学科 (学生会員)

*2 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 助教(正会員)

*3 (株)ケミカル工事 技術部 (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)

め、加熱方法の検討が必要となった。既往の検討において、1050℃に設定して急速加熱を試みることで、爆裂の有無を検討できることを確認している⁴⁾。そのため、本検討でも1050℃一定加熱を採用した。ただし、爆裂によって試験が安全に実施できないと判断した場合、加熱試験を中止した。試験手順は以下の通りである。①リング拘束供試体にセットしたパイプにシリコンオイルを充填する。②炉内温度が1050℃に達したことを確認する。③電気炉の上蓋を開けた直後、リング供試体を設置し下面を炉内開口部にセットした。④加熱中の爆裂音を確認し、爆裂した時間を記録した。⑤加熱試験終了後、試験体を十分に冷却した後に爆裂深さを測定した。加熱時材齢は3, 7, 14, 42 日とした。

2.4 拘束応力

加熱中のPCMに生じる拘束応力を算出した。拘束応力は、薄肉円筒理論⁵⁾を用いて算出した。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(1)式で算出した。

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

σ_{re} : 拘束応力

ε_{θ} : 鋼製リングの円周方向ひずみ

E_s : 鋼製リングの弾性係数

t : 鋼製リングの厚み

R : 鋼製リングの内半径

2.5 引張ひずみ

本研究グループでは、リング拘束加熱試験を用いた場合、平面応力状態を仮定し爆裂メカニズムとして熱応力による引張ひずみ破壊モデルを提案し、爆裂指標として用いた⁸⁾。以下の式(2)～(4)によって引張ひずみを算出した。

$$\sigma_{re-s} = \sigma_{x-s} = \sigma_{y-s} \quad (2)$$

$$\tau_{xy-s} = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_z = \nu_s (\sigma_{x-s} + \sigma_{y-s}) / E_m(T_s) \quad (4)$$

σ_{re-s} : 拘束応力

$\sigma_{x-s}, \sigma_{y-s}$: X, Y 方向の拘束応力

τ_{xy-s} : せん断応力

ε_z : 引張ひずみ

T_s : 内部温度

$E_m(T_s)$: 内部温度における残存弾性係数

ν_s : 見かけのポアソン比

既報より、ポアソン比は0.2とした⁷⁾。残存弾性係数は既往の研究より、図-3に示す弾性係数残存比と加熱温度

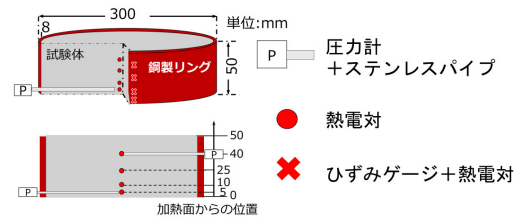


図-1 リング拘束供試体概要図

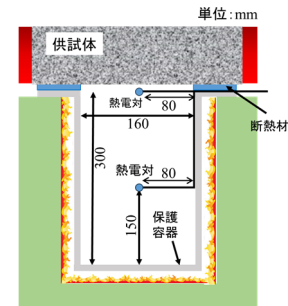


図-2 加熱試験

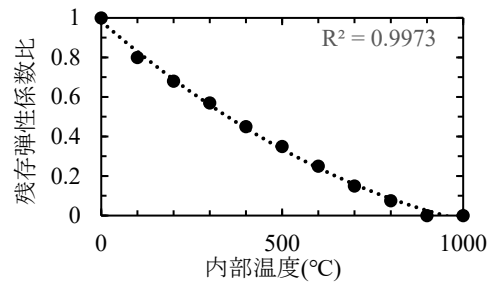


図-3 残存弾性係数比と温度⁹⁾

の関係を用いた⁹⁾。また、常温時における各材齢の弾性係数は実験値を用いた(後述)。

2.6 爆裂規模の評価方法⁹⁾

加熱試験終了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-2に爆裂規模のグレーディング指標を示す。加熱試験後の供試体の加熱面を対象に、爆裂深さを測定して、最も大きな欠損深さを最大爆裂深さ(D_{max})とした。爆裂面積率(A_s)と爆裂容積率(V_{sp})の計算方法は以下の式(5)(6)の通りとした。

$$A_s = N_i / N \quad (5)$$

$$V_{sp} = \sum D_i / (N \times H) \quad (6)$$

N_i : 欠損深さが0より大きい測定点数

N : 測定点数(148点)

$\sum D_i$: 合計欠損深さ(mm)

H：供試体高さ(mm)

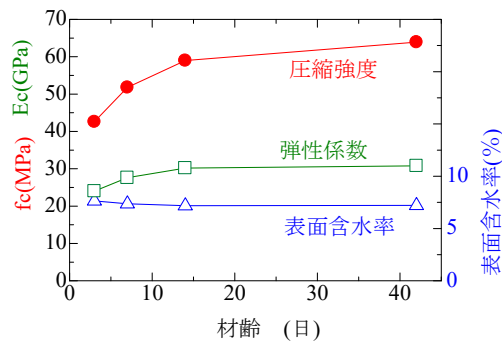


図-4 圧縮強度，弾性係数，表面含水率と材齢

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度・弾性係数・表面含水率の材齢による変化

図-4 に PCM における圧縮強度と弾性係数および表面含水率の経時変化を示す。材齢進行とともに，圧縮強度

と弾性係数が増加しそれぞれ，材齢 43 日で 63MPa と 30.8GPa であった。表面含水率は低下し，材齢 3 日の 7.64%から材齢42日には7.21%に低下した。本実験では，封緘養生を実施した。これにより，セメントの水和反応が進行し，自由水が減少し表面含水率は低下したと考えられる。

3.2 供試体加熱面状況及び爆裂性状

図-5 に PCM 供試体の加熱試験終了後の供試体加熱面の損傷状況を示す。すべての材齢で爆裂が生じた。最初の爆裂が発生した時刻は材齢 3 日からそれぞれ 1 分 28 秒，1 分 10 秒，1 分 40 秒，2 分 21 秒であり，材齢 3 日は 15 分 20 秒，材齢 7 日は 29 分 50 秒の段階で激しい爆裂が生じ，この時点で加熱試験を終了した。特に，材齢 3，7，14 日では，最大爆裂深さは 19.4mm と 7.5mm および 18.4mm であった。材齢 42 日では 4.6mm であった。材齢 7 日は熱変形によって加熱の影響を受けていない部分が押し出された結果，上面に加熱中に 20mm の深さで

表-2 爆裂規模のグレーディング指標

Grade	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		
B	爆裂はないが、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

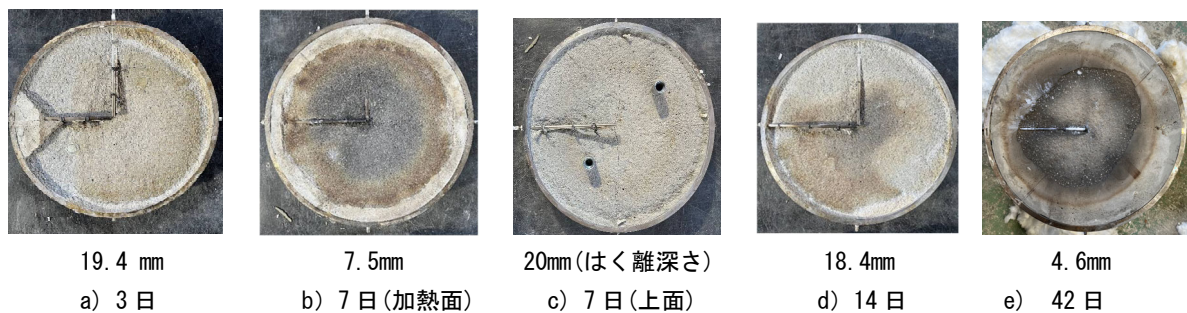


図-5 加熱面と材齢 7 日供試体上面の損傷状況(上段は最大爆裂深さを示す。)

表-3 爆裂グレーディング結果

材齢 (日)	指標 1	指標 2	指標 3	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
3	19.4	95.3	25.6	D	E	D
7	7.5	79.7	7.2	C	E	C
14	18.4	100	23.2	D	E	D
42	4.6	37.2	4.2	C	D	C

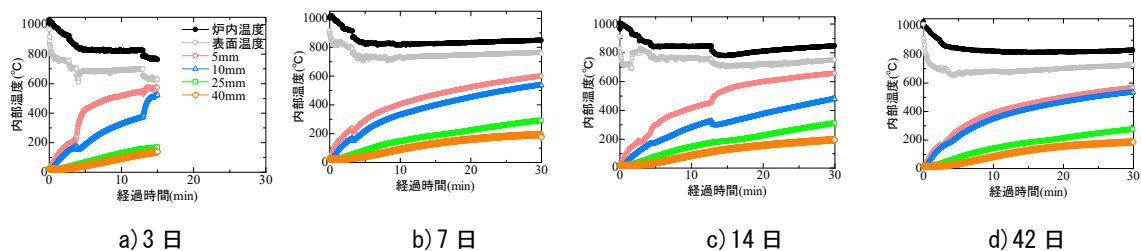


図-6 内部温度

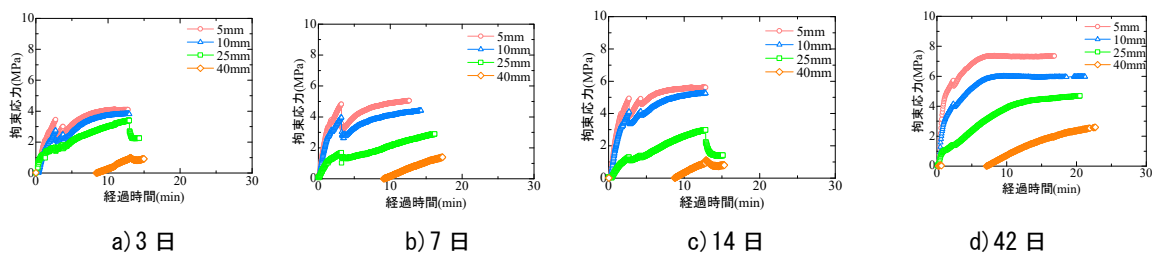


図-7 拘束応力

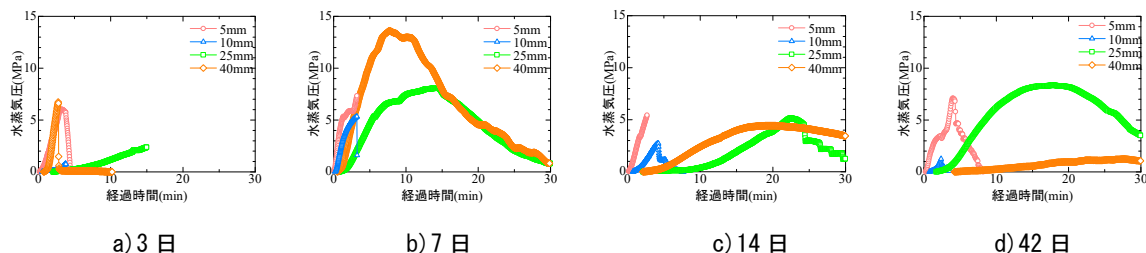


図-8 水蒸気圧

はく離が生じた。表-3 に爆裂評価の結果を示す。

指標 1: 最大爆裂深さについて材齢 3, 14 日は爆裂深さが 20mm 程度であり評価が D となった。材齢 42 日では、4.6mm であり評価は C となった。指標 2: 爆裂面積率では、材齢 3~14 日まで E 評価となったが、材齢 42 日で D 評価となった。指標 3: 爆裂容積率は材齢 3, 14 日で D 評価となり、材齢 42 日では C となった。材齢の経過とともに、爆裂規模が小さくなる傾向となった。これは、PCM の圧縮強度の変化が影響していると考えられる。考察の詳細は、後述する引張ひずみの項目で説明する。

3.3 内部温度の経時変化

図-6 に内部温度の経時変化を示す。PCM は全ての材齢で爆裂が生じた。内部温度の傾向を下記に示す。炉内温度は、加熱の開始とともに低下し 800℃程度で一定となった。各材齢ともに、加熱面に近い 5mm 位置から熱伝導によって内部温度が上昇していることがわかる。内部温度が急激な増減を生じる時間が確認できるが、これは爆裂によってコンクリート加熱面がはく離し、熱電対が炉内に曝されたことが考えられる。炉内温度も急激な温度低下を示す時間がある。

これは、爆裂によって、コンクリート内部の水分が急激に蒸発し蒸発潜熱によって、温度が低下したこと

因すると考えられる。材齢 3 日の供試体では 5mm 位置の温度の上昇速度がその他の材齢よりも大きく、爆裂の規模が大きいことがわかる。材齢 3 日供試体は爆裂の衝撃によって、供試体が損傷し移動したため加熱 15 分で試験を中止した。その他に材齢では爆裂が生じているが、試験体の移動が生じなかったため、30 分間加熱を実施した。

3.4 拘束応力の経時変化

図-7 に拘束応力の経時変化を示す。全体の傾向として、加熱面モルタルの熱膨張変形をリングが拘束することでリングに引張ひずみが生じることから、拘束応力が生じていることがわかる。拘束応力が急激に減少し、その後また増加を示している時間が確認できる。これは、爆裂に発生によって、断面欠損が生じ拘束応力の解放が生じ、その後、加熱によって熱膨張が生じていることに起因すると考えられる。最大爆裂深さが 4.3mm で断面欠損が少ない材齢 42 日供試体の 5mm 位置における拘束応力の最大値は 7MPa 程度であった。

3.5 水蒸気圧の経時変化

図-8 に水蒸気圧の経時変化を示す。全体の傾向として、加熱に伴い、加熱面の近い 5, 10mm 位置から水蒸気圧の上昇が確認できる。その後、爆裂の発生とともに、急激

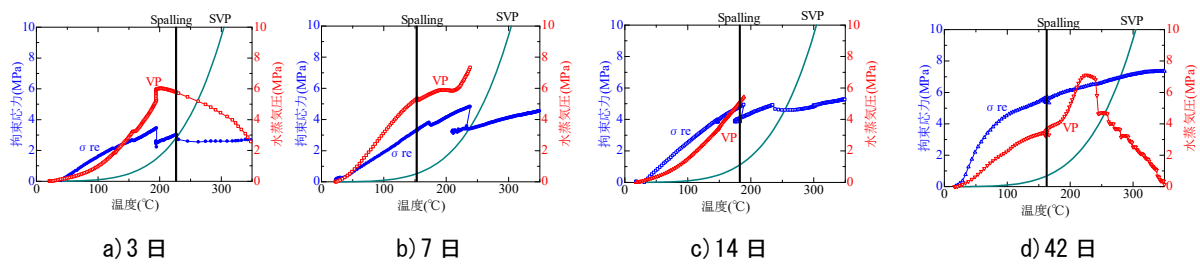


図-9 水蒸気圧および拘束応力と内部温度との関係(5mm)

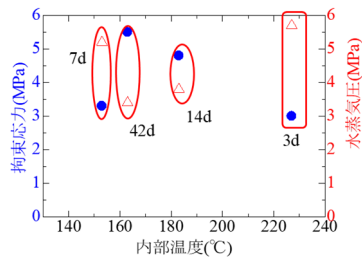


図-10 水蒸気圧および拘束応力と内部温度 (爆裂発生時)

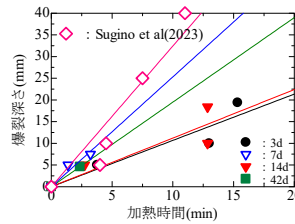


図 - 11 爆裂深さの経時変化

表-4 爆裂進行速度

材齢(日)	爆裂進行速度 (mm/min)
3	1.07
7	2.53
14	1.12
42	1.95
60 ¹¹⁾	3.23

に値が低下することが確認できる。一方、25、40mm 位置では、材齢 3 日、7 日では 5、10mm 位置と同程度の勾配であったが、材齢 14 日、42 日では水蒸気圧が緩やかに上昇した。また、材齢 7 日では、40mm 位置において水蒸気圧の最大値が 10MPa を超えるなど他の材齢とは異なる挙動を示した。これは、加熱に伴い自由水に起因する水分溜りが加熱面から上部に移動すること、セメント水和生成物の脱水物分解によって、水分が供給されることにより、水蒸気圧が高い状態を保持する傾向となったと考えられる。加えて、ポリマーの混入によるポリマーフィルムの形成³⁾によって、水分移動が阻害されることも影響として考えられる。その後、内部ひび割れの発生とともに、水蒸気圧が緩やかに低下するものと考えられる。

3.6 水蒸気圧および拘束応力と内部温度との関係(5mm)

図-9 に各供試体の 5mm 位置での拘束応力と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。Ichikawa ら¹⁰⁾は、SVP 曲線の左側を過飽和領域、右側を不飽和領域としている。全体の傾向は下記のとおりである。内部温度の上昇に伴い拘束応力が上昇した後、拘束応力の上昇速度が緩やかになっている点が確認できる。例えば、材齢 42 日では 100℃付近がその点にあたる。この時点で、内部でマイクロクラックが生じていると考えられる。併せて、加熱に伴い、水蒸気圧が上昇する。拘束応力によって生じるマイクロクラックに、水蒸気圧が作用することで爆裂が生じると考えられる。図-10 に 5mm 位置における爆裂が生じた時の内部温度と拘束応力および水蒸気圧をまとめた。爆裂が生じ

た温度は、153～227℃の領域であった。拘束応力と水蒸気圧の範囲は、それぞれ 3～5.5MPa と 3.4～5.5MPa であった。

3.7 各材齢における爆裂進行速度

図-11、表-4 に各材齢における爆裂深さの加熱時間との関係と爆裂進行速度を示す。ここでは、爆裂音と供試体内部に設置した K 型熱電対が急激に変化する時間および加熱試験後の最大爆裂深さをもとに、爆裂深さの経時変化を求めた。

各材齢ともに加熱時間の経過とともに、爆裂が進行していることがわかる。その結果をもとに、爆裂進行速度を求めた。その結果、爆裂進行速度は 1.07～2.53mm/min の範囲であった。一方、既往研究¹¹⁾では材齢 60 日で RABT30 加熱曲線を用いて PCM のリング試験結果より、爆裂進行速度を求めると 3.23mm/min となった。本実験結果は既往の研究よりも、爆裂進行速度は小さい。これは、今回の実験で加熱の際に用いた電気炉は加熱初期の炉内温度は高いため、最初の爆裂発生は 2 分程度であった。一方で、出力がガス炉に比べて小さく、その後の爆裂進展速度はガス炉よりも小さくなったと考えられる。

3.8 限界引張ひずみと材齢の関係

図-12 に最初の爆裂発生時のひずみである限界引張ひずみと材齢の関係を示す。ここでは、加熱面から 5mm 位置における拘束応力から引張ひずみを算出した。併せて、既往研究³⁾の結果を示す。

限界引張ひずみは材齢の経過とともに大きくなり 44～98μ の範囲であった。既往の知見では、見かけのポアソン比が 0.15 から 0.3 の値を用いているが、本研究では

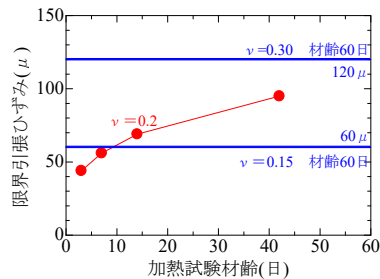


図-12 限界引張ひずみと材齢の関係

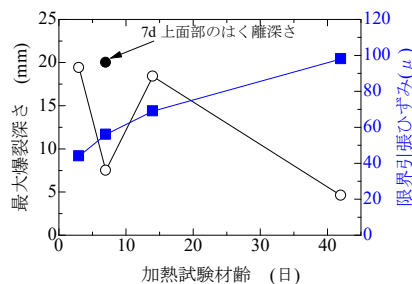


図-13 限界引張ひずみと最大爆裂深さの関係

0.2 を用いており、ほぼ既往の研究の範囲と同程度となった。

図-13 に限界引張ひずみと最大爆裂深さの関係を示す。最大爆裂深さは材齢 7 日を除いて、若材齢ほど大きい傾向を示した。一方で、限界引張ひずみは、材齢の進行とともに、大きくなる傾向を示した。引張ひずみが大きくなることは、爆裂が生じにくくなることを意味しており、若材齢ほど、爆裂しやすい傾向にある。加えて材齢 3 日は加熱時間が 15min であり、ほかの供試体よりも短かったため、30min 加熱であればより爆裂が進行したと予想される。

4. まとめ

本研究ではポリマーセメントモルタルの若材齢期における爆裂リスクを評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 本研究で対象としたポリマーセメントモルタルは、若材齢期ほど、爆裂規模が大きくなる可能性があることがわかった
- 2) 爆裂発生時の拘束応力と水蒸気圧の範囲は、それぞれ 3～5.5MPa と 3.4～5.5MPa であった。
- 3) PCM の若材齢期における爆裂進行速度は 1.07～2.53mm/min の範囲であった。
- 4) 若材齢期の最大爆裂深さおよび限界引張ひずみの関係より、引張ひずみが高いほど爆裂リスクは低い傾向にあることが分かった。

謝辞

本研究の実施にあたり、群馬大学大学院生 栗原祐人

氏、大倉玲真氏の補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー150 セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針，2018.6
- 2) 安藤祐太郎，Sanjay PAREEK：各種コンクリート及びポリマーセメントモルタルの燃焼特性及び熱伝導特性に関する評価検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp1306-1311，2014.6
- 3) 杉野 雄亮，小澤 満津雄，谷辺 徹，常藤 光，祐川 真紀帆：リング拘束供試体法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と爆裂発生メカニズムに関する検討，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，第 77 巻 4 号 p.150-163，2021.11
- 4) 大倉玲真，栗原祐斗，福井拓也，小澤満津雄：リング拘束加熱試験による耐熱性断面補修材の若材齢時における爆裂評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.859-864，2024.6
- 5) 栗原 祐斗，富山 隆彦，福井 拓也，小澤 満津雄：高温加熱を受ける耐熱性断面補修材の若材齢における爆裂性状、第 23 回 コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文集,pp.371-376,Vol.23, 2023.10
- 6) 羽生隼，栗原祐斗，小澤満津雄：リング拘束加熱試験を用いた若材齢時における高強度コンクリートの爆裂性状評価，コンクリート工学年次論文集，pp.1117-1122，No.1，Vol.46，2024.6
- 7) 日本コンクリート工学会：JCI 試験規準，コンクリートの爆裂試験法，https://www.jci-net.or.jp/j/publish/standard/jci_standard/JCI-S-014-2024_20240314.pdf (2025/1/6 閲覧)
- 8) 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，土木学会論文集，E2，Vol. 70，No. 1 pp. 104-117，2014.3
- 9) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2017.3
- 10) 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, March 2004
- 11) Y.Sugino, M.Ozawa, M.Sukekawa：Fire spalling behavior of various polymer modified mortars under ring restraint, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 21, pp.367-379, May 2023