

博士論文

リング拘束供試体を適用したポリマーセメント
モルタルの火災時の爆裂性状と爆裂発生メカニズム
に関する研究

(Fire spalling behavior of polymer cement mortar
under ring restraint condition)

T192C001 杉野 雄亮

指導教員 小澤 満津雄 教授

群馬大学大学院 理工学府
理工学専攻 環境創生理工学領域

2022年3月

目次

1. 序論：研究背景と目的	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 RC 構造物の維持管理に関する動向	1
1.1.2 RC 構造物の断面修復に用いる補修材	1
1.1.3 RC 構造物の火害事例	1
1.1.4 PCM の高温下の爆裂現象	2
1.2 本論文の目的	2
1.3 論文構成	3
1 章の参考文献	4
2. 耐火性および爆裂に関する既往の研究	5
2.1 補修した RC 部材の耐火性	5
2.2 小型供試体の加熱試験による爆裂評価	5
2.3 爆裂現象および爆裂発生メカニズムに関する研究	6
2 章の参考文献	7
3. リング拘束供試体法による爆裂試験方法	9
3.1 リング拘束供試体の形状寸法	9
3.2 リング拘束供試体の加熱方法	10
3.3 内部応力の測定方法	11
3.3.1 内部温度と爆裂発生時間の推定方法	11
3.3.2 拘束応力の測定方法	12
3.3.3 水蒸気圧の測定方法	12
3.4 爆裂による損傷規模の評価方法	13
3 章の参考文献	14
4. PCM の爆裂性状評価	15
4.1 各種ポリマーを混入した PCM の爆裂性状	15
4.1.1 使用材料および配合	15
4.1.2 フレッシュ性状および強度特性	16
4.1.3 リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件	16
4.1.4 爆裂継続時間および爆裂による損傷規模	17
4.1.5 内部温度と爆裂発生時間の推定	19
4.1.6 拘束応力および水蒸気圧	20
4.2 ポリマー混入量の影響	22
4.2.1 使用材料および配合	22
4.2.2 フレッシュ性状および強度特性	22
4.2.3 リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件	22

4.2.4	爆裂継続時間および爆裂による損傷規模	23
4.2.5	内部温度と爆裂発生時間の推定	26
4.2.6	拘束応力および水蒸気圧	27
	4章の参考文献	30
5.	爆裂発生メカニズムに関する検討	31
5.1	コンクリートの爆裂発生メカニズム	31
5.2	PCMの爆裂発生メカニズムに関する検討	32
5.3	PCMの引張破壊ひずみ推定方法に関する提案	33
5.4	引張ひずみ破壊発生時間と爆裂発生時間の比較	37
5.4.1	各種ポリマーを混入したPCMによる検証	37
5.4.2	P/C=2.5~20%のPCMによる検証	39
5.5	爆裂発生時の水蒸気圧の作用に関する考察	39
5.5.1	爆裂発生時の水蒸気圧と内部温度に関する傾向	39
5.5.2	爆裂発生温度域におけるPCMの組織の状態	42
5.6	PCMの爆裂による損傷が大きくなる原因考察	47
	5章の参考文献	50
6.	有機繊維混入による爆裂抑止効果	51
6.1	各種ポリマーを用いたPCMの評価	51
6.1.1	使用材料および配合	51
6.1.2	フレッシュ性状および強度特性	51
6.1.3	リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件	52
6.1.4	爆裂継続時間および爆裂による損傷規模	53
6.1.5	内部温度と爆裂発生時間の推定	55
6.1.6	拘束応力および水蒸気圧	56
6.2	P/Cが爆裂抑止効果に及ぼす影響	58
6.2.1	使用材料および配合	58
6.2.2	フレッシュ性状および強度特性	58
6.2.3	リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件	58
6.2.4	爆裂継続時間および爆裂による損傷規模	59
6.2.5	内部温度と爆裂発生時間の推定	61
6.2.6	拘束応力および水蒸気圧	62
6.3	爆裂発生メカニズムに基づく爆裂未発生原因の考察	64
6.3.1	引張ひずみ破壊指数と水蒸気圧の挙動	64
6.3.2	有機繊維混入による爆裂抑止効果のイメージ	65
	6章の参考文献	69
7.	補修したRC部材の耐火試験との比較評価	70
7.1	試験体の仕様	70

7.1.1	リング拘束供試体	70
7.1.2	補修した RC 梁	71
7.2	リング拘束供試体および RC 梁の加熱条件	72
7.3	フレッシュ性状および強度特性	73
7.4	爆裂による損傷規模	73
7.5	内部温度の経時変化	74
	7章の参考文献	77
8.	補修厚さおよび材齢の影響	78
8.1	PCMで補修したコンクリートの供試体作製方法	78
8.2	補修厚さの影響評価	79
8.2.1	使用材料および配合	79
8.2.2	フレッシュ性状および強度特性	80
8.2.3	リング拘束供試体の加熱条件	80
8.2.4	爆裂継続時間および爆裂による損傷規模	81
8.2.5	内部温度と爆裂発生時間の推定	83
8.2.6	拘束応力および水蒸気圧	84
8.3	材齢の影響評価	86
8.3.1	水準および養生期間	86
8.3.2	コンクリートおよびPCMの強度特性	86
8.3.3	リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件	86
8.3.4	爆裂継続時間および爆裂による損傷規模	86
8.3.5	内部温度と爆裂発生時間の推定	88
8.3.6	拘束応力および水蒸気圧	88
	8章の参考文献	91
9.	結論および今後の展望	92
9.1	各章における結論	92
9.2	今後の課題と展望	93
	9章の参考文献	94
	発表論文リスト	95
	関連論文	95
	参考論文	95
	謝辞	97

1. 序論：研究背景と目的

1.1 研究背景

1.1.1 RC 構造物の維持管理に関する動向

RC 構造物は、維持管理をして供用することがライフサイクルコストを削減するための道筋であると考えられる。維持管理とは、点検および診断を計画的に実施し、劣化進行を予測し、必要な時期に適切な補修を行うことである¹⁾。経済産業省は、持続可能な開発目標 (SDGs) において、持続可能で強靱な国土と質の高いインフラの整備を優先課題としている²⁾。また、政府は 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体でゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを目標に掲げている³⁾。SDGs やカーボンニュートラルの視点に基づくと、資源やエネルギーを消費する「解体・新設」よりも既設構造物の継続利用が積極的に選択される可能性がある。また、国土交通省、NEXCO 東日本および首都高速道路の保有する施設経過年数に関する資料^{4),5),6)}によると、今後供用から 50 年経過した施設の割合が急速に増加し、老朽化の影響が表れてくる可能性がある。施設の老朽化に関しては、公共建築物の老朽化に関する資料⁷⁾から建築物においても同様である。これらの社会情勢を鑑みると、維持管理における補修適用の範囲は、さらに拡大することが予想される。

1.1.2 RC 構造物の断面修復に用いる補修材

RC 構造物の補修工法のひとつに断面修復がある。この工法は、劣化したコンクリートを除去し、除去した部分を補修材で充填して修復する方法である。断面修復に用いる補修材は、母材であるコンクリートとの付着性を高めるため、ポリマーセメントモルタル (PCM) が用いられる^{8),9)}。PCM に混入するポリマーは、セメント混和用ポリマーディスパージョン及び再乳化形粉末樹脂 (JIS A 6203 : 2015) に適合するポリマーが用いられる。セメント混和用ポリマーの種類は、ディスパージョン(水の中にポリマーの微粒子が分散した状態)と粉末樹脂に分類される¹⁰⁾。粉末樹脂の利点は、セメントや骨材とあらかじめプレミックスできることにある。そのため、現場ではプレミックスパウダーに水を加えるだけで PCM を製造でき、計量手間が減り、施工品質が安定する。粉末樹脂を用いた PCM は、各種製品が開発され、市場に供給されている。

1.1.3 RC 構造物の火害事例

従来、コンクリートは耐火性を有する材料とされる。しかし、トンネルや高架道路は車両火災により被害が大きくなった事例がある。ここでは、車両火災による RC 構造物の火害事例として、日本坂トンネルの火災事故と首都高速 5 号池袋線の火災事故の概要を示す。

- 1) 日本坂トンネルの火災事故は、1979 年 7 月 11 日に東名高速道路日本坂トンネル下り線において発生した。この事故は、追突事故に伴い車両火災が発生し、さらに後続車両 173 台が延焼するに至った。消火には 10 日間を要し、覆工コンクリートの被害は全長 1610m のうち 1122m の区間に達した。復旧工事は 24 時間体制の突貫工事により事故から 60 日で全面供用を再開している。それでも、被害額は 67 億円 (うち、復旧工事費 34 億円、通行料金減収 33 億円) に上ったとされている¹¹⁾。
- 2) 首都高速 5 号池袋線の火災は、タンクローリーが炎上し、消火まで 5 時間を要し、火災による温度上昇は最高で 1200°C に達したと推定される。この火災により、RC 高架道路

の上部工や橋脚にコンクリートの剥落、鉄筋の露出、ひび割れ等の損傷が生じた^{12), 13)}。火災復旧には73日間を要し、被害額はおよそ45億円（うち、復旧工事費20億円、通行料金減収25億円）とされる¹⁴⁾。

なお、2020年の総出火件数は、34,691件あり、そのうち建物火災が19,365件、車両火災が3,466件発生している¹⁵⁾。今後は、補修したRC部材が火災を受けるケースも増えると考えられる。そのため、補修したRC部材も建造物の重要度や火災による被害予測等に応じて耐火性を検討する必要性が高まることが予想される。

1.1.4 PCMの高温下の爆裂現象

PCMはコンクリートとの付着を高めるためにポリマーが混入される。一方、PCMの耐火性に関する文献によると、PCMはポリマー無混入のモルタル(NCM)に比べ、高温下で爆裂が発生しやすいとの報告が確認される¹⁶⁾。これらの研究事例に関する情報は、2章に詳細を示す。仮に、PCMで補修したRC部材においてPCMに爆裂が生じた場合、補修部のかぶりが損傷し、断面減少と鉄筋温度上昇によりRC部材全体の耐火性の低下につながる恐れがある。しかしながら、PCMの爆裂現象の詳細や爆裂発生メカニズムについては未だ不明な点が多い現状である。

1.2 本論文の目的

図1-1にリング拘束供試体による爆裂試験イメージを示す。本論文は、リング拘束供試体を適用して爆裂試験を行い、PCMの高温下の爆裂性状を評価し、爆裂発生メカニズムを検討することを目的とした。リング拘束供試体は、小型供試体で外部拘束の影響を考慮できる爆裂試験方法である。従来、コンクリートの爆裂試験方法として開発された試験方法であるが、この方法をPCMに応用し、標準化された試験条件で爆裂による損傷規模を比較評価することとした。さらに、爆裂発生時の内部応力状態を拘束応力と水蒸気圧により定量的に評価し、爆裂発生メカニズムについて検討した。

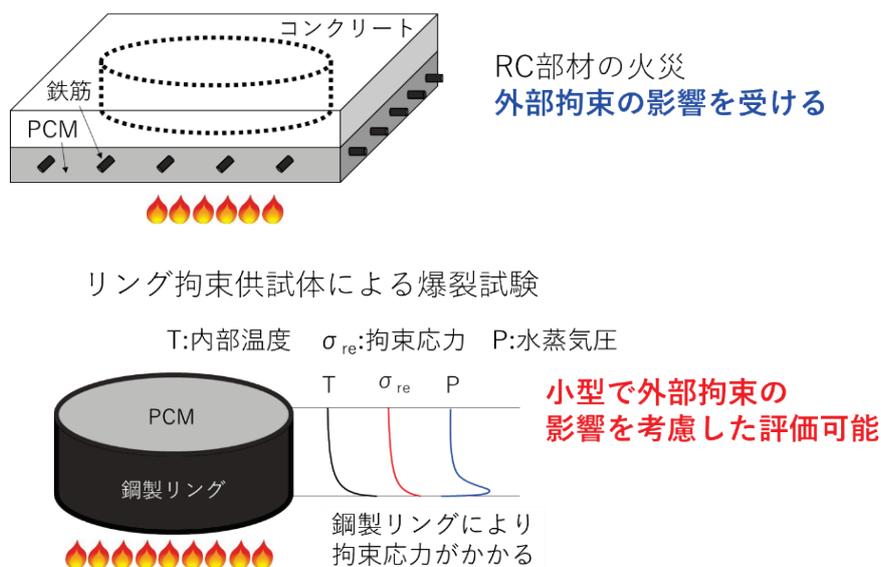


図 1-1 リング拘束供試体による爆裂試験イメージ

1.3 論文構成

図 1-2 に論文構成を示す。1 章は、背景と目的について説明した。2 章は、PCM およびコンクリートの耐火性および爆裂に関する既往の研究をまとめた。3 章は、リング拘束供試体を適用した爆裂試験方法の概要を説明した。4 章では、ポリマーの種類やポリマーセメント質量比 (P/C) の異なる PCM の爆裂性状を評価した。5 章は、4 章の爆裂試験データを用い、PCM の爆裂発生メカニズムについて検討した。6 章は、有機繊維を混入した配合の爆裂抑止効果を確認し、爆裂未発生時のメカニズムを検討した。7 章は、PCM で補修した RC 梁の加熱試験を行い、リング拘束供試体の爆裂試験結果と比較評価した。8 章は、コンクリートに PCM を打ち重ねたリング拘束供試体を用い、補修厚さや材齢が爆裂に及ぼす影響を調べた。9 章は、リング拘束供試体を適用した PCM の爆裂試験結果をとりまとめ、得られた知見と今後の課題や展望を整理した。

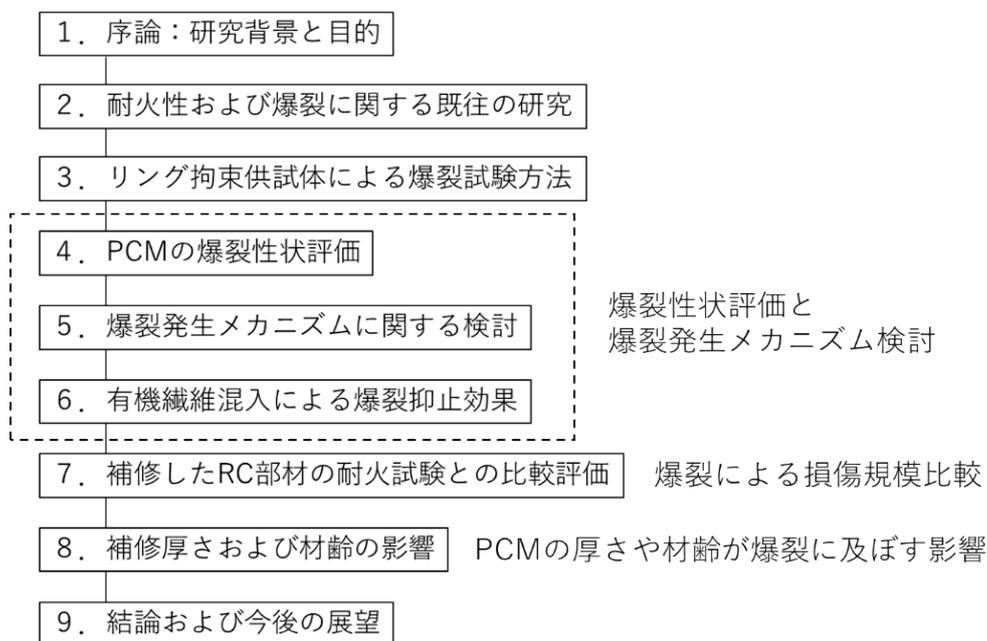


図 1-2 論文構成

1 章の参考文献

- 1) 皆川浩：コンクリート構造物のライフサイクルコスト評価技術の現状と課題およびその展望，コンクリート工学，Vol.48，No.5，2010.
- 2) SDGs アクションプラン 2021，経済産業省 SDGs 推進本部，2020.
- 3) 脱炭素ポータル，環境省，
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/（閲覧日：2022年1月25日）
- 4) 国土交通白書 2021，第2章，第2節，国土交通省，
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r02/hakusho/r03/pdfindex.html>（閲覧日：2022年1月25日）
- 5) NEXCO 東日本 インフラ長寿命化計画（行動計画）令和3年度～令和7年度，東日本高速道路株式会社，2021.
- 6) 諸橋雅之：持続可能な首都高ネットワーク機能の確保に向けて，土木学会誌，Vol.106，No.9，2021.9
- 7) 官庁営繕：インフラ長寿命化計画，国土交通省，
https://www.mlit.go.jp/gobuild/gobuild_tk2_000007.html（閲覧日：2022年1月25日）
- 8) 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，土木学会，pp. 30-39, 2018.
- 9) 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，pp. 105-111, 1997.
- 10) 出村克宜：特集 最近のコンクリート用混和剤／2.13，セメント混和用ポリマー，コンクリート工学，Vol.26，No.3，pp.85-90，1988.
- 11) 鮫島利隆，赤井公昭，山田憲夫：日本坂トンネル火災事故の復旧工事，土木学会誌，Vol.65，No.5，1980.4.
- 12) 首都高速5号池袋線タンクローリー事故に伴う構造物の被災状況，土木学会誌，Vol.93，No.12，2008.12.
- 13) 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.
- 14) タンクローリー事故の首都高復旧工事・減収計45億円，朝日新聞（2008.10.14記事）
- 15) 令和2年（1～12月）における火災の状況（確定値），消防統計（火災統計），消防庁，2021.
- 16) コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，2012.

以上

2. 耐火性および爆裂に関する既往の研究

2.1 補修した RC 部材の耐火性

濱崎らは、かぶりを含むコンクリートの一部を PCM で補修した壁部材の耐火性について検討している¹⁾。PCM の砂セメント質量比 (S/C) は 3.0, 水セメント質量比 (W/C) は 0.5, ポリマー量は 20~100kg/m³ である。加熱条件は、ISO834 標準加熱曲線による 2 時間の加熱である。試験の結果、PCM に損傷が生じない条件であれば、PCM の内部への熱の伝わりはコンクリートや普通モルタルと比較して同等以上であることが確認されている。これは、高温作用を受けた PCM の熱伝導率は、ポリマーの燃焼により空隙量が増加する影響でコンクリートや普通セメントモルタルに比べて小さくなること²⁾が一因にあるとしている。なお、400°C を超えると PCM とコンクリートの付着強度が低下して一体性を期待できなくなるため、補修厚さがかぶり厚さよりも浅い場合は、メッシュおよびアンカーピンによる剥落防止耐対策が必要となることを述べている。

道越ら、梅本らは、爆裂しないことを確認した PCM により補修した RC 壁部材の載荷加熱試験を実施している^{3),4)}。加熱条件は、ISO834 標準加熱曲線による 2 時間の加熱である。試験の結果、PCM は爆裂未発生であり、さらに裏面温度は無補修の水準に比べて低いため、補修した RC 壁は、無補修の場合と同等もしくは同等以上の耐火性を有すると考えている。また、森田ら、松戸らは、RC 造柱のかぶり部分を PCM で増厚し、一定軸力を載荷しながら加熱試験を実施している^{5),6)}。加熱条件は、ISO834 標準加熱曲線の 5 時間加熱である。試験の結果、PCM に顕著な爆裂発生はみられず、遮熱性能はコンクリートと同等であり、軸力保持性能は十分にあることを確認している。一方、RC 壁のかぶり面を PCM で増厚した部材の耐火試験では、爆裂により損傷が発生する水準が確認されている⁷⁾。加熱条件は、ISO834 標準加熱曲線による 3 時間の加熱である。PCM はメッシュを伏せ込み、アンカーピンによってコンクリートと連結されている。爆裂は、アンカーピンより内側まで発生する事例もあり、爆裂面積が全面に至る場合もみられる。爆裂による損傷が大きいと内部温度上昇が早まり、部材の遮熱性が低下することが確認されている。これらの知見より、PCM の爆裂が未発生、もしくは軽微であり、コンクリートから剥落しなければ、補修した RC 部材は、無補修と同等の耐火性能を期待できると考えられる。すなわち、補修した RC 部材の耐火性を確保するためには、PCM の爆裂を抑止することが重要であることが分かる。

2.2 小型供試体の加熱試験による爆裂評価

岸谷らは、板状の小型供試体により爆裂による損傷状態を目視評価している⁸⁾。加熱試験は、軽量ボード下地に 280×280×t20mm の PCM を取り付け、一面加熱している。加熱条件は、JISA 1301 : 1994 (建築物の木造部分の防火試験方法) に規定されている防火 2 級加熱曲線と 400, 500, 600, 700°C の定温加熱である。PCM の砂セメント質量比 (S/C) は 2.5, ポリマーセメント質量比 (P/C) は、5, 10, 20% である。防火 2 級加熱曲線で加熱した場合、PCM は昇温開始から 6~10 分で爆裂および剥落が確認される。一方、普通セメントモルタルは爆裂が未発生である。定温加熱試験は、P/C が大きく加熱温度が大きいほど爆裂による損傷が大きくなる。鈴木らは、φ50×100mm の供試体を 800°C の電気炉に 20 分間入れ、加熱後に取り出して損傷状態を目視評価している⁹⁾。PCM は各種の市販品や試製品である。小型供試体は、無拘束条件と供試体中央部に鋼製平織金網を縦方向に埋め込み、拘束がか

2. 耐火性および爆裂に関する既往の研究

かる条件で実施している。小型供試体の加熱試験の結果、金網を埋め込んだ供試体は、ひび割れが発生する水準が多く、拘束の影響とされる。さらに、同じ PCM を用い、小型供試体の加熱試験結果と PCM で補修した壁部材の耐火試験結果の損傷状態を比較している。その結果、壁部材において爆裂による損傷が激しい水準は、小型供試体でも爆裂や割れ等の損傷が確認できる。しかし、表層付近に爆裂が発生した程度の壁部材の水準は、小型供試体の加熱試験では損傷が生じておらず、相関性がみられないと報告されている。小型供試体による爆裂評価結果から、PCM はポリマー無混入のモルタルに比べ爆裂が発生しやすいと考えられる。一方、部材レベルの耐火試験において爆裂による損傷がみられる水準で、同じ PCM による小型供試体の加熱試験では爆裂が生じない場合もあり、両者が異なる傾向を示す可能性も示唆されている。

2.3 爆裂現象および爆裂発生メカニズムに関する研究

金らは PCM の熱分解に伴うガスの発生を調べている¹⁰⁾。熱重量示差熱分析装置 (TG-DTA) による分析では、EVA, PAE, SBR の各種ポリマーは、いずれも 200~500°C 付近で熱分解が確認される。また、燃焼時の発生ガスは、コーンカロリーメーターにより 99%以上が CO₂ ガス、残り 1%以下が CO および CH₄ ガスであることを確認している。これらのガスや水蒸気が放出できないとき、内部圧力が増加して爆裂が発生しやすくなると考えている。しかし、爆裂を実験的に再現した上で、爆裂現象の詳細や爆裂発生メカニズムについて検討した事例は無く、PCM の高温下の爆裂現象については未だ不明な点が多くあると考えられる。一方、コンクリートの高温下の爆裂現象に関する研究は、PCM に先行している。これらの研究によると、コンクリートの高温下の爆裂は、熱応力および水蒸気圧の作用によると考えられている。Harmathy は、コンクリートが含有する水分が高温下で水蒸気になり、それにより生じる水蒸気圧が爆裂の発生要因となることを述べている¹¹⁾。また、Bazant や Anderberg は、熱膨張により加熱面と水平に生じる圧縮応力と水蒸気圧が爆裂に作用すると考察している^{12), 13)}。一方、斎藤は、RC の爆裂は熱応力と周辺拘束の影響が主要因であり、水蒸気圧のみでコンクリートの引張破壊は生じないと説明している^{14), 15)}。Ozawa らは、リング拘束供試体を用い、高強度コンクリートの爆裂発生時の拘束応力と水蒸気圧を計測している¹⁶⁾。その結果、コンクリートの高温下の爆裂は、拘束応力のポアソン効果に伴う引張ひずみ破壊と水蒸気圧による破壊片の押し出しが複合して作用するときに生じると考察されている。なお、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委員会」は、RC 柱部材の載荷加熱試験と各種小型供試体の共通試験を実施し、爆裂による損傷状態を比較評価している¹⁷⁾。その結果、上述のリング拘束供試体による結果は、RC 柱部材の載荷加熱試験結果に最も近くなったことが報告されている。高温下の爆裂による損傷は、拘束の影響を受けると考えられており、リング拘束供試体法¹⁸⁾は小型でも外部拘束を考慮した評価が可能な点に特徴がある。上述の試験法は JCI 規準に制定され、コンクリートの高温下の耐爆裂性に関するスクリーニング評価に活用されている。

2章の参考文献

- 1) 濱崎仁, 茂木武, 野口貴文, 王徳東, 金享俊: 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 その1 耐火試験における補修部の損傷および温度分布, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第672号, pp.1065-1071, 2010.
- 2) 王徳東, 野口貴文, 濱崎仁, 成瀬友宏, 長井宏憲, 金享俊: 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(東海), pp.163-164, 2008.
- 3) 道越真太郎, 遊佐秀逸, 野口貴文, 山崎裕一, 吉田敏之, 大岡督尚, 吉岡昌洋, 加納嘉, 森田武, 唐沢智之, 梶田秀幸, 加納雅樹: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造床試験体の耐火試験 その1 実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1115-1116, 2012.
- 4) 梅本宗宏, 遊佐秀逸, 野口貴文, 道越真太郎, 森田武, 山田人司, 起橋孝徳, 唐沢智之, 中瀬博一, 松戸正士, 梶田秀幸, 加納雅樹: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造床試験体の耐火試験 その2 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1117-1118, 2012.
- 5) 森田武, 松戸正士, 遊佐秀逸, 野口貴文, 安田正雪, 神代泰道, 住学, 山崎裕一, 大岡督尚, 吉岡昌洋, 加納嘉, 唐沢智之: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造柱の耐火試験 (その1 実験概要および実験経過), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1119-1120, 2012.
- 6) 松戸正士, 森田武, 遊佐秀逸, 野口貴文, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 道越真太郎, 起橋孝徳, 唐沢智之, 中瀬博一, 加納雅樹: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造柱の耐火試験 (その2 軸方向変位および部材温度測定結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1121-1122, 2012.
- 7) 濱崎仁, 鹿毛忠継, 萩原一郎, 吉田正志, 茂木武, 根本かおり, 日本建設業連合会かぶり厚さ確保研究会: 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, 建築研究報告, No.147, 2013.
- 8) 岸谷孝一, 土田恭義: ポリマーセメントモルタルの耐火性状に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.169-170, 1982.
- 9) 鈴木好幸, 濱崎仁, 遊佐秀逸, 野口貴文, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 道越真太郎, 野中英, 山田人司: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐火性評価に関する実験 その3 耐爆裂性の評価方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1109-1110, 2012.
- 10) 金享俊: 高温環境下におけるポリマーセメントモルタルの変状に伴う爆裂機構に関する研究, BELCA NEWS, 139号, pp.72-88, 2012.
- 11) Harmathy, T. Z.: Effect of moisture on the fire endurance of building elements. *ASTM Special Technical Publication*, No.385, pp.74-95, 1965.
- 12) 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.
- 13) Anderberg, Y.: Spalling phenomena in HPC and OC, *Proceedings of the International Workshop*

2. 耐火性および爆裂に関する既往の研究

- on Fire Performance of High-strength Concrete, NIST*, pp. 69-73, Gaithersburg, Maryland, 1997.
- 14) 斎藤光：プレストレスとコンクリート部材の爆裂について，日本建築学会論文報告集号外，pp.688，1966.
 - 15) 斎藤光：火災時のコンクリート内部の水蒸気圧について，日本建築学会論文報告集号外，pp.937，1967.
 - 16) Ozawa, M., Tanibe, T., Kamata, R., Uchida, Y. and 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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/j/jci/study/standard.html>（閲覧日：2022年1月25日）

以上

3. リング拘束供試体による爆裂試験方法

3.1 リング拘束供試体の形状寸法

図3-1にリング拘束供試体の形状寸法(一例)を示す。供試体の詳細な仕様については、各章にて示す。リング拘束供試体の作製は、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¹⁾を参考にした。鋼製リング外周には、ひずみゲージを貼り付け、リング周方向のひずみを測定した。さらに、ひずみゲージと同じ位置に熱電対を取り付け、リングの温度を測定した。また、リングに4方向から穴をあけ、ステンレスパイプを通した。ステンレスパイプの先端は、供試体の中心部に設置し、供試体中心付近の水蒸気圧を測定できるようにした。なお、図中には1方向のステンレスパイプを示し、残りのステンレスパイプは先端のみ表記している。また、ステンレスパイプ先端と同じ位置に熱電対を設置し、内部温度を測定した。各種センサーは深さ方向に数点設置した。また、各種センサーを設置した後、評価対象とする材料を鋼製リング内に充填して供試体を作製した。

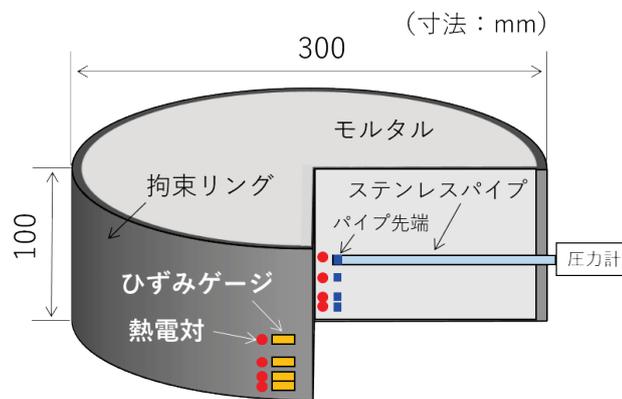


図3-1 リング拘束供試体の形状寸法 (一例)

3.2 リング拘束供試体の加熱方法

図 3-2 にリング拘束供試体の加熱方法を示す。加熱炉は、天然ガスを熱源とする水平炉を用いた。炉内温度は、JIS A 1304 : 2017 (建築構造部分の耐火試験方法) に記載のシーブ熱電対により測定し、熱電対の測定部は、リング拘束供試体から 100mm 下方に設置した。リング拘束供試体は、下面側に開口部を設けて加熱した。また、鋼製リングが直接加熱されないよう、リング下端を断熱材で被覆した。図 3-3 に設定温度と炉内温度を示す。図より、加熱曲線 2 (RABT30 相当) に設定して加熱炉を運転したときの炉内温度は、設定温度と概ね一致することを確認した。

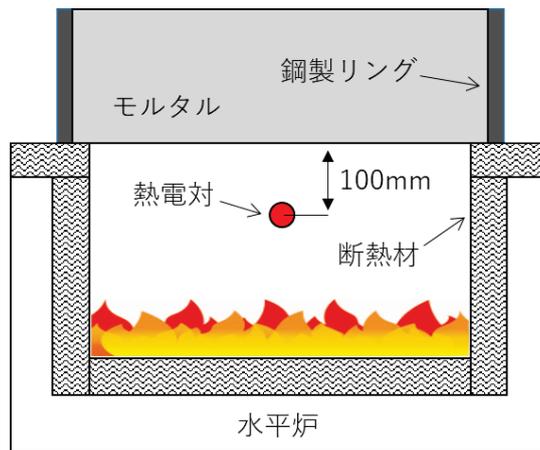


図 3-2 リング拘束供試体の加熱方法

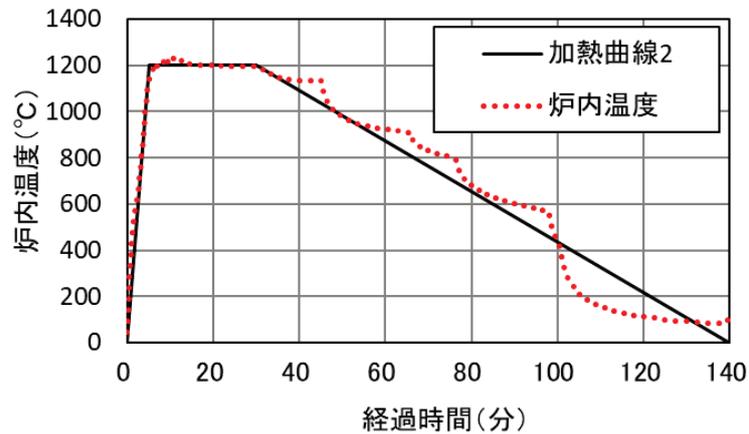


図 3-3 設定温度と炉内温度

3.3 内部応力の測定方法

3.3.1 内部温度と爆裂発生時間の推定方法

内部温度は、モルタル内部に設置した熱電対により測定した。コンクリートは、爆裂発生時に内部温度-経過時間曲線の傾きが急激に大きくなることが確認されている²⁾。熱電対の設置位置付近で爆裂が発生すると、コンクリートに断面欠損が生じ、熱電対が炉内に直接曝される。その結果、爆裂発生以降、内部温度-経過時間曲線の傾きが急激に大きくなると思われる。図3-4にISO834標準加熱曲線に従いリング拘束供試体を加熱した際の爆裂未発生時および爆裂発生時の内部温度の経時変化例³⁾を示す。既往の研究より、PCMおよびNCMにおいても、コンクリートと同様、爆裂の発生以降は、内部温度-経過時間曲線の傾きが急激に増加する現象が確認されている。

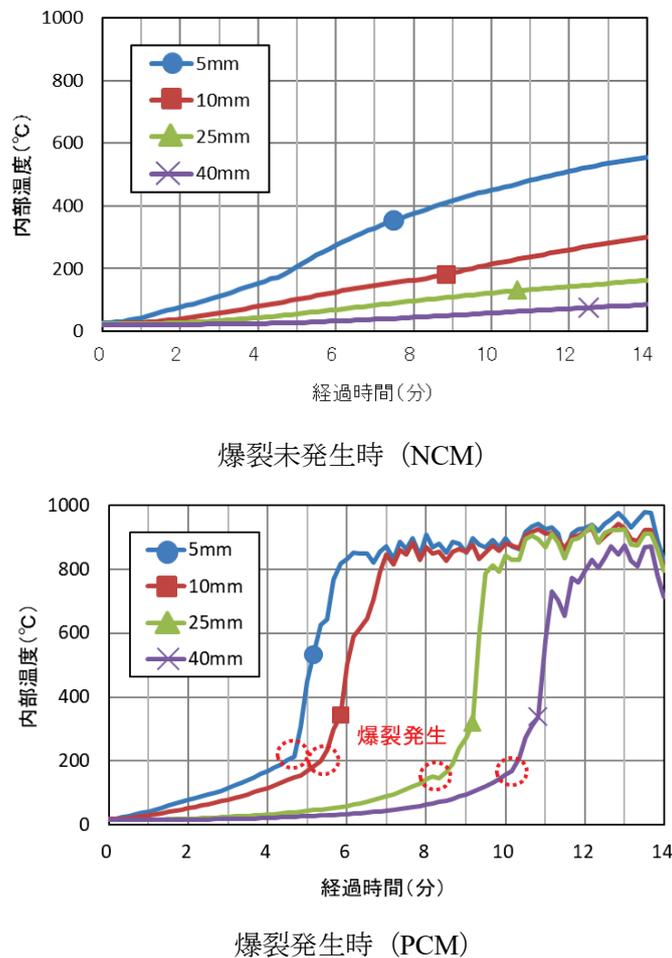


図3-4 内部温度の経時変化例³⁾

3.3.2 拘束応力の測定方法

リング拘束供試体法の拘束応力は、内圧を受ける円筒モデル^{4),5),6)}により算出することが可能である。拘束応力は、リング拘束供試体法の付属書 A¹⁾を参考とし、鋼製リングの円周方向ひずみから算出した。式(3-1)に拘束応力の計算式を示す。なお、試験に用いたひずみゲージの温度補償範囲上限は 80°C であるため、鋼製リングの温度がひずみゲージの温度補償範囲の上限を超えないことを確認した上で、ひずみ測定 of データを用いることとした。

$$\sigma_{re} = \varepsilon_{\theta} \cdot E_s \cdot t / R \quad (3-1)$$

ここで、 σ_{re} ：拘束応力、 ε_{θ} ：鋼製リングの円周方向ひずみ、 t ：鋼製リングの厚み、 E_s ：鋼製リングの弾性係数、 R ：リング内半径

リング厚さの設定は、リング拘束供試体による高強度コンクリートの爆裂試験に関する研究を参考にした。谷辺ら⁷⁾は、コンクリートで作製した $\phi 284 \times 100 \text{mm}$ の無拘束供試体と、鋼製リング厚さが 0.5, 8, 18mm のリング拘束供試体の爆裂性状を比較評価している。その結果、リング厚さが大きい方が爆裂による損傷規模が大きくなり、リング厚さ 8mm および 18mm の爆裂規模はあまり変わらないことを確認している。式(3-2)に拘束度の計算式を示す。拘束度は、加熱時のコンクリートの半径増加量により評価し、鋼製リングの厚さ 0.5mm の供試体の拘束度が 0.3~0.4 であるのに対し、厚さ 8mm および 18mm の供試体の拘束度は 0.8~0.9 であり、拘束度が高くなることを示している。したがって、リング厚さ 8mm 仕様で供試体の標準化が可能であることを述べている。なお、上述の評価結果は高強度コンクリートの知見ではあるが、PCM はそれに比べて低強度であり、拘束度は同等以上になると判断した。したがって、リング拘束供試体の鋼製リングの厚さは 8mm とした。

$$M_{re} = (\Delta R_0 - \Delta R_{re}) / \Delta R_0 \quad (3-2)$$

ここで、 M_{re} ：拘束度 (0：自由膨張~1.0：完全拘束)、 ΔR_0 ：無拘束供試体の半径増加量、 ΔR_{re} ：拘束供試体の半径増加量

3.3.3 水蒸気圧の測定方法

水蒸気圧の測定は、リング拘束供試体法の付属書 A¹⁾を参考にした。ステンレスパイプ内部は、供試体の加熱前にシリコンオイルで充填した。さらに、ステンレスパイプ外端に圧力計を取り付け、パイプ先端の水蒸気圧がシリコンオイルを伝達して圧力計に伝わるようにした。シリコンオイルの熱膨張により生じる圧力は、水蒸気圧の測定値からシリコンオイルの熱膨張による圧力を差し引くことで補正した。シリコンオイルの熱膨張により生じる圧力は、事前試験により確認した。事前試験は、ステンレスパイプ先端を塞いだ状態でシリコンオイルを充填し、圧力計を反対側の端部に取り付けた。さらに、ステンレスパイプを電気炉内に静置して加熱し、加熱温度と圧力の関係を把握した。

3.4 爆裂による損傷規模の評価方法

加熱試験後の爆裂規模は、加熱面の爆裂深さ分布に基づき評価した。爆裂深さは、加熱試験終了後、供試体が冷却してから測定した。爆裂深さの測定位置は、加熱面を10mmメッシュで分割したときの交点とした。さらに、リング拘束供試体法¹⁾に準じ、最大爆裂深さ、爆裂面積率および爆裂容積率を算出した。式(3-3)、(3-4)に爆裂面積率および爆裂容積率の計算方法を示す。最大爆裂深さは、測定した爆裂深さの中で最大の爆裂深さとした。爆裂面積率は、爆裂深さが0より大きい測定点数を全測定点数で除して求めた。爆裂容積率は、各測定位置の爆裂深さの合計を元の供試体高さ²⁾と測定点数の積で除して求めた。表3-1に各種指標に関する爆裂規模のグレード¹⁾を示す。爆裂による損傷規模は、各水準のグレードを比較して評価した。

$$A_{sp} = N_j / N \times 100 \quad (3-3)$$

ここで、 N ：測定点数、 N_j ：爆裂深さが0より大である測定点数、 A_{sp} ：爆裂面積率

$$V_{sp} = \Sigma D_i / (N \times H) \times 100 \quad (3-4)$$

ここで、 ΣD_i ：合計爆裂深さ、 N ：測定点数、 H ：供試体高さ、 V_{sp} ：爆裂容積率

表3-1 爆裂規模に関する各種指標とグレード¹⁾

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

3章の参考文献

- 1) 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/j/jci/study/standard.html> (閲覧日：2022年1月25日)
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 小林一輔, 伊藤利治：膨張セメントの膨張圧に影響を及ぼす諸要因, 土木学会論文報告集, 第226号, pp.67-72, 1974.
- 5) 原田哲夫, 副田孝一, 出光隆, 渡辺明：静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.91-100, 1993.
- 6) 辻埜真人, 橋田浩, 湯浅竜貴, 高橋圭一：膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 437-442, 2011.
- 7) 谷辺徹, 鎌田亮太, 小澤満津雄, 六郷恵哲：拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1135-1140, 2013.

以 上

4. PCM の爆裂性状評価

4.1 各種ポリマーを混入した PCM の爆裂性状

4.1.1 使用材料および配合

表 4-1 に使用材料を示す。PCM に混和するポリマーは、セメント混和用ポリマーディスパーション及び再乳化形粉末樹脂 (JIS A 6203:2015) に適合する再乳化形粉末樹脂とした。再乳化形粉末樹脂は、ポリアクリル酸エステル、エチレン酢酸ビニルおよび酢酸ビニル・ビニルバーサテートの既製品を選定した。いずれのポリマーも補修材用途に汎用されている仕様であり、ガラス転移温度 (TG) は 0~10°C の範囲にある。表 4-2 に各種ポリマーを混入した PCM の配合を示す。補修材として用いる配合は、通常、ポリマーセメント質量比 (P/C) が 5~20%、砂セメント質量比 (S/C) が 2~3 の範囲にあるとされる¹⁾。そこで、PAE、EVA および VVA の P/C は 10% とした。S/C は 2.5、W/C は 0.5 とした。また、ポリマー無添加のモルタル (NCM) は比較用として水準に加えた。なお、各種のモルタルは、減水剤と消泡剤により流動性および空気量を調整した。

表 4-1 使用材料

名称	仕様
ポリアクリル酸エステル	再乳化形粉末樹脂, 密度 0.4~0.6 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
エチレン酢酸ビニル	再乳化形粉末樹脂, 密度 0.5~0.6 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
酢酸ビニル・ビニルバーサテート	再乳化形粉末樹脂, 密度 0.5~0.7 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
セメント	普通ポルトランドセメント, 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%
混和剤	減水剤 (粉末型), 消泡剤 (粉末型)

表 4-2 各種ポリマーを混入した PCM の配合

水準	ポリマー	S/C	W/C	P/C(%)	ポリマー量 (kg/m ³)	混和剤 (C×%)
NCM	-	2.5	0.5	-	-	0.5 以下
PAE	アクリル酸エステル			10	56	
EVA	エチレン酢酸ビニル					
VVA	酢酸ビニル・ ビニルバーサテート					

4.1.2 フレッシュ性状および強度特性

表 4-3 に各種ポリマーを混入した PCM のフレッシュ性状および強度特性を示す。養生方法は、リング拘束供試体の養生方法と合わせ、2ヶ月間の封かん養生とした。VVA は他水準に比べて15打フローが小さくなったが、鋼製リングへの充填性は問題無かった。圧縮強度は、いずれのモルタルも 45MPa 程度であることを確認した。一方、PAE, EVA および VVA の弾性係数は、NCM に比べてやや小さくなる傾向を示した。ポリマー混入による弾性係数の低下は、既往の研究²⁾と同じ傾向を示した。含水率は6~7%であり、いずれの水準も同程度であった。

表 4-3 各種ポリマーを添加した PCM のフレッシュ性状および強度特性

測定時期	項目	NCM	PAE	EVA	VVA
練り直後	15打フロー(mm)	159	181	180	135
	空気量(%)	5.2	6.2	4.4	4.0
	温度(°C)	25.5	26.0	16.7	16.8
加熱試験	圧縮強度(MPa)	45.3	43.0	47.3	47.0
	弾性係数(GPa)	26.3	22.0	20.5	22.4
	含水率(%)	6.1	6.1	7.4	7.2

4.1.3 リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件

図 4-1 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³⁾を参考に作製した。熱電対、ひずみゲージおよびステンレスパイプの設置位置は、加熱面から 5, 10, 25, 40mm の位置とした。養生方法は2ヶ月間の封かん養生とし、図 3-2 に示すように加熱試験を実施した。加熱条件は、加熱曲線 2 (RABT30 相当)³⁾とした。

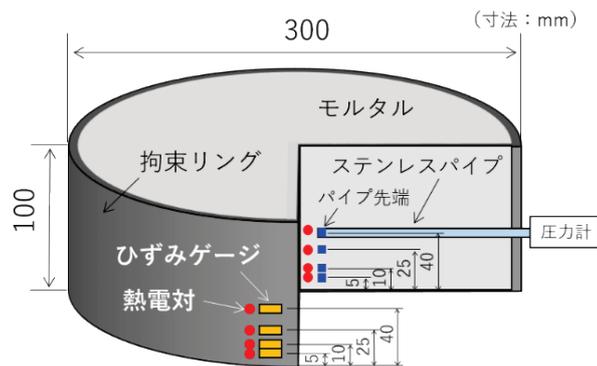


図 4-1 リング拘束供試体の形状寸法

4.1.4 爆裂継続時間および爆裂による損傷規模

図 4-2 に爆裂継続時間を示す。爆裂継続時間は、爆裂音が最初に確認されてから最後に確認されるまでの時間とした。加熱試験の結果、NCM は加熱途中で爆裂の発生が止まった、PAE、EVA および VVA は、加熱中に爆裂が繰り返し発生し、止まらなかった。なお、そのまま加熱を続けると爆裂による損傷が供試体上面に達し、上面から火炎漏れが生じる恐れがあったため、安全面への配慮から試験を中止した。図 4-3 に加熱面および爆裂深さ分布を示す。また、表 4-4 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。爆裂による損傷は加熱面全体に及んでいるため、爆裂面積率はいずれの水準も同程度であった。最大爆裂深さおよび爆裂容積率は、NCM が D または C であるのに対し、PAE、EVA および VVA は、いずれも E であった。これらの結果より、各種ポリマーを混入した PCM は、NCM に比べ、最大爆裂深さおよび爆裂容積率のグレードが低下する傾向を示した。

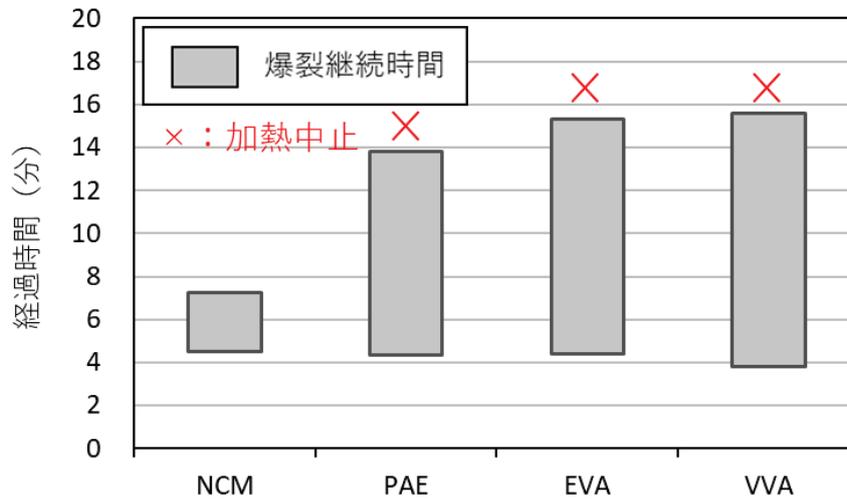


図 4-2 爆裂継続時間

4. PCM の爆裂性状評価

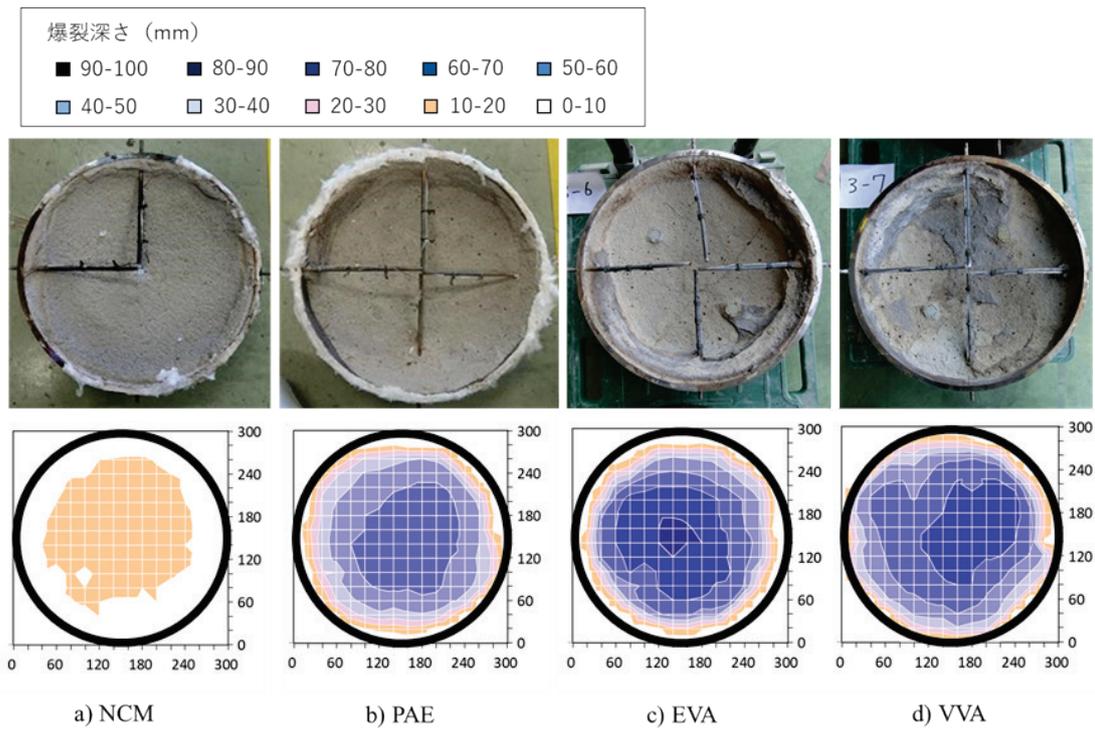


図 4-3 加熱面および爆裂深さ分布

表 4-4 爆裂規模のグレーディング結果

水準	爆裂状況			グレード ³⁾		
	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
PAE	56	98	36	E	E	E
EVA	73	90	41	E	E	E
VVA	69	91	44	E	E	E

4.1.5 内部温度と爆裂発生時間の推定

図4-4に内部温度と爆裂深さの経時変化を示す。爆裂発生時間は内部温度から推定した。いずれの水準も加熱開始から4～5分以内に5mm位置の爆裂発生が確認され、爆裂発生位置は時間経過とともに深くなった。一方、爆裂継続時間内は爆裂音が繰り返し観察され、爆裂が繰り返し発生することで爆裂深さが徐々に深くなったと考えられる。また、爆裂発生時の内部温度について、ポリマー種別による差異はみられなかった。

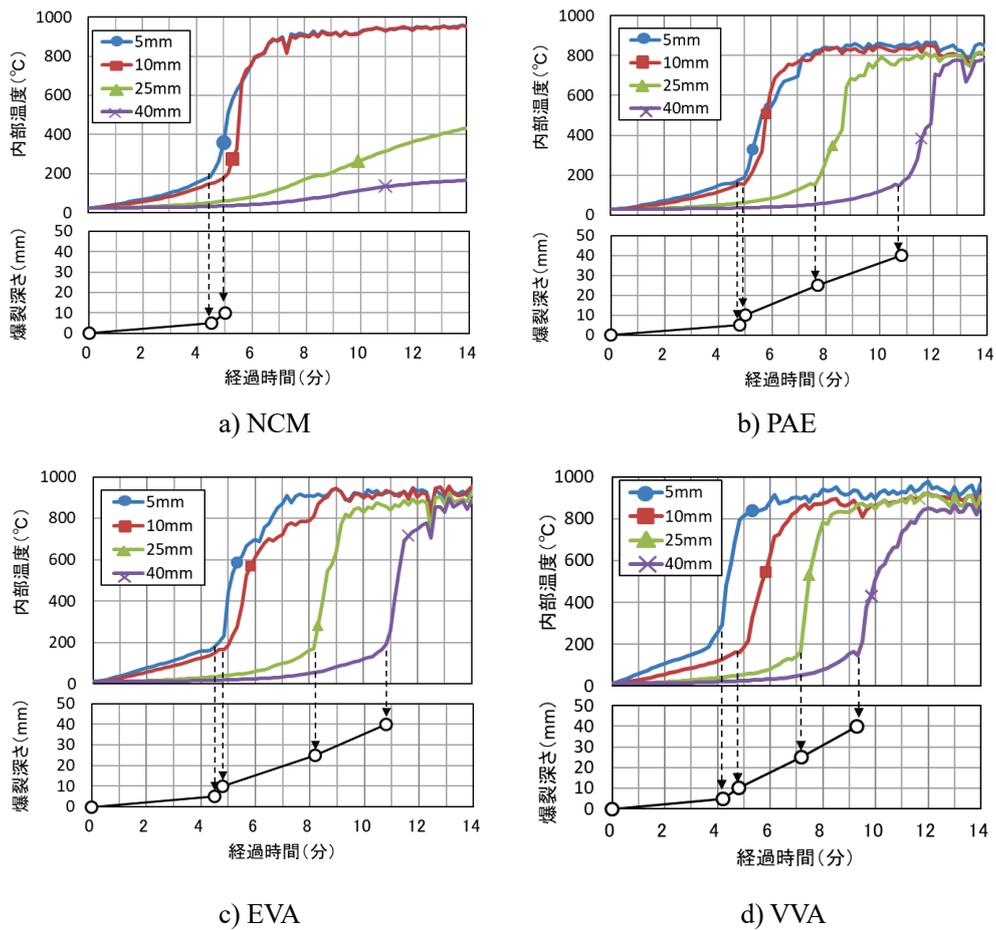


図4-4 内部温度と爆裂深さの経時変化

4.1.6 拘束応力および水蒸気圧

図 4-5 に拘束応力の経時変化を示す。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。なお、拘束応力は測定位置における鋼製リングの温度がひずみゲージの温度補償の上限を超えない範囲のデータを示した。各水準の拘束応力は、最初の爆裂が発生するまでに時間経過とともに増加した。一方、爆裂の発生以降は、拘束応力が上下に変動する挙動を示した。爆裂発生後は、モルタルの熱膨張による拘束応力増加とモルタルの断面欠損に伴う拘束応力緩和が相互に影響したと考えられる。図 4-6 に水蒸気圧の経時変化を示す。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 の各測定位置の水蒸気圧は、時間経過とともに増加し、爆裂発生時に急激に減少した。NCM の 5,10mm 位置は、爆裂発生時に水蒸気圧が急減する挙動を示すが、爆裂未発生時の 25,40mm 位置は水蒸気圧が緩やかに減少した。各種ポリマーを混入した PCM の拘束応力と水蒸気圧を測定した結果、爆裂発生時および未発生時の挙動は、高強度コンクリートと類似した傾向⁴⁾を示すことを確認した。

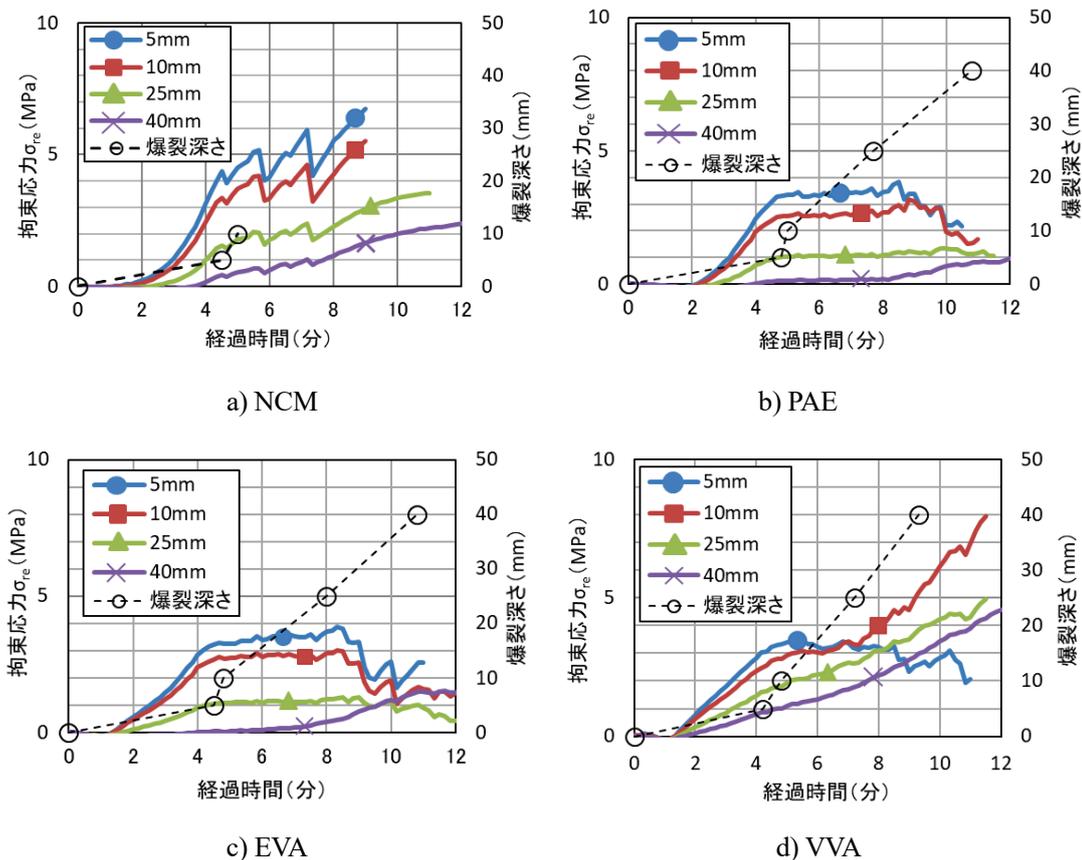


図 4-5 拘束応力の経時変化

4. PCM の爆裂性状評価

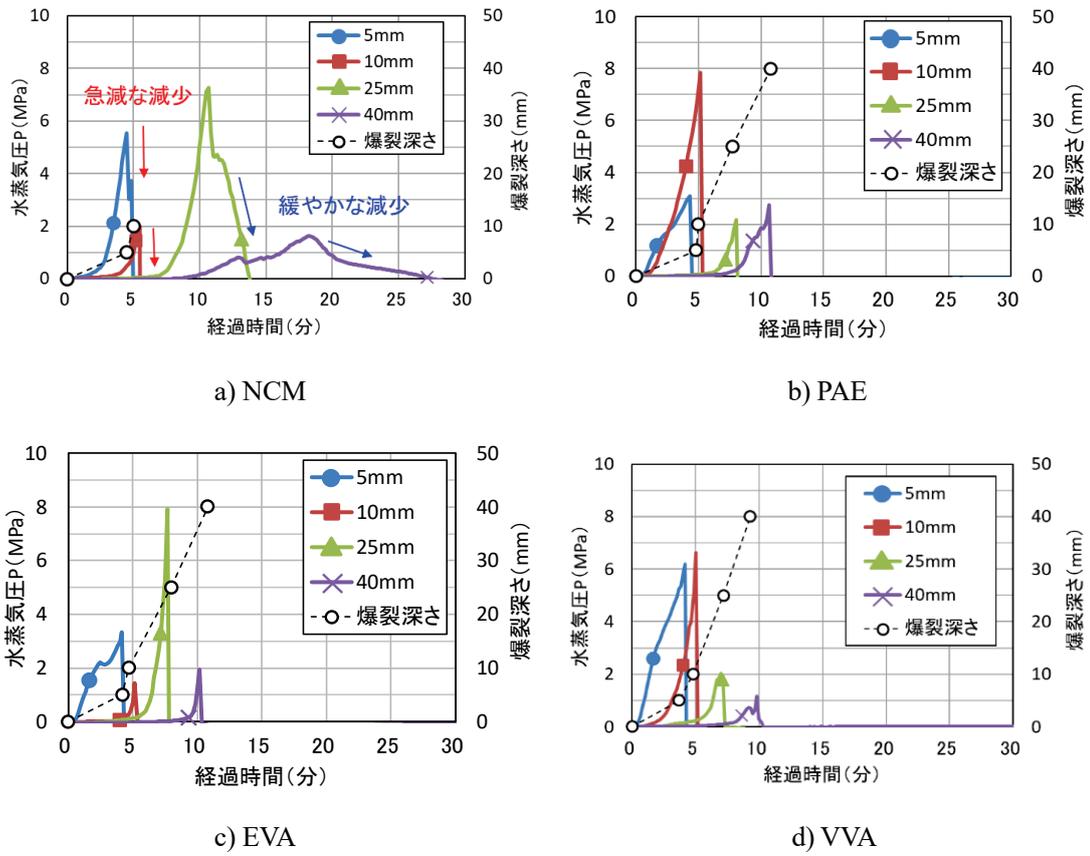


図 4-6 水蒸気圧の経時変化

4.2 ポリマー混入量の影響

4.2.1 使用材料および配合

使用材料は、表 4-1 に示すセメントおよび細骨材と同じである。ポリマーの種類は、ポリアクリル酸エステルとし、ポリマー混入量の影響を評価した。表 4-5 に PCM の配合を示す。補修材として用いる PCM は、ポリマーセメント質量比 (P/C) が 5~20%程度、S/C=2~3 であることを参考に、P/C=2.5, 5, 10, 20%とした。また、S/C=2.5, W/C=0.5 とした。なお、P10 は表 4-2 の PAE のデータを示した。

表 4-5 PCM の配合

水準	S/C	W/C	P/C(%)	ポリマー量(kg/m ³)	混和剤(C×%)
NCM	2.5	0.5	-	-	0.5 以下
P2.5			2.5	14	
P5			5	28	
P10			10	56	
P20			20	112	

4.2.2 フレッシュ性状および強度特性

表 4-6 にフレッシュ性状および強度特性を示す。P/C が大きくなると流動性が増し、15 打フローが大きくなる。一方、ポリマー量が増えると粘性も増加するため、材料分離は生じなかった。P5 および P10 の圧縮強度は NCM と同程度であった。一方、P2.5 および P20 の圧縮強度は NCM よりもやや大きく、空気量も影響した可能性があると考えられた。弾性係数は、ポリマー量が多いほど低下し、既往の知見²⁾と同じ傾向を示した。

表 4-6 フレッシュ性状および強度特性

測定時期	項目	NCM	P2.5	P5	P10	P20
練り直後	15 打フロー(mm)	159	178	170	181	196
	空気量(%)	5.2	4.0	5.4	6.2	3.0
	温度(°C)	25.5	27.3	25.1	26.0	26.3
加熱試験	圧縮強度(MPa)	45.3	55.0	44.1	43.0	49.3
	弾性係数(GPa)	26.3	25.4	23.5	22.0	18.3
	含水率(mass%)	6.1	6.0	6.2	6.1	6.6

4.2.3 リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件

リング拘束供試体の形状寸法は、図 4-1 と同じ仕様である。熱電対、ひずみゲージおよびステンレスパイプの設置位置は、加熱面から 5, 10, 25, 40mm の位置とした。養生方法は 2 ヶ月間の封かん養生とし、その後、図 3-2 に示すように加熱試験を実施した。加熱条件は、加熱曲線 2 (RABT30 相当)³⁾とした。

4.2.4 爆裂継続時間および爆裂による損傷規模

図 4-7 に爆裂継続時間を示す。観察の結果、P2.5 および NCM は加熱途中で爆裂が止まったが、P5、P10 および P20 は爆裂が繰り返し発生して止まらなかった。そのため、P5、P10 および P20 は、加熱を続けると爆裂による損傷が供試体上面に達する恐れがあると判断し、安全上の配慮により試験を中止した。図 4-8 に加熱面および爆裂深さ分布を示す。また、表 4-7 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。爆裂による損傷は加熱面全面にみられ、爆裂面積率はいずれの水準も E であった。最大爆裂深さおよび爆裂容積率は、P2.5 および NCM のグレードが D または C であるのに対し、P5、P10 および P20 のグレードはすべて E であり、P2.5 および NCM よりもグレードが低下する傾向がみられた。なお、P5、P10 および P20 は加熱を中止しており、加熱を継続すると最大爆裂深さおよび爆裂容積率は、さらに大きくなった可能性がある。

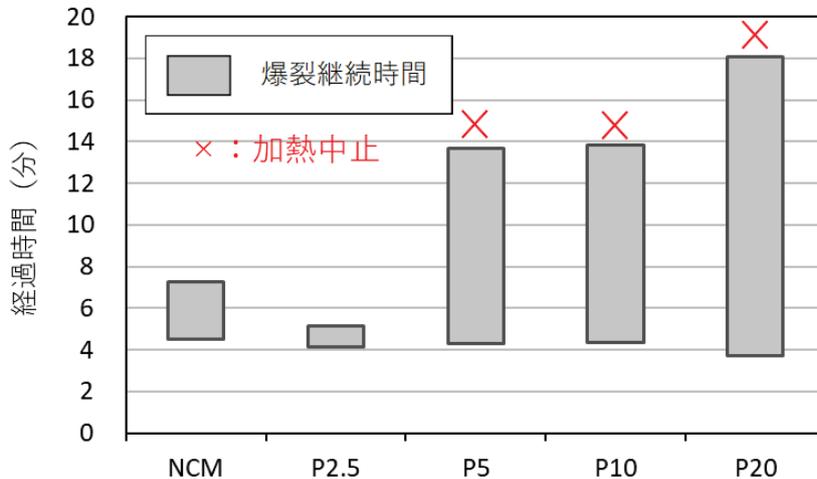


図 4-7 爆裂継続時間

4. PCM の爆裂性状評価

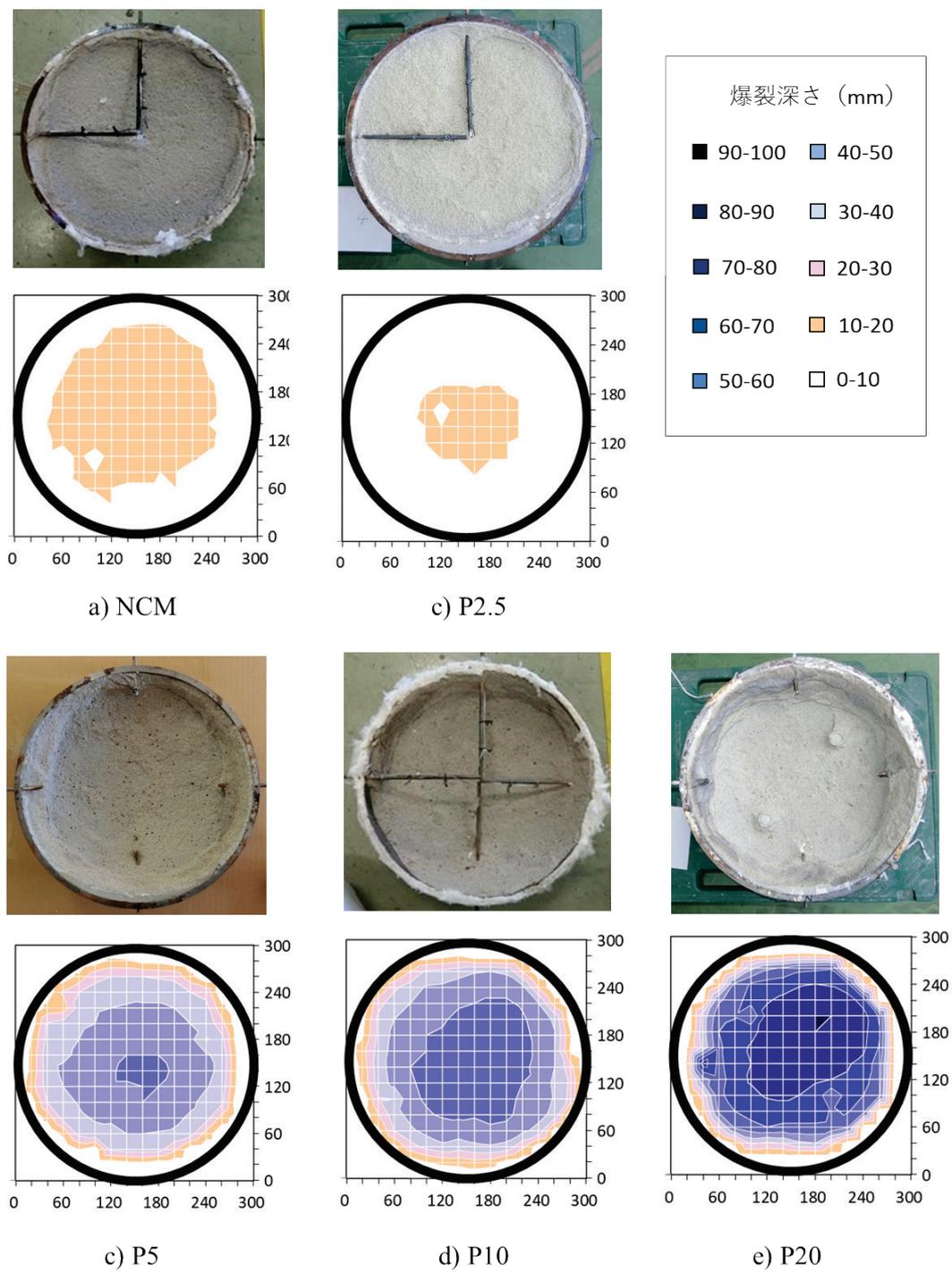


図 4-8 加熱面および爆裂深さ分布

表 4-7 爆裂規模のグレーディング結果

水準	爆裂状況			グレード ³⁾		
	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
P2.5	14	85	5	D	E	C
P5	52	90	29	E	E	E
P10	56	98	36	E	E	E
P20	80	87	45	E	E	E

4.2.5 内部温度と爆裂発生時間の推定

図 4-9 に内部温度と爆裂深さの経時変化を示す。爆裂発生時間は、内部温度から推定した。いずれの水準も爆裂深さが時間経過とともに大きくなり、爆裂による断面欠損が繰り返し生じた結果と考えられる。また、P/C=2.5~20%の PCM および NCM の爆裂発生時間と爆裂発生温度は類似した傾向にあり、ポリマー量の影響はみられなかった。

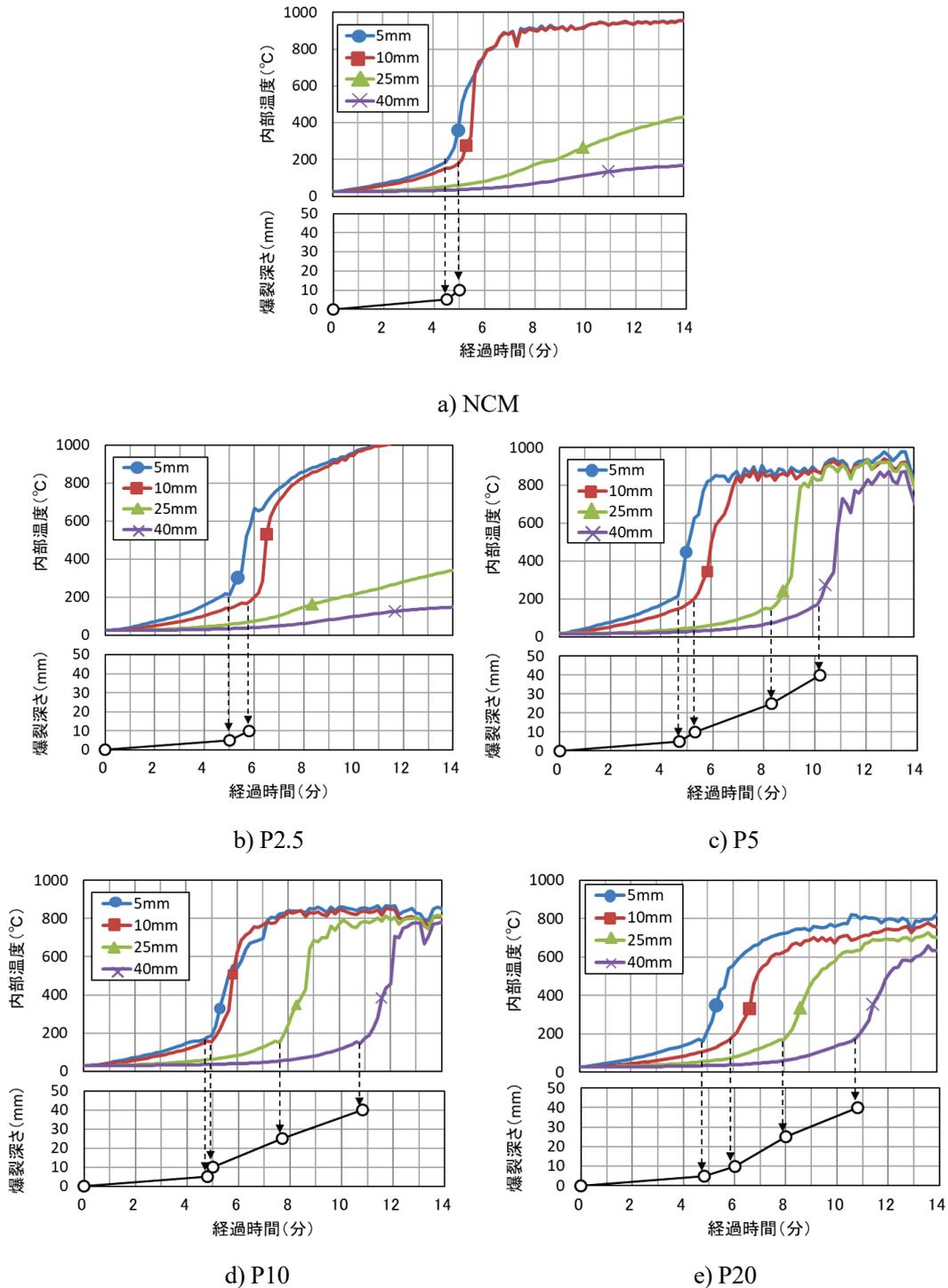


図 4-9 内部温度と爆裂深さの経時変化

4.2.6 拘束応力および水蒸気圧

図 4-10 に拘束応力の経時変化を示す。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。なお、拘束応力は、測定位置における鋼製リングの温度がひずみゲージの温度補償範囲内にあるデータを示した。いずれの水準も加熱開始から拘束応力が増加した。また、5mm 位置の爆裂発生以降は拘束応力が上下に変動し、類似した傾向を示した。なお、P/C が大きくなると爆裂発生時の拘束応力は低下傾向を示し、爆裂発生後の拘束応力の上下変動は小さくなった。拘束応力低下の一因としては、ポリマー混入による弾性係数の低下が考えられる。今後、さらに原因の詳細を把握するためには、熱ひずみ、高温下の弾性係数およびポアソン比など、PCM の高温特性に関する知見の充実が望まれ、今後の課題と位置付けたい。図 4-11 に水蒸気圧の経時変化を示す。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。いずれの水準も、各測定位置の水蒸気圧は爆裂発生まで増加し、爆裂発生時に急減することを確認した。以上より、P/C=2.5~20%の PCM の拘束応力と水蒸気圧を確認した結果、爆裂発生時の挙動はコンクリートと類似した傾向を示した⁴⁾。

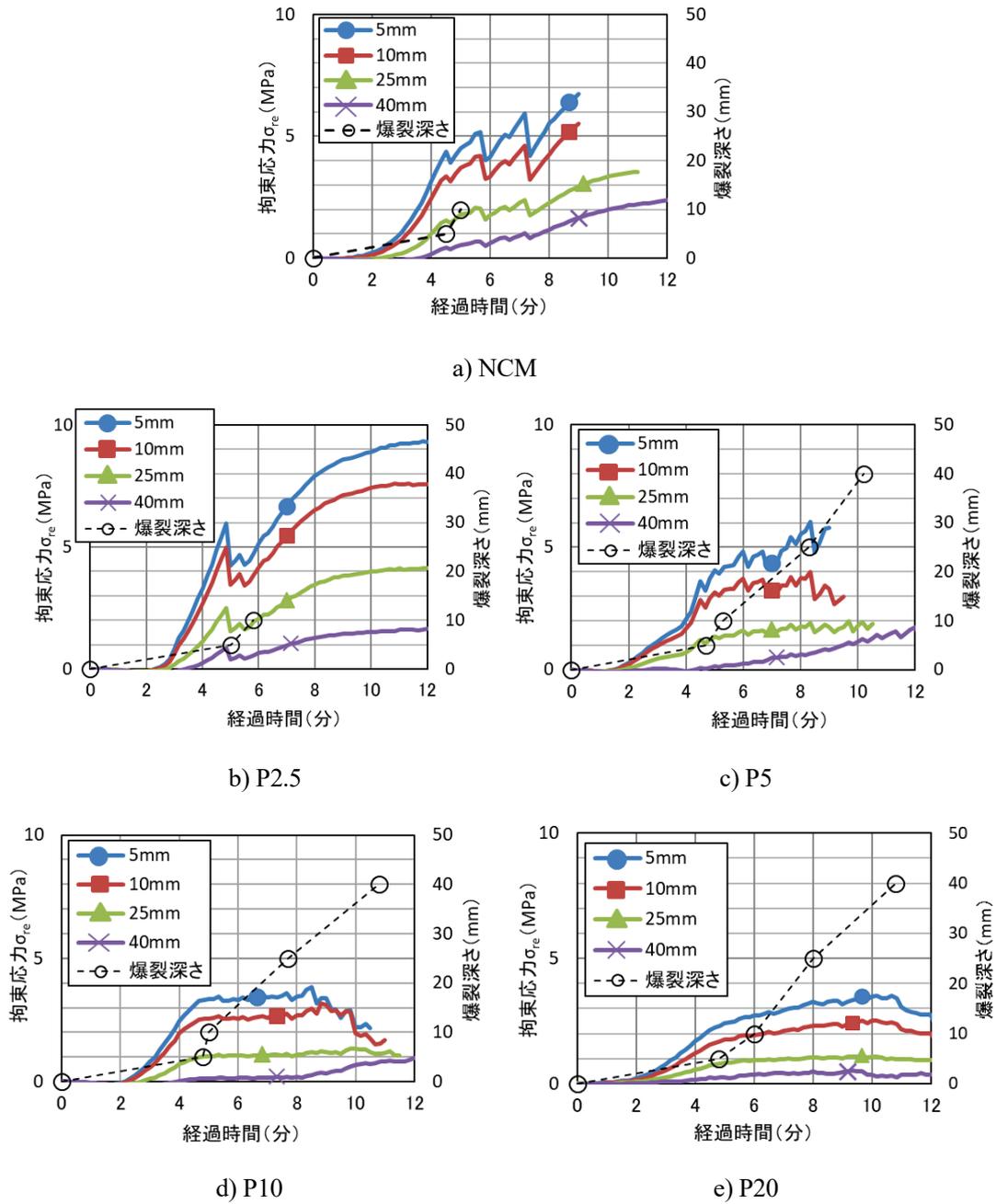


図 4-10 拘束応力の経時変化

4. PCM の爆裂性状評価

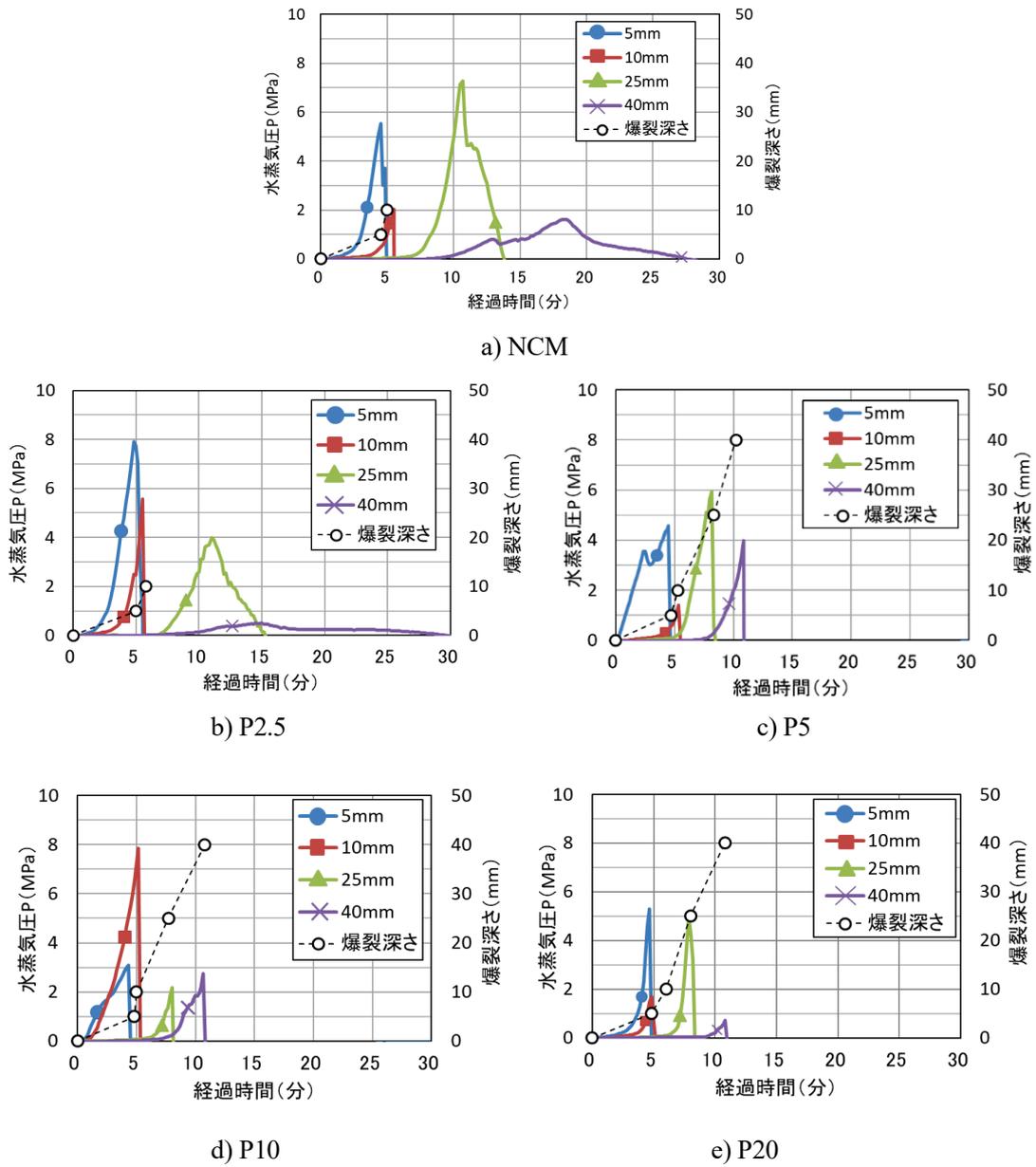


図 4-11 水蒸気圧の経時変化

4 章の参考文献

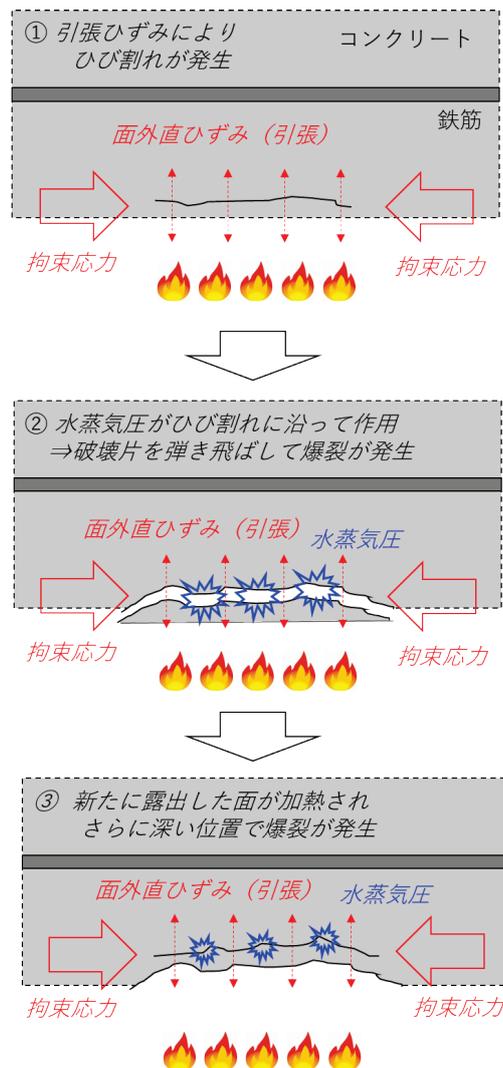
- 1) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性評価・診断および補修指針（案）・同解説，日本建築学会，pp. 105-111, 1997.
- 2) 小川晴果，大濱嘉彦，出村克宣：高曲げ強さを有するポリマーセメントモルタルの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21, No. 1, pp. 115-120, 1999.
- 3) 日本コンクリート工学会 JCI 規準・指針画面参照，
<http://www.jci-net.or.jp/j/jci/study/standard.html>（閲覧日：2022年1月25日）
- 4) 鎌田亮太，小澤満津雄，明石孝太，谷辺徹：リング拘束試験方法における高強度コンクリートの爆裂性状に及ぼす養生期間の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38, No. 1, pp. 1305-1310, 2016.

以 上

5. 爆裂発生メカニズムに関する検討

5.1 コンクリートの爆裂発生メカニズム

コンクリートの高温下の爆裂は、熱応力や水蒸気圧が作用することで生じるとされる⁴⁾。²⁾、³⁾。ここで、熱応力は、加熱されたコンクリートの熱膨張により加熱面と平行に生じる圧縮力である。一方、水蒸気圧はコンクリート内部にある水が加熱されて水蒸気になり、体積膨張に伴い発生する圧力が引張力として働く。さらに、熱応力と水蒸気圧が複合的に作用することで爆裂が発生する複合説がある。リング拘束供試体によるコンクリートの爆裂発生メカニズムの検証においては、複合説が支持されている。図5-1にコンクリートの複合説による爆裂発生メカニズム⁴⁾を示す。コンクリートが加熱されると、熱膨張により拘束応力が発生し、拘束応力のポアソン効果により面外直ひずみ（引張）が発生する。この面外直ひずみがコンクリートの引張破壊ひずみを超えると、加熱面と水平方向にひび割れが発生する。さらに、ひび割れに沿って水蒸気圧が作用し、破壊片を弾き飛ばすと爆裂が発生すると考えられている。また、爆裂により断面欠損が生じると、新たに露出した面が加熱される。その結果、さらに深い位置で爆裂が発生することが確認されている⁵⁾。

図5-1 コンクリートの爆裂発生メカニズム（複合説）⁴⁾

5.2 PCMの爆裂発生メカニズムに関する検討

図5-2にPCMの爆裂発生条件の仮説と検証内容について示す。4章においてPCMの爆裂発生時および未発生時の拘束応力と水蒸気圧の挙動は、高強度コンクリートと類似した傾向にあることを確認した。また、写真5-1に示すように、加熱試験後のリング拘束供試体には水平方向にひび割れが確認され、炉底には薄片状の剥落片が確認された。これらの結果より、PCMの爆裂発生条件は、コンクリートの爆裂発生メカニズム⁴⁾と同様、拘束応力のポアソン効果による引張ひずみ破壊と水蒸気圧による破壊片の押し出し作用であると仮定した。これらの爆裂発生条件についての検証は、4章の試験データを用いて実施した。すなわち、引張ひずみ破壊は、内部温度により推定した爆裂発生時間と引張ひずみ破壊の発生時間を比較して検討した。また、水蒸気圧による破壊片の押し出し作用は、爆裂発生時の水蒸気圧挙動、走査電子顕微鏡 (SEM) による組織観察、加熱したポリマーフィルムの観察および熱重量示差熱重量装置 (TG-DTA) による熱分析の結果をあわせて考察した。

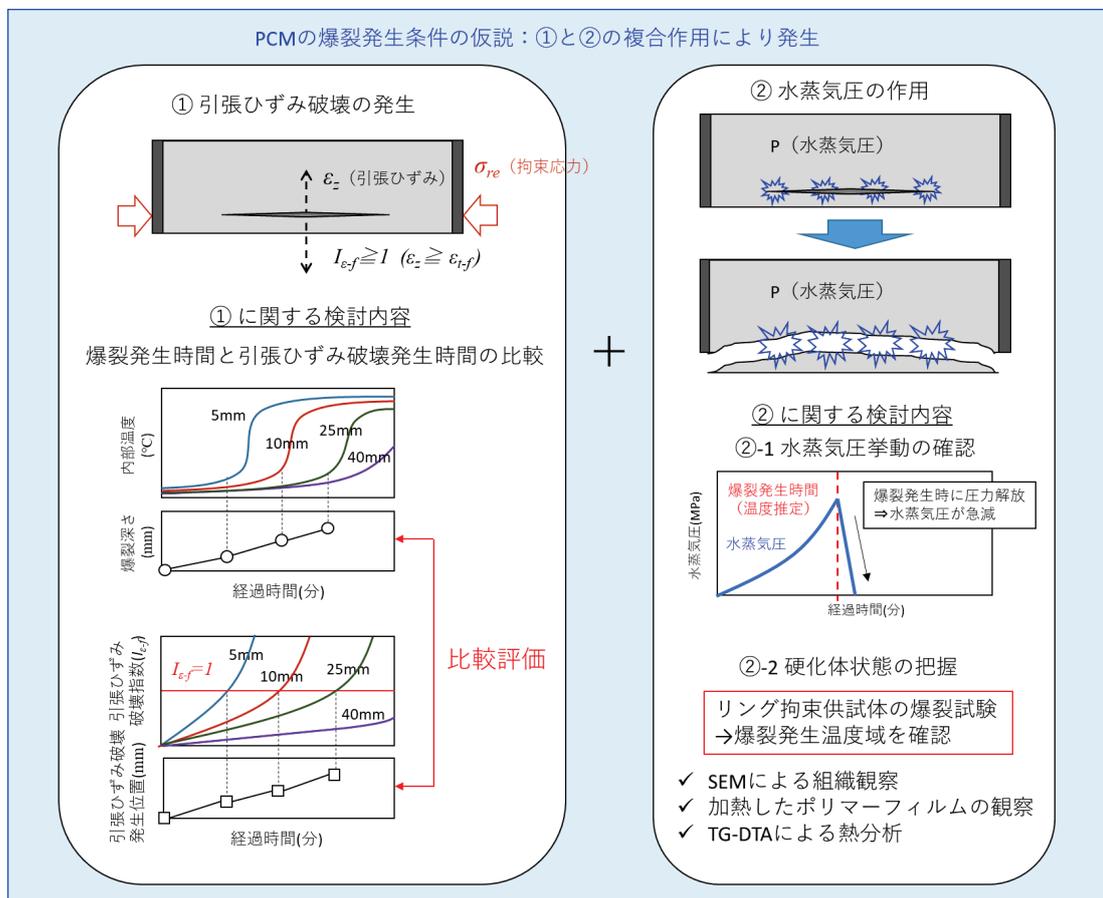


図5-2 PCMの爆裂発生条件の仮説と検証内容



a) 水平方向のひび割れ



b) 加熱後の炉底から採取した剥落片

写真 5-1 加熱試験後のリング拘束供試体および剥落片の観察

5.3 PCM の引張破壊ひずみ推定方法に関する提案

リング拘束供試体法によるコンクリートの引張ひずみ破壊発生時間推定において、コンクリートの引張破壊ひずみは、高温圧縮試験のデータ⁹⁾を参考に $200\sim 500\mu$ に設定された⁵⁾。一方、PCM は、引張破壊ひずみ設定の参考になるような熱間での試験データが不足している状況である。そこで、PCM の引張破壊ひずみは、爆裂発生時の面外直ひずみ（限界引張ひずみ）であると仮定して設定する方法を提案することとした。図 5-3 に P20 および NCM の拘束応力と内部温度の関係を示す。図中には内部温度から推定した爆裂発生時間をあわせて示す。図より、5, 10mm 位置は、爆裂発生時に拘束応力-内部温度曲線の傾きが変化し、爆裂発生時の断面欠損の影響が表れたと考えられる。一方、25, 40mm 位置では、爆裂発生時に拘束応力-内部温度曲線の傾きがあまり変わらず、変曲点が不明瞭になる。その原因は、25, 40mm 位置の爆裂が発生するときの供試体は、既に爆裂によるモルタルの断面欠損量が多く、拘束応力の変化が見え難くなるためであると考えられる。そこで、爆裂発生時の面外直ひずみ（限界引張ひずみ）を計算するにあたり、拘束応力は 5, 10mm 位置のデータを採用することとした。図 5-4 に拘束応力と面外直ひずみを示す。爆裂発生時の面外直ひずみ（限界引張ひずみ）は、拘束応力のポアソン効果により生じるとし、平面応力状態を仮定して式(5-1)～(5-3)により計算した。

5. 爆裂発生メカニズムに関する検討

$$\sigma_{re-s} = \sigma_{x-s} = \sigma_{y-s} \quad (5-1)$$

$$\tau_{xy-s} = 0 \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_s = \nu_s(\sigma_{x-s} + \sigma_{y-s})/E_m(T_s) \quad (5-3)$$

ここで、 σ_{re-s} : 爆裂発生時の拘束応力、 σ_{x-s} 、 σ_{y-s} : 爆裂発生時の X 方向と Y 方向の拘束応力、 τ_{xy-s} : 爆裂発生時のせん断応力、 ε_s : 爆裂発生時の面外直ひずみ (限界引張ひずみ)、 T_s : 爆裂発生時のモルタル温度、 $E_m(T_s)$: 爆裂発生時の弾性係数、 ν_s : 爆裂発生時の見掛けのポアソン比

図 5-5 に加熱温度と残存弾性係数の関係を示す。既往の知見には、コンクリートとモルタルの高温下の残存弾性係数比は類似するとの報告⁷⁾があり、PCM および NCM の残存弾性係数は、コンクリートの残存弾性係数の提案値を代用することとした。具体的には、コンクリートの残存弾性係数比の提案値⁸⁾を線形近似し、加熱温度と残存弾性係数比の関係式として用いた。また、見掛けのポアソン比は、爆裂発生温度域における平均的な値として一定値とし、コンクリートの高温圧縮データ⁶⁾を参考に設定した。NCM および P20 の爆裂発生時の内部温度は、150~200°C の範囲にあるため、見掛けのポアソン比は 0.15 および 0.30 と設定した。図 5-6 に P/C と引張破壊ひずみを示す。P/C と引張破壊ひずみの関係式は、P20 および NCM の 5, 10mm 位置の爆裂発生時の面外直ひずみ (限界引張ひずみ) を線形近似したものである。P/C と引張破壊ひずみの関係は負の相関を示した。

5. 爆裂発生メカニズムに関する検討

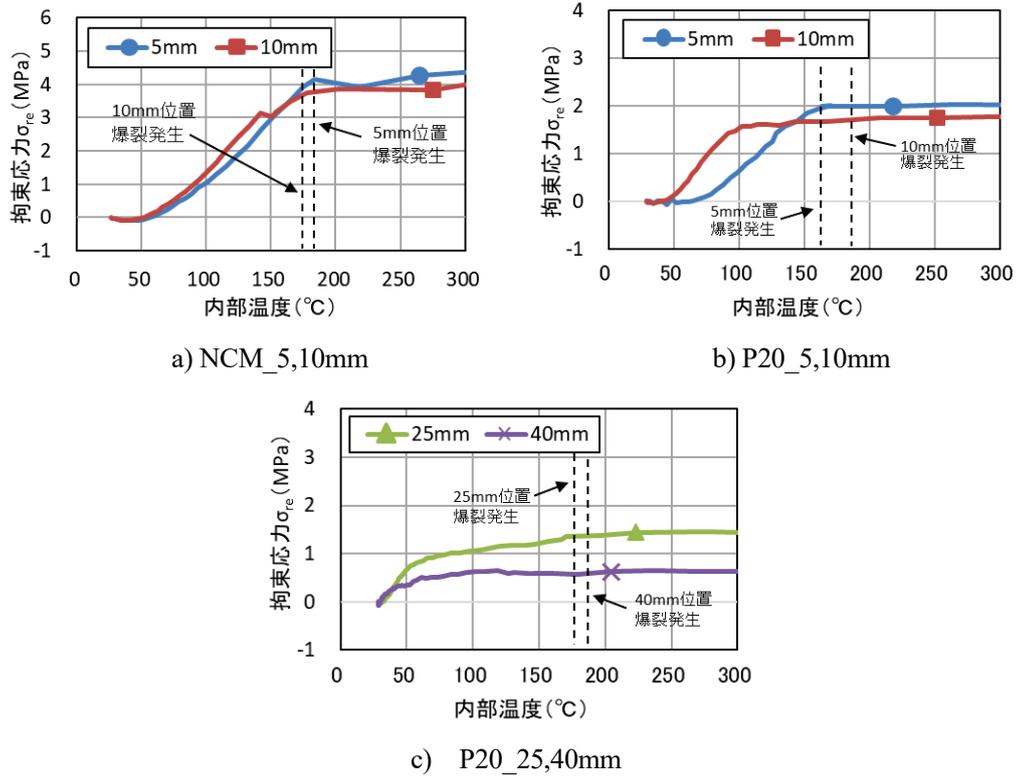


図 5-3 P20 および NCM の拘束応力と内部温度

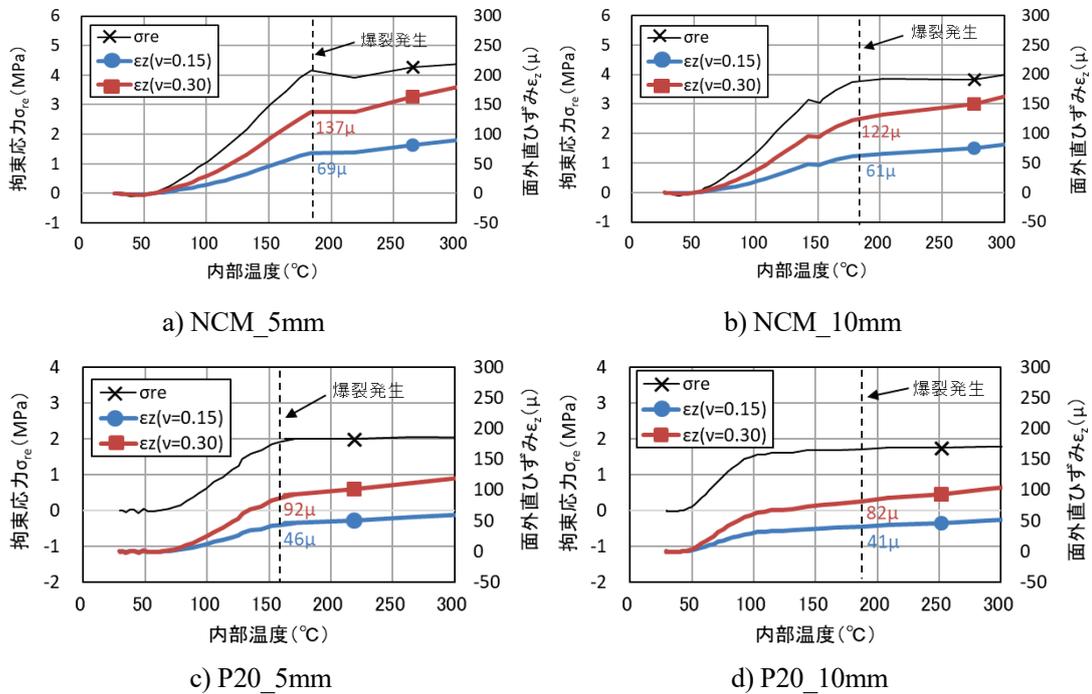


図 5-4 拘束応力と面外直ひずみ

5. 爆裂発生メカニズムに関する検討

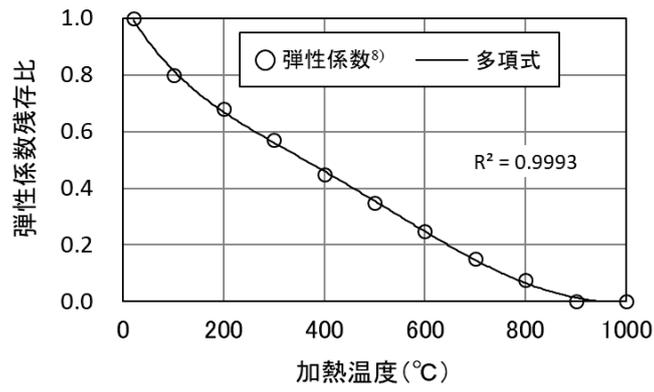
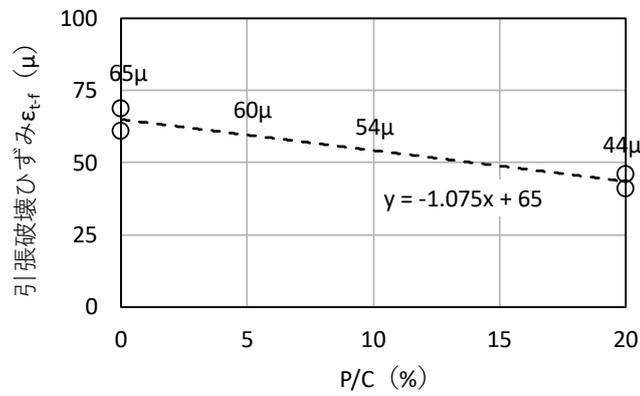
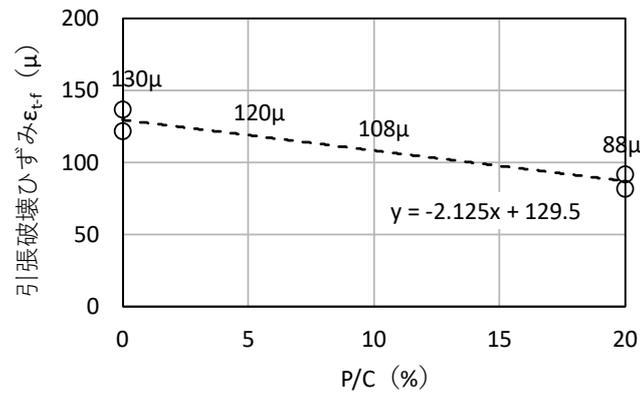


図 5-5 加熱温度と残存弾性係数比



a) $\nu_s=0.15$



b) $\nu_s=0.30$

図 5-6 P/C と引張破壊ひずみ

5.4 引張ひずみ破壊発生時間と爆裂発生時間の比較

引張ひずみ破壊に関する検証は、爆裂発生時間と引張ひずみ破壊発生時間を比較して評価した。爆裂発生時間は内部温度から推定した。一方、引張ひずみ破壊発生時間の推定は、平面応力状態を仮定し、式(5-4)～(5-7)⁹⁾により計算した。

$$\sigma_{re} = \sigma_x = \sigma_y \quad (5-4)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (5-5)$$

$$\varepsilon_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)/E_m(T) \quad (5-6)$$

$$I_{\varepsilon-f} = \varepsilon_z/\varepsilon_{t-f} \quad (I_{\varepsilon-lim} = 1) \quad (5-7)$$

ここで、 σ_{re} ：拘束応力、 σ_x 、 σ_y ：X方向とY方向の拘束応力、 τ_{xy} ：せん断応力、 ε_z ：面外直ひずみ（引張）、 ε_{t-f} ：引張破壊ひずみ、 $E_m(T)$ ：加熱時の弾性係数、 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限界条件

残存弾性係数は、コンクリートの残存弾性係数比の提案値⁸⁾を線形近似し、残存弾性係数比と加熱温度の関係式により設定した。また、見掛けのポアソン比は、爆裂発生温度域における平均的な値として一定値とした。P20 および NCM の爆裂発生温度は 150～200℃ の範囲にあり、コンクリートの高温圧縮試験のデータ⁶⁾を参考にして見掛けのポアソン比を 0.15 および 0.30 と設定した。PCM の引張破壊ひずみは、図 5-6 の関係式を用いて設定した。なお、上述の関係式は、引張ひずみ破壊発生時間の推定が安全側の評価となるように、爆裂発生時の見掛けのポアソン比を 0.15 として計算した関係式を用いた。引張ひずみ破壊発生時間は、引張ひずみ破壊指数が 1 となる時間を計算した。さらに各位置の引張ひずみ破壊発生時間のプロットをつなぎ、引張ひずみ破壊発生位置の経時変化とした。

5.4.1 各種ポリマーを混入した PCM による検証

各種ポリマーを混入した PCM による引張ひずみ破壊に関する検証は、PAE、EVA および VVA により検討した。PAE、EVA および VVA は、4.1 のデータを用いた。PAE、EVA および VVA の P/C は 10%、NCM の P/C は 0% であるため、図 5-6 の関係式より、PAE、EVA および VVA の引張破壊ひずみは 54 μ 、NCM の引張破壊ひずみは 65 μ と設定した。図 5-7 に各種ポリマーを混入した PCM の引張ひずみ破壊発生時間と温度推定による爆裂発生時間を示す。引張ひずみの計算において見掛けのポアソン比を 0.15 としたとき、引張ひずみ破壊発生時間と爆裂発生時間は良く一致した。一方、5、10mm 位置に比べ、25、40mm 位置の引張ひずみ破壊発生時間は、爆裂発生時間との差がやや開いた。25、40mm 位置は、既に爆裂が繰り返し生じてモルタルの損傷が大きく、計算値と実測値に乖離が生じた可能性がある。また、ポアソン比を 0.30 として引張ひずみを計算すると、引張ひずみ破壊発生時間は全体的に早まる傾向を示した。これは、ポアソン比が大きくなると、引張ひずみが大きく計算されるためである。しかしながら、これらの結果を総合して評価すると、ポア

ゾン比を 0.15 および 0.30 と設定した条件において、引張ひずみ破壊発生時間は、爆裂発生時間と概ね一致した。すなわち、PAE, EVA, VVA および NCM は、爆裂発生時に引張ひずみ破壊が生じていると考えられた。

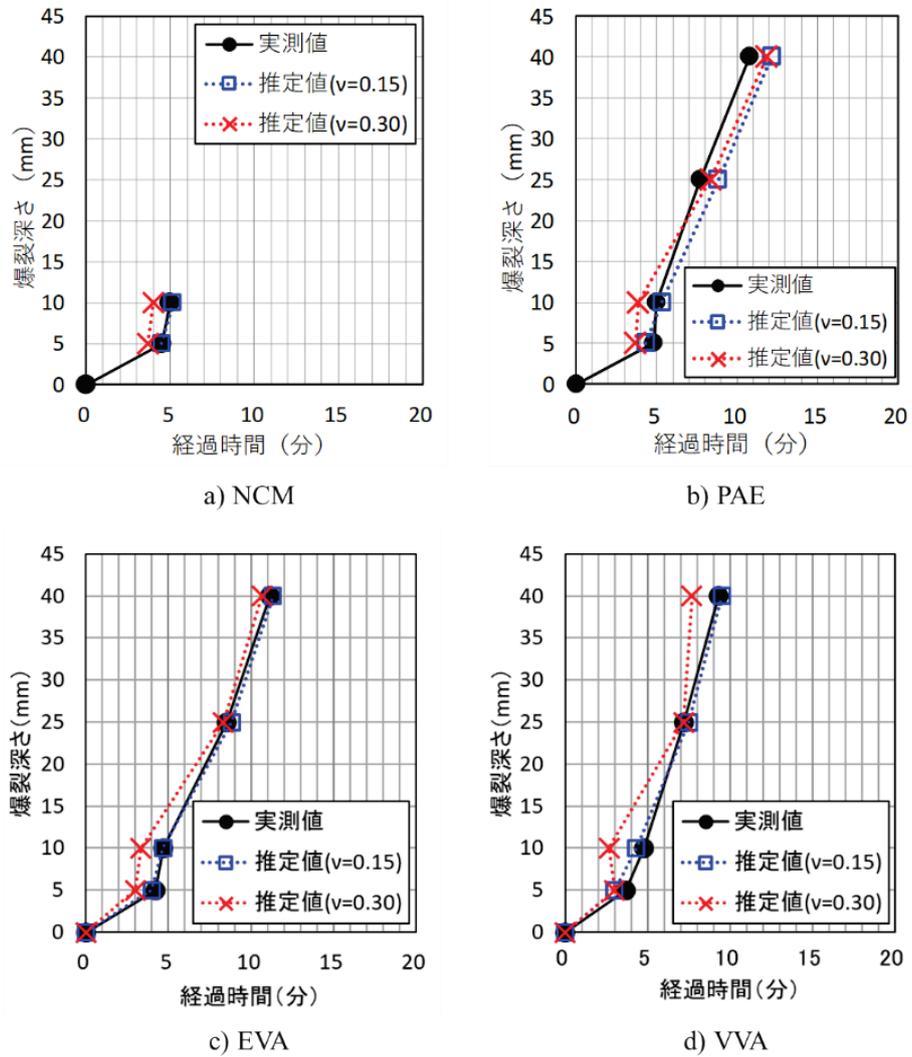


図 5-7 引張ひずみ破壊発生時間および爆裂発生時間 (PAE, EVA, VVA)

5.4.2 P/C=2.5~20%のPCMによる検証

図 5-8 に P/C=2.5~20%の PCM の引張ひずみ破壊発生時間および温度推定による爆裂発生時間を示す。ここで、P/C=2.5, 5, 10, 20%の PCM (P5, P10, P20) は、4.2 のデータを用いた。また、図 5-6 の関係式より、P2.5 の引張破壊ひずみは 62μ 、P5 は 60μ 、P10 は 54μ 、P20 は 44μ と設定した。なお、NCM は図 5-7 のデータを示した。ポアソン比を 0.15 とし引張ひずみを計算したとき、5, 10mm 位置の引張ひずみ破壊発生時間と爆裂発生時間は良く一致した。一方、25, 40mm 位置においては、引張ひずみ破壊発生時間と爆裂発生時間の差がやや開いた。また、ポアソン比を 0.30 とし引張ひずみを計算するとき、ポアソン比を 0.15 とし計算するときと比べ、全体的に爆裂発生時間が早まる傾向を示した。これは、ポアソン比が大きくなると引張ひずみが大きく計算されるためである。しかし、これらの結果を総合して評価すると、P/C=2.5~20%の PCM は、爆裂発生時に引張ひずみ破壊が生じていると考えられた。

5.5 爆裂発生時の水蒸気圧の作用に関する考察

5.5.1 爆裂発生時の水蒸気圧と内部温度に関する傾向

各種 PCM の加熱試験の結果、PCM は爆裂発生時に水蒸気圧が急減することを確認した。図 5-9 に爆裂発生時の水蒸気圧と拘束応力の関係を示す。なお、これらのデータは 4.1 および 4.2 の 5, 10mm 位置における爆裂発生時のデータであり、爆裂による損傷が小さい状態での評価とした。図より、爆裂発生時の拘束応力は主に 2~4MPa に分布するのに対し、水蒸気圧の大きさにはバラつきがみられた。水蒸気圧の大きさのバラつきは、破壊片を押し出すために必要な力が、引張ひずみ破壊に伴うひび割れ状態の影響を受けることによるのではないかと推察している。図 5-10 に P/C と爆裂発生時の内部温度を示す。これらのデータは、4.1 および 4.2 のデータを用いた。図より、各種 PCM の爆裂発生時の内部温度は、150~200°C の範囲に多く分布していることが分かる。

5. 爆裂発生メカニズムに関する検討

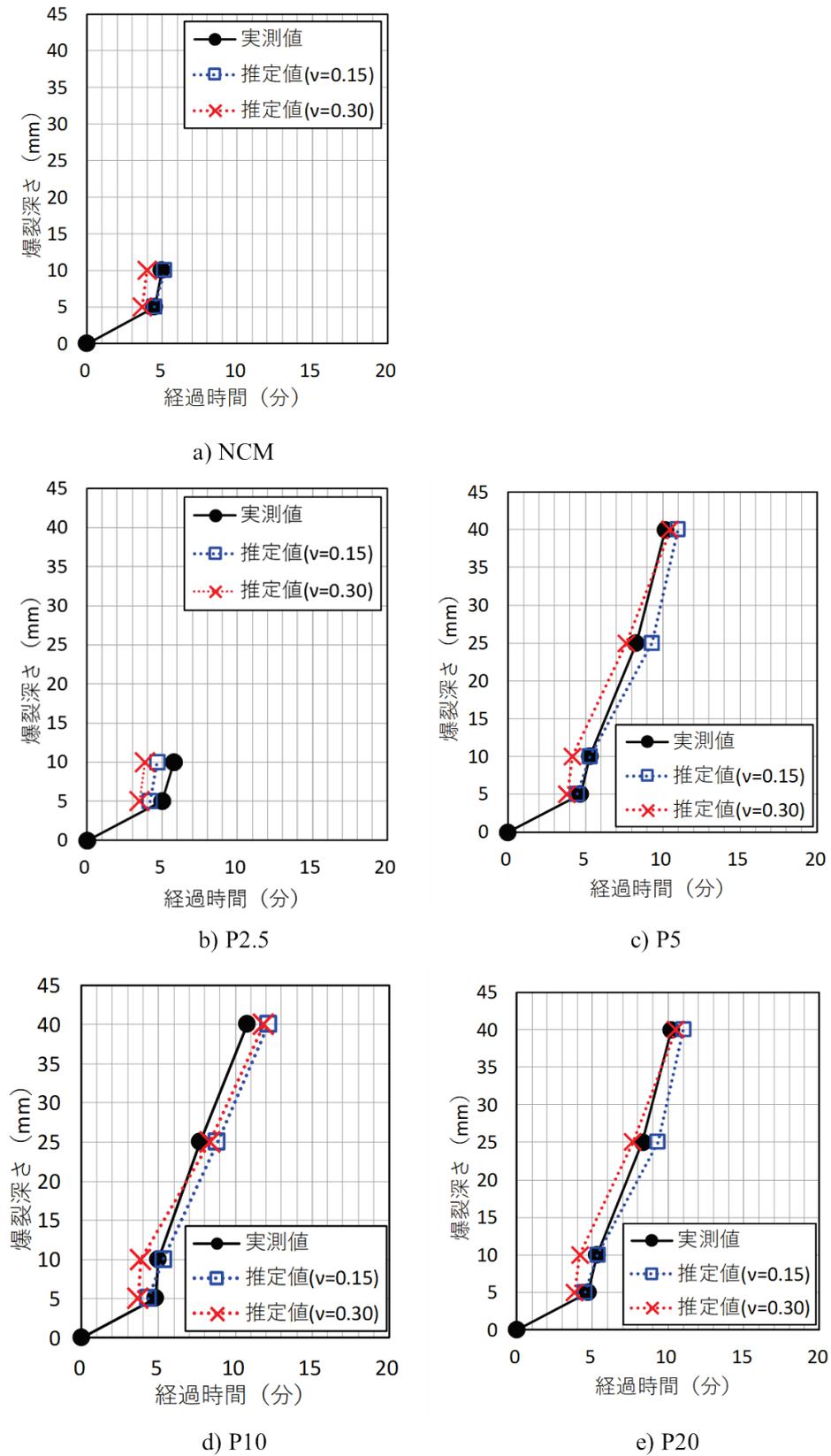


図 5-8 引張ひずみ破壊発生時間および爆裂発生時間 (P/C=0~20%)

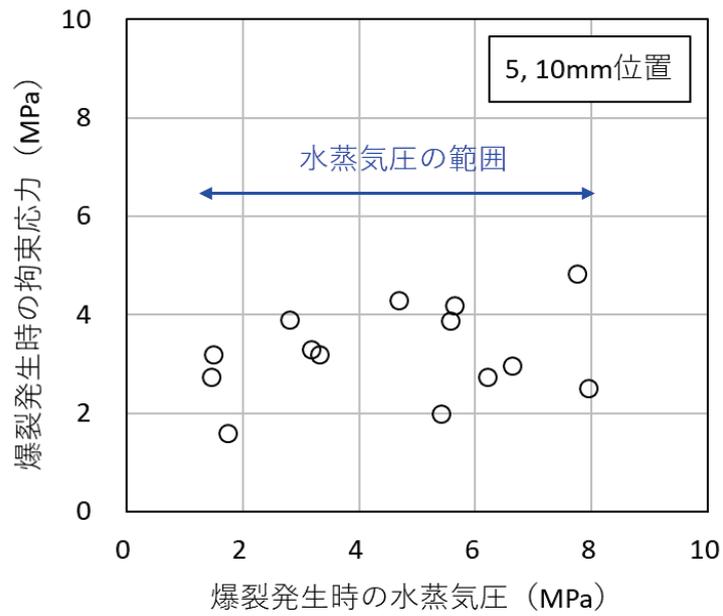


図 5-9 爆裂発生時の水蒸気圧と拘束応力

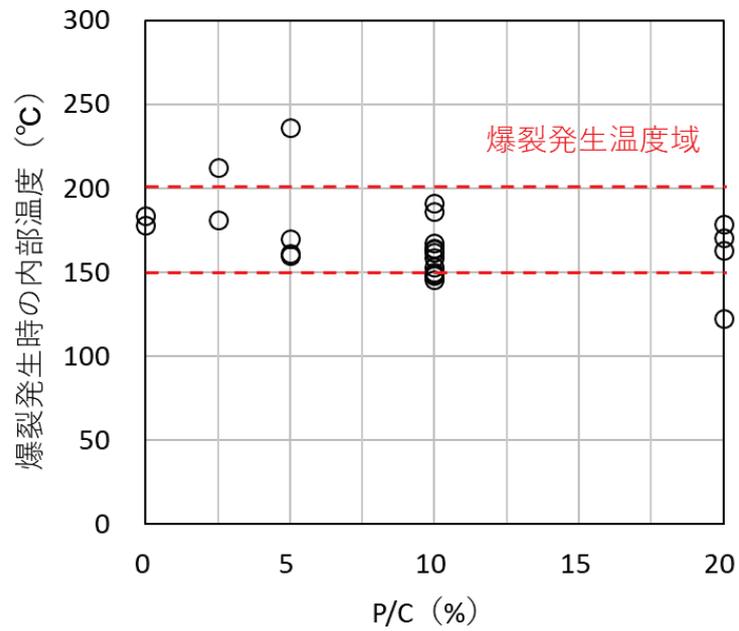


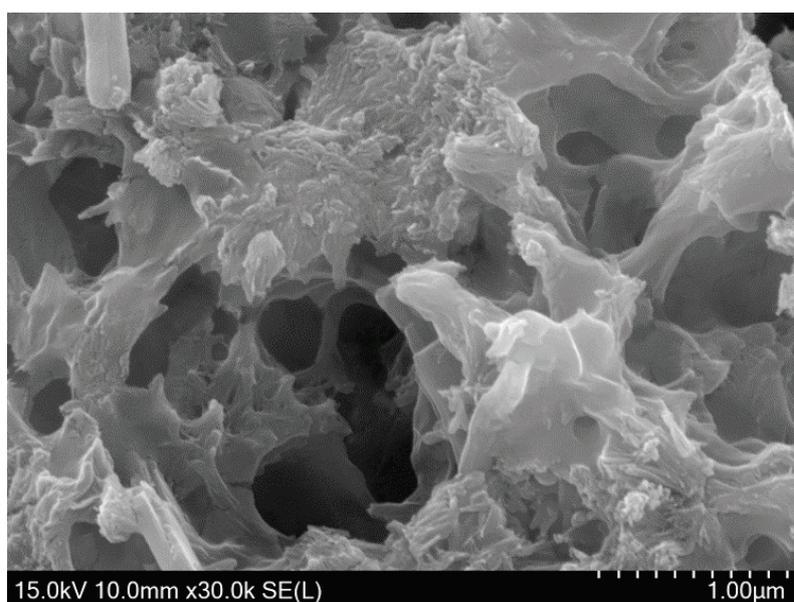
図 5-10 P/C と爆裂発生時の内部温度

5.5.2 爆裂発生温度域における PCM の組織の状態

本節は、爆裂発生温度域における PCM の組織の状態を走査電子顕微鏡 (SEM) による観察、加熱したポリマーフィルムの観察、熱重量示差熱重量装置 (TG-DTA) による熱分析により把握することを試みた。図 5-11 に SEM による P20 の未加熱試料の観察結果を示す。試料は、φ50×100mm の供試体をニッパーで小片に破碎して断面を観察した。また P20 の破断面にはセメント水和生成物特有の針状および板状の結晶が観察された。一方、表面が滑らかな質感を持つ部分が多くあり、ポリマーが水和生成物を被覆している状態であると考えられた。既往の知見では、PCM に含まれるポリマーは、細骨材-ペースト界面や水和生成物間に存在し、ポリマー同士が密着してフィルム状になっている様子が観察されている¹⁰⁾。図 5-12 に各種ポリマーの示差熱重量曲線を示す。TG-DTA の測定条件は、空気雰囲気とした。各種ポリマーの示差熱重量曲線は、一定の温度域で活発な燃焼反応がみられ、既往の知見¹¹⁾と同じ傾向を示した。ポリマーは、240～260°C を超えてから燃焼反応が活発になり、420～530°C で大部分が燃焼した。図 5-13 に加熱したポリマーフィルムの観察結果を示す。ポリマーフィルムの試料は、ポリマーと水を混合して皿に流し、40°C で乾燥させた後、10mm 角にカットして作製した。それらのフィルムを電気炉で 10 分間定温加熱し、炉から取り出してフィルムを目視や指触により観察した。加熱温度は 105, 200, 300, 400, 500°C とした。試験の結果、105, 200°C に加熱したフィルムは固くなり、反りがみられた。また、300°C に加熱したフィルムには黄色い変色がみられた。これらの温度では加熱による脱水の影響がみられるが、フィルムの形状は保っていることを確認した。一方、400, 500°C で加熱したフィルムは触ると崩れ、フィルム形状を保っていなかった。各種ポリマーの示差熱重量曲線と加熱したポリマーフィルムの観察結果は、類似した傾向を示したと考えられる。図 5-14 に P10 および NCM の示差熱重量曲線を示す。試料はモルタルを粉砕して測定した。TG-DTA の測定条件は、空気雰囲気とした。セメント水和物の熱分解は、100°C 付近の自由水やエトリンガイトの分解、450°C 付近の水酸化カルシウムの分解、730°C 付近の CaCO₃ の分解¹²⁾が P10 および NCM に共通して起きていることを確認した。また、P10 は 280～350°C でポリマーの燃焼反応が確認された。一方、リング拘束供試体の加熱試験では、PCM の爆裂発生温度域が 150～200°C に多く分布することを確認している。すなわち、PCM に爆裂が発生するとき、PCM に含まれるポリマーはあまり燃焼していない状態であると考えられた。



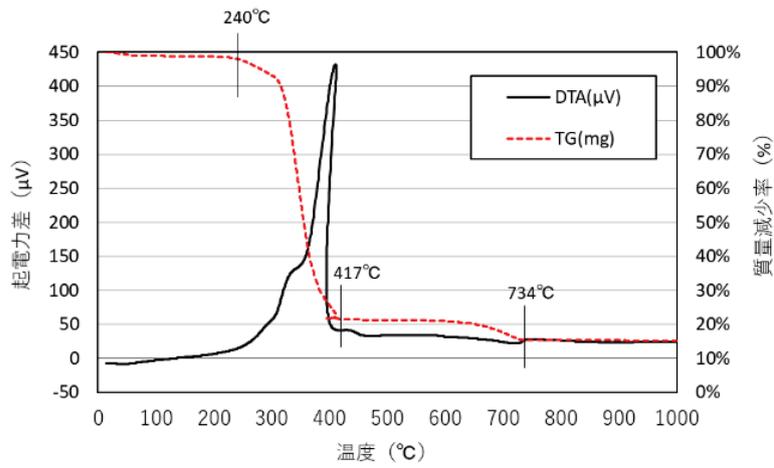
a) セメント水和物



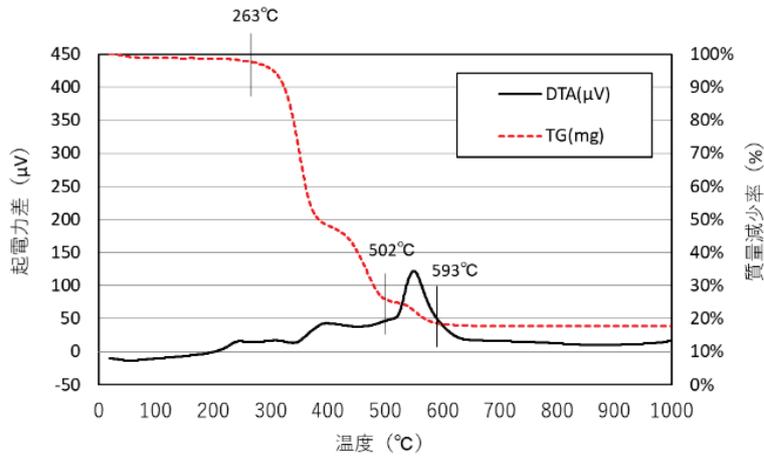
b) ポリマーによる水和物の被覆

図 5-11 P20 の SEM 観察 (未加熱)

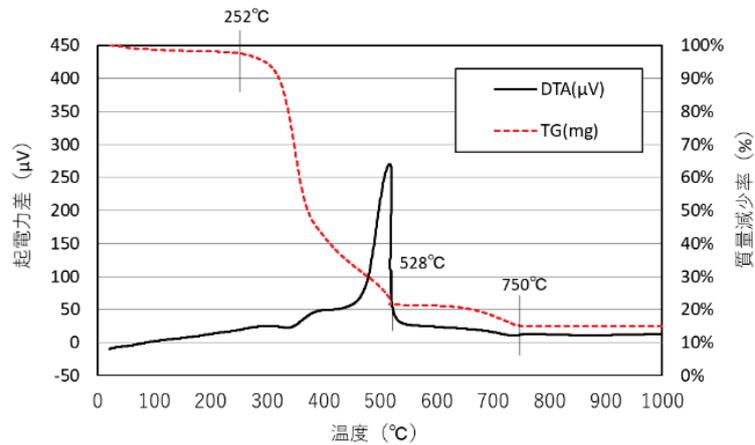
5. 爆裂発生メカニズムに関する検討



a) ポリアクリル酸エステル



b) エチレン酢酸ビニル



c) 酢酸ビニル・ビニルバーサテート

図 5-12 各種ポリマーの示差熱重量曲線

5. 爆裂発生メカニズムに関する検討

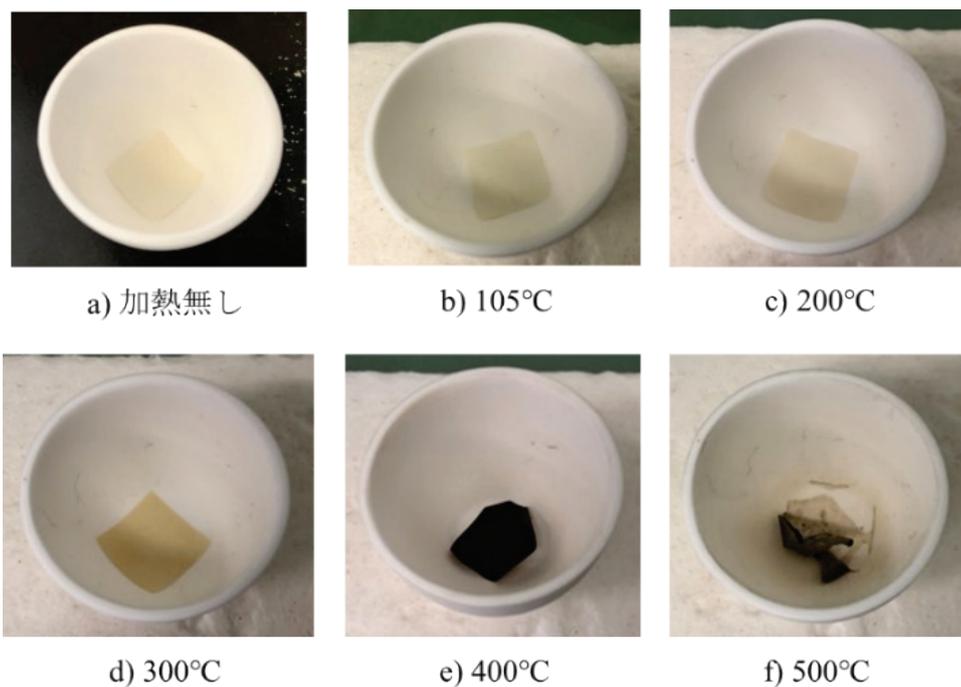
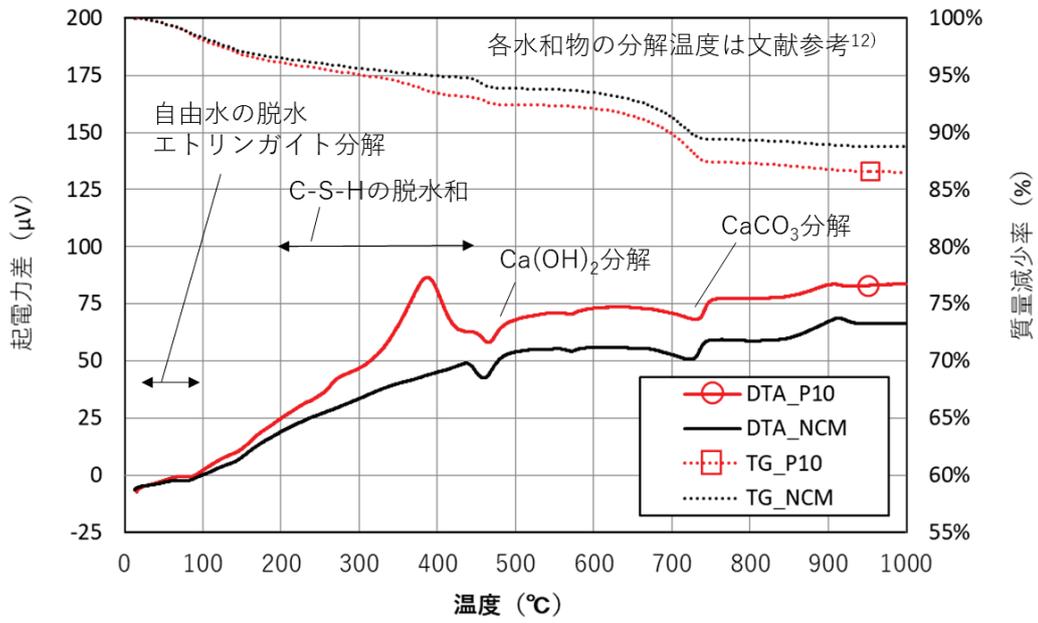
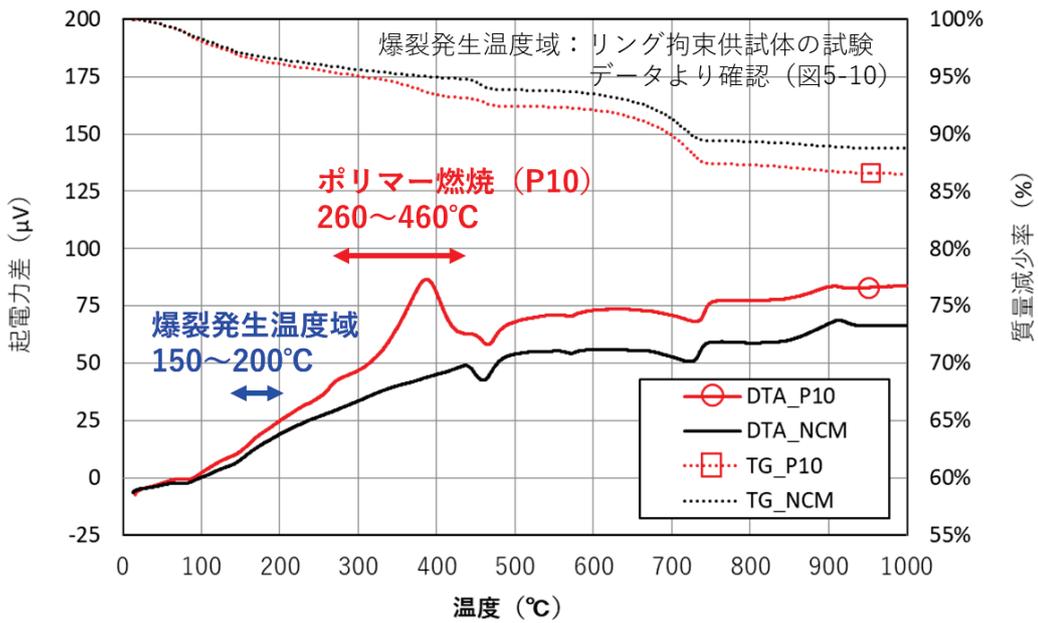


図 5-13 加熱したポリマーフィルムの状態 (ポリアクリル酸エステル)

5. 爆裂発生メカニズムに関する検討



a) 水和物の分解



b) ポリマーの燃焼温度と爆裂発生温度域

図 5-14 P10 および NCM の示差熱重量曲線

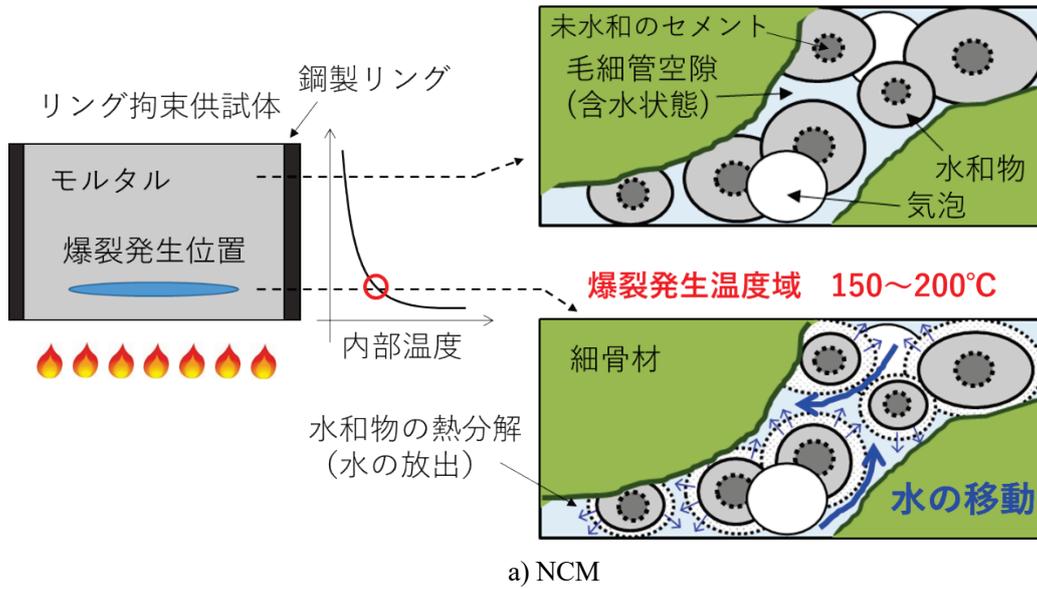
5.6 PCMの爆裂による損傷が大きくなる原因考察

図 5-15 に爆裂発生温度域における組織のイメージを示す。リング拘束供試体の爆裂発生温度域とポリマーの熱分析の結果より、爆裂発生温度域においてポリマーはあまり燃焼していないと考えられた。そのため、PCM は爆裂発生温度域においてポリマーが水蒸気や水の移動を抑制し、NCM よりも水蒸気圧がかかりやすい状態になると考えられる。すなわち、引張ひずみ破壊発生と同時に水蒸気圧による破壊片の押し出しが生じやすくなる。その結果、加熱中に爆裂が繰り返し発生して止まらず、加熱後の爆裂による損傷規模が NCM に比べて大きくなると考察される。なお、高強度コンクリートの高温下の水分移動に関する研究¹³⁾では、水の移動が抑制されて水分溜まりが生じ、爆裂が生じやすくなるとされる。式(5-8)に NCM の総細孔量に対する PCM の細孔充填率の計算式を示す。粉末樹脂を混入した PCM の水銀圧入ポロシメータによる細孔測定結果¹⁴⁾によると、ポリマー混入により 0.01~1 μ m の細孔量が低下する。また、総細孔量のデータ¹⁴⁾を参考に示すと、NCM が 0.0877ml/g、P/C=5%の PCM が 0.0658ml/g、P/C=10%が 0.0655ml/g、P/C=20%が 0.0631ml/g である。これらのデータから NCM に対する PCM の細孔充填率を計算すると、P/C=5%の PCM は 25.0%、P/C=10%の PCM は 25.3%、P/C=20%の PCM は 28.1%になる。なお、P/C=2.5%の PCM は爆裂発生が加熱中に止まっており、本検討では P/C=2.5~5%の間に爆裂発生温度域における水分移動に対するポリマー量の境界条件が存在すると考えられる。しかしながら、上述の境界条件は、ポリマー種類、W/C および S/C などの配合条件により異なると考えられ、総合的な評価としてはさらなる検討が必要である。図 5-16 に P/C=2.5~20%の PCM および NCM の水蒸気圧と内部温度の関係を示す。NCM の 5mm 位置は、飽和水蒸気圧曲線に対して過飽和の領域（図中 飽和水蒸気圧曲線の左側）で水蒸気圧が上昇し、爆裂が発生した。また、10, 25 および 40mm 位置の水蒸気圧は、飽和水蒸気圧曲線のライン付近で水蒸気圧が上昇した。一方、PCM は、飽和水蒸気圧曲線に対して過飽和の領域で水蒸気圧が上昇するパターンが多く、水蒸気圧がかかりやすい特徴として表れている可能性がある。

$$R_f = (R_0 - R_p) / R_0 \times 100 \quad (5-8)$$

ここで、 R_f : NCM に対する PCM の細孔充填率、 R_0 : NCM の総細孔量、 R_p : PCM の総細孔量

【爆裂発生温度域における組織イメージ】



【爆裂発生温度域における組織イメージ】

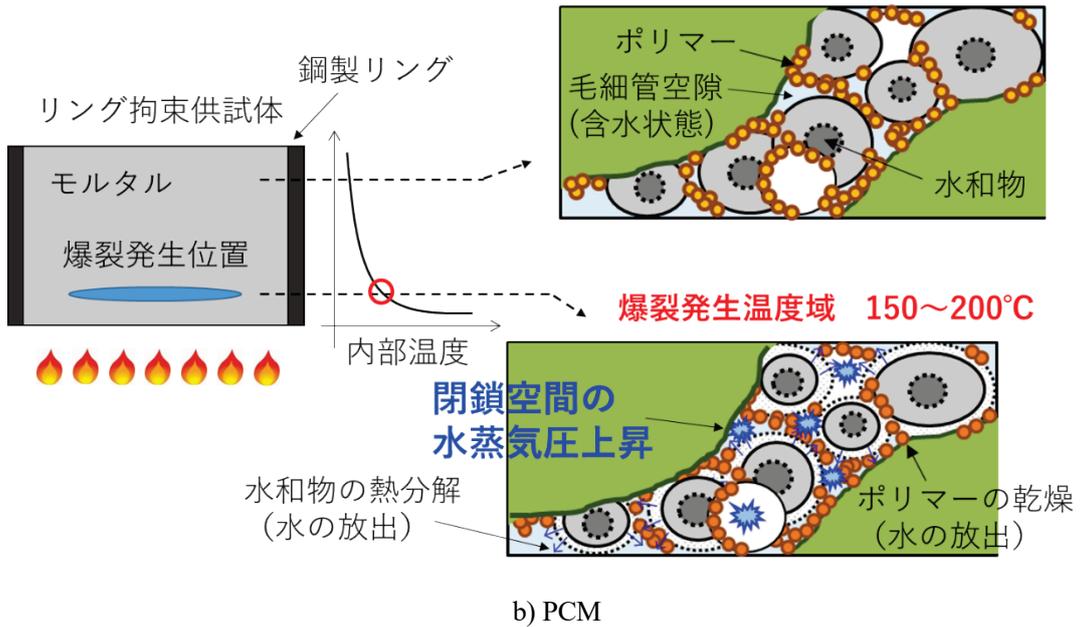
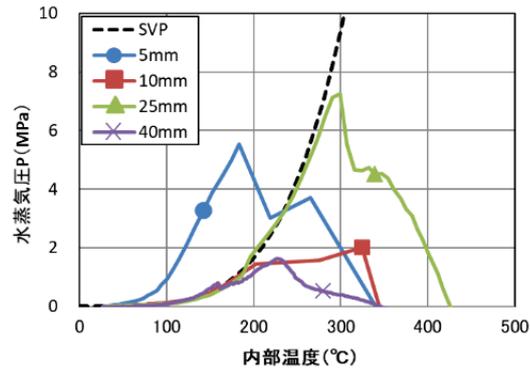
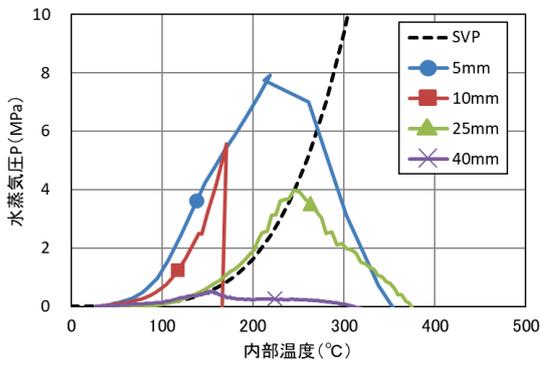


図 5-15 爆裂発生温度域における組織のイメージ

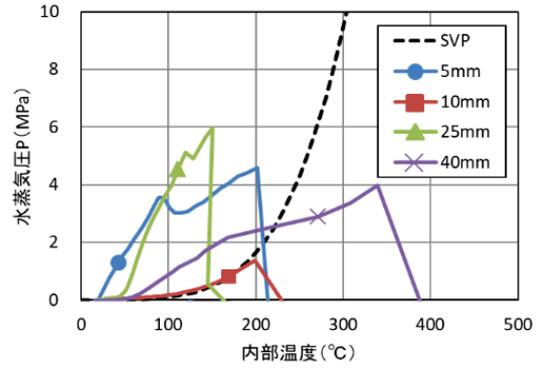
5. 爆裂発生メカニズムに関する検討



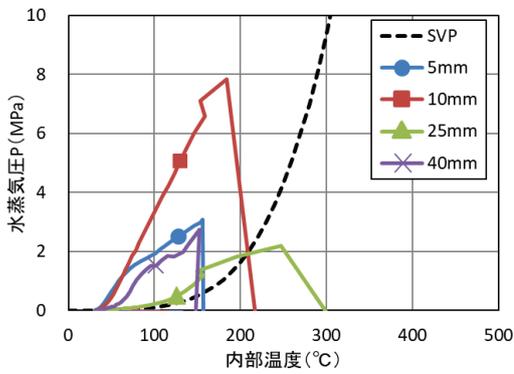
a) NCM



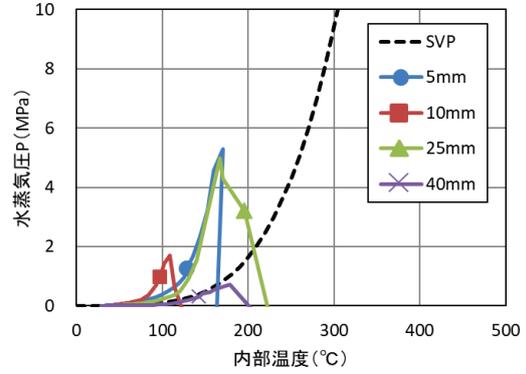
b) P2.5



c) P5



d) P10



e) P20

図 5-16 水蒸気圧と内部温度

5章の参考文献

- 1) Harmathy, T. Z.: Effect of moisture on the fire endurance of building elements. *ASTM Special Technical Publication*, No.385, pp.74-95, 1965.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Ozawa, M., Tanibe, T., Kamata, R., Uchida, Y. and Roku-go, 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 小幡陸央, 菊地毅之, 高橋優斗, 木下晃一, 深津志向, 平島岳夫: 高温時におけるモルタルの力学的特性 (その 1 一定温度下での圧縮実験), *日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北)*, pp. 367-368, 2018.9.
- 8) 構造材料の耐火性ガイドブック, 日本建築学会, 2017.
- 9) 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/j/jci/study/standard.html> (閲覧日: 2022 年 1 月 25 日)
- 10) Yu, P., Guorong, Z., Yuxuan, Q. and Qigng, Z.: In-situ assessment of water-penetration resistance of polymer modified cement mortars by μ -XCT, SEM and EDS, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 114, 2020.
- 11) 王徳東, 野口貴文, 下山淳一: 高温加熱下におけるセメント混和用再乳化形粉末樹脂の挙動, 第 44 回燃焼シンポジウム, 2006.
- 12) 吉田夏樹, 新大軌, 木野瀬透, 俵あかり: 火災の影響を受けたコンクリートの化学的変化に関する一検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.1, 2017.
- 13) 榎村剛, 兼松学: 高強度コンクリートの爆裂時の水分挙動に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 34, No. 1, pp. 1108-1113, 2012.
- 14) 榎原弘幸, 安藤重裕, 大崎敬一, 川上明大, 佐々木孝彦, 上田洋, 藤原申次: ポリマーセメントモルタルの物性に及ぼすポリマーディスパーションおよび再乳化形粉末樹脂の影響, *材料*, Vol.53, No.10, pp.1103-1108, 2004.10.

以上

6. 有機繊維混入による爆裂抑止効果

6.1 各種ポリマーを用いた PCM の評価

6.1.1 使用材料および配合

表 6-1 に使用材料を示す。繊維以外の材料は、表 4-1 と同じ仕様である。本検討では、高強度コンクリートの爆裂抑止配合に混和される有機繊維¹⁾を参考にし、ナイロン繊維を用いた。表 6-2 に配合を示す。ナイロン繊維の混入量は 0.1vol%とした。

表 6-1 使用材料

名称	仕様
ポリアクリル酸エステル	再乳化形粉末樹脂, 密度 0.4~0.6 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
エチレン酢酸ビニル	再乳化形粉末樹脂, 密度 0.5~0.6 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
酢酸ビニル・ビニルバーサテート	再乳化形粉末樹脂, 密度 0.5~0.7 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
セメント	普通ポルトランドセメント, 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%
繊維	ナイロン樹脂, 密度 1.14g/cm ³ 繊維長 10mm, 融点 215°C
混和剤	減水剤 (粉末型), 消泡剤 (粉末型)

表 6-2 配合

水準	ポリマー	S/C	W/C	P/C (%)	繊維 (vol%)	混和剤 (C×%)
PAE-F	アクリル酸エステル	2.5	0.5	10	0.1	0.5 以下
EVA-F	エチレン酢酸ビニル					
VVA-F	酢酸ビニル・ ビニルバーサテート					

6.1.2 フレッシュ性状および強度特性

表 6-3 にフレッシュ性状および強度特性を示す。養生方法は封かん養生とした。表中には、繊維無混入の配合として、表 4-3 の PAE, EVA および VVA の試験結果を示す。なお、EVA-F および VVA-F の空気量は未測定である。PAE-F および EVA-F は、繊維無混入の配合に比べ、フローが若干低下した。VVA はフローがやや小さいが、VVA-F は VVA に比べてフローが増加し、鋼製リングへの充填性については、いずれの水準も問題無かった。圧縮強度は、繊維無混入の配合と比較して同程度であった。一方、弾性係数は、ナイロン繊維の混入により、やや低下する傾向を示した。含水率は 6.1~7.5%の範囲であった。

表 6-3 フレッシュ性状および強度特性

材齢	項目	NCM	PAE	PAE-F	EVA	EVA-F	VVA	VVA-F
練り直後	15 打フロー	159	181	157	180	169	135	153
	空気量(%)	5.2	6.2	5.9	4.4	-	4.0	-
	温度(°C)	25.5	26.0	28.5	16.7	16.2	16.8	16.5
加熱試験	圧縮強度(MPa)	45.3	43.0	46.7	47.3	44.5	47.0	46.1
	弾性係数(GPa)	26.3	22.0	20.9	20.5	19.7	22.4	20.6
	含水率(%)	6.1	6.1	6.1	7.4	7.4	7.2	7.5

6.1.3 リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件

リング拘束供試体の形状寸法は、図 4-1 の仕様と同じである。熱電対、ひずみゲージおよびステンレスパイプの設置位置は、加熱面から 5, 10, 25, 40mm の位置とした。養生方法は 2 ヶ月間の封かん養生とし、その後、図 3-2 に示すように加熱試験を実施した。また、加熱条件は加熱曲線 2 (RABT30 相当)²⁾とした。

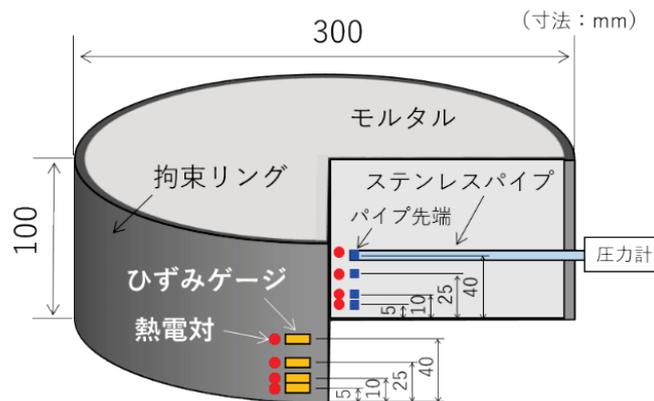


図 4-1 リング拘束供試体の形状寸法 (再掲)

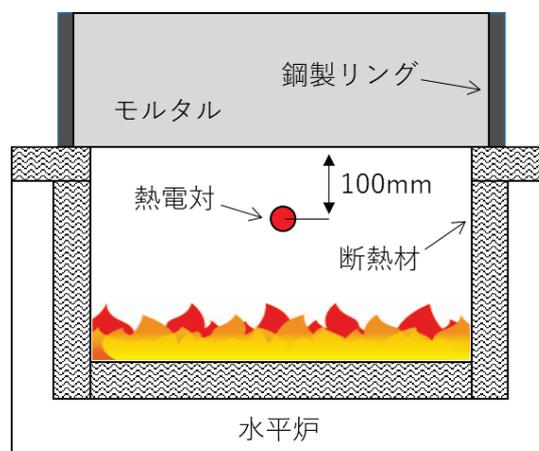


図 3-2 リング拘束供試体の加熱方法 (再掲)

6.1.4 爆裂継続時間および爆裂による損傷規模

図 6-1 に爆裂継続時間を示し、図 6-2 に加熱面および爆裂深さ分布を示す。また、表 6-4 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。なお、表にはナイロン繊維無混入の水準の試験結果として、表 4-4 のデータを併せて示す。試験の結果、いずれの PCM も、ナイロン繊維を混入した水準は繊維無混入の水準に比べて爆裂規模が小さくなった。また、爆裂の発生が途中で止まり、加熱を中止することは無かった。なお、ポリプロピレン繊維を混入した PCM は、無拘束供試体の加熱試験において爆裂抑止効果が確認されており³⁾、拘束条件下でも同様に効果が確認された。一方、ナイロン繊維の混入量は同じであるが、ポリマーの種類により爆裂規模に差が生じた。PAE-F は爆裂が発生し、最大爆裂深さおよび爆裂容積率は D、爆裂面積率は E となった。一方、EVA-F および VVA-F は爆裂が発生せず、最大爆裂深さ、爆裂面積率および爆裂容積率は、いずれも B であった。これらの結果より、ポリマーの種類により、有機繊維の爆裂抑止効果の程度には差異が生じる可能性があると考えられた。

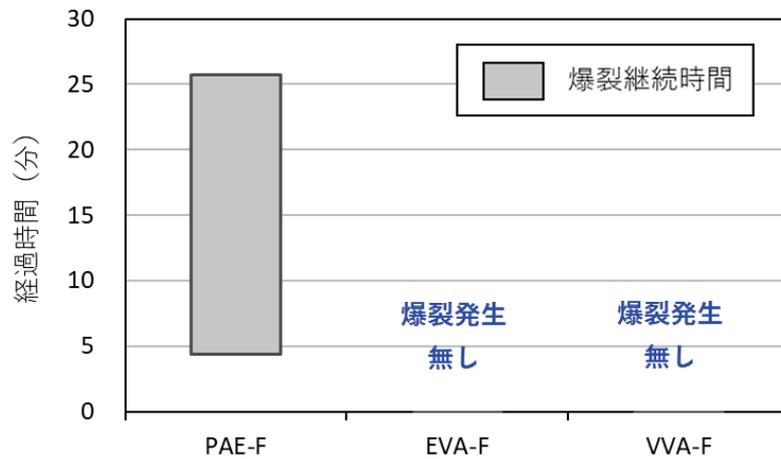


図 6-1 爆裂継続時間

6. 有機繊維混入による爆裂抑止効果

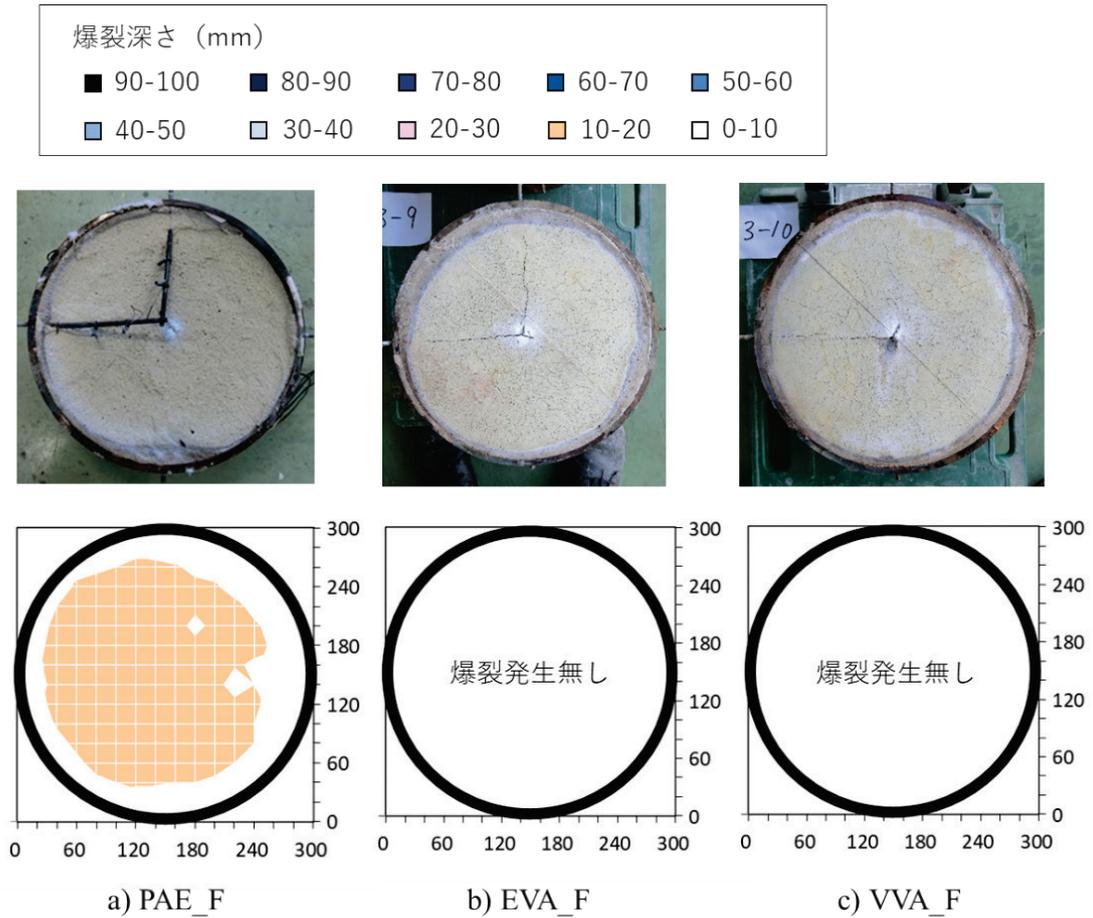


図 6-2 加熱面および爆裂深さ分布

表 6-4 爆裂規模のグレーディング結果

水準	爆裂状況			グレード ²⁾		
	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
PAE	56	98	36	E	E	E
PAE-F	19	98	11	D	E	D
EVA	73	90	41	E	E	E
EVA-F	0	0	0	B	B	B
VVA	69	91	44	E	E	E
VVA-F	0	0	0	B	B	B

6.1.5 内部温度と爆裂発生時間の推定

図 6-3 に内部温度および爆裂深さの経時変化を示す。なお、EVA-F および VVA-F は爆裂が発生しなかったため、内部温度の経時変化のみを示す。PAE-F は、5、10mm 位置において爆裂が発生し、内部温度が急激に上昇した。EVA-F と VVA-F は爆裂が未発生であり、各測定位置の内部温度は緩やかに上昇した。なお、VVA-F は同加熱時間における 5mm 位置の温度が EVA-F より高いが、ひび割れ等からの熱の伝わりが影響した可能性がある。EVA-F および VVA-F の 10、25、40mm 位置の内部温度に差異はみられない。

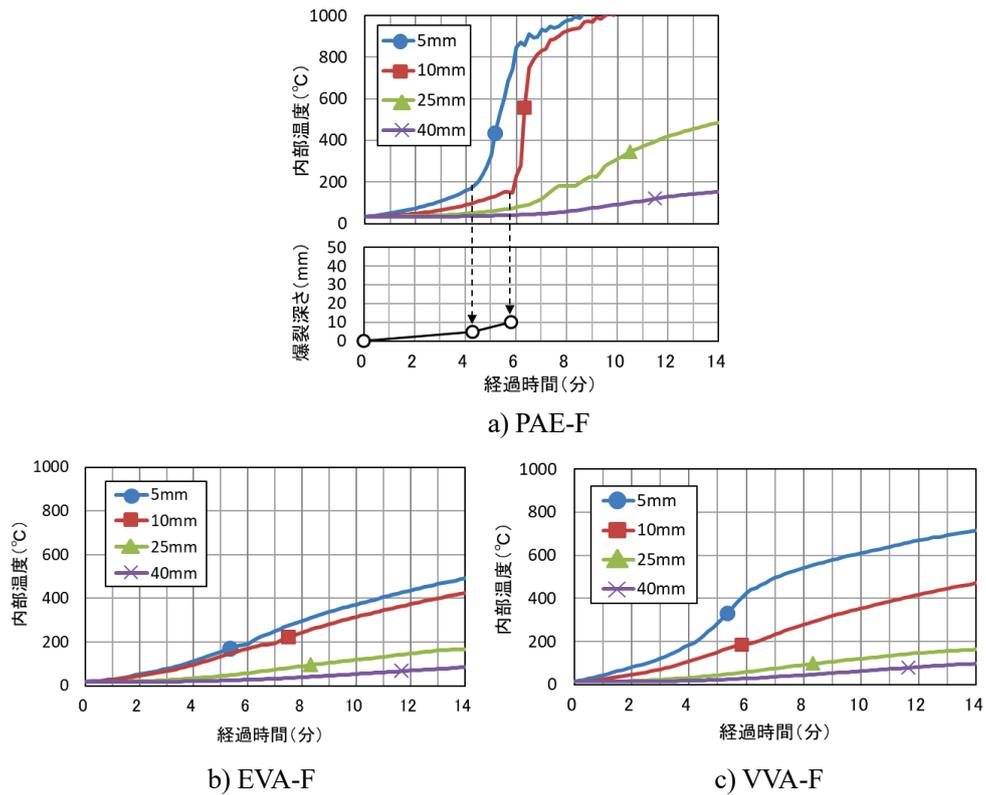


図 6-3 内部温度および爆裂深さの経時変化

6.1.6 拘束応力および水蒸気圧

図 6-4 に拘束応力と内部温度の経時変化を示す。なお、PAE-F は爆裂深さの経時変化を併せて示す。PAE-F は爆裂が発生した後、拘束応力が伸び止まり、上下に変動する挙動を示した。これは、モルタルの熱膨張と断面欠損が相互に作用する影響であると考えられ、繊維無混入の PCM と類似した挙動である。一方、EVA-F および VVA-F は、爆裂が未発生であり、断面欠損が生じないため、内部温度の上昇によるモルタルの熱膨張に伴い拘束応力が増加し続けたと考えられる。図 6-5 に水蒸気圧と内部温度の経時変化を示す。PAE-F は 5,10mm 位置で爆裂が発生し、爆裂発生時に水蒸気圧が急減した。PAE-F の爆裂発生時の水蒸気圧の挙動は、繊維無混入の PCM と同じ傾向を示した。また、EVA-F および VVA-F は、温度上昇に伴い水蒸気圧が増加した後、緩やかに減少した。これらの水準は、爆裂が未発生であった。

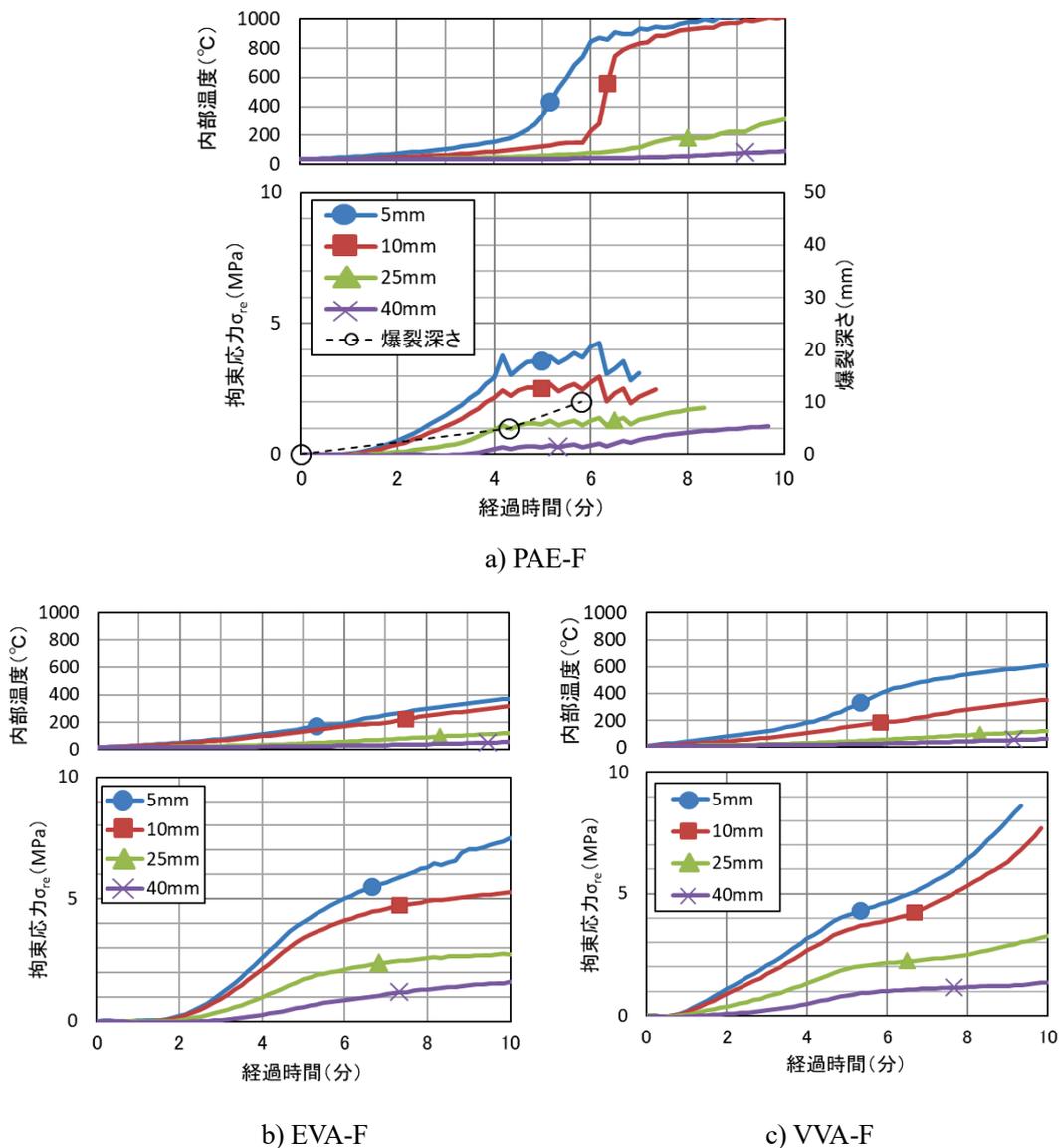
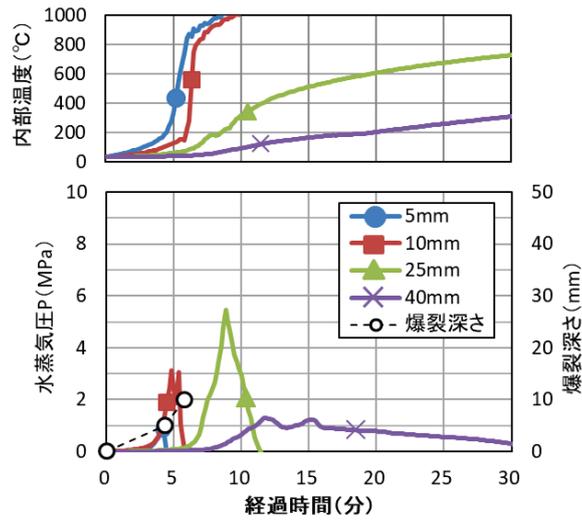
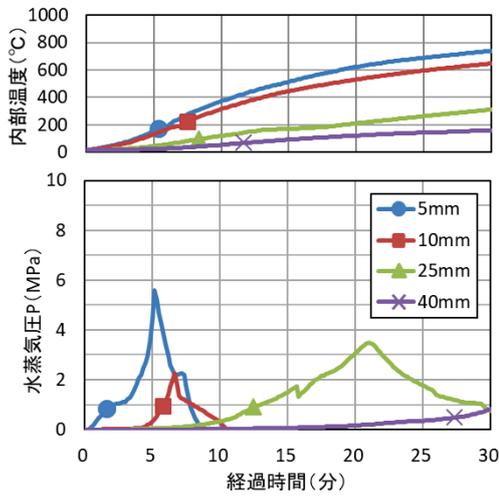


図 6-4 拘束応力と内部温度の経時変化

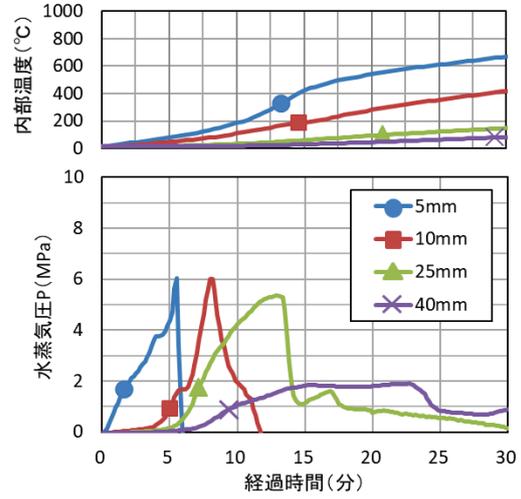
6. 有機繊維混入による爆裂抑止効果



a) PAE-F



b) EVA-F



c) VVA-F

図 6-5 水蒸気圧と内部温度の経時変化

6.2 P/Cが爆裂抑止効果に及ぼす影響

6.2.1 使用材料および配合

PCMのP/Cが有機繊維の爆裂抑止効果に及ぼす影響を確認した。セメント、細骨材および繊維は表6-1と同じ仕様である。ポリマーは、表6-1に示すポリアクリル酸エステルを用いた。表6-5に配合を示す。P/Cは10,20%とし、S/C=2.5, W/C=0.5とした。また、ナイロン繊維の混入量は、P/C=10%のPCMは0.1vol%, P/C=20%のPCMは0.1および0.5vol%とした。

表6-5 配合

水準	S/C	W/C	P/C(%)	繊維(vol%)	混和剤(C×%)
P10-0.1F	2.5	0.5	10	0.1	0.5以下
P20-0.1F			20	0.1	
P20-0.5F				0.5	

6.2.2 フレッシュ性状および強度特性

表6-6にフレッシュ性状および強度特性を示す。表には、繊維無混入の水準として表4-6のP10およびP20のデータを併せて示す。ナイロン繊維を混入するとフローがやや低下したが、鋼製リングへの充填性に問題はなかった。P10-0.1Fの圧縮強度および弾性係数は、P10と比較して同程度であった。また、P20-0.1Fの圧縮強度はP20より若干低下し、弾性係数は同程度であった。P20-0.5Fの圧縮強度は、P20に比べて低下し、弾性係数も若干低下した。P20-0.1FおよびP20-0.5Fの含水率は、他水準よりやや大きくなった。

表6-6 フレッシュ性状および強度特性

材齢	項目	NCM	P10	P10-0.1F	P20	P20-0.1F	P20-0.5F
練り直後	15打フロー(mm)	159	181	157	196	190	184
	空気量(%)	5.2	6.2	5.9	3.0	4.0	6.1
	温度(°C)	25.5	26.0	28.5	26.3	17.2	30.0
加熱試験	圧縮強度(MPa)	45.3	43.0	46.7	49.3	42.5	35.6
	弾性係数(GPa)	26.3	22.0	20.9	18.3	18.5	17.4
	含水率(mass%)	6.1	6.1	6.1	6.6	7.3	8.4

6.2.3 リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件

リング拘束供試体の形状寸法は、図4-1と同じ仕様である。熱電対、ひずみゲージおよびステンレスパイプの設置位置は、加熱面から5, 10, 25, 40mmの位置とした。養生方法は2ヶ月間の封かん養生とし、その後、図3-2に示すように加熱試験を実施した。また、加熱条件は加熱曲線2 (RABT30相当)²⁾とした。

6.2.4 爆裂継続時間および爆裂による損傷規模

図 6-6 に爆裂継続時間を示す。P10, P20 および P20-0.1F は、爆裂がくり返し発生して止まらず、供試体上面から火炎漏れが生じる恐れがあったため、加熱を中止した。P10-0.1F および P20-0.5F は爆裂が途中で止まり、加熱を中止することは無かった。図 6-7 に加熱面および爆裂深さ分布を示す。また、表 6-7 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。表中には、繊維無混入の水準として表 4-7 の結果を併せて示す。P10-0.1F は P10 と比較して、最大爆裂深さおよび爆裂容積率のグレードが E から D に向上した。P20-0.1F は、最大爆裂深さおよび爆裂容積率が E となり、P20 と同じであった。一方、P20-0.5F は、最大爆裂深さおよび爆裂容積率のすべてのグレードが B となり、P20 に比べてグレードが向上した。これらの結果より、同じ繊維混入量のとき、P/C が小さくなると爆裂抑止効果は大きくなる傾向を示した。一方、繊維混入量を増やすと、爆裂規模のグレードは向上し、爆裂抑止効果が大きくなる傾向を示した。

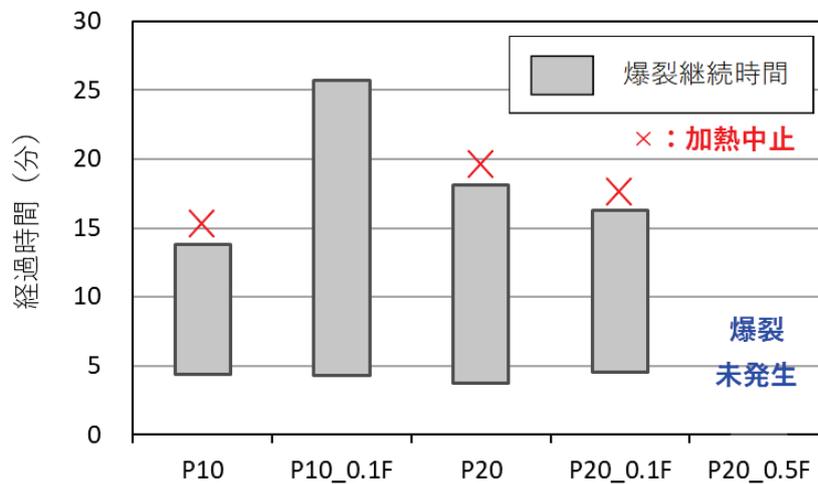


図 6-6 爆裂継続時間

6. 有機繊維混入による爆裂抑止効果

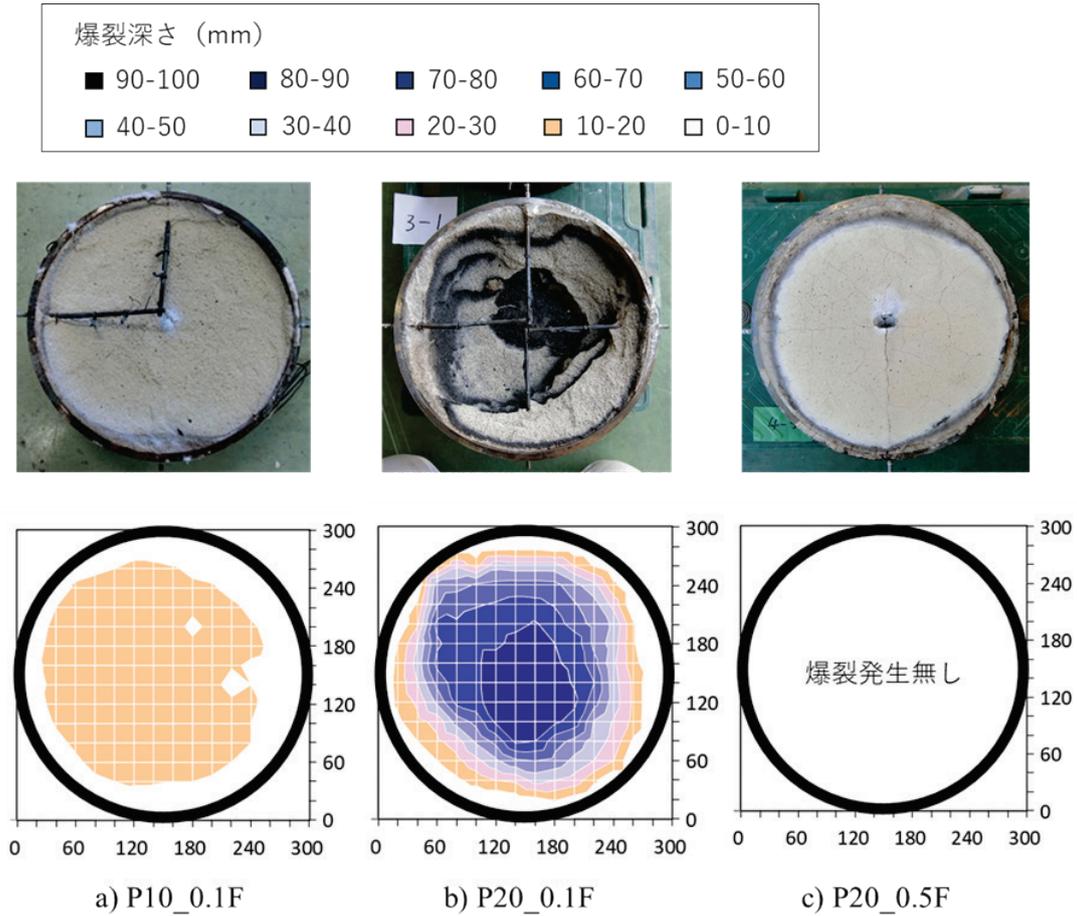


図 6-7 加熱面の状況および爆裂深さ分布

表 6-7 爆裂規模のグレーディング結果

水準	爆裂状況			グレード ²⁾		
	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
P10	56	98	36	E	E	E
P10-0.1F	19	98	11	D	E	D
P20	80	87	45	E	E	E
P20-0.1F	80	85	36	E	E	E
P20-0.5F	0	0	0	B	B	B

6.2.5 内部温度と爆裂発生時間の推定

図 6-8 に内部温度と爆裂深さの経時変化を示す。P10-0.1F は、5,10mm 位置で爆裂が発生した。P20-0.1F は、5,10,25,40mm の各位置で爆裂の発生が確認された。一方、P20-0.5F は爆裂未発生であり、内部温度は緩やかに上昇した。

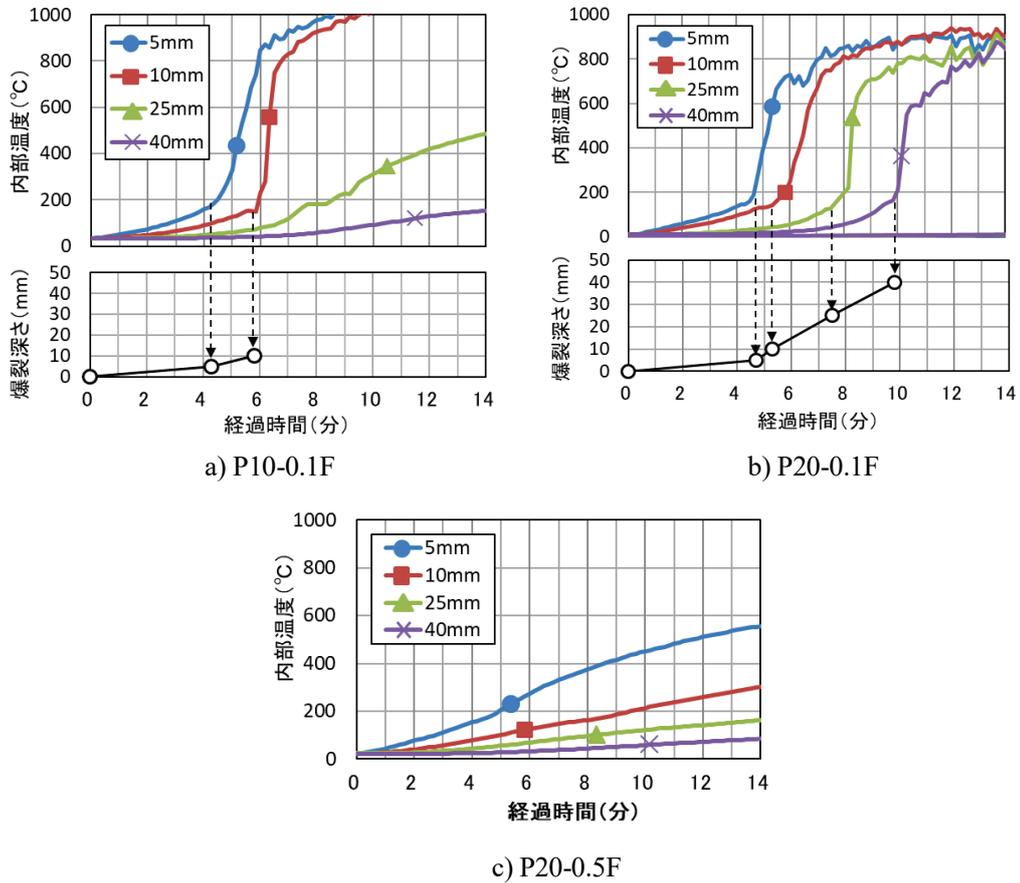
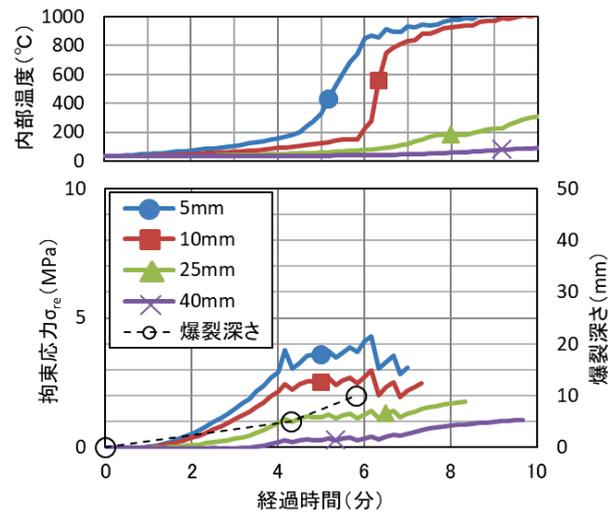


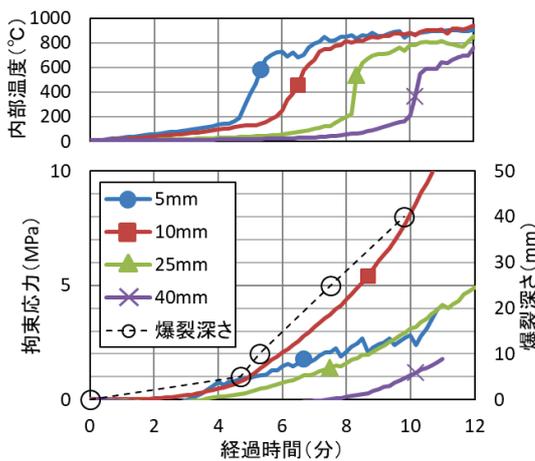
図 6-8 内部温度と爆裂深さの経時変化

6.2.6 拘束応力および水蒸気圧

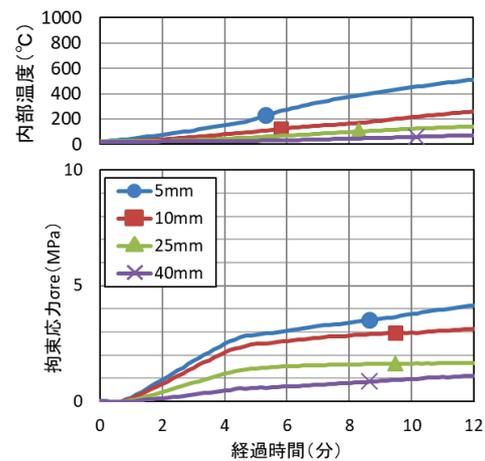
図 6-9 に拘束応力および内部温度の経時変化を示す。また、図中には爆裂深さの経時変化を併せて示す。P20-0.5F は爆裂未発生であり、拘束応力は時間経過とともに増加し続けた。一方、P10-0.1F は爆裂が発生し、爆裂発生後は拘束応力が伸び止まり、断面欠損の影響であると考えられた。なお、P20-0.1F の 5mm 位置の拘束応力は、爆裂発生の影響で伸び止まるが、10, 25, 40mm 位置は加熱時間経過とともに増加した。P20-0.1F の爆裂による損傷箇所は、図 6-7 に示すように中心付近に集中しており周囲はモルタルが残っている箇所が多い。そのため、周囲に残ったモルタルの熱膨張により爆裂発生後も拘束応力が増加した可能性があると考えている。図 6-10 に水蒸気圧および内部温度の経時変化を示す。なお、P20_0.5F の 5mm 位置の水蒸気圧は計測不良であったため除外した。爆裂発生時に水蒸気圧が急激に減少する現象は、P10-0.1F および P20-0.1F でもこれまでの結果と同様にみられた。一方、爆裂未発生時は、水蒸気圧が上昇した後、徐々に下降する動きを示した。



a) P10-0.1F



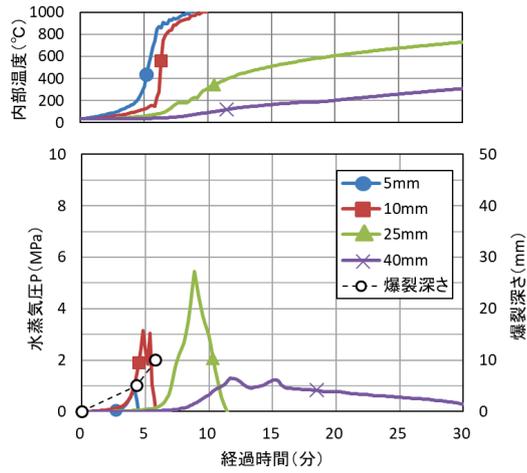
b) P20-0.1F



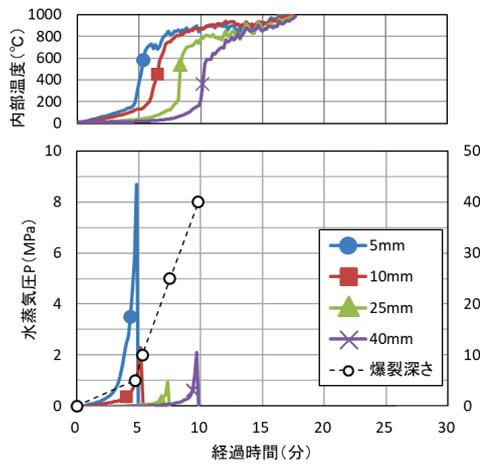
c) P20-0.5F

図 6-9 拘束応力および内部温度の経時変化

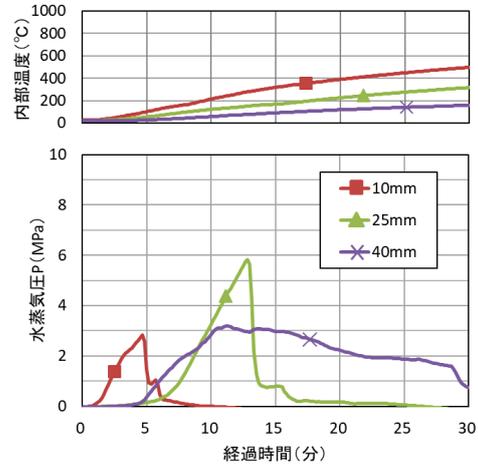
6. 有機繊維混入による爆裂抑止効果



a) P10-0.1F



b) P20-0.1F



c) P20-0.5F

図 6-10 水蒸気圧および内部温度の経時変化

6.3 爆裂発生メカニズムに基づく爆裂未発生原因の考察

6.3.1 引張ひずみ破壊指数と水蒸気圧の挙動

爆裂の発生しなかった P20-0.5F について、爆裂未発生の原因を 5 章で検討した爆裂発生メカニズムに基づいて考察した。図 6-11 に P20-0.5F の引張ひずみ破壊指数と水蒸気圧の挙動を示す。P20-0.5F の引張ひずみ破壊指数は、式(5-4)~(5-7)²⁾により計算した。見掛けのポアソン比は 0.15 とし、PCM の引張破壊ひずみは、図 4-6 の関係式により 44μ (P/C=20%) と設定した。引張ひずみ破壊指数の計算の結果、P20-0.5F の各測定位置の引張ひずみ破壊指数は 1 を超え、爆裂が未発生の場合にも引張ひずみ破壊が生じると考えられた。一方、水蒸気圧は、ひび割れからの水蒸気の抜けや乾燥により低下した可能性があると考えられ、爆裂発生時の特徴である急激な減少挙動はみられなかった。

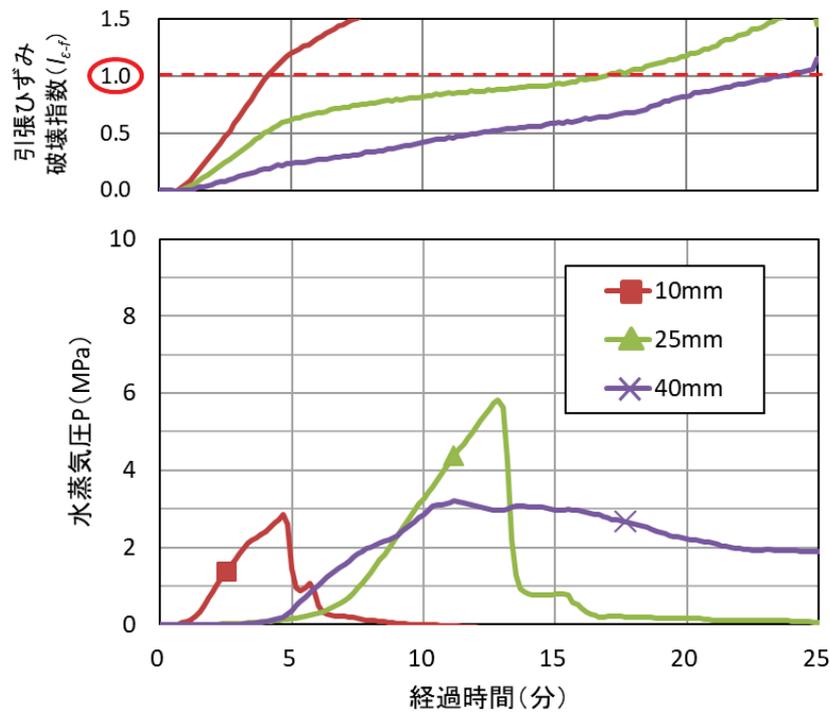


図 6-11 引張ひずみ破壊指数と水蒸気圧の挙動 (P20_0.5F)

6.3.2 有機繊維混入による爆裂抑止効果のイメージ

高強度コンクリートにポリプロピレン繊維を混入すると、高温下の爆裂を抑止する効果が確認されている。これは、有機繊維が高温下で熔融し、熔融により生じたスペースが水蒸気の逃げ道になり、水蒸気圧が緩和されることによると考えられている⁴⁾。図6-12にSEM観察に用いた試料の採取方法を示す。未加熱の試料は、φ50×100mmの供試体をニッパーで小片に破砕して断面を観察した。また、加熱した試料は、加熱試験を実施したリング拘束供試体からコアを採取し、割裂した断面を観察した。加熱した試料は、500°C程度の温度履歴を受けた部分を観察した。図6-13にP20-0.5FをSEM観察した結果を示す。観察の結果、未加熱の試料には有機繊維が確認された。また、割裂面に繊維が抜けた跡も確認した。繊維が抜けた跡を拡大して観察すると、表面形状は滑らかであった。一方、加熱した試料は、有機繊維が確認されず、有機繊維と同径の穴のみ確認された。この穴は、繊維が熔融して生じたもの（熔融跡）と考えられる。さらに、熔融跡表面を観察すると凹凸が確認され、モルタルの表面に熔融した繊維が付着したものと推察された。図6-14に水蒸気圧と内部温度を示す。10, 25, 40mm位置の水蒸気圧は、100, 150, 65°C付近をピークに水蒸気圧が減少した。ナイロンの融点は215°Cである⁵⁾ため、融点より低い温度でも水蒸気圧が減少していると考えられる。一方、ナイロンのガラス転移温度は50°Cであり⁵⁾、PCMに混入したナイロン繊維は、ガラス転移温度を超えて軟化し、モルタルとの境界面に隙間が生じた可能性があると考えている。上記の現象は、ポリプロピレン繊維を混入した高強度コンクリートにおいても同様の知見がある⁶⁾。図6-15に爆裂発生温度域における組織のイメージを示す。5章にて、PCMに含まれるポリマーは爆裂発生温度域において未燃焼であり、水和生成物間や骨材-ペースト界面に存在し、水分移動を抑制していることを説明した。一方、有機繊維を混入すると、爆裂発生温度域において繊維とモルタルの境界面に隙間が生じると考えられる。その結果、水や水蒸気が繊維-モルタル境界面の隙間に移動し、水蒸気圧が緩和されると推察される。PCMの高温下の爆裂現象は、拘束応力のポアソン効果に伴う引張りずみ破壊と水蒸気圧による破壊片の押し出し作用が複合して発生すると考えている。図6-11より、PCMにナイロン繊維を混入した場合も引張りずみ破壊は生じている。しかし、爆裂発生温度域において繊維の軟化や熔融による体積変化に伴いスペースが形成されると水蒸気圧が緩和される。その結果、水蒸気圧が破壊片を押し出す力として作用しなくなり、爆裂が発生しない、もしくは加熱途中で止まると考えられる。

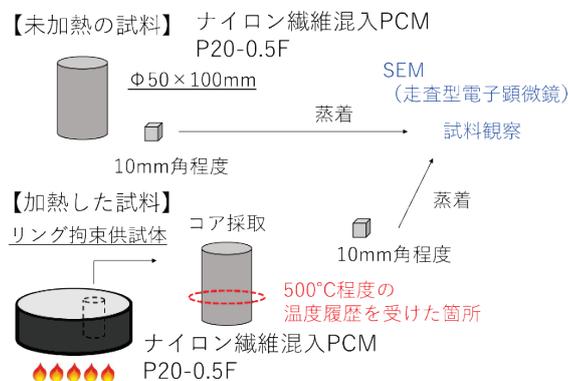
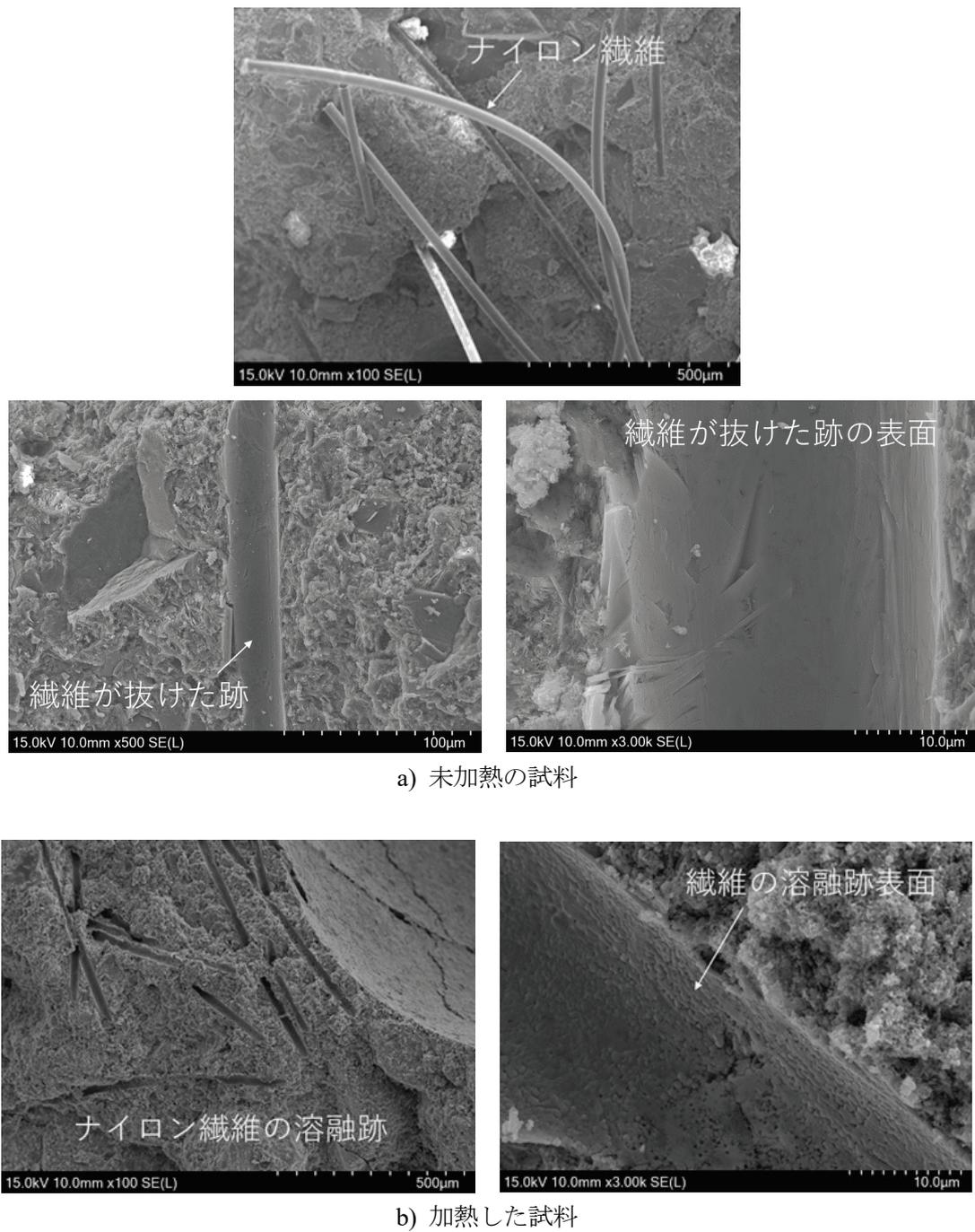


図6-12 SEM観察に用いた試料の採取方法

6. 有機繊維混入による爆裂抑止効果



a) 未加熱の試料

b) 加熱した試料

図 6-13 加熱前後の断面観察 (P20-0.5F)

6. 有機繊維混入による爆裂抑止効果

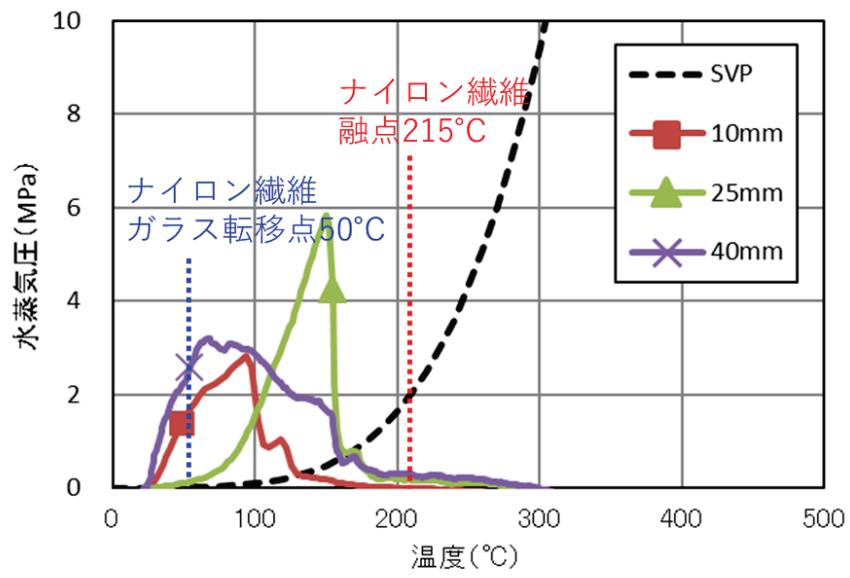
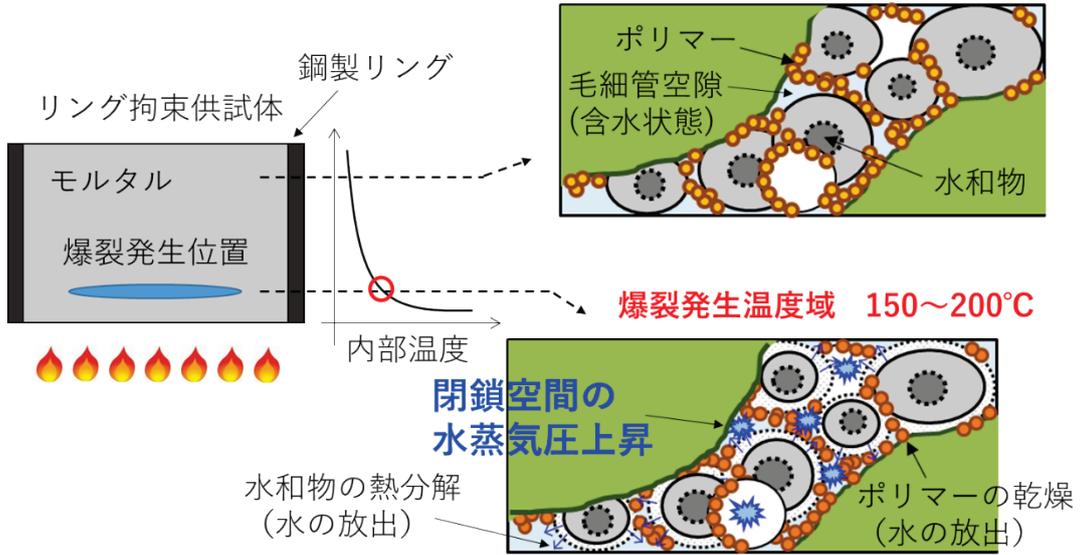


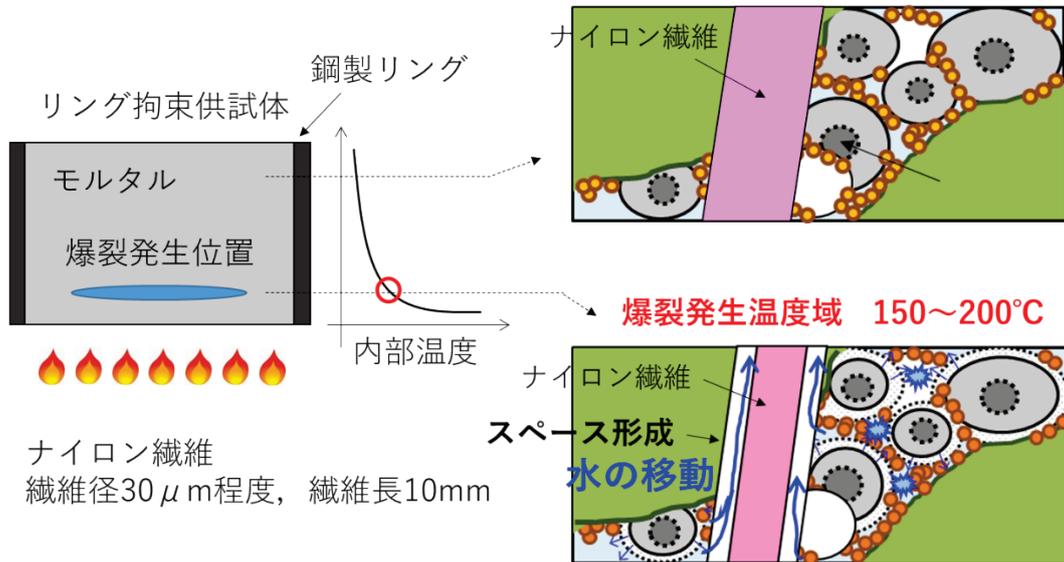
図 6-14 水蒸気圧と内部温度 (P20-0.5F)

【爆裂発生温度域における組織イメージ】



a) 繊維未混入のPCM

【爆裂発生温度域における組織イメージ】



b) 繊維を混入したPCM

図 6-15 爆裂発生温度域における組織のイメージ

6章の参考文献

- 1) 韓千求, 韓敏喆, 李健哲, 李周宣: 複合有機繊維の混入率が高強度コンクリートの耐火特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009.
- 2) 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: 2022年1月25日)
- 3) 森田武, 元売正美: 鉄筋コンクリート造部材の補修に用いるポリマーセメントモルタルの耐火性に関する検討—爆裂の簡易評価方法および爆裂防止用ポリプロピレン繊維の最適混入量—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.33-36, 2015.
- 4) Ozawa, M., Morimoto, H.: Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.71, pp. 83-92, 2014.
- 5) 中島章夫: 化学繊維の融点と分子構造の関連性, 繊維製品消費科学, 5巻3号, pp.119-126, 1964.
- 6) Khory, G. A.: Polypropylene fibres in heated concrete Part 2 : pressure relief mechanisms and modelling criteria, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 60, pp. 189-204, 2008.

以 上

7. 補修した RC 部材の耐火試験との比較評価

7.1 試験体の仕様

7.1.1 リング拘束供試体

表 7-1 にコンクリートの使用材料を示し、表 7-2 にコンクリートの配合を示す。コンクリートは、普通コンクリートの標準的な配合とした。また、表 7-3 に PCM の使用材料を示し、表 7-4 に PCM の配合を示す。リング拘束供試体は、NSC、PAE および PAE-0.5F の 3 水準とした。リング拘束供試体は、図 4-1 と同じ仕様としたが、本節では爆裂深さおよび爆裂規模のグレーディング結果のみを示した。

表 7-1 コンクリートの使用材料

名称	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材 1	栃木県佐野市仙波町産砕砂 表乾密度 2.64 g/cm ³
細骨材 2	栃木県佐野市山菅町産砕砂 表乾密度 2.61 g/cm ³
粗骨材 1	群馬県みどり市大間々町産砕石 表乾密度 2.89g/cm ³
粗骨材 2	栃木県佐野市閑馬町産砕石 表乾密度 2.65g/cm ³
混和剤	AE 減水剤標準形

表 7-2 コンクリートの配合

水準	W/C (%)	単位量(kg/m ³)						
		W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
NSC	49.5	183	370	439	439	634	271	4.81

表 7-3 PCM の使用材料

名称	仕様
ポリアクリル酸エステル	再乳化形粉末樹脂 密度 0.4~0.6 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
セメント	普通ポルトランドセメント 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%
繊維	ナイロン樹脂, 密度 1.14g/cm ³ 繊維長 10mm, 融点 215°C
混和剤	減水剤 (粉末型), 消泡剤 (粉末型)

表 7-4 PCM の配合

水準	S/C	W/C	P/C(%)	繊維(vol%)	混和剤(C×%)
PAE	2.5	0.5	10	-	0.5
PAE-0.5F				0.5	以下

7. 補修した RC 部材の耐火試験との比較評価

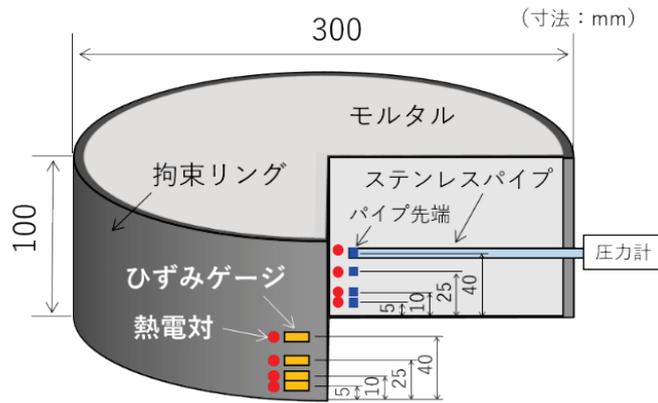


図 4-1 リング拘束供試体の形状寸法 (再掲)

7.1.2 補修した RC 梁

表 7-5 に鉄筋コンクリート梁 (RC 梁) の作製条件を示す。また、図 7-1 に補修した RC 梁の形状寸法を示す。RC 梁は、100mm×150mm×1500mm (幅×高さ×長さ) とした。また、主筋は D13 (SD-345) 2 本とし、圧縮領域には D6 鉄筋を 2 本配置した。A0 は無補修の RC 梁とした。一方、A1 および A2 は補修した RC 梁を模擬した。PCM による補修厚さは 50mm とした。なお、RC 梁のコンクリートおよび PCM の打設は上下を逆さにした状態で実施した。A0 はコンクリートを打設後 2 ヶ月間湿布養生した。A1 および A2 は、厚さ 100mm コンクリートを打設し、打ち継ぎ目処理剤により表面を洗い出した。その後 1 ヶ月間湿布養生した。さらに、PCM を打ち重ねて 1 ヶ月間湿布養生した。湿布養生の終了後、1 週間程度気中養生して加熱試験を実施した。

表 7-5 RC 梁の作製条件

水準	コンクリート	補修	補修材	補修厚さ (mm)
A0	NSC	無し	-	-
A1		有り	PAE	50
A2			PAE-0.5F	50

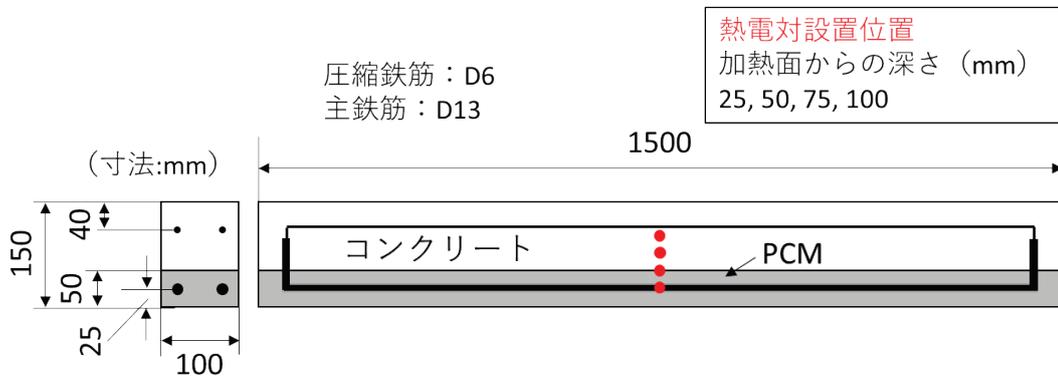


図 7-1 補修した RC 梁の形状寸法

7.2 リング拘束供試体および RC 梁の加熱条件

リング拘束供試体は、図 3-2 に示すように加熱試験を実施した。加熱条件は、加熱曲線 2 (RABT30 相当) 1)とした。図 7-2 に RC 梁の加熱方法を示す。RC 梁は本水準も含めた 6 本を水平炉に並べて設置した。梁間の隙間は断熱材で覆い、梁下の長さ 900mm の範囲を加熱した。加熱条件は、加熱曲線 2 (RABT30 相当) 1)とした。

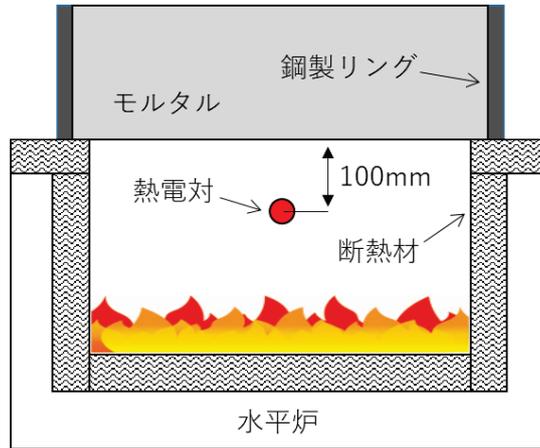


図 3-2 リング拘束供試体の加熱方法 (再掲)

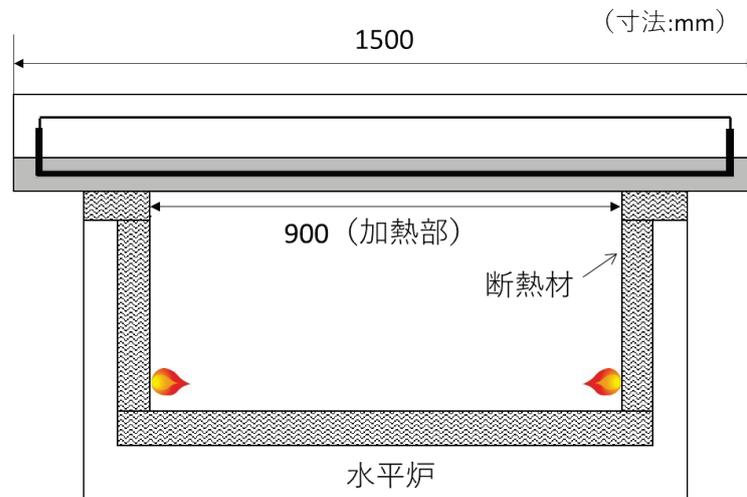


図 7-2 RC 梁の加熱方法

7.3 フレッシュ性状および強度特性

表 7-6 にコンクリートおよび PCM のフレッシュ性状および強度特性を示す。なお、PAE は、リング拘束供試体と RC 梁を異なる時期に作製したため、それぞれを作製したときのフレッシュ性状および強度特性を示す。各種材料の圧縮強度は、45MPa 前後である。一方、弾性係数は、NSC に比べ PAE および PAE-0.5F は小さいことが分かる。PCM は粗骨材が含まれていないことに加え、ポリマー混入により弾性係数が小さくなると考えられる^{1),2)}。

表 7-6 コンクリートおよび PCM のフレッシュ性状および強度特性

材齢	項目	NSC	PAE		PAE-0.5F
			リング	RC 梁	
練り直後	スランプ	21.5	-	-	-
	15 打フロー	-	181	188	163
	空気量(%)	6.8	6.2	3.8	4.1
	温度(°C)	29.0	26.0	25.4	26.0
加熱試験	圧縮強度(MPa)	45.7	43.0	43.5	43.0
	弾性係数(GPa)	34.9	22.0	19.3	20.5
	含水率(%)	6.5	6.1	7.8	8.0

7.4 爆裂による損傷規模

図 7-3 にリング拘束供試体の加熱面を、図 7-4 に RC 梁の加熱面を示す。リング拘束供試体の加熱試験において、PAE は加熱中に爆裂が止まらなかったため、加熱を 13.8 分で中止した。一方、NSC および PAE-0.5F は加熱を中止することは無かった。RC 梁の加熱試験は、すべての水準で加熱を中止することは無かった。A0 は表層に剥離がみられるが、鉄筋は露出していない。一方、A1 は PCM が爆裂により損傷し、PCM に被覆されていた鉄筋が露出した。A2 は表面にひび割れが生じたが爆裂は未発生であり、鉄筋は露出しなかった。図 7-5 に加熱面の爆裂深さ分布を示す。リング拘束供試体の爆裂深さは、リング拘束供試体法³⁾に準じて加熱面を 10mm メッシュの交点で測定した。RC 梁は、加熱した範囲の爆裂深さを測定した。測定位置は長さ方向に 100mm 間隔とし、中央および両端から 10mm 内側の 3 点をそれぞれ測定した。表 7-6 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。最大爆裂深さ、爆裂面積率、爆裂容積率は、リング拘束供試体法³⁾に準じて計算した。爆裂面積率と爆裂容積率の計算式は、式(3-2)、式(3-3)を再掲する。リング拘束供試体および RC 梁の最大爆裂深さおよび爆裂容積率は、類似した傾向を示すことを確認した。爆裂面積率は、PAE-0.5F と B2 でやや異なるが、損傷が軽微である点は同様の傾向を示した。

$$A_{sp} = N_j / N \times 100 \quad (3-2)$$

ここで、 N : 測定点数, N_j : 爆裂深さが 0 より大である測定点数, A_{sp} : 爆裂面積率

$$V_{sp} = \Sigma D_i / (N \times H) \times 100 \quad (3-3)$$

ここで、 ΣD_i : 合計爆裂深さ、 N : 測定点数、 H : 供試体高さ、 V_{sp} : 爆裂容積率

7.5 内部温度の経時変化

図 7-6 に内部温度の経時変化を示す。A1 は PCM の損傷が大きく、それにより 25,50mm 位置の熱電対が炉内に曝され、内部温度が急激に上昇したと考えられる。補修部の損傷による断面減少に加え、鉄筋の引張強度は 300~700°C で直線的に低下する⁴⁾ため、A1 は部材の耐力が早期に低下する可能性が大きいと考えられる。一方、A0 および A2 は、かぶりが鉄筋を保護し、鉄筋設置位置の内部温度上昇は緩やかであった。すなわち、PCM は、爆裂の発生を抑止することで無補修の場合と同等以上の遮熱性能を有すると考えられる。PCM で補修した RC 梁の加熱試験結果は、既往の研究^{5),6),7),8),9)}と同じ傾向を示した。

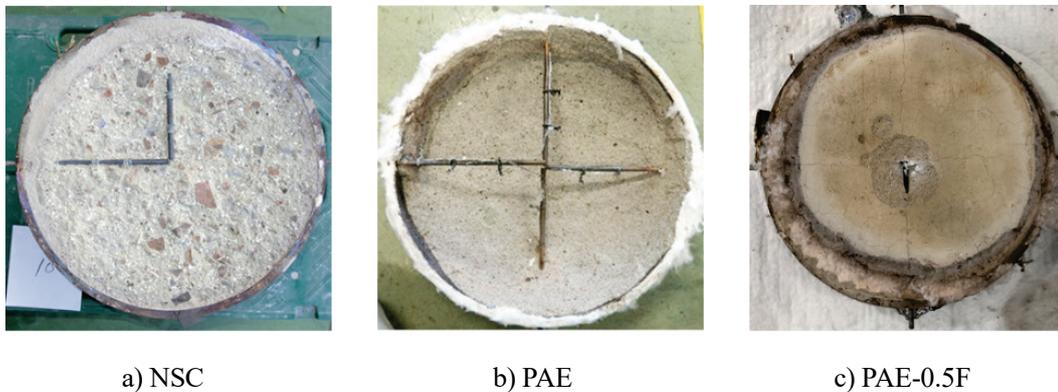


図 7-3 リング拘束供試体の加熱面



図 7-4 RC 梁の加熱面

7. 補修した RC 部材の耐火試験との比較評価

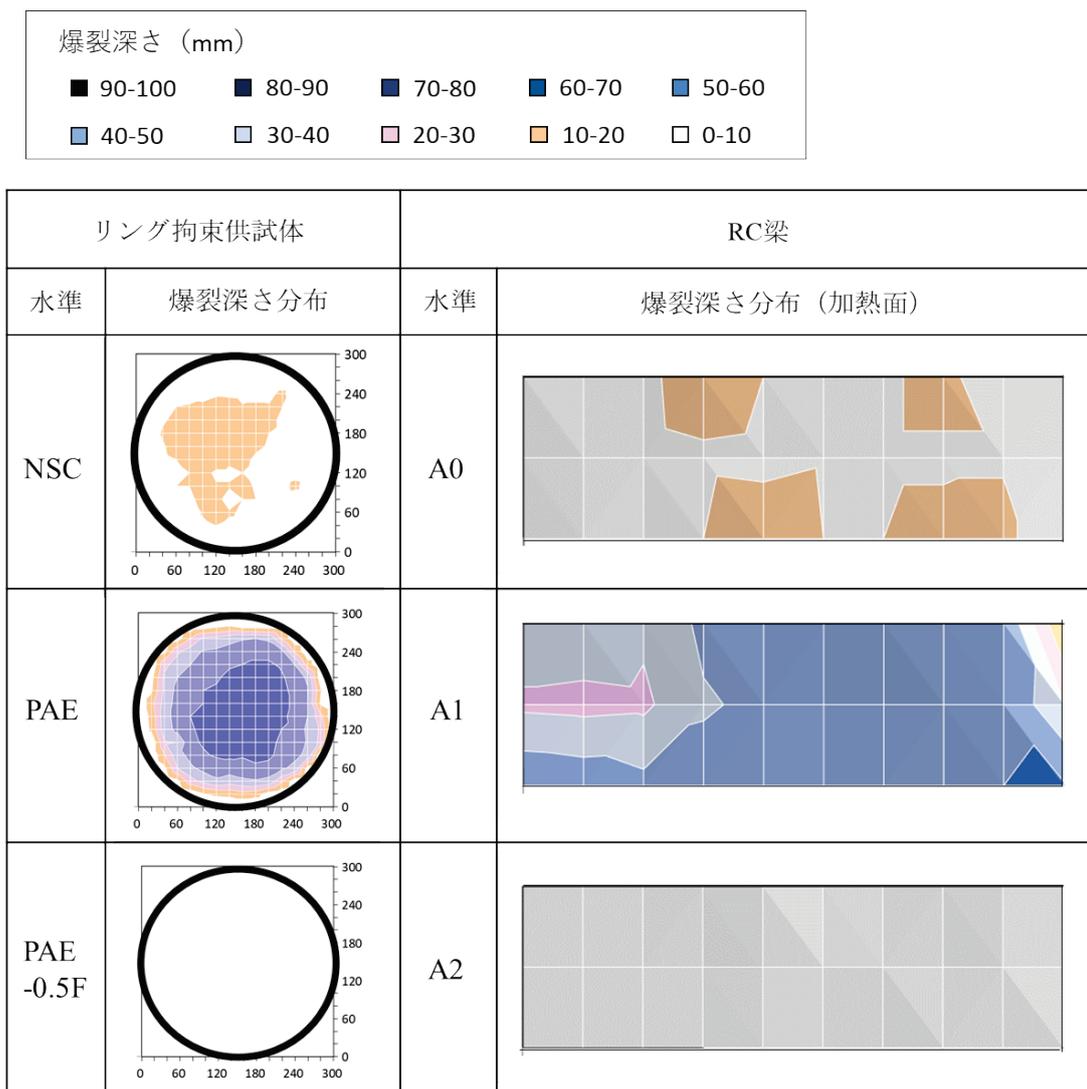
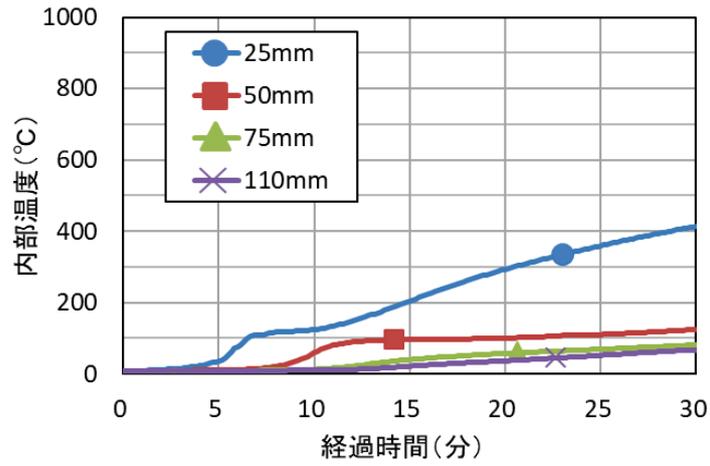


図 7-5 加熱面の爆裂深さ分布

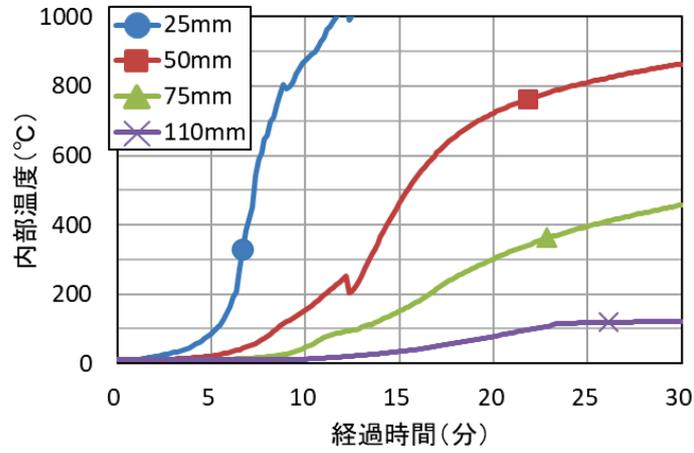
表 7-6 爆裂規模のグレーディング結果

水準	爆裂状況			グレード ³⁾		
	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
NSC	19	87	7	D	E	C
PAE	56	98	36	E	E	E
PAE-0.5F	2	16	0.1	C	C	C
A0	17	83	5	D	E	C
A1	51	100	27	E	E	E
A2	9	50	2	C	E	C

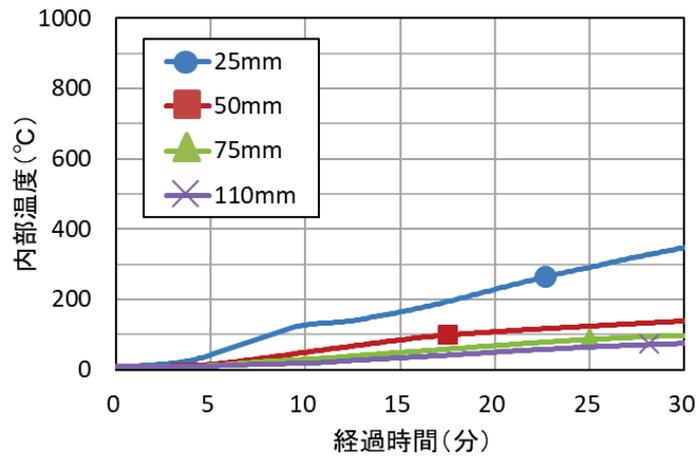
7. 補修した RC 部材の耐火試験との比較評価



a) A0



b) A1



c) A2

図 7-6 内部温度の経時変化

7章の参考文献

- 1) 川上英男：骨材種類とコンクリートの弾性係数，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25, No. 1, pp. 359-364, 2003.
- 2) 小川晴果，大濱嘉彦，出村克宣：高曲げ強さを有するポリマーセメントモルタルの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21, No. 1, pp. 115-120, 1999.
- 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：2022年1月25日）
- 4) 構造材料の耐火性ガイドブック，日本建築学会，2017.
- 5) 濱崎仁，茂木武，野口貴文，王徳東，金享俊：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 その1 耐火試験における補修部の損傷および温度分布，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第672号，pp. 1065-1071, 2010.
- 6) 道越真太郎，遊佐秀逸，野口貴文，山崎裕一，吉田敏之，大岡督尚，吉岡昌洋，加納嘉，森田武，唐沢智之，梶田秀幸，加納雅樹：ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造床試験体の耐火試験 その1 実験計画，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.1115-1116, 2012.
- 7) 梅本宗宏，遊佐秀逸，野口貴文，道越真太郎，森田武，山田人司，起橋孝徳，唐沢智之，中瀬博一，松戸正士，梶田秀幸，加納雅樹：ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造床試験体の耐火試験 その2 実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.1117-1118, 2012.
- 8) 森田武，松戸正士，遊佐秀逸，野口貴文，安田正雪，神代泰道，住学，山崎裕一，大岡督尚，吉岡昌洋，加納嘉，唐沢智之：ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造柱の耐火試験（その1 実験概要および実験経過），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.1119-1120, 2012.
- 9) 松戸正士，森田武，遊佐秀逸，野口貴文，閑田徹志，安田正雪，小島正朗，道越真太郎，起橋孝徳，唐沢智之，中瀬博一，加納雅樹：ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造柱の耐火試験（その2 軸方向変位および部材温度測定結果），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.1121-1122, 2012.

以 上

8. 補修厚さおよび材齢の影響

8.1 PCMで補修したコンクリートの供試体作製方法

図8-1にPCMで補修したコンクリート供試体の一例を示す。また、表8-1に各水準の打ち重ね条件およびセンサー設置位置を示す。本節は、コンクリートとPCMを打ち重ねたリング拘束供試体を用い、PCMの補修厚さが爆裂に及ぼす影響を評価した。試験水準は、コンクリート単体仕様(NSC)、PCM単体仕様(PCM-S)、コンクリートを厚さ80mm打設してPCMを厚さ20mm打ち重ねた複合体仕様(C80P20)およびコンクリートを厚さ50mm打設してPCMを厚さ50mm打ち重ねた複合体仕様(C50P50)とした。なお、NSCとC50P50は表面から30mm位置に鉄筋を設置し、鉄筋の露出状況の確認用とした。複合体仕様の供試体は、鋼製リングを上下反転させた状態で材料を充填した。打ち重ねの手順は、はじめにコンクリートを打設し、打ち継ぎ目処理剤を用いて表面を洗い出した。コンクリートは1ヶ月間封かん養生した。その後PCMを打ち重ね、さらに3ヶ月間封かん養生した。また、NSCは4ヶ月間封かん養生し、PCM-Sは2ヶ月間封かん養生した。それぞれの供試体は、封かん養生後、1週間程度気中乾燥して加熱試験を実施した。

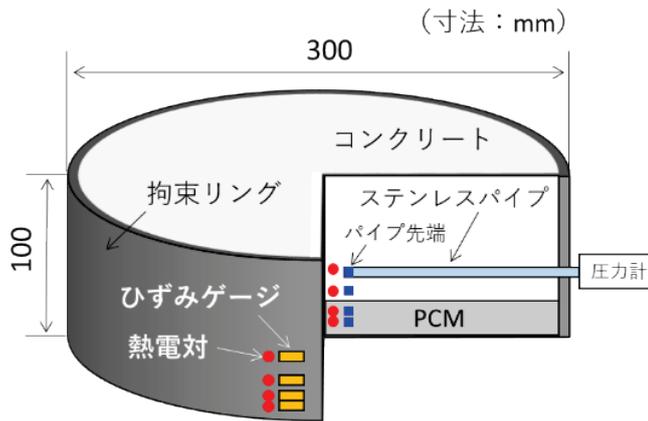


図8-1 供試体の形状寸法（複合体仕様の一例）

表8-1 供試体の打ち重ね条件およびセンサー設置位置

水準	NSC	C80P20	C50P50	PCM-S
打ち重ね条件	コンクリート 鉄筋	パイプ先端 熱電対	ひずみゲージ 鉄筋	PCM
センサー設置位置 (mm)	5, 10, 40, 60	5, 10, 30, 40	5, 10, 40, 60	5, 10, 25, 40
鉄筋位置 (mm)	30	無し	30	無し

8.2 補修厚さの影響評価

8.2.1 使用材料および配合

表 8-2 にコンクリートの使用材料を示し、表 8-3 にコンクリートの配合を示す。コンクリートは、普通コンクリートの標準的な配合とした。表 8-4 に PCM の使用材料を示し、表 8-5 に PCM の配合を示す。PCM のポリマーはポリアクリル酸エステルとし、P/C は 10% とした。

表 8-2 コンクリートの使用材料

名称	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材 1	栃木県佐野市仙波町産砕砂 表乾密度 2.64 g/cm ³
細骨材 2	栃木県佐野市山菅町産砕砂 表乾密度 2.61 g/cm ³
粗骨材 1	群馬県みどり市大間々町産砕石 表乾密度 2.89g/cm ³
粗骨材 2	栃木県佐野市閑馬町産砕石 表乾密度 2.65g/cm ³
混和剤	AE 減水剤標準形

表 8-3 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
	W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
49.5	183	370	439	439	634	271	4.07

表 8-4 PCM の使用材料

名称	仕様
ポリアクリル酸エステル	再乳化形粉末樹脂 密度 0.4~0.6 g/cm ³ ガラス転移温度 (TG) 0~10°C
セメント	普通ポルトランドセメント 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%
混和剤	減水剤 (粉末型), 消泡剤 (粉末型)

表 8-5 PCM の配合

S/C	W/C	P/C (%)	混和剤(C×%)
2.5	0.5	10	0.5 以下

8.2.2 フレッシュ性状および強度特性

表 8-6 にコンクリートおよび PCM のフレッシュ性状および強度特性を示す。NCM および PCM-S の圧縮強度は 45MPa 程度である。なお、複合体仕様 (C80P20, C50P50) の PCM は PCM-S とは異なる時期に作製しており、圧縮強度は高い値を示した。PCM-S は、複合体の PCM に比べ、空気量が少なく、若材齢である。しかし、これらの条件が、圧縮強度の差の直接的な原因であるかは不明である。一方、弾性係数は、コンクリートが 30GPa に対し、PCM-S および複合体仕様の PCM は 22GPa 程度であり、PCM の方が小さい値を示した。通常、コンクリートは粗骨材が含まれるため、モルタルに比べて弾性係数が大きくなる¹⁾。さらに、ポリマーを混入すると弾性係数は低下する傾向にある²⁾。PCM は、これらの要因により NSC に比べて弾性係数が小さくなると考えられる。NSC、PCM-S および複合体仕様の PCM の含水率は、いずれも同程度であった。

表 8-6 コンクリートおよび PCM のフレッシュ性状および強度特性

材齢	項目	NSC	PCM-S	複合体仕様の PCM
練り直後	スランプ	19.5	-	-
	15 打フロー	-	181	181
	空気量(%)	5.6	6.2	3.8
	温度(°C)	29.2	26.0	28.1
加熱試験	圧縮強度(MPa)	43.1	43.0	56.0
	弾性係数(GPa)	30.0	22.0	22.4
	含水率(%)	5.7	6.1	6.3

8.2.3 リング拘束供試体の加熱条件

加熱試験は、図 3-2 に示すように実施した。加熱条件は、加熱曲線 2 (RABT30 相当)²⁾ とした。

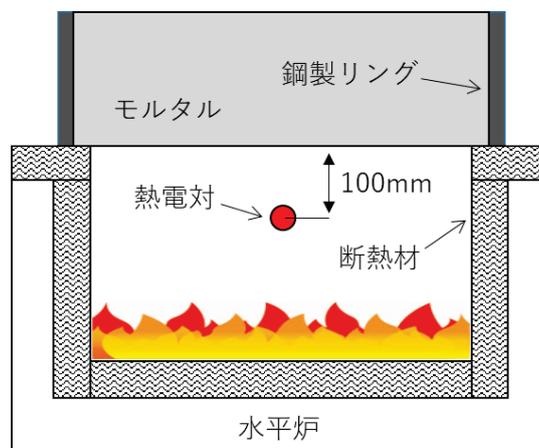


図 3-2 リング拘束供試体の加熱方法 (再掲)

8.2.4 爆裂継続時間および爆裂による損傷規模

図 8-2 に爆裂継続時間を示す。すべての水準で爆裂の発生が確認された。最初に爆裂発生音が確認された時間は、加熱から 4.2～4.5 分であり、いずれの水準も同程度であった。なお、PCM-S は加熱中に爆裂の発生が止まらず、加熱を中止した。一方、他の水準は一定時間が経過すると爆裂の発生が止まり、加熱を中止することは無かった。図 8-3 に加熱面および爆裂深さ分布を示す。なお、NCM は加熱面の写真に埋設した鉄筋を点線で示し、C80P20 および C50P50 は、コンクリートまで爆裂が進行した箇所を赤い点線で示した。表 8-5 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。加熱試験の結果、爆裂による損傷は加熱面全体に及んでおり、各水準の爆裂面積率のグレードは E であった。また、NSC の最大爆裂深さおよび爆裂容積率のグレードは、D と C であった。なお、PCM-S は加熱を中止しており、加熱を継続した場合には、さらに爆裂による損傷規模が大きくなる可能性があると考えられた。C80P20、C50P50 および PCM-S を比較すると、PCM による補修厚さが大きいほど最大爆裂深さおよび爆裂容積率は大きくなる傾向を示した。また、C80P20、C50P50 および PCM-S は、最大爆裂深さおよび爆裂容積率のグレードがすべて E となった。

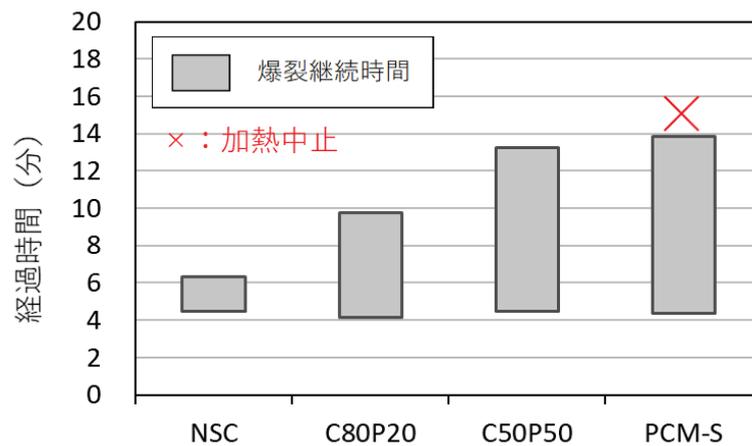


図 8-2 爆裂継続時間

8. 補修厚さおよび材齢の影響

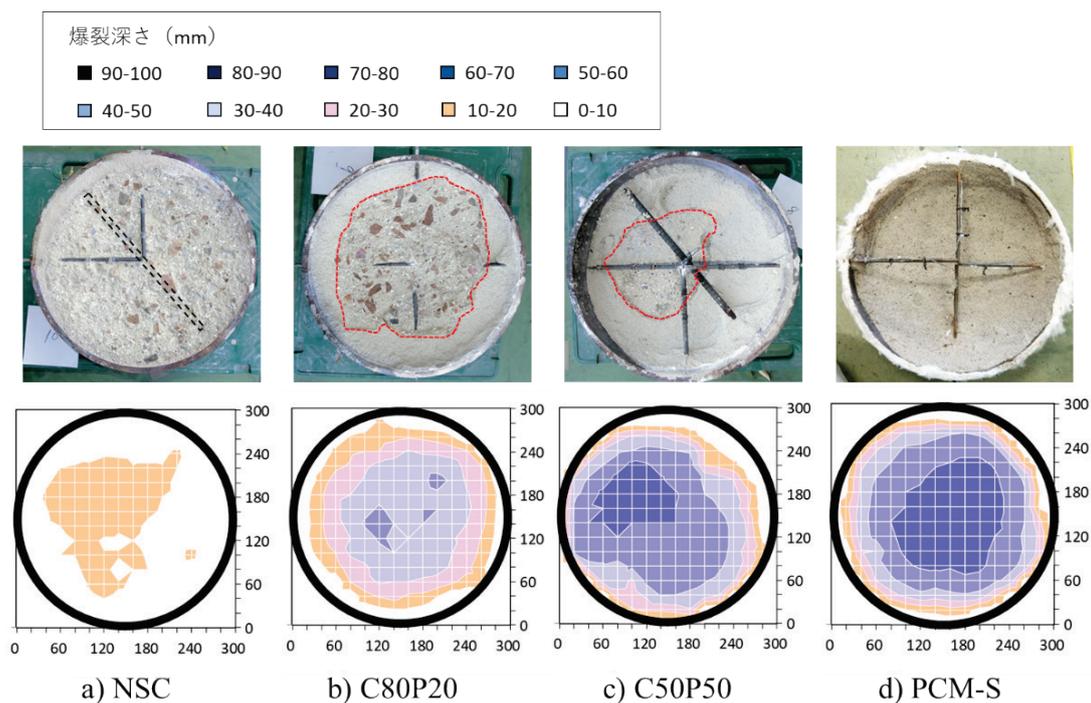


図 8-3 加熱面および爆裂深さ分布

表 8-5 爆裂規模のグレーディング結果

水準	爆裂状況			グレード ³⁾		
	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
NSC	19	87	7	D	E	C
C80P20	42	92	22	E	E	E
C50P50	57	91	33	E	E	E
PCM-S	56	98	36	E	E	E

8.2.5 内部温度と爆裂発生時間の推定

図8-4に内部温度と爆裂発生時間を示す。爆裂発生時間は、内部温度から推定した。NSCは5, 10mm位置で爆裂の発生が確認された。また、C80P20の中央付近の爆裂深さは40mm程度であった。なお、C80P20の40mm位置の熱電対の一部はモルタルに被覆されており、爆裂発生後の温度上昇が緩やかとなったため、内部温度-経過時間曲線の傾きが他の爆裂発生位置に比べて小さくなったと考えられる。C50P50およびPCM-Sは40mm位置まで爆裂が発生した。NCM, C80P20, C50P50, PCM-Sの爆裂発生時間および内部温度、爆裂深さの経時変化を比較すると、各水準において差異はみられなかった。

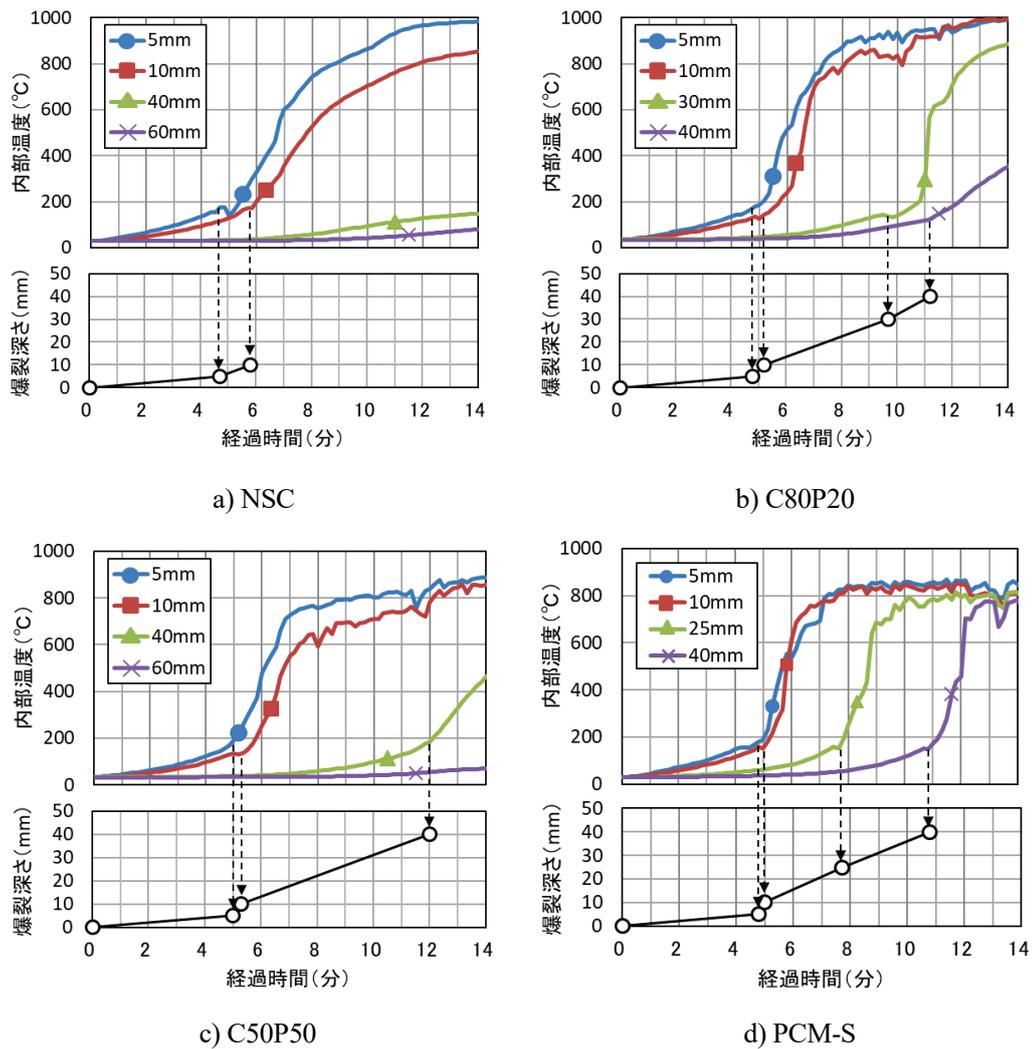


図8-4 内部温度と爆裂発生時間

8.2.6 拘束応力および水蒸気圧

図 8-5 に拘束応力の経時変化を示す。いずれの水準も、爆裂発生直後の拘束応力は伸び止まり、類似した傾向を示した。一方、NSC, C80P20, C50P50 は、最初の爆裂発生からしばらく時間が経つと、PCM-S に比べて拘束応力が再び増加する傾向を示した。これは、爆裂の発生が途中で止まり、残ったコンクリートの熱膨張の影響が表れたためであると考えられる。図 8-6 に各水準の 5mm 位置の拘束応力と内部温度を示す。NSC と C80P20, C50P50, PCM-S を比較すると、拘束応力がかかりはじめる温度が異なることが分かる。PCM-S, C50P50, C80P20 は、いずれの水準も 5mm 位置に PCM があり、材料の高温特性の違いが表れていると考えられる。一方、PCM-S, C50P50, C80P20 は、拘束応力がかかり始める温度は近いが、拘束応力-内部温度曲線の傾きに差異がみられる。これは、補修厚さが薄いほど PCM が下地のコンクリートから受ける拘束の影響が大きくなり、リングにかかる力が小さくなっている可能性があると考えられる。図 8-7 に水蒸気圧の経時変化を示す。水蒸気圧は、爆裂発生時に急激に減少する挙動を示した。これらの現象は、PCM-S と同様に NSC, C80P20, C50P50 に共通してみられることを確認した。一方、NSC および P50C50 の爆裂未発生位置では、水蒸気圧が上昇した後、徐々に減少した。

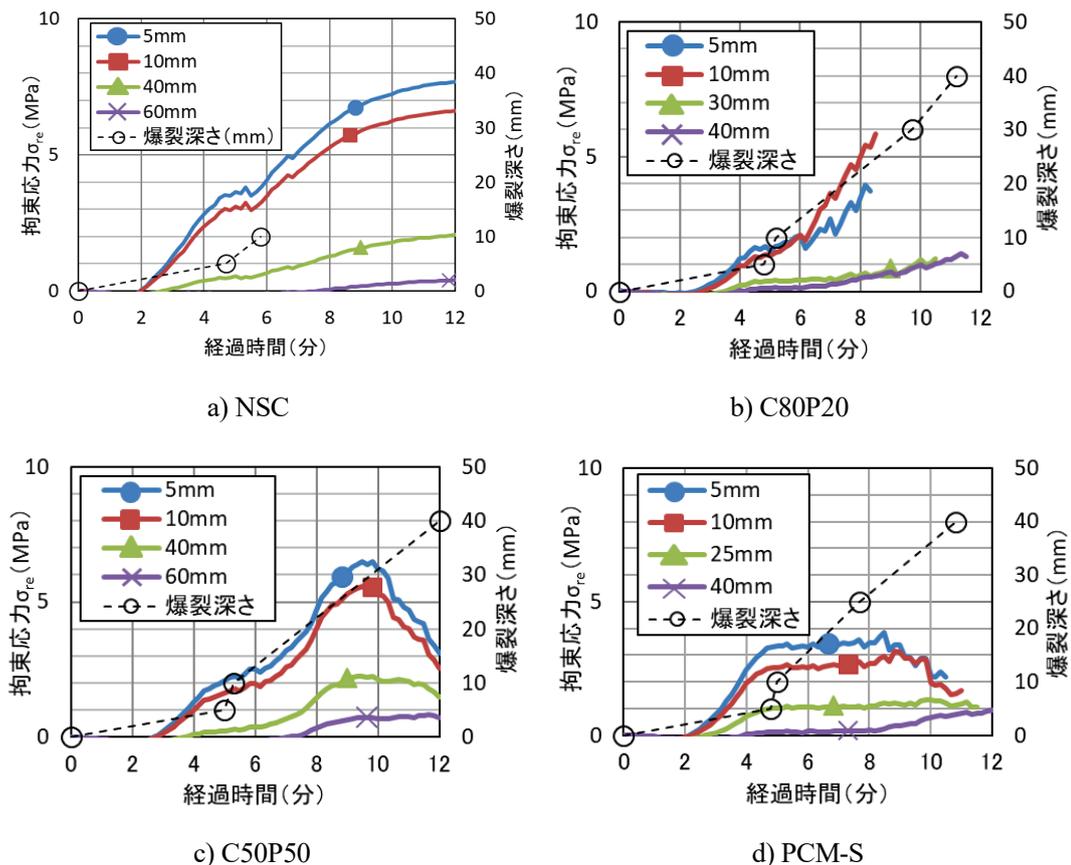


図 8-5 拘束応力の経時変化

8. 補修厚さおよび材齢の影響

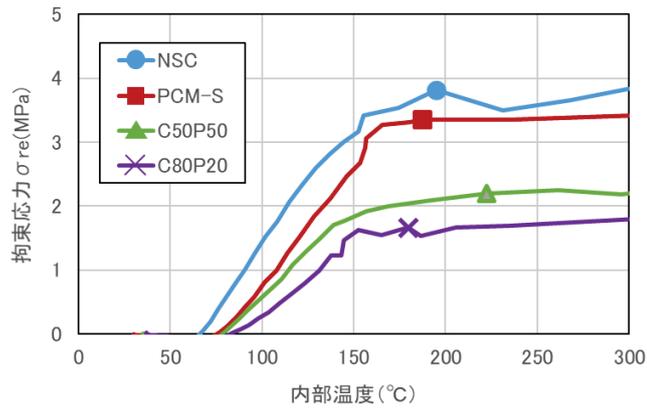


図 8-6 5mm 位置の拘束応力と内部温度

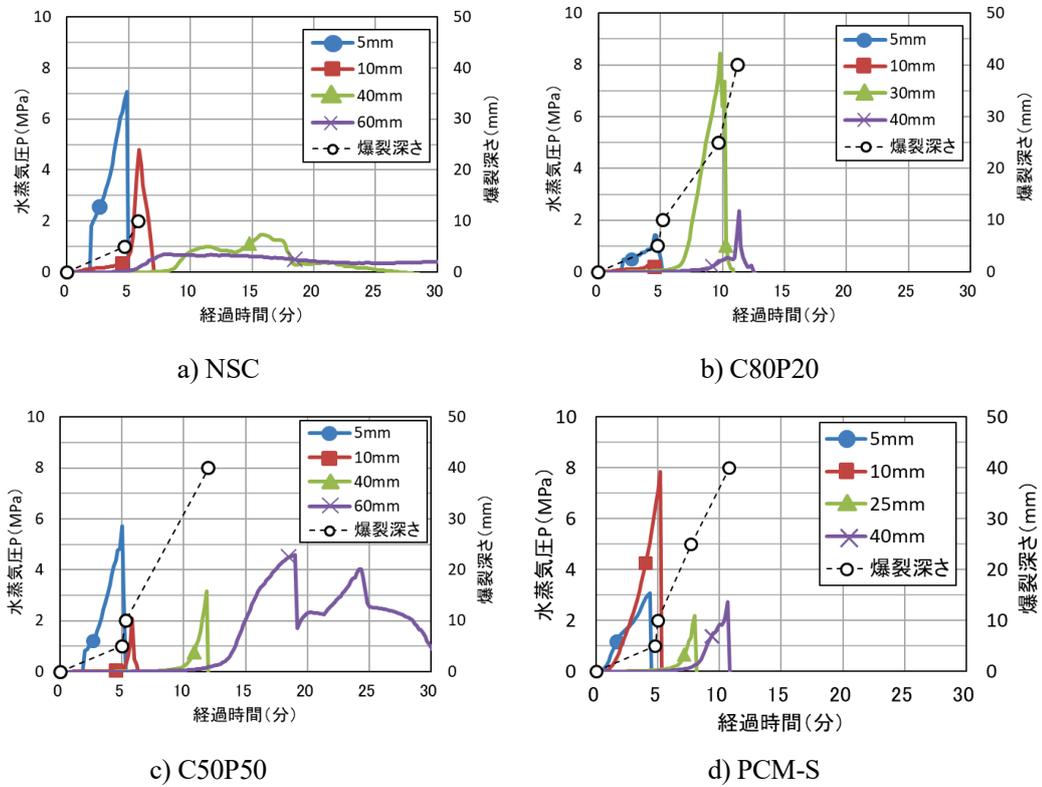


図 8-7 水蒸気圧の経時変化

8.3 材齢の影響評価

8.3.1 水準および養生期間

表 8-6 に材齢の影響評価に用いた試験水準を示す。材齢の影響評価は、NSC および C50P50 により評価した。コンクリートの材齢は、4 ヶ月と 18 ヶ月である。コンクリートは材齢 4 か月まで封かん養生とし、PCM は材齢 3 ヶ月までを封かん養生とした。以降は、屋内で気中養生した。なお、C50P50 は、コンクリートを打設して 1 ヶ月後に PCM を打ち重ねており、PCM の材齢はコンクリートの材齢よりも 1 ヶ月短くなっている。

表 8-6 材齢の影響評価に用いた試験水準

水準	材齢 (月)	
	コンクリート	PCM
NSC	4	-
NSC(L)	18	-
C50P50	4	3
C50P50(L)	18	17

8.3.2 コンクリートおよび PCM の強度特性

表 8-7 にコンクリートおよび PCM の強度特性と含水率を示す。なお、C50P50 は、コンクリートと PCM を打ち重ねて作製した供試体である。圧縮強度と弾性係数は、材齢が経過した方がやや増加するが、大きくは変わらなかった。また、含水率は材齢の経過に伴い低下する傾向を示すが、コンクリートよりも PCM の方が含水率の低下が少なかった。

表 8-7 コンクリートおよび PCM の強度特性と含水率

材齢	項目	NSC	NSC(L)	PCM	PCM(L)
加熱試験	圧縮強度(MPa)	43.1	46.0	56.0	59.7
	弾性係数(GPa)	30.0	31.0	22.4	24.8
	含水率(%)	5.7	4.8	6.3	5.9

8.3.3 リング拘束供試体の形状寸法および加熱条件

リング拘束供試体の形状寸法は、図 8-1 および表 8-1 に示す通りである。加熱条件は、加熱曲線 2 (RABT30 に相当³⁾)とした。

8.3.4 爆裂継続時間および爆裂による損傷規模

図 8-8 に爆裂継続時間を示す。NSC は爆裂が発生したが、NSC(L)は爆裂が未発生であった。一方、C50P50 および C50P50(L)は爆裂が発生した。図 8-9 に加熱面および爆裂深さ分布を示す。NSC(L)は爆裂が未発生であり、表面にひび割れがみられるのみであった。一方、C50P50(L)は PCM の大部分が爆裂により損傷し、C50P50 と同じ傾向であった。表 8-8 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。NSC(L)と NSC を比較すると、いずれの爆裂指標もグレードが向上し、爆裂規模は小さくなった。一方、C50P50(L)と C50P50 を比較すると、

8. 補修厚さおよび材齢の影響

いずれの爆裂指標もグレードがEであり、爆裂規模は同程度であった。

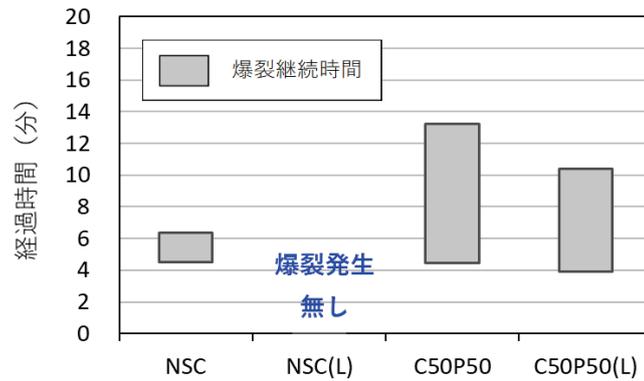


図 8-8 爆裂継続時間

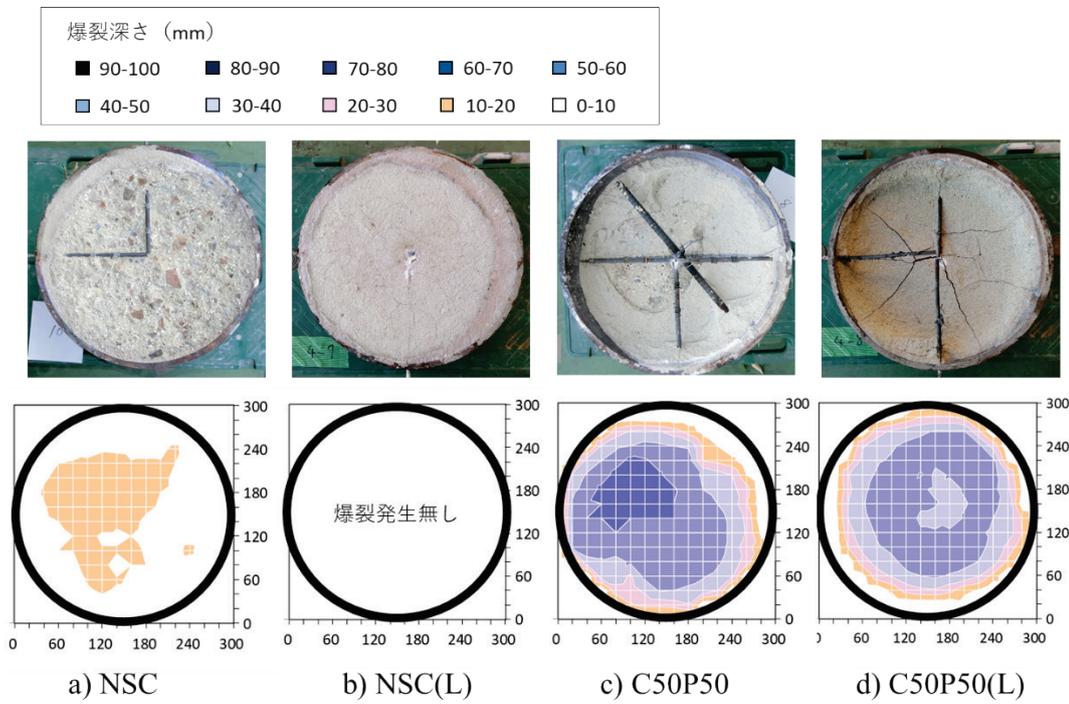


図 8-9 加熱面の状況および爆裂深さ分布

表 8-8 爆裂規模のグレーディング評価結果

水準	爆裂状況			グレード ³⁾		
	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
NSC	19	87	7	D	E	C
NSC(L)	0	0	0	B	B	B
C50P50	57	91	33	E	E	E
C50P50(L)	51	98	29	E	E	E

8.3.5 内部温度と爆裂発生時間の推定

図8-10に内部温度と爆裂発生時間を示す。なお、NSC(L)は爆裂が未発生であったため、内部温度のみを示した。NSCは5,10mm位置において爆裂の発生を確認した。一方、NSC(L)は爆裂が未発生であり、内部温度は緩やかに増加した。C50P50は、5,10,40mm位置にて爆裂の発生を確認した。また、C50P50(L)は、5,10mm位置にて爆裂の発生を確認した。

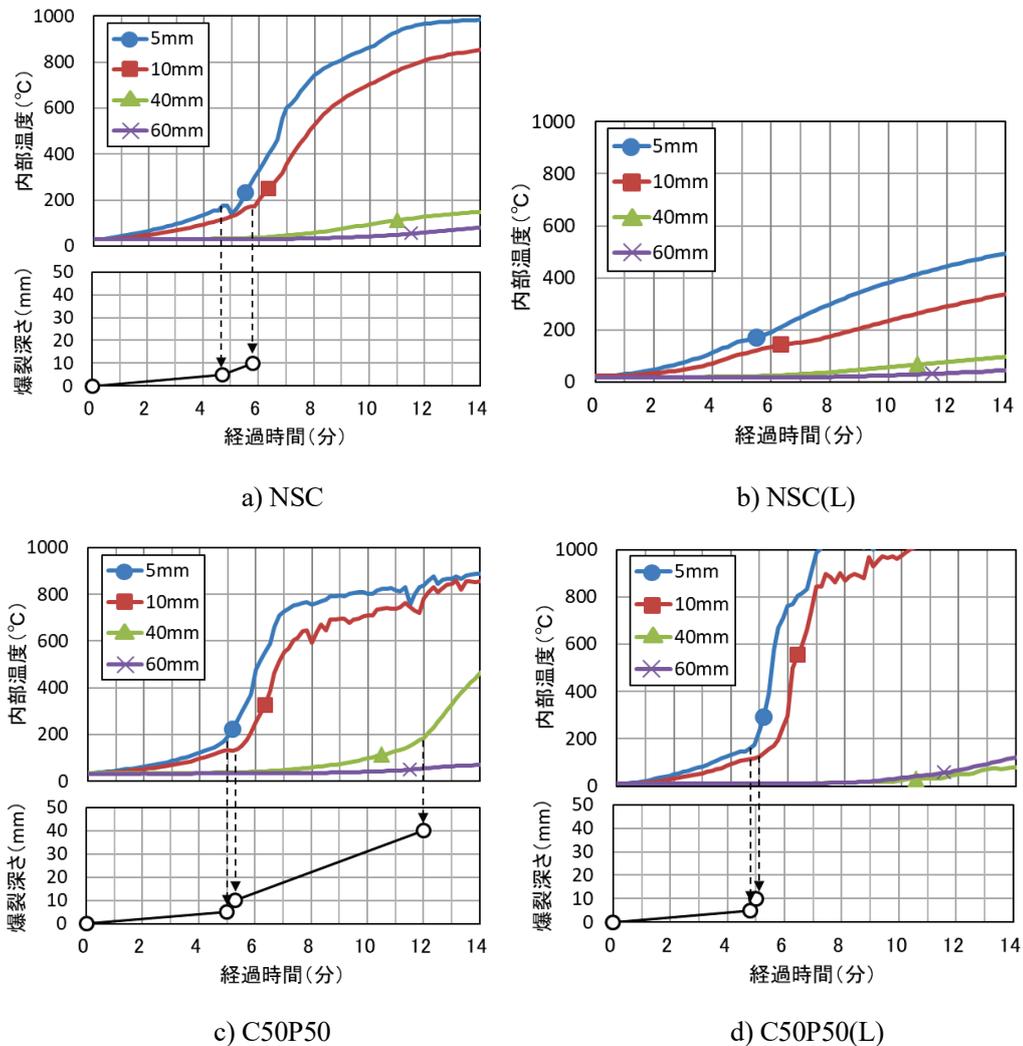


図8-10 内部温度と爆裂発生時間

8.3.6 拘束応力および水蒸気圧

図8-11に拘束応力の経時変化を示す。また、NSC, C50P50 および C50P50(L)の図中には爆裂深さの経時変化を、NSC(L)の図中には内部温度をあわせて示す。NSCは、爆裂発生時に一時的に拘束応力が停滞し、爆裂による断面欠損の影響であると考えられる。一方、NSC(L)は拘束応力が増加し続けた。なお、5mm位置の拘束応力は、10分過ぎに上下に大きく変動したが、内部温度に大きな変化はみられないため、爆裂発生由来ではなく、ひずみゲージに剥がれが生じた等、計測エラーの影響によると推察している。C50P50(L)は5,10mm位置にて爆裂が発生し、爆裂発生前後の拘束応力の大きさや挙動は、C50P50と類似

8. 補修厚さおよび材齢の影響

する傾向を示した。図 8-12 に水蒸気圧の経時変化を示す。なお、NSC, C50P50 および C50P50(L)の図中には爆裂深さの経時変化を、NSC(L)の図中には内部温度を併せて示す。NSC(L)は、爆裂が未発生であり、水蒸気圧の急激な減少挙動は見られなかった。NSC(L)の爆裂が未発生であった原因は、材齢の経過により乾燥し、水蒸気圧が低下して爆裂発生条件を満たさなかったためであると考えられる。材齢が経過すると乾燥により爆裂が発生し難くなる傾向は、既往の研究⁴⁾にも同様の傾向が報告されている。一方、C50P50(L)はPCMに爆裂が発生し、C50P50と類似した傾向を示した。PCMの含水率は、コンクリートに比べ、長期材齢品の含水率の低下が小さい。ポリマーセメントコンクリートの文献には、ポリマーにより水蒸気の移動が抑制され、乾燥し難いことが報告されており⁵⁾、PCMにおいてもポリマーによる同じ効果が期待される。すなわち、PCMはコンクリートに比べて乾燥の影響を受け難く、外部から水が供給されない条件であっても、長期的に爆裂が発生しやすい傾向が続く可能性が示唆された。なお、C50P50(L)の40mm位置の水蒸気圧は急激に減少したが、内部温度-経過時間曲線の傾きに大きな変化はみられなかった。その原因として、C50P50(L)には、加熱後に薄く残ったPCMに多数のひび割れが確認されており、40mm位置の水蒸気はこれらのひび割れから抜けた可能性があると考えている。

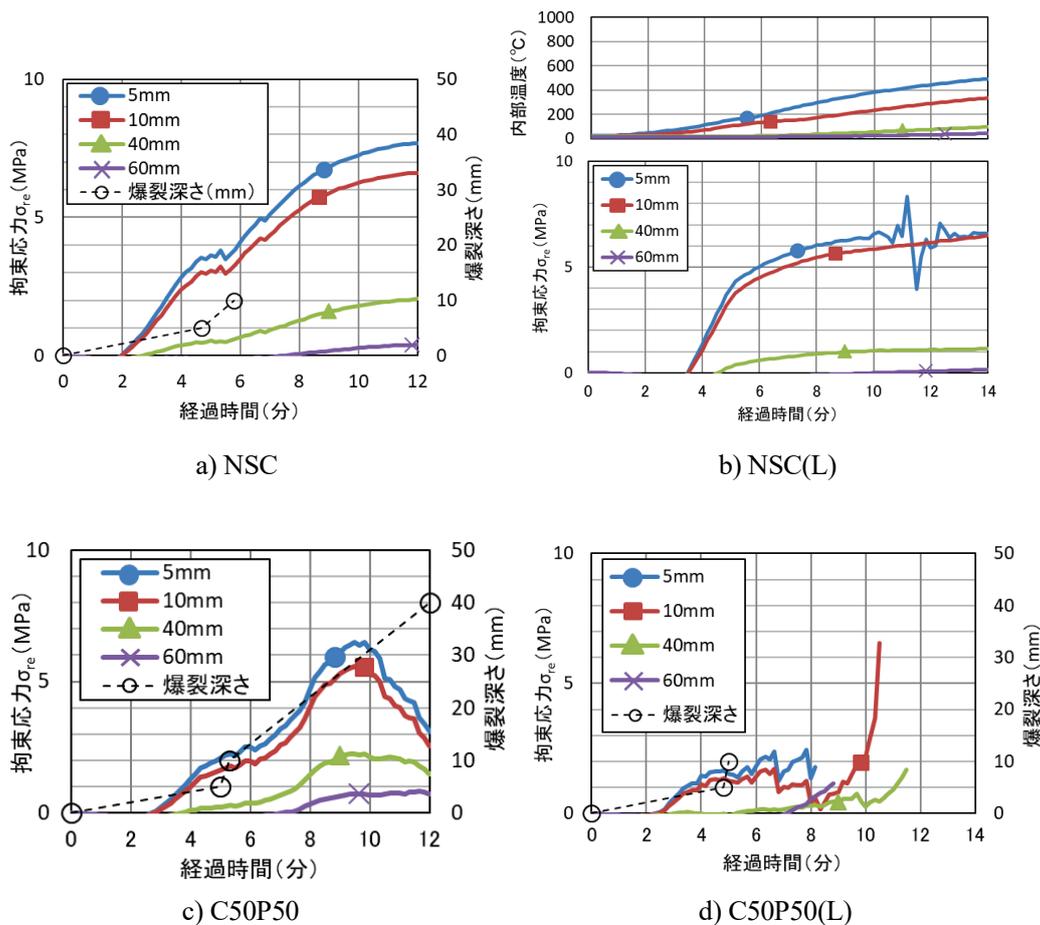


図 8-11 拘束応力の経時変化

8. 補修厚さおよび材齢の影響

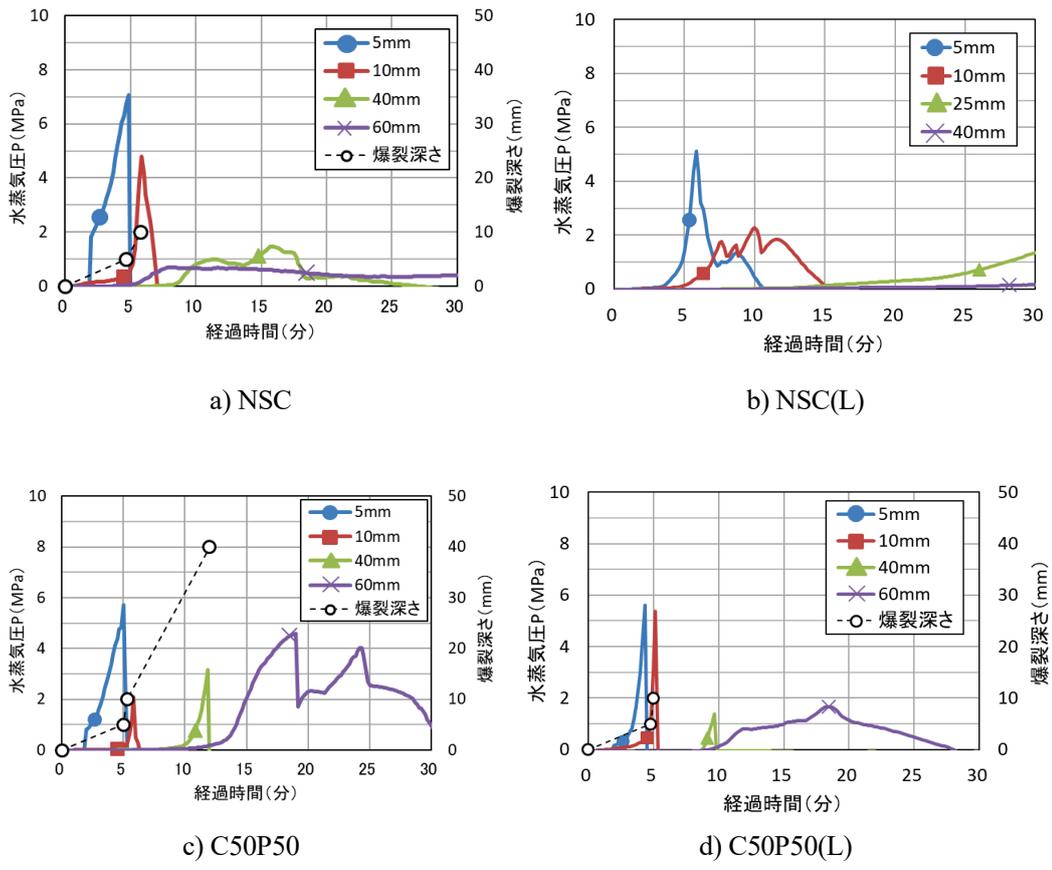


図 8-12 水蒸気圧の経時変化

8章の参考文献

- 1) 川上英男：骨材種類とコンクリートの弾性係数，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 1, pp. 359-364, 2003.
- 2) 小川晴果，大濱嘉彦，出村克宣：高曲げ強さを有するポリマーセメントモルタルの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21, No. 1, pp. 115-120, 1999.
- 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/j/jci/study/standard.html>（閲覧日：2022年1月25日）
- 4) 鎌田亮太，小澤満津雄，明石孝太，谷辺徹：リング拘束試験方法における高強度コンクリートの爆裂性状に及ぼす養生期間の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, 2016.
- 5) M. V. Diamanti, A. Brenna, F. Bolzoni, M. Berra, T. Pastore, M. Ormellese: Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.49, pp.720-728, 2013.

以上

9. 結論および今後の展望

9.1 各章における結論

本論文は、リング拘束供試体を適用して PCM の高温下の爆裂性状を評価し、爆裂発生メカニズムについて検討した。各章における結論を以下に示す。

- 1) 4章は、PCMの爆裂損傷規模を爆裂深さ分布に基づく指標に従い評価した結果を示した。各種ポリマーを混入した PCM は $P/C=10\%$ とした。また、ポリアクリル酸エステルを混入した PCM は、 P/C を 2.5, 5, 10 および 20% とした。 $P/C=5\sim 20\%$ の PCM は加熱中に爆裂が繰り返し発生して止まらなかった。一方、 $P/C=2.5\%$ の PCM および NCM は加熱開始後しばらく爆裂が発生するが、一定時間経過すると止まった。試験の結果、加熱中に爆裂が繰り返し発生して止まらない水準は、最大爆裂深さおよび爆裂容積率が大きくなる傾向を示した。
- 2) 4章では、さらに、拘束応力および水蒸気圧の測定結果を示した。各種 PCM の加熱時の拘束応力は、熱膨張により増加し、爆裂発生後は断面欠損と熱膨張の相互作用により上下に変動する挙動を示した。また、 P/C が大きくなると拘束応力が低下する傾向がみられた。拘束応力低下の一因は、弾性係数の低下によると考えられる。一方、水蒸気圧は内部温度の上昇により増加し、爆裂発生時に急激に減少した。爆裂発生時の拘束応力および水蒸気圧の挙動は、コンクリートの爆裂発生時と類似する傾向を示した。
- 3) 5章は、PCMの高温下の爆裂発生メカニズムについて検討した。その結果、PCMの爆裂発生条件は、拘束応力のポアソン効果による引張ひずみ破壊と水蒸気圧による破壊片の押し出しの複合作用であると考えられた。また、PCMの爆裂発生温度域において、ポリマーはあまり燃焼しておらず、水蒸気や水の移動を抑制すると考えられた。そのため、PCMはNCMに比べて水蒸気圧がかかりやすく、爆裂発生条件を満たし、加熱中に爆裂が繰り返し発生して止まらなくなると考察した。
- 4) 6章は、ナイロン繊維による爆裂抑止効果について検討した。その結果、PCMの爆裂抑止効果は、 P/C が小さく、繊維混入量が多いほど、向上することを確認した。さらに爆裂抑止のメカニズムを考察した。ナイロン繊維を混入すると、加熱により増加した水蒸気圧が徐々に減少傾向を示し、圧力が緩和されたと推察した。PCMにナイロン繊維を混入すると、PCMの温度上昇に伴い、繊維-モルタル境界面にスペースが形成されることが考えられた。さらに、そのスペースに水や水蒸気が移動して水蒸気圧が緩和される。その結果、水蒸気圧が破壊片を押し出す力として作用せず、爆裂が未発生もしくは途中で止まると考えられた。
- 5) 7章は、リング拘束供試体と補修した RC 部材の爆裂による損傷規模を比較評価した。無補修の RC 梁を基準とした。また、RC 梁は、PAE (ナイロン繊維無混入) と PAE-0.5F (ナイロン繊維混入) の 2 配合でそれぞれ補修した。加熱試験の結果、リング拘束供試体と RC 梁の最大爆裂深さおよび爆裂容積率のグレードは類似した傾向を示した。また、PAE で補修した RC 梁は PCM の大部分が損傷し、主鉄筋が剥き出しの状態になった。一方、PAE-0.5F は爆裂が未発生であり、熱の伝わりは無補修の RC 梁と同等であることを確認した。
- 6) 8章は、PCMの補修厚さが爆裂性状に及ぼす影響を評価した。補修厚さの影響評価は、

コンクリートに PCM を打ち重ねたリング拘束供試体（複合体仕様）を用いて実施した。PCM の厚さは、20、50mm の 2 水準とした。加熱試験の結果、PCM の大部分は爆裂により損傷し、爆裂深さはコンクリートとの打ち継ぎ位置に達した。そのため、補修厚さが大きいほど、爆裂による損傷規模は大きくなる傾向を示した。

- 7) 8 章では、さらに、材齢の影響を評価した。材齢の影響評価は、C50P50（複合体仕様）および NSC（コンクリート単体仕様）の材齢 4 ヶ月および 18 ヶ月の供試体を用い、爆裂による損傷規模を比較評価した。その結果、NCM は材齢 4 ヶ月で爆裂が発生するが、材齢 18 ヶ月では爆裂未発生であった。一方、PCM は材齢 3 ヶ月と 17 ヶ月の供試体で同様に爆裂が発生した。PCM はポリマーによる水の移動抑制効果により気中乾燥の影響を受け難いとされ、材齢が経過しても水蒸気圧が作用しやすいと考えられた。

9.2 今後の課題と展望

本論文では、PCM の高温下の爆裂性状をリング拘束供試体により評価し、標準化した条件において爆裂性状を評価した。その結果、PCM はポリマー無添加のモルタル（NCM）に比べて爆裂による損傷規模が大きくなることを確認した。また、リング拘束供試体の爆裂試験結果は、部材レベルの加熱試験結果と類似した傾向を示した。さらに、PCM の爆裂発生メカニズムを検討し、爆裂発生条件は、拘束応力のポアソン効果による引張ひずみ破壊と水蒸気圧の複合作用であることを実証した。また、リング拘束供試体の爆裂発生温度域のデータとポリマーの熱分析をあわせて考察し、PCM の爆裂による損傷規模がポリマー無添加のモルタル（NCM）に比べて大きくなる原因を明らかにした。すなわち、PCM は爆裂発生温度域においてポリマーが水分移動を抑制し、引張ひずみ破壊時に水蒸気圧がかかりやすい状態になると考えられた。その結果、上述の爆裂発生条件を満たし加熱中に爆裂が繰り返し発生して止まらず、爆裂による損傷規模が大きくなると考えられた。

今後、PCM の高温下の爆裂現象をより詳細に把握するためには、高温特性に関する材料データの蓄積が望まれる。しかしながら、熱間での試験は特殊な試験装置が必要なことなど実現にあたっての課題も多い。一方、コンクリートの爆裂に関する研究では、爆裂現象の数値解析モデルが検討されており^{1),2)}、内部応力を考慮したモデルも開発検討されている。これらの解析技術を PCM に応用し、さらにリング拘束供試体のデータを活用することで、PCM の各種高温特性が爆裂に及ぼす影響を逆解析するアプローチも一手法として考えられる。また、今後 PCM の爆裂抑止設計手法を検討する場合、リング拘束供試体による爆裂試験は、配合選定のためのスクリーニング試験としての位置付けを考えている。すなわち、リング拘束供試体を用いた爆裂試験により配合候補を選定し、部材レベルの耐火試験により最終評価を行うイメージである。図 9-1 に PCM の爆裂抑止設計手法のイメージを示す。リング拘束供試体による爆裂試験は小型の供試体で実施できるため、配合候補を過大な労力をかけずに選定できるメリットがある。さらに、拘束の影響を考慮できるため、部材レベルの耐火試験との高い相関性も期待される。また、本論文ではトンネル火災を想定した RABT 曲線を用いたが、例えば建築火災を ISO834 標準加熱曲線により評価する³⁾など、火災想定によって火災加熱温度曲線⁴⁾を設定することも可能である。以上のように、今後は PCM の爆裂性状評価とあわせ、爆裂抑止設計手法に関する検討も広く実用するにあたっての重要なテーマになるものと考えている。



図 9-1 PCM の爆裂抑止設計手法のイメージ

9 章の参考文献

- 1) 村上真聖, 小澤満津雄, 明石孝太, 杉野雄亮: 熱応力と水蒸気圧を考慮した高強度コンクリートの爆裂解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 1047-1052, 2018.
- 2) Iwama, K., Higuchi, K. and Maekawa, K.: Thermo-mechanistic multi-scale modeling of structural concrete at high temperature, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 18, pp. 272-293, 2020.
- 3) 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.
- 4) 常世田昌寿: コンクリート構造物の耐火性能 ①コンクリートと鋼材の高温時(火災時)力学特性, コンクリート工学, Vol.59, No.6, 2021.6

以 上

発表論文リスト

関連論文

- 1) 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), 土木学会, Vol.77, No.4, pp.150-163, 2021.11.
- 2) 杉野雄亮, 小澤満津雄, 谷辺徹, 祐川真紀帆: 各種ポリマーで作製したリング拘束供試体の爆裂性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol.43, No.1, pp.724-729, 2021.7.
- 3) Sugino, Y., Ozawa, M., Sukekawa, M., Tanibe, T.: Fire spalling of acrylic polymer cement mortar restrained by a steel ring, Proceedings of ConMat'20, Japan Concrete Institute, 2020.8.
- 4) Sukekawa, M., Sugino, Y., Tanibe, T. Ozawa, M.: Fire-spalling evaluation of concrete repaired with polymer cement mortar by ring-restrained heating test, Proceedings of Structures20, ACEM, 2020.8.
- 5) 祐川真紀帆, 杉野雄亮, 谷辺徹, 小澤満津雄: リング拘束供試体を用いたポリマーセメントモルタルで補修したコンクリートの火災時における爆裂性状, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol.42, No.1, pp.887-892, 2020.7.
- 6) 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, 2019.6.
- 7) 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, 日本コンクリート工学会, Vol.42, No.1, pp.893-898, 2020.7.

参考論文

- 1) Sugino, Y., Ozawa, M., Tanibe, T.: Fire-related spalling evaluation of ring-restrained polymer cement mortar and normal cement mortar, Proceedings of Fire Spalling workshop2019, RILEM, 2019.9.
- 2) 杉野雄亮, 谷辺徹, 小澤満津雄: リング拘束供試体を適用した補修用モルタルの爆裂発生プロセスに基づく爆裂性状に関する一考察, 第18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, 日本材料学会, pp.603-608, 2018.10.
- 3) 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, 日本コンクリート工学会, Vol.40, No.1, pp.1035-1040, 2018.6.
- 4) 祐川真紀帆, 杉野雄亮, 谷辺徹, 小澤満津雄: リング拘束供試体法によるポリマーセメントモルタルで補修したコンクリートの爆裂性状および拘束応力と水蒸気圧の関係, 第74回セメント技術大会, pp.284-285, 2020.
- 5) 常藤光, 杉野雄亮, 谷辺徹, 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爆裂性状の評価検討, 土木学会全国大会第74回年次学術講演会, V-483, 2019.

- 6) 杉野雄亮, 小山拓, 谷辺徹, 小澤満津雄, 兼松学: リング拘束された補修用モルタルの高温下の爆裂性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.141-142, 2019.9
- 7) 常藤光, 杉野雄亮, 谷辺徹, 高間孝一郎, 小澤満津雄: リング拘束供試体を適応したモルタルの爆裂性状評価, 土木学会第73回年次学術講演会, pp.195-196, 2018.
- 8) 杉野雄亮, 常藤光, 谷辺徹, 高間孝一郎, 小澤満津雄: リング拘束供試体を適用したポリマーセメントモルタルの爆裂メカニズムに関する一考察, 土木学会第73回年次学術講演会, pp.197-198, 2018.

謝辞

本論文は、筆者が群馬大学大学院理工学府 環境創生理工学領域 博士後期課程在籍中にとりまとめたものです。

本論文を審査して頂きました、主査 若井明彦博士（群馬大学大学院 理工学府 教授）、副査 清水義彦博士（群馬大学大学院 理工学府 教授）、副査 宮澤伸吾博士（足利大学工学部 教授）、副査 佐川孝広博士（前橋工科大学工学部 准教授）、副査 小澤満津雄博士（群馬大学大学院 理工学府 教授）に深く感謝申し上げます。

小澤先生には、指導教員として大変お世話になりました。博士課程の研究テーマを通して、課題設定、アプローチ、アウトプットに至るステップを始めから終わりまで実践的に学ばせて頂くことができたと思います。また、論文投稿に苦心していた時期にも定期的な打合せを重ねて様々な面からサポートして頂きました。心より感謝申し上げます。

岐阜大学コンクリート研究会のメンバーの皆様には大変お世話になりました。小柳洽博士（岐阜大学 名誉教授）には文献情報をご提供頂き、本研究において有用な文献となりましたこと、お礼申し上げます。また、六郷恵哲博士（岐阜大学 名誉教授）、内田裕市博士（岐阜大学 工学部 教授）、小林孝一博士（岐阜大学 工学部 教授）、国枝稔博士（岐阜大学 工学部 教授）、木下幸治博士（岐阜大学 工学部 准教授）には、発表内容に対する様々な視点からのご意見や気づきを頂きましたこと、改めてお礼申し上げます。

兼松学博士（東京理科大学 理工学部 教授）には、PCMの高温下の熱ひずみ測定に際してご協力を頂きましたこと、感謝申し上げます。

日比野誠博士（九州工業大学 工学部 准教授）、合田寛基博士（九州工業大学 工学部 准教授）は、群馬大学と九州工業大学の合同ゼミで本研究テーマについてお話しをする機会があり、以降ご支援を頂きまして厚くお礼申し上げます。

小泉伸洋氏（豊清工業株式会社）には、耐火炉運転のサポートをして頂きました。爆裂が発生しやすい条件でも工夫して安全に試験を実施できましたこと、感謝申し上げます。

群馬大学コンクリート工学研究室の皆様には、試験体作製など大変お世話になりました。また、祐川真紀帆氏（群馬大学大学院 理工学府 環境創生理工学領域）は、研究室に同時期に在籍している間、色々とお世話になり、ありがとうございました。

佐久間隆司博士（太平洋マテリアル株式会社 取締役専務執行役員）、松林裕二博士（同上席執行役員 開発研究所 所長）には、多大なる支援を頂きまして、深く感謝申し上げます。谷辺徹博士（同 開発研究所 ロックウールグループ 主席研究員）には、コンクリートの爆裂に関する知見から様々なアドバイスやご意見を伺うことができました。また、研究活動全般の相談に応じてもらい、多くのサポートを頂きましたこと、心より感謝いたします。原謙治氏（同 執行役員 営業本部 ロックウール営業部 前部長（現東京支社長））、藤田守氏（同 営業本部 ロックウール営業部 部長）、林一夫氏（同 営業本部 ロックウール営業部 副部長）、池崎大輔氏（同 営業本部 ロックウール営業部）にはご支援を頂き、厚くお礼申し上げます。掛川勝博士（同 営業本部 機能性材料営業部 副部長）、山下直樹氏（同 営業本部 機能性材料営業部 副部長）、中條史峯氏（同 営業本部 機能性材料営業部）、長井義徳氏（同 開発研究所 機能性材料グループ 副主席研究員）、竹下永造氏（同 開発研究所 土木・混和材料グループ）には、補修材の知見からアドバイスや助言を頂きましたこと、お礼申し上げます。また、常藤光氏（同 開発研究所 土木・混和材料グルー

ブ)には、加熱試験や論文執筆の際にご協力頂き、お礼申し上げます。また、社内の皆様には、本研究に際してご支援を頂きましたこと、この場を借りてお礼申し上げます。

最後に、博士課程進学に際して応援してくれた両親に感謝いたします。また、妻さおり、長男太軌、長女未来は、研究活動を長い間見守り応援してくれました。本当にありがとう。

本研究は、関係する皆様の様々なサポートがあり、博士論文としてとりまとめることができました。ここに改めて感謝の意を示します。