

# 論文 火災を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する研究

岩本 早耶香<sup>\*1</sup>・迫井 裕樹<sup>\*2</sup>・小澤 満津雄<sup>\*3</sup>・川邊 清伸<sup>\*4</sup>

**要旨**：火災劣化後のコンクリート構造物の劣化診断は、受熱温度と残存強度が主な指標となっているが、物質侵入抵抗性についての検討は十分とは言い難いのが現状である。そこで、本研究は、高温履歴を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性を、塩分浸透性で評価した。加えて、火災後のコンクリートの補修方法として、けい酸塩系表面含浸材に着目し、含浸材を塗布することにより得られる効果も合わせて検討した。その結果、含浸材を塗布することで塩分浸透を抑制し、物質侵入抵抗性を高める効果があることがわかった。

**キーワード**：物質移動抵抗性、塩分浸透、けい酸塩系表面含浸材

## 1. はじめに

火災を受けたコンクリートは、加熱表面が損傷し、耐久性上問題となる。この場合、被害状況に応じて適切な補修・補強の判断を行う必要がある。特に、高強度コンクリートにおいては、マトリックスが密実であることから、加熱に伴い発生する蒸気圧が増加し、爆裂現象等顕著な損傷を生じる。これに対して、有機繊維の混入により、高温加熱時に繊維の熔融およびそれに伴う蒸気圧の緩和と爆裂防止に関する研究が進められ、その成果が報告されている。

有機繊維の混入による爆裂対策が検討される一方で、高温加熱に伴いマトリックス中に発生するひび割れおよび、爆裂対策として混入した有機繊維の熔融箇所において、外部からの各種劣化因子が浸透しやすくなることが想定される。しかし、火災後のコンクリートの劣化診断としては、現在、受熱温度と残存強度が主な指標となっており、物質侵入抵抗性についての検討は十分とは言い難いのが現状である<sup>1)</sup>。

そこで、本研究では物質侵入抵抗性を、塩分浸透性を指標として評価し、火災劣化後のコンクリート構造物の新たな診断手法の提案をする基礎的な資料を得ることを目的とする。なお、物質侵入抵抗性の指標に塩化物を用いた理由としては、火災を受けたコンクリートは一般に中性化が生じているため、中性化深さを用いることができないこと<sup>2)</sup>、塩化物は定量的な分析が比較的容易であることなどである。

さらに本研究では、火災後のコンクリートの補修方法として、表面含浸工法に着目する<sup>3), 4)</sup>。表面含浸材の一般的な性能については、土木学会「表面保護工法設計施工指針(案)」<sup>5)</sup>に示されており、表面被覆工法等の他の工

法よりも施工が容易で、比較的安価であることから近年実構造物への適用事例が増加している。上記工法に用いられる含浸材はシラン系とけい酸塩系に大別され、さらにけい酸塩系はその改質機構により、固化型と反応型に分類される。本研究では反応型けい酸塩系表面含浸材を用いた。けい酸塩系表面含浸材(反応型)は、セメントの水和によって生じる水酸化カルシウムと反応し、コンクリートの空隙中にC-S-Hゲルを生成し、コンクリート中の空隙を充填する。未反応のまま残存している主成分が乾燥により析出しても、水分が供給されると再度溶解し、水酸化カルシウムと反応性を有することにより長期的な空隙充填効果を期待するものである。

以上より、本研究では、火災後のコンクリートの新たな劣化診断指標として、物質侵入抵抗性を評価するとともに、高温加熱を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性に対する表面含浸材の効果を検討することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

使用したコンクリートの性状および示方配合を表-1、表-2に示す。対象は高強度コンクリート(以下、HSC)とした。セメントは、早強ポルトランドセメントとし、混和剤には高性能減水剤を用いた。水セメント比は30%とした。供試体の種類は3種類とした。すなわち、配合A：粗骨材に硬質砂岩を用いたもの、配合B：前述の配合Aにポリプロピレン(PP)繊維を0.2% vol混入したもの、及び、配合C：粗骨材に石灰岩を用いたものとした。ここで、PP繊維とは、火災時の爆裂現象や熱損傷を低減させる目的で混入されるものである。本研究では、繊維長12mm、繊維径42 $\mu$ mのものを用いた。含浸材は、け

\*1 群馬大学 工学部社会環境デザイン工学科 (学生会員)

\*2 八戸工業大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 講師 博士(工) (正会員)

\*3 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 博士(工) (正会員)

\*4 八戸工業大学 工学部土木建築工学科 (非会員)

表-1 コンクリートの性状

シリーズ名	練混温度 [°C]	空気量 [%]	スランプまたは、 スランプフロー [cm]	圧縮強度 [Mpa]	弾性係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]
[A] HSC(硬質砂岩)	28.0	1.7	62.0	81.9	41.1
[B] HSC+PP	27.0	1.7	15.5	83.5	42.9
[C] HSC(石灰岩)	27.1	2.3	58.0	76.0	50.0

表-2 示方配合

シリーズ名	W/C [%]	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]							
		W	C	S	G1 (5-15mm)	G2 (10-20mm)	G3 (5-25mm)	ad.	fiber
[A] HSC(硬質砂岩)	30	150	500	718	418	626	—	5	—
[B] HSC+PP									1.82
[C] HSC(石灰岩)									—

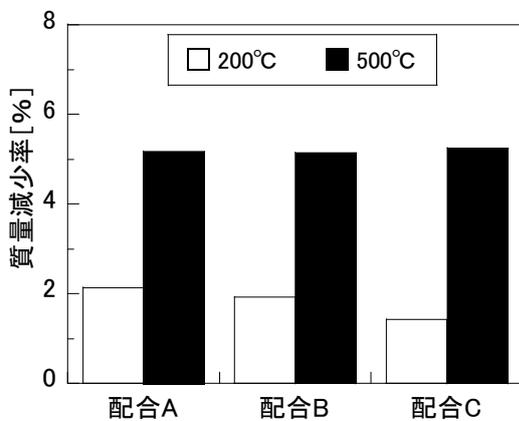


図-1 質量減少率



図-2 供試体のひび割れ状況(配合C, 加熱温度500°C)

い酸ナトリウムを主成分とする反応型のけい酸塩系表面含浸材を用いた。

## 2.2 実験フロー

本研究で用いた供試体は、φ100×200mmの円柱供試体である。供試体は各配合8体ずつ、計24体を作製した。

加熱設定温度は、炉内温度で制御することとし、加熱なし、100°C、200°Cおよび500°Cの4水準とした。供試体の加熱には電気炉を用い、各加熱設定温度につき、2体ずつ全面加熱を実施した。加熱条件はRILEM試験に準拠し<sup>6)</sup>、炉内の温度上昇速度を1°C/minとした。炉内温度が所定の温度に達した後、1時間保持し、その後電気炉の電源を切って自然冷却した。加熱試験後、湿式コンクリートカッターを用いて円柱供試体を長さ100mmに切断し、上下面をシリコン接着剤でシールした。切断した一方の供試体には、含浸材を塗布し、他方は加熱後の状態を保持(含浸材無塗布)した。含浸材を塗布したものについては、塗布後24時間気中養生を行った後、14日間の散水養生を行い、また含浸材無塗布のものについては、同一期間ビニルシートで覆い封緘養生を行った。なお、加熱後塩水浸せきまでの期間中における含浸材塗

布・無塗布の供試体に対する養生方法が異なり、これが後述の塩化物イオン浸透性に及ぼす影響も考えられるが、本研究では、この点に関する検討は行っていない。加熱後の含浸材塗布までの時期あるいは塗布前後の養生方法・期間の違いが及ぼす影響については今後の検討課題の一つである。養生期間終了後、塩水浸せきを行った。供試体を28日間塩水(NaCl濃度10%)に浸せきさせた後、供試体を割裂し、割裂面への硝酸銀溶液(0.1mol/L)噴霧により、白色を呈した部分を塩化物イオン浸透深さとしてノギスを用いて測定を行った。尚、測定箇所は各浸透面に対して10箇所とし、その平均値を用いた。塩化物イオン浸透深さ測定後の供試体を用いて、浸透面(円周面)より10mm間隔で乾式ドリル削孔を行い、全塩化物イオン濃度分布測定用サンプルを採取した。採取したサンプルを用いて、硝酸銀滴定法により各深さ位置での全塩化物イオン濃度の測定を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 加熱試験

図-1に加熱温度200°Cと500°Cにおける加熱前後の質

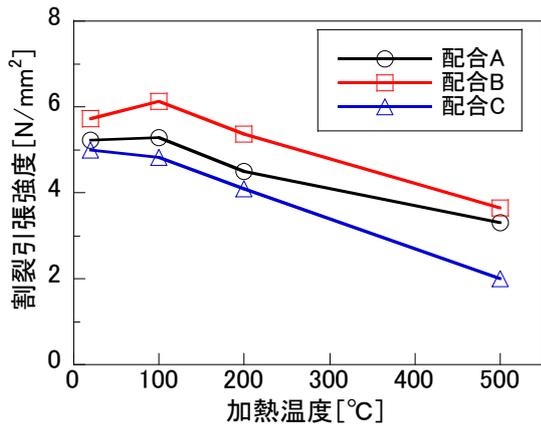


図-3 割裂引張強度

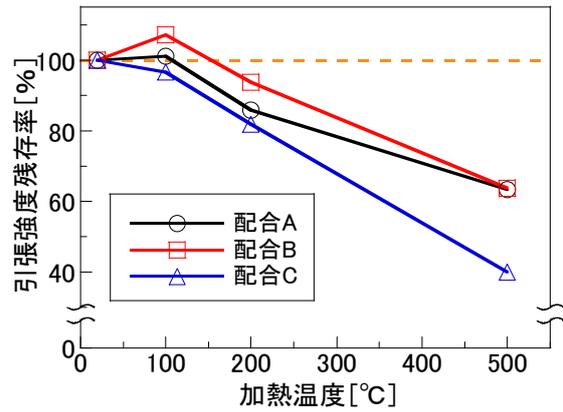


図-4 割裂引張強度残存率

量減少率を示す。図より、加熱温度 200°C および 500°C における質量減少率はそれぞれ、1.4~2.1% および 5.1~5.3% 程度とほぼ同等であり、PP 繊維混入の有無および骨材種別の違いが質量減少率に及ぼす顕著な差は認められないことが把握された。加熱後の供試体表面の状態について、加熱温度 200°C では、ひび割れ等の明確な損傷は認められなかったが、加熱温度 500°C においては、図-2 に示すように、供試体表面に亀甲状のひび割れが生じていることが目視により確認された。ただし、このひび割れ状態についても、PP 繊維混入の有無および骨材種別の違い等配合の違いによる差異は確認されなかった。

### 3.2 割裂引張試験

各供試体における加熱後の割裂引張強度と加熱温度の関係を図-3 に示す。これより、加熱前の割裂引張強度は、PP 繊維を混入した場合（配合 B）にわずかに高い値を示すものの、いずれも、5~6N/mm<sup>2</sup> 程度であることが確認された。また図-3 を概観すると、いずれも配合においても加熱温度 100°C までは、加熱無しとほぼ同等の強度を示すものの、加熱温度の上昇に伴い、割裂引張強度が比例的に低下することが把握された。また、いずれの加熱温度においても、PP 繊維を混入したもの（配合 B）は、他の配合と比較して、僅かに高い値を示すことが把握された。

加熱後の割裂引張強度残存率（＝加熱後の割裂引張強度／加熱前の割裂引張強度）と加熱温度の関係を図-4 に示す。図-4 より、いずれの配合においても、加熱温度 100°C では、加熱無しと比較してほぼ同等、その後、加熱温度の上昇に伴い、強度残存率は低下する傾向を示すことが把握された。加熱温度 100°C において、配合の違いにより強度残存率に増減が確認されるが、いずれの配合においても、加熱無しと比較して±10%以内であることから、強度の顕著な増加あるいは低下は無いものと判断される。加熱温度 200°C における強度残存率は、配

合 A~C それぞれ、85.8%、93.7%、81.8% であり、配合 A および C は、15~20% 程度の強度低下を示すのに対して、配合 B では、約 6% 程度の強度低下となることが把握された。配合 A および C で確認される強度低下は、加熱に伴い、硬化体内部にひび割れが発生したことに起因するものと考えられる。一方、配合 B の強度低下が他と比較して小さかった点については、PP 繊維（融点＝約 170°C）が溶け残っていたためだと考えられる<sup>7)</sup>。さらに、加熱温度 500°C の強度残存率は、配合 A~C それぞれ、63.3%、63.6%、40.0% となり、配合 A および B は、約 37% の強度低下を、配合 C では約 60% の強度低下を示すことが把握された。

### 3.3 硝酸銀噴霧試験

図-5 に塩化物イオン浸透深さの一例として、配合 B における塩分浸透深さの状況を示す。図より、含浸材の適用の違いによらず、加熱温度の上昇に伴い、塩分の浸透深さが大きくなる傾向を示すことが把握された。また、含浸材適用の有無に着目すると、加熱温度 500°C を除くいずれの加熱温度においても、含浸材を塗布することにより浸透深さが少なくなる傾向を示すことが把握された。ただし、加熱温度 500°C においては、含浸材適用の有無によらず、割裂面ほぼ全域に渡って白色を呈していることが確認された。なお、他の配合においても上述と同様の傾向を示すことが確認されている。

図-6 には、ノギスを用いて浸透深さを測定した結果を示す。本実験では、φ100mm の円柱供試体に対して、円周面から中心への塩化物イオン浸透を行っているため、浸透深さの最大値は供試体直径の 1/2（＝50mm）となる。また、図中の各点は、各供試体 10 点の測定値の平均値で示している。なお、一部の供試体において、上下面のシールが不十分と思われる箇所があることから、その供試体に対しては、シールが不十分と思われる箇所を除いた浸透深さが確認される箇所において測定を行っている。

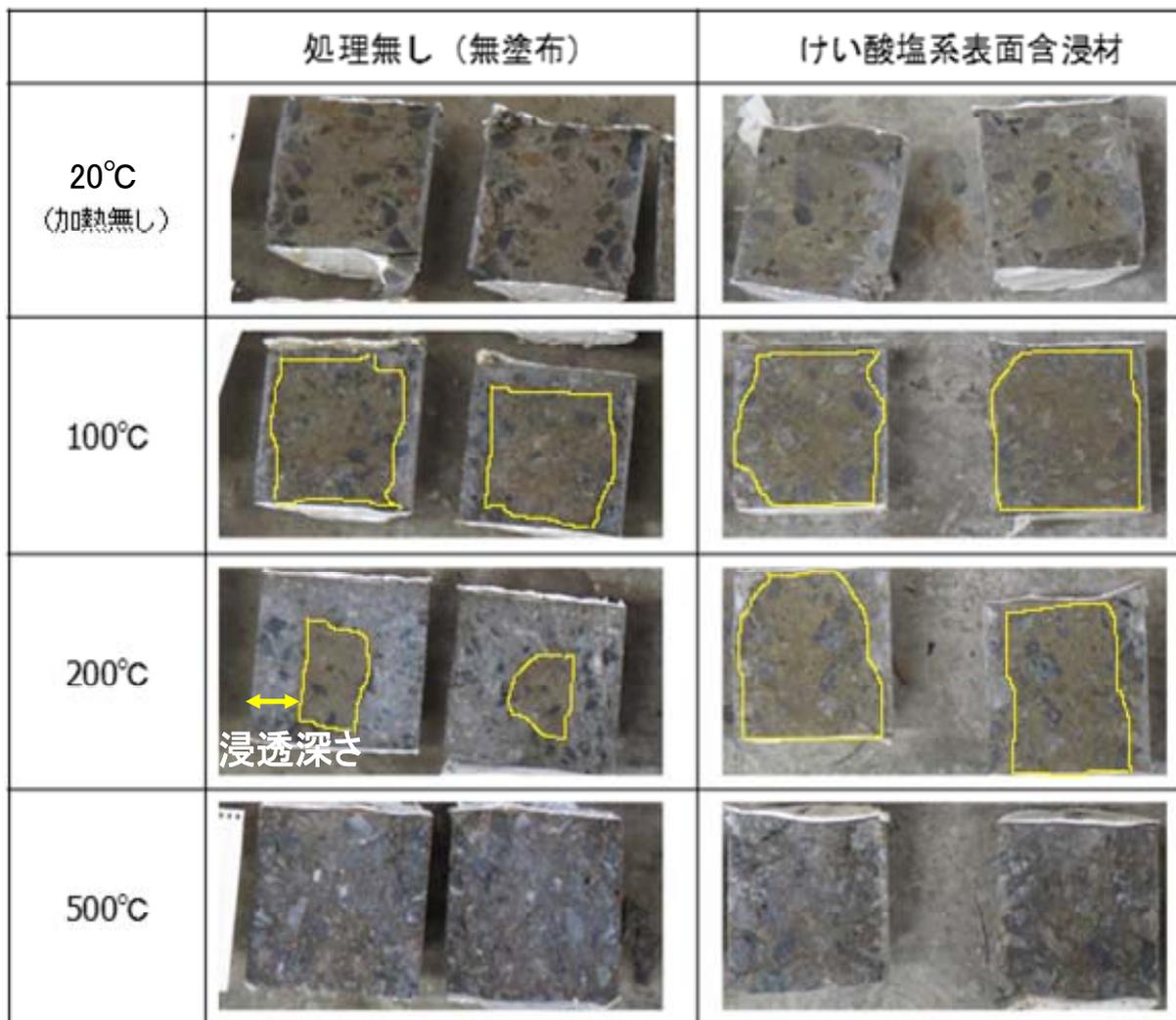


図-5 硝酸銀噴霧試験結果

図-6 を概観すると、配合の違いによらず、いずれも加熱温度の上昇に伴い塩分浸透深さが増加した。また、含浸材を塗布することで塩分浸透深さが抑制されることが確認された。特に、加熱温度 200°Cにおいて、含浸材の有無による浸透深さの違いが顕著に現れた。各加熱温度において、含浸材塗布・無塗布の違いによる浸透深さの平均値の差は、それぞれ、加熱無し：3.88mm、加熱温度 100°C：1.67mm、加熱温度 200°C：20.3mm および、加熱温度 500°C：6.11mm（配合 A のみ。配合 B および C は、割裂面ほぼ全域に渡り白色を呈しているため、評価不可）という結果になった。

加熱温度 500°Cにおいて、含浸材の塗布・無塗布の違いによらず、ほぼ同等の浸透深さを示した点については、含浸材塗布による改質効果よりもむしろ、加熱に伴う硬化体内部のひび割れ等の損傷の影響が卓越したためと考えられる。加えて、本実験で用いた含浸材は、反応型のけい酸塩系表面含浸材であり、加熱温度 500°Cについては、加熱により硬化体中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が著しく減少していることが推察されることから、含浸材としての効果を

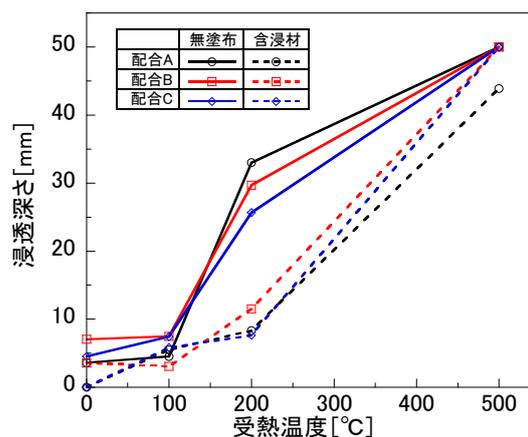


図-6 塩化物イオン浸透深さ

十分に発揮できなかったことも要因の一つとして考えられる。ただし後者については不明な点が多く、塗布後の養生期間中の含浸材の反応の程度（効果の発揮）については、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

### 3.4 全塩化物イオン濃度分布

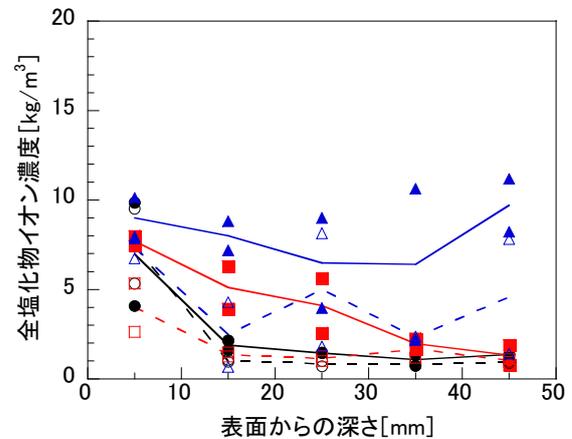
図-7 (a) ~ (c) に、各配合における全塩化物イオン濃度分布を示す。図中のプロットは、各供試体各深さ位置での測定値を、図中の線（実線、破線）は、各供試体各深さ位置での測定値の平均値を結んだものである。

これらの図より、いずれの配合においても、含浸材無塗布のものについては、加熱温度の増加に伴い、より内部まで塩化物イオン濃度が高い値を示すことが把握された。また加熱温度 200°C かつ含浸材を塗布した供試体の 10mm 以深における全塩化物イオン濃度は、1.0 ~ 2.0 kg/m<sup>3</sup> とほぼ一定の値を示すことが把握された。加熱温度 500°C の場合、浸透深さの測定では含浸材の有無による違いが確認されなかった（図-5 および図-6）ものの、全塩化物イオン濃度分布は、含浸材を用いた場合、無塗布の場合と比較して低い値を示す傾向にあることが確認された。ここで、全塩化物イオン濃度分布（図-7）と硝酸銀噴霧による浸透深さ（図-5 および図-6）を比較すると、本研究の範囲内では、硝酸銀噴霧による変色域の全塩化物イオン濃度は、2 ~ 3 kg/m<sup>3</sup> 程度であると考えられる。加熱温度 500°C においては、図-7 に示すように、いずれの深さ位置においてもこの値を超える全塩化物イオン濃度が確認されており、硝酸銀噴霧による浸透深さでは、含浸材適用の違いによる差が確認されなかったものと考えられる。一方で、前述のとおり、全塩化物イオン濃度の測定から、加熱温度 500°C においても含浸材を塗布することにより、内部への塩化物イオン浸透は含浸材無塗布の場合よりも抑制されたものと判断され、その効果が確認された。ただし、加熱温度 500°C の場合、配合・含浸材の有無の違いによらず、いずれも全塩化物イオン濃度のバラツキが大きい傾向にあることが確認される。これは、加熱温度の増加に伴い硬化体内部に発生するひび割れの影響によるものと考えられる。配合の違い（骨材種別、PP 繊維の有無）による影響よりも、加熱に伴うひび割れの影響が卓越するためと考えられる。

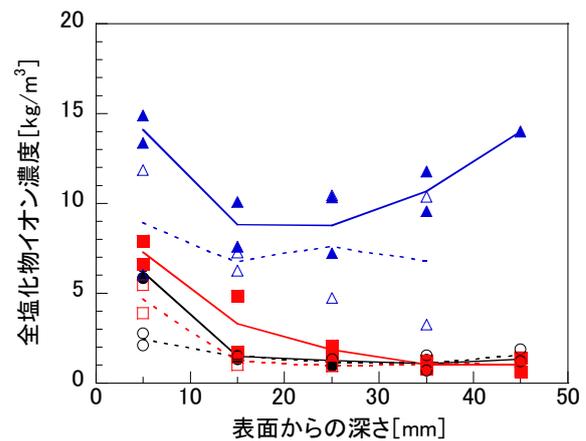
配合の違いが全塩化物イオン濃度分布に与える影響について、PP 繊維の有無による影響（配合 A と B）を比較すると、加熱なし及び加熱温度 200°C の場合、両配合とも含浸材の有無に関わらず、全塩化物イオン濃度は同程度の傾向を示すことが確認される。一方、加熱温度 500°C の場合、含浸材塗布、無塗布ともに配合 B の方が配合 A よりも平均 3.3 kg/m<sup>3</sup> 程度塩化物イオン濃度が大きくなった。これは、PP 繊維の融点が約 170°C であるため、500°C に加熱した場合、繊維が熔融した空隙を通じて塩化物イオンが浸透したためと考えられる。

粗骨材の種別による影響（配合 A と C）を比較すると、加熱温度 200°C かつ含浸材無塗布の場合、表面からの深さ 0.5cm において、全塩化物イオン濃度は、配合 A と配

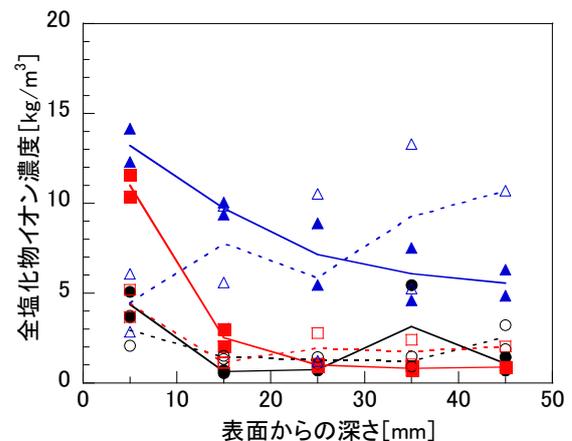
	無塗布	含浸材
加熱無し	—●—	- -○- -
200°C	—■—	- -□- -
500°C	—▲—	- -△- -



(a) 配合 A (硬質砂岩)



(b) 配合 B (硬質砂岩+PP 繊維)



(c) 配合 C (石灰岩砕石)

図-7 全塩化物イオン濃度分布

合 C でそれぞれ 7.71, 10.99kg/m<sup>3</sup>であった。同様に、加熱温度 500℃の場合は、8.99, 13.23kg/m<sup>3</sup>であった。以上より、表面からの深さ 10mm 以内における全塩化物イオン濃度は、配合 A よりも C のほうが大きいことが確認された。しかし、深さ 10mm 以深の箇所においては、配合 C の全塩化物イオン濃度が急激に低下し、配合 A と同等な値を示すことが確認された。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 加熱により、加熱温度 200℃において 1.4～2.1%、加熱温度 500℃において 5.1～5.3%の質量減少率が確認された。また、加熱温度 200℃では、供試体表面にひび割れ等の損傷は目視により確認されなかったが、加熱温度 500℃においては、供試体表面に亀甲状のひび割れが確認された。
- (2) 加熱後の割裂引張強度残存率は、加熱温度 100℃では加熱無しと同等の値を示し、その後、加熱温度の増加に伴い、強度残存率が低下し、加熱無しの場合と比較して、加熱温度 200℃および 500℃ではそれぞれ、82～94%および 40～64%の割裂引張強度を示すことが把握された。
- (3) 硝酸銀噴霧による塩化物イオン浸透深さの測定より、いずれの配合も、加熱温度の上昇に伴い、塩分浸透深さが増加することが把握された。また、加熱温度 200℃以下においては、加熱後含浸材を塗布することにより、塩分浸透深さが抑制できることが確認され、特に加熱温度 200℃においてその効果が顕著であった。
- (4) 全塩化物イオン濃度分布より、含浸材を塗布することにより、塩化物イオン浸透性を抑制する傾向にあることが確認された。また加熱温度 500℃において

も、含浸材を塗布することにより、無塗布のものと比較して、同一深さにおける全塩化物イオン濃度は低い値を示し、塩化物イオン浸透に対する抑制効果が確認された。

- (5) ただし、加熱温度 500℃においては、含浸材の塗布・無塗布によらず、全塩化物イオン濃度分布のバラツキが大きくなる傾向にあることが把握された。

#### 参考文献

- 1) 向井佑真, 小澤満津雄, 谷辺徹, 小林孝一: 火災劣化後のコンクリートの物質移動抵抗性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, 2013
- 2) 日本建築学会: 建物の火害診断および補修・補強方法指針(案)・同解説, 第1版第1刷, 2010.2
- 3) 坂元貴之, 竹若耕司, 山口明神, 樋原弘貴: 各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1625-1630, 2011
- 4) 澤田巧, 福手勤, 内藤英晴, 小笠原哲也: 表面含浸材の耐久性向上に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.665-670, 2011
- 5) 土木学会: コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告, コンクリート技術シリーズ 68, 2006.4
- 6) 日本コンクリート工学会: コンクリートの耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012.5
- 7) 小澤満津雄, DantasRafael, 森本博昭: 高温環境下における繊維混入高強度コンクリートの通気率変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1199-1204, 2011