

# 論文 火害を受けたコンクリートのけい酸塩系表面含浸材による補修効果

山本 哲\*1・小澤 満津雄\*2・鎌田 亮太\*3・谷辺 徹\*4

**要旨:** 本研究では、高強度コンクリートおよびPP繊維を混入した高強度コンクリートを対象として、火害後の含浸材による補修効果を検討した。すなわち、角柱供試体を対象として105, 200, 300°Cの加熱試験を実施し、けい酸塩系表面含浸材を塗布しNaCl10%溶液に2週間浸漬した。含浸材の塗布量は150, 300, 450g/m<sup>2</sup>とし塩分浸透抵抗性によって物質侵入抵抗性を評価した。その結果、含浸材なしでは加熱温度の影響は確認できなかったが、加熱した供試体でも含浸材の塗布量を多くすると、塩分浸透深さは小さくなった。PP繊維混入型高強度コンクリートにおいても同様な結果となった。

**キーワード:** 火害, 高強度コンクリート, 塩水浸漬, 硝酸銀噴霧, 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構造物は、加熱表面からセメントの水和生成物は熱分解し、ひび割れが生じることがある(図-1)。この劣化現象により、コンクリートの組織が粗になり、物質侵入抵抗性や見かけの密度低下に繋がる可能性がある。物質侵入抵抗性が低下すると、コンクリート表面から劣化因子(酸素, 二酸化炭素, 塩化物イオンなど)が侵入し、コンクリート内部の鉄筋が腐食する危険性がある<sup>1)</sup>。一方、近年使用量が増加している高強度コンクリートは火災時に爆裂現象を生じやすいことが報告されている<sup>2)3)</sup>。この爆裂現象を抑制する方法として、ポリプロピレン繊維(以下、PP繊維と称す)を添加する方法がある。この方法は、火災時にPP繊維が溶融し水蒸気圧逸散ネットワークを形成し、水蒸気を外部に放出すること、およびコンクリートの剛性を緩和することで爆裂を抑制するとされている。しかし、加熱によるコンクリート躯体の損傷は避けることができず、火災後の耐久性の低下が懸念されている。加えて、火災時のPP繊維溶融による水蒸気圧逸散ネットワークの形成により、コンクリートの鉄筋に対するバリア機能が低下、すなわち物質侵入抵抗性が低下することが考えられる。物質侵入抵抗性の評価においては、加熱後のコンクリー

ト供試体を対象として、NaCl10%溶液に浸漬させ、供試体を割裂後に硝酸銀噴霧試験を行い、析出する塩化銀より塩分浸透状況を検討したものがあ<sup>4)~7)</sup>。その結果、加熱温度が高くなると、塩分浸透量は大きくなるという報告がある。ここでの塩分は、トレーサーとして使用している。

しかしながら、現在の火害後診断<sup>8)</sup>では、残存強度、受熱温度、中性化により劣化の程度を評価する方法が主流であり、物質侵入抵抗性による評価が十分とは言えないのが現状である。また、火害後の補修・補強方法の検討事例は少ない。そこで、本研究では、高強度コンクリートを対象として、火害後のコンクリートの表面含浸材の効果について検討を行った。表面含浸材の効果は、塩化物イオンの浸透深さで評価する。特にPP繊維混入型高強度コンクリートを対象として、含浸材の補修効果を検討した。すなわち、PP繊維溶融に伴う空隙の増加を含浸材の塗布によってどの程度補修可能かを検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

本研究で使用したコンクリートの配合と使用材料を表-1, 2に示す。設計基準強度は、60N/mm<sup>2</sup>であり、JIS認

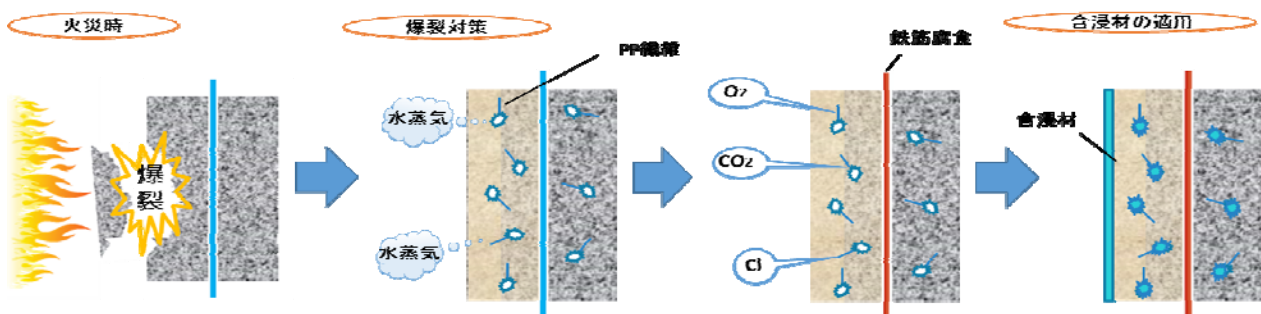


図-1 火害を受けたコンクリートの損傷状況と含浸材の適用

\*1 群馬大学 理工学部環境創生理工学科 学生 (学生会員)

\*2 群馬大学 理工学部環境創生理工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 修士(工学) (正会員)

\*4 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

シリーズ	水セメント比 W/C %	単体量(kg/m <sup>3</sup> )						
		セメント C	水 W	細骨材		粗骨材 G	混和剤	PP 繊維
				S1	S2			
HSC	32	532	170	589	253	858	6.92	—
HSC+PP	32	532	170	589	253	858	6.92	1.82

表-2 使用材料

記号	詳細
C	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
S1	栃木県佐野市中町砕砂：砂岩(表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> )
S2	栃木県佐野市仙波町砕砂：石灰岩(表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> )
G	群馬県みどり市大間々町砕石：輝緑凝灰岩(表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> )
SP.	高性能 AE 減水剤
PP 繊維	ポリプロピレン繊維(繊維長 12mm, 繊維径 50μm, 密度 0.91g/cm <sup>3</sup> )

表-3 フレッシュ性状と力学特性

	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	温度 (°C)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
HSC	-	54.5, 54.0	25.9	4.2	76.9	44.2	4.1
HSC+PP	19	-	23.7	3.7	79.0	44.7	3.0

定工場の生コンクリートを使用した。W/C は 32%とし、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材の岩種は輝緑凝灰岩である。コンクリートの種類は、HSC と HCS+PP のシリーズとした。すなわち、高強度コンクリート：HSC と高強度コンクリートに PP 繊維を 0.2%vol 混入したもの：HSC+PP の二種類とした。PP 繊維は繊維長 12mm で繊維の直径が 50μm のものを使用した。表-3 にコンクリートのフレッシュ性状と力学特性を示す。材齢 84 日の圧縮強度は、HSC が 76.9N/mm<sup>2</sup>、HSC+PP が 79.0N/mm<sup>2</sup> であった。含水率計測用供試体は、Φ50×L100 mm の供試体を各シリーズ 4 本ずつ作製し、角柱供試体と同様に 3 か月間湿布養生を行った。含水率供試体は材齢 90 日(加熱試験開始材齢)で、105°Cの乾燥炉内で 24hr 乾燥させた。含水率は、乾燥前後の重量差より求めた。その結果、HSC と HSC+PP の含水率は 4.0%と 3.1%程度であった。HSC+PP の含水率が HSC よりも低かった。

## 2.2 塩水浸漬試験による物質侵入抵抗性の評価

供試体の種類は、加熱温度と含浸材の塗布量で分類した。詳細は後述する。表面含浸材には、固化型けい酸塩系含浸材(けい酸リチウム濃度 10%)を使用した。図-2 に実験フローを示す。供試体は、H100mm×W100mm×L380mm の角柱とした。供試体の中央部に熱電対を設置

した供試体を作製した。まず、コンクリート供試体を作製し、3 か月湿布養生を行った。養生後、加熱試験を実施した。加熱方法について記述する。105°C加熱では、予備試験により爆裂が生じないと判断し、105°Cの乾燥炉に直接設置した。炉内温度と供試体中心温度の差をできる限り小さくするため、8 日間乾燥させた。200°Cと 300°C 加熱では、加熱速度によって爆裂が生じる可能性があったため、加熱速度を 1°C/min とし所定の温度に達したあと 5hr 保持した。供試体は角柱供試体を 4 体ずつ加熱した。加熱面は角柱供試体の側面：4 面とした。その後、自然冷却させた。加熱時には炉内温度と供試体断面中心の温度を計測した。各設定温度で加熱後の質量を測定し、質量減少率を測定した。加熱試験後、乾式コンクリートカッターを用いて角柱供試体を 4 等分し、加熱面一面以外をエポキシ樹脂でコーティングした。切断した供試体のうち、2 体は含浸材を塗布し残り 2 体は無塗布とした。含浸材の塗布量は、150, 300, 450g/m<sup>2</sup> とした。含浸材塗布後の養生期間を 7 日間とした。その後、供試体を NaCl : 10%溶液に 14 日間浸漬させた。塩水浸漬後、供試体を割裂した。割裂した供試体の割裂面に硝酸銀溶液を噴霧した。塩化銀が生成した部分の発色状況より、塩化物浸透深さを測定した。

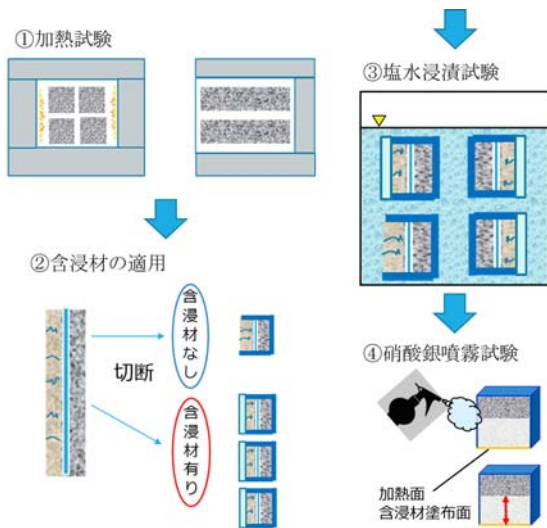


図-2 実験フロー

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 加熱試験結果

図-3~5に、加熱温度 105℃と 200℃および 300℃における炉内温度と供試体内部温度の経時変化を示す。加熱温度 105℃の時の供試体内部温度の HSC, HSC+PP の中心部の最高温度は、89.7 と、96.3℃であった。200℃では、HSC が 223.7℃、HSC+PP が 204.4℃であった。300℃では、HSC が 312.1℃、HSC+PP が 304.7℃であった。200℃加熱と 300℃加熱においては、供試体の中心部が所定の温度に達していることが確認できた。特に、HSC+PP では PP 繊維の熔融温度は 170℃程度であるため、200℃加熱と 300℃加熱を行った供試体は、PP 繊維の熔融温度以上となっていることが確認できた。

#### 3.2 硝酸銀噴霧試験結果

図-6に塩分浸透深さの凡例を示す。割裂した面に硝酸銀を噴霧し、濃く変色している領域は、塩化銀が生成した領域であり、塩化物浸透深さとした。下面は、加熱面であり、含浸材を塗布した面である。その他の面は、エポキシ樹脂を塗布した面である。

##### 1) 加熱温度の影響

図-7a)b)に含浸材なしにおける HSC と HSC+PP 供試体の塩分浸透深さの平均値と加熱温度の関係と供試体毎の塩分浸透深さの写真を示す。今回の実験結果では、HSC と HSC+PP とともに 80mm 以上、塩分浸透する結果となった。しかし、加熱温度に伴う塩分浸透状況に大きな差異が見られなかった。今後、塩化物量分布とポロシティを計測し、加熱温度の影響を検討したいと考えている。

##### 2) 含浸材塗布の影響

図-8a)b)に 105℃で加熱し含浸材塗布量が 150, 300, 450g/m<sup>2</sup> 塗布した時の塩分浸透状況と塩分浸透深さの平

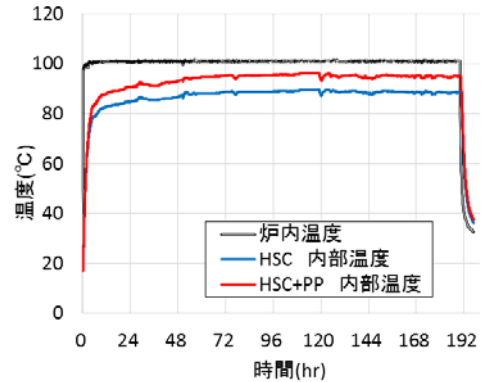


図-3 供試体内部温度の経時変化 (105℃)

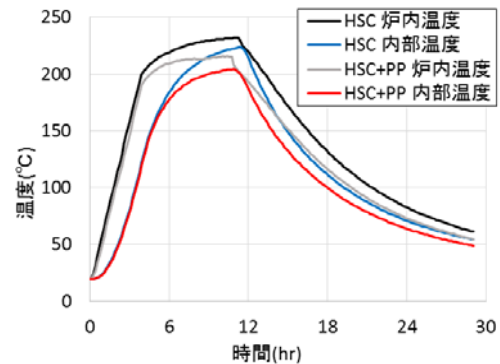


図-4 供試体内部温度の経時変化 (200℃)

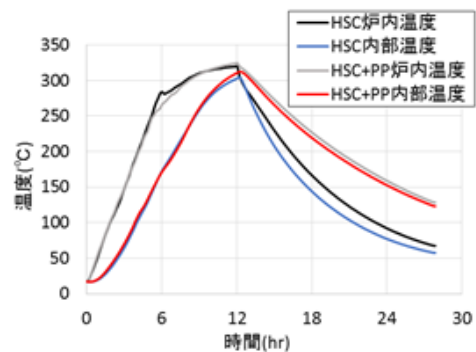


図-5 供試体内部温度の経時変化 (300℃)

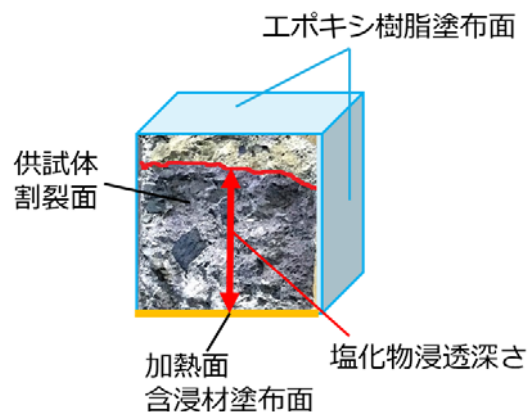


図-6 塩分浸透深さの凡例



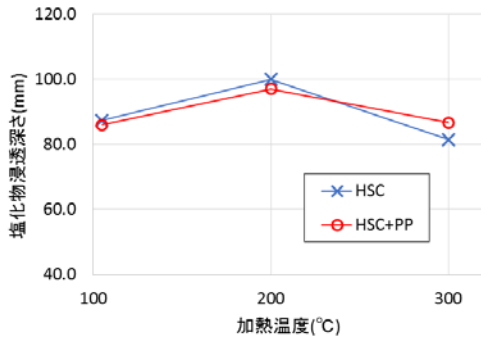


図-7 a) 塩化物浸透深さ (含浸材なし)

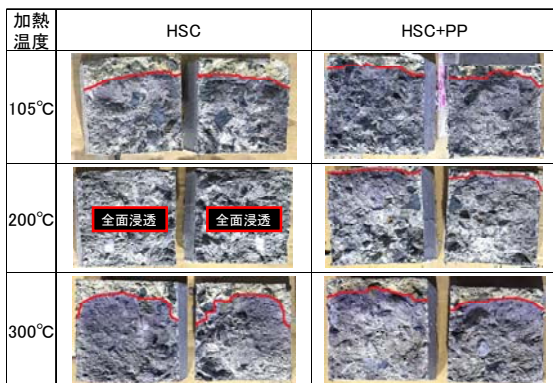


図-7 b) 塩化物浸透深さの写真(含浸材なし)

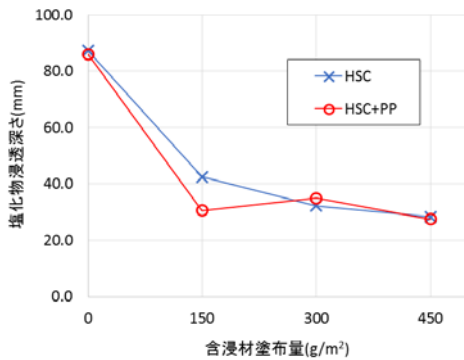


図-8 a) 塩化物浸透深さ (含浸材あり: 105°C)

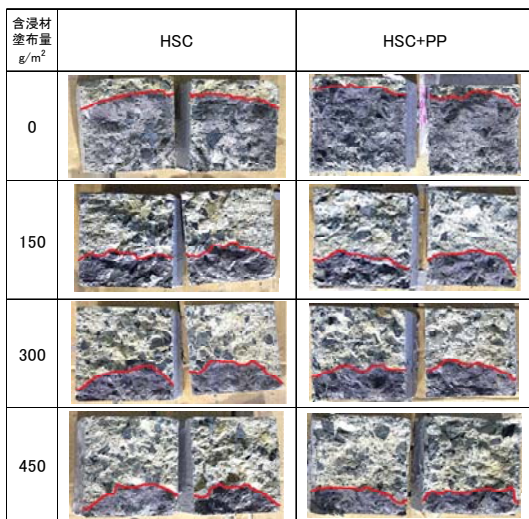


図-8 b) 塩化物浸透深さの写真(含浸材あり: 105°C)

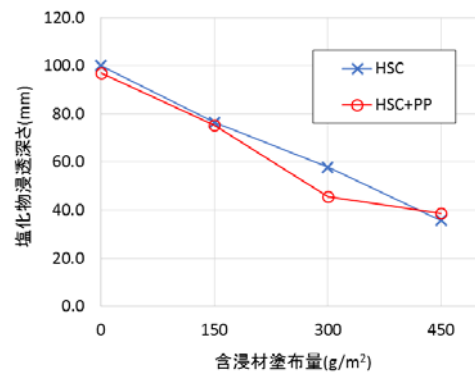


図-9 a) 塩化物浸透深さ (200°C)

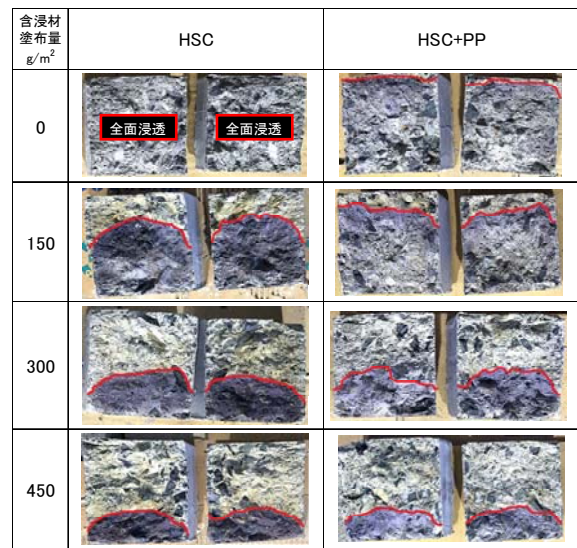


図-9 b) 塩化物浸透深さの写真(200°C)

均値を示す。図より、105°Cにおいて含浸材の塗布量が大きくなると塩分浸透深さは低減することがわかる。含浸材無塗布の場合は、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP とともに 85mm 程度で大きな差異はない。含浸材を 150g/m<sup>2</sup> 塗布すると、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP それぞれ 42mm と 30mm 程度となり、塗布前に比べて大幅に小さくなった。300g/m<sup>2</sup> と 450g/m<sup>2</sup> では大きな差異は見られなかった。

図-9a)b)に 200°Cで加熱し含浸材塗布量を 150, 300, 450g/m<sup>2</sup> とした時の塩分浸透状況と塩分浸透深さの平均値を示す。図より、200°Cにおいても含浸材の塗布量が大きくなると、塩分浸透深さは低減することがわかる。含浸材無塗布の場合は、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP とともにほぼ全面浸透した。含浸材を 150g/m<sup>2</sup> 塗布すると、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP とともに 75mm 程度となった。300g/m<sup>2</sup> では塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP それぞれ 57mm と 45mm となった。450g/m<sup>2</sup> では塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP とともに 35mm 程度となった。

図-10a) b)に 300°Cで加熱し含浸材塗布量が 150, 300, 450g/m<sup>2</sup> 塗布した時の塩分浸透状況と塩分浸透深さの平均値を示す。図より、300°Cにおいて含浸材の塗布量が大きくなって塩分浸透深さはあまり低減しないことがわかる。含浸材無塗布の場合は、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP とともに 85mm 程度で大きな差異はない。含浸材を 150g/m<sup>2</sup> 塗布しても、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP とともに 85mm 程度となった。300g/m<sup>2</sup> 塗布すると、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP はともに 72mm 程度となった。450g/m<sup>2</sup> 塗布すると、塩化物浸透深さは HSC と HSC+PP はそれぞれ 73mm と 83mm 程度となった。

### 3) PP 繊維混入の影響

図-11 に 300°C加熱で含浸材塗布量が 150, 300, 450g/m<sup>2</sup> 塗布した時の塩分浸透深さの最大値をとったものを示す。含浸材無塗布の塩化物浸透深さの最大値は、HSC と HSC+PP で 84mm と 92mm であり、PP 繊維を混入したものを方が大きい。含浸材の塗布量を 150g/m<sup>2</sup> から 450g/m<sup>2</sup> に大きくすると、150g/m<sup>2</sup> で HSC と HSC+PP の最大値は逆になっているが、そのほかは HSC+PP の方が塩化物浸透深さは、大きいことがわかる。HSC では水和生成物の分解と微細なひび割れの発生が生じ、HSC+PP では HSC での損傷の加えて、PP 繊維が溶融することによる空隙の増加が考えられるが、無塗布の場合の HSC と HSC+PP の塩化物浸透深さの差が、PP 繊維溶融による空隙増加の分と推察される。加えて、含浸材の量を 450g/m<sup>2</sup> まで多くしたが、塩化物浸透深さはあまり差異がなかった。このことは、PP 繊維が溶融してできた空隙を埋めるためには、含浸材の量を追加する必要があることを示すものと考えられる。

### 4) 硝酸銀噴霧による発色限界について

今回の検討で、塩分浸透深さを硝酸銀噴霧による塩化銀生成の発色限界で評価を行った。既往の知見では青木ら<sup>9)</sup>が W/C0.4-0.6 の範囲で硝酸銀噴霧試験による発色限界式を示している。一方、岩本ら<sup>9)</sup>は、高強度コンクリートを対象として、硝酸銀噴霧試験結果と硝酸銀滴定法による塩化物量深さの関係を検討している。硬質砂岩を使用した高強度コンクリートの 200°C加熱における白色限界領域は 32mm であった。塩化物イオン量分布のグラフより 32mm 位置の塩化物イオン量は約 2kg/m<sup>3</sup> となった。この値を適用すると、今回の適用では、200°C加熱の発色限界領域の塩化物量は 2kg/m<sup>3</sup> と推定できる。しかしながら、加熱温度や配合、含浸材の種類によって結果が異なるため今後更に検討を進める予定である。

### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 高強度コンクリート HSC と高強度コンクリートに

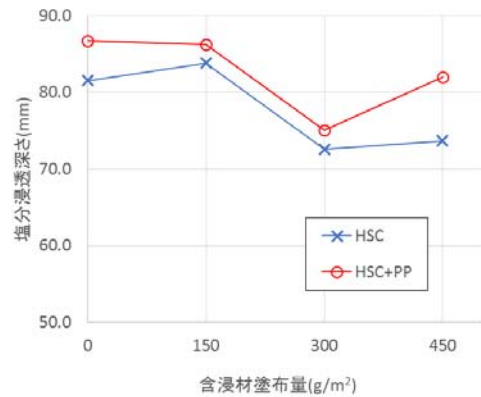


図-10 a) 塩化物浸透深さ (300°C)

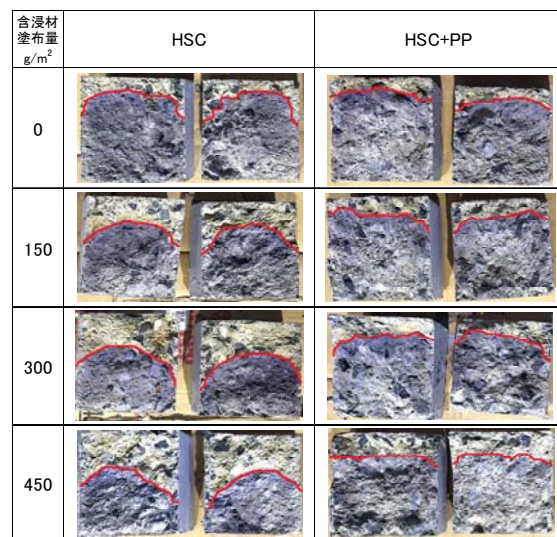


図-10 b) 塩化物浸透深さの写真 (300°C)

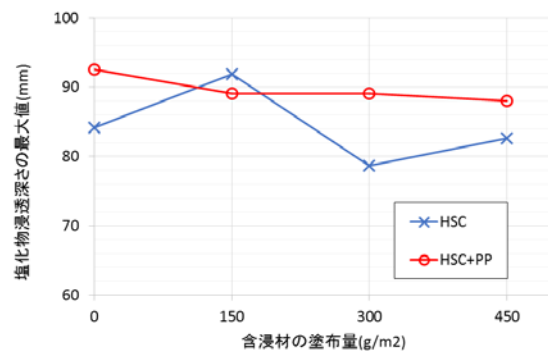


図-11 塩化物浸透深さの最大値 (300°C)

PP 繊維を混入した HSC+PP を対象として、加熱試験後に塩水浸漬試験を行い、塩化物浸透深さを測定した。その結果、今回の検討では加熱温度の影響はみられなかった。この点について、今後、塩化物量分布とポロシティの計測を行い検討する予定である。

- (2) 含浸材の塗布量が多くなるほど、塩化物の浸透を抑制することができた。また、200°C加熱までは、含浸材による抑制効果がみられたが、300°Cでは、含浸材による抑制効果は見られなかった。
- (3) PP 繊維が溶融している 200°C加熱では、HSC と

HSC+PP で差がほとんど見られなかった。200℃加熱までは含浸材により空隙を埋めることができたと考えられる。

- (4) 300℃加熱において、HSC と HSC+PP の塩化物浸透深さの最大値を比較した。その結果、HSC よりも HSC+PP の方が浸透深さは大きく、含浸材の塗布量を 450g/m<sup>2</sup> まで増加しても浸透深さが小さくならなかった。

今後の課題として、300℃以上で火災損傷を受けた場合の含浸材塗布量を検討し、含浸材の適用範囲を検討する必要があると考えられる。また、含浸材の補修効果のクライテリアと設計式について本論文の結果と今後の検討を踏まえて、提案していく予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、科学技術研究補助金(基盤研究(C)、課題番号：25420459、代表：小澤満津雄)およびNEXCO 東日本研究助成の補助を受けて行った。また、本研究の実施に当たり、4年生の大嶋美紗樹氏から多大なる援助を受けた。ここに謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 若林瑠美, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 川邊清伸: 火災損傷を受けた普通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基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1003-1008, 2015.
- 2) 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.
- 3) 森田武: コンクリートの爆裂とその防止対策, コンクリート工学, Vol.45, No.9, pp.87-91, 2007.9.
- 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, No.1, pp.1147-1152, 2013.
- 4) 塚越俊, 小澤満津雄: 火災劣化を受けた合成繊維混入型高強度コンクリートの物質侵入抵抗性の評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第14巻, pp.187-194, 2014.10.
- 5) 鎌田亮太, 小澤満津雄, 明石孝太, 鉄羅健太, 谷辺徹: PP 繊維が火災劣化を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第15巻, pp.291-296, 2015.10.
- 6) 岩本早耶香, 迫井裕樹, 小澤満津雄, 川邊清伸: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.820-825, 2014.
- 7) 小澤満津雄, 向井佑真, 谷辺徹, 麓隆行, 小林孝一: 火災を受けた高強度コンクリートの物質侵入抵抗性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第13巻, pp.495-500, 2013.11.
- 8) 日本建築学会: 建物の火災診断および補修・補強方法 指針・同解説, 2010.
- 9) 青木優介, 嶋野慶次, 三好佑果, 鈴木正志: 硝酸銀溶液噴霧法による硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.759-764, 2008