

# 論文 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

向井 佑真\*1・小澤 満津雄\*2・谷辺 徹\*3・小林 孝一\*4

**要旨:** 本論文では、火災を受けたコンクリートの劣化診断手法の提案の基礎的資料を得ることを目的として、高温履歴を受けたコンクリートの物質移動抵抗性について検討した。本研究では、高強度コンクリート(HSC)と、HSCにポリプロピレン(PP)繊維を0.2vol%混入した(HSC+PP)を対象に、200℃と500℃の加熱試験を実施した。加熱後、NaCl 10%溶液に供試体を1ヶ月間浸漬し、加熱表面から深さ方向の塩分浸透状況を蛍光X線分析により測定を行った。受熱温度が高くなるにつれて、塩分浸透量は増加し、物質移動抵抗性が低下することが分かった。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 火災劣化, 物質移動抵抗性, 蛍光X線分析, 塩分浸透

## 1. はじめに

従来、コンクリートは不燃材料として取り扱われ、コンクリート構造物は耐火構造物であると考えられてきた。しかしながら、コンクリート構造物の巨大化・高層化・複雑化に伴い、火災被害によって被害は甚大となることが報告されている<sup>1)</sup>。コンクリートは火災による熱作用を受けると爆裂現象を生じる<sup>2)</sup>。この爆裂は、コンクリートの強度が大きい場合や拘束が大きい場合に生じやすいとされている。

火災時の爆裂現象や熱損傷を低減する方法として、耐火被覆材と合成繊維(PP繊維)を混入する方法が一般的である<sup>3)</sup>。耐火被覆材は、コンクリート躯体を火災の熱から直接保護できるため有効な手法であるが、コスト面で採用されないケースがある。一方、合成繊維を混入する方法は、水蒸気圧を低減し爆裂を防止しようとするものであるが、火災時の爆裂を必ずしも防止できる訳ではなく、火災による熱を躯体が直接受けるため、躯体は損傷し火災後の断面補修を避けることができない。

上記の耐火対策について、加熱試験による耐火性の検証は多数報告されているが<sup>4)</sup>、コンクリートが火災劣化を受けたあとの耐久性については報告が少ない。火災劣化を受けた場合には、受熱温度の推定や強度特性の低下状況の把握などの劣化診断のもと、適切な補修補強が必要となる。受熱温度の推定では、フェノールフタレイン溶液噴霧による変色判定により中性化の度合いをある程度、推定可能であるが、変色の程度にバラつきが大きく厳密な推定は難しいのが現状である<sup>5)</sup>。火災時に、コンクリート構造物のかぶりは損傷し微細なひび割れが多数発生する。その結果、コンクリートの物質移動抵抗性は低下し、内部の鉄筋が腐食する危険性が高まる。既往の研究では、火災劣化を生じたコンクリートの強度回復と

塩分浸透深さの関係を検討した例がある<sup>6)</sup>。

以上より、劣化診断には強度特性だけでなく、コンクリートの物質移動抵抗性を考慮した評価指標が必要であると考えられる。本研究では、高温履歴を受けたコンクリートの物質移動抵抗性を塩分浸透抵抗性で評価し、火災劣化の新たな診断方法の提案を行うための基礎的資料を得ることを目的とした。本論文では、高強度コンクリートの加熱後の物質移動抵抗性の変化について検討した。

## 2. 実験の概要

本研究の実験フローを図-1に示す。図に示すように、作製したコンクリートを対象に加熱試験を行い、塩水に浸漬した後、塩水の浸透深さを確認し、塩化物量の測定と拡散係数の推定を行った。

### 2.1 試験体概要

表-1に示方配合を示す。実験対象は、高強度コンクリ

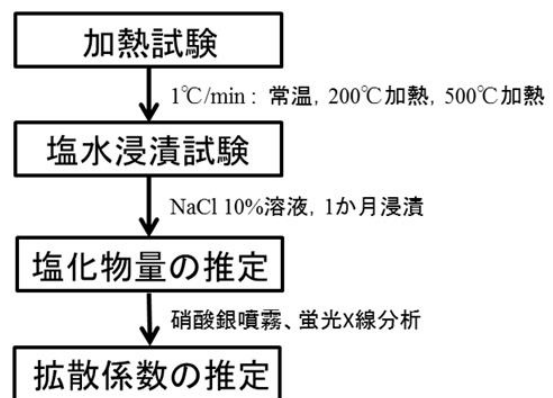


図-1 実験フロー

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (学生会員)

\*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 助教 (正会員)

\*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 (正会員)

\*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 准教授 (正会員)

表-1 示方配合

コンクリート種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						fiber (vol%)
			W	C	S	G1(5-15mm)	G2(10-20mm)	ad	
HSC	30	63.3	150	500	718	417.6	626.4	5	-
HSC+PP	30	63.3	150	500	718	417.6	626.4	5	0.2

表-2 材料特性

材料名	種類	密度(g/cm <sup>3</sup> )
セメントC	早強ポルトランドセメント	3.15
細骨材S	砕砂(長良川水系)	2.60
粗骨材G	碎石10-20mm(大垣 上石津(硬質砂岩))	2.61
	碎石5-15mm(大垣 上石津(硬質砂岩))	2.61
混和剤ad	高性能減水剤	1.06-1.12
PP繊維fiber	長さ12mm、直径43μm	0.91

表-3 コンクリートの性状

コンクリート種類	練り混ぜ温度(°C)	空気量(%)	フロー(cm)	圧縮強度(MPa)	弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )
HSC	28.0	1.7	62	81.9	41.1
HSC+pp	27.0	1.7	15.5	83.5	42.9



写真-1 電気炉

ート(以下、HSC)、HSC にポリプロピレン(PP)繊維を0.2%vol 混入した(以下、HSC+PP)とした。表-2 に使用した材料の特性を示す。セメントには、早強ポルトランドセメントを使用した。混和剤には、高性能減水剤を使用した。PP 繊維は、繊維長 12mm で繊維径 42 μm のものを使用し混入率は 0.2%vol とした。粗骨材は硬質砂岩碎石(密度:2.61g/cm<sup>3</sup>)を使用し、粗骨材の最大寸法は 20mm とした。供試体寸法は φ100×200mm の円柱供試体とし、供試体数は、各 9 本ずつとし、計 18 本作製した。表-3 に作製したコンクリートの性状を示す。W/C は 30%とし、目標の圧縮強度を約 80MPa とした。養生方法は 28 日間の湿布養生とした。

## 2.2 加熱試験

供試体の加熱には、写真-1 に示す電気炉を用いた。加熱試験方法は RILEM 試験<sup>4)</sup>に準拠し、炉内温度の温度上昇速度は、1°C/min.とした。加熱温度の水準は①加熱無、②200°C、③500°Cとした。各設定温度について、供試体は 3 本ずつ実験を行った。加熱時の中心温度を確認するために、各設定温度で 1 本ずつ供試体の中心に熱電対を設置した。これにより、各温度における供試体中心部の温度を測定した。炉内温度は所定の温度に達した後、所定の温度を 1hr.保持し、その後、電気炉の電源を切って、自然冷却した。

## 2.3 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は、JSCE-G 572-2007 に示されている「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」<sup>7)</sup>に準拠した。加熱試験後の供試

体を温度 20°Cの塩水(NaCl 濃度 10%)が入った容器の中に、1 月間浸漬させた。

## 2.4 塩化物量の推定

塩水浸漬後、円柱供試体の割裂試験を行い、引張強度を求めた。割裂試験後、破断面に硝酸銀(0.1mol/L)を噴霧し、発色状況から塩水浸透状況を簡易的に確認した<sup>8)</sup>。

硝酸銀溶液噴霧後に、供試体内部の塩分浸透状況を確認するため、蛍光 X 線分析<sup>9)</sup>を行った。供試体表面から深さ方向にドリル削孔を行い、削孔粉を採取した。分析位置は HSC が 5,15,45mm とし、HSC+PP は 5,15,25,45mm とした。供試体中心部(加熱表面から深さ 50mm)の位置は、ドリル削孔が困難だったため、供試体より破片を採取し、ハンマーで粉砕して試料とした。採取した試料を用いて、蛍光 X 線分析により、塩化物量 Cl<sup>-</sup>の測定を行った。

## 2.5 拡散係数の推定

蛍光 X 線分析で得られた塩化物量 Cl<sup>-</sup>を用いて、各加熱温度における塩化物の拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)を求めた。拡散係数の推定には、コンクリート構造物の劣化予測計算ソフト(LECCA2-LITE)<sup>10)</sup>を用いた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 加熱試験とひび割れ状況

図-2, 3 に設定温度 200°Cと 500°Cにおける炉内と供試体の中心温度の経時変化を示す。設定温度 200°Cにおける供試体中心の最高温度は、HSC と HSC+PP それぞれ、145°C、154°Cとなった。設定温度 500°Cでは、供試体中心の最高温度は、HSC と HSC+PP それぞれ、463°C、479°C

となった。以上より、炉内（供試体表面）と供試体中心の温度差は、21~55℃となることが分かった。加熱後に、供試体に発生したひび割れを目視により確認した。写真-2 に設定温度 500℃に加熱した供試体のひび割れ状況を示す。爆裂は起こらなかったが、供試体全体に亀甲状のひび割れが確認でき、最大ひび割れ幅は 0.05mm であった。一方、設定温度 200℃では、ひび割れがほとんど確認されなかった。HSC、HSC+PP とも、ひび割れの状況は同様な傾向となった。

### 3.2 割裂試験

加熱無の各種コンクリートの引張強度を基準として、図-4 に設定温度 200℃と 500℃の加熱後の強度残存率を示す。設定温度 200℃で加熱した供試体は、HSC、HSC+PP それぞれ、85.8%、93.7%に強度が低下した。200℃で加熱した場合、PP 繊維が溶け残っていたため、HSC に比べて強度低下が小さくなったと考えられる。一方で、設定温度 500℃で加熱した供試体は、HSC、HSC+PP それぞれ、63.3%、63.6% となり、強度低下は同程度であった。

### 3.3 硝酸銀噴霧試験

写真-3 に硝酸銀溶液の噴霧による塩分浸透深さを確認した結果を示す。白色に発色したところが、塩分が浸透していることを示している。設定温度 500℃に加熱した供試体は、破断面全面が白色に発色した。これは、供試体全体に塩分が浸透したことを示すものである。一方、設定温度 200℃に加熱した供試体は、発色深さが表面から最大で約 40mm 程度であった。加熱無の供試体は、発色深さが最大 10mm 程度であった。これにより、供試体の受熱温度が高くなるほど、塩分の浸透深さは大きくなることが分かった。これは、加熱に伴い、コンクリート内部に微細なひび割れが生じたためであると考えられる。

### 3.4 蛍光 X 線分析の結果

図-5、6 に HSC と HSC+PP の各加熱温度条件における塩化物量と供試体表面からの深さの関係を示す。図-5 より、HSC について、加熱無供試体の塩化物量は、表面から深さ方向に 5mm と 15mm および 45mm でそれぞれ、 $3.35\text{kg/m}^3$ 、 $0.81\text{kg/m}^3$ 、 $0.74\text{kg/m}^3$  であった。設定温度 200℃の供試体では、加熱表面から深さ 5mm と 15mm および 45mm でそれぞれ、 $3.51\text{kg/m}^3$ 、 $1.97\text{kg/m}^3$ 、 $1.03\text{kg/m}^3$  となった。加熱無供試体と設定温度 200℃供試体では、供試体中心に移動するにつれて、減少していく傾向が見られた。一方、設定温度 500℃の供試体は、加熱表面から深さが 5mm から 45mm(中心)までの範囲で塩化物量は、 $4.2\sim 8.3\text{kg/m}^3$  の範囲であった。

図-6 より、HSC+PP について、加熱無供試体の塩化物量は、加熱表面から深さ 5mm で  $3.96\text{kg/m}^3$  であり、深さ 15~45mm では、 $0.21\sim 0.47\text{kg/m}^3$  であった。設定温度

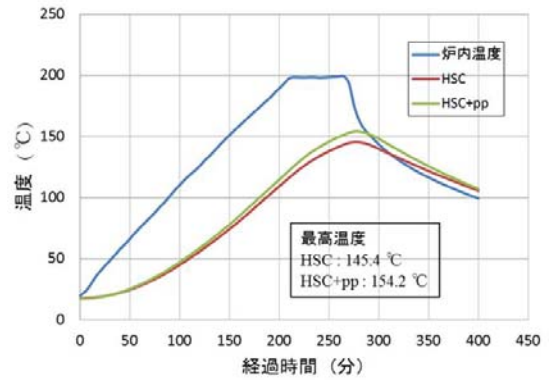


図-2 温度の経時変化（設定温度 200℃）

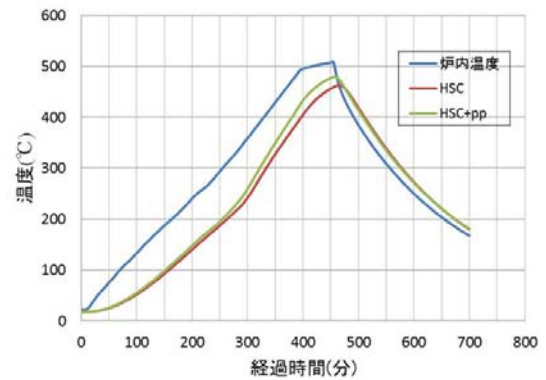


図-3 温度の経時変化（設定温度 500℃）



写真-2 500℃加熱後のひび割れ状況

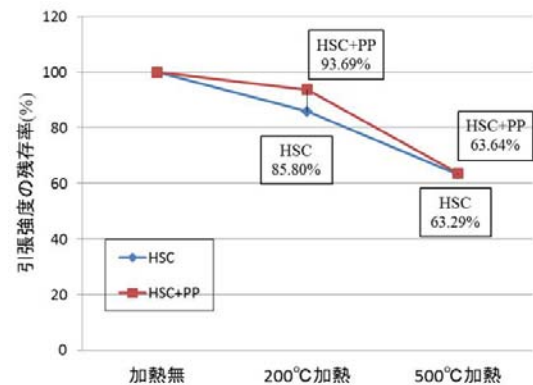


図-4 加熱後の引張強度残存率

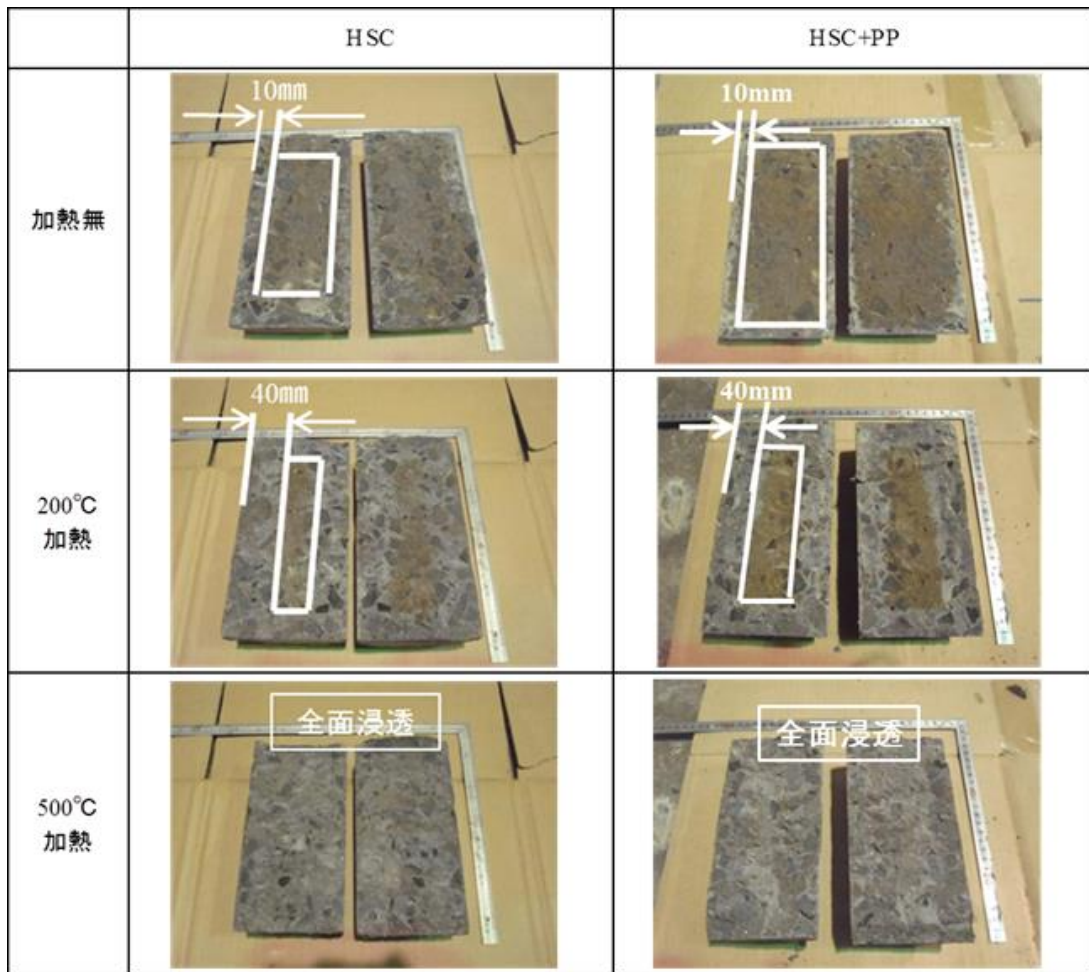


写真-3 硝酸銀溶液噴霧による塩分浸透深さ

200℃の供試体の塩化物量は、加熱表面から深さ 5mm の位置で、 $3.37\text{kg/m}^3$  であるが、深さ方向に減少していき、45mm の位置で、 $0.29\text{kg/m}^3$  であった。設定温度 500℃の供試体の塩化物量は、加熱表面から深さが 5mm から 45mm までの範囲で塩化物量は  $6.1\sim 10.0\text{kg/m}^3$  の範囲であった。

以上より、設定温度 200℃の供試体は、加熱無供試体に比べて、塩化物量が多くなる傾向を示した。これは、加熱に伴い、内部に微細なひび割れが生じたためと考えられる。500℃加熱供試体は、目視で確認できるほどのひび割れが生じていた。500℃加熱供試体は塩分の浸透経路として、以下の2つが考えられる。ひとつは、目視で確認できるひび割れにより塩水が浸透するものであり、塩化物量は大きくなると考えられる。もうひとつはモルタルマトリックス部分から塩分が浸透するもので、前者に比べて塩化物量は小さくなると考えられる。ひび割れとモルタルマトリックスの損傷が塩分浸透性に与える影響の定量化は、今後の検討課題としたい。HSC と HSC+PP

で塩化物量の差を比較すると、200℃加熱までは、HSC+PP の方が物質移動抵抗性は高かった。しかし、500℃加熱では、HSC+PP の方が、物質移動抵抗性が低くなった。これは PP 繊維の融点が約 170℃であるため、コンクリート内部で PP 繊維が熔融し、空隙が生じたことが原因であると考えられる。すなわち、火災時において、蒸気圧を逸散し、コンクリートの爆裂現象を抑制するための空隙ネットワーク<sup>11)</sup> が、物質移動抵抗性を低下させたと考えられる。図-7 にこの現象の模式図を示す。

### 3.5 拡散係数の推定

図-8 に、HSC と HSC+PP の LECCA2-LITE による各加熱条件の塩化物イオン  $\text{Cl}^-$  の拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )を示す。図より、HSC について、加熱無供試体と設定温度 200℃および 500℃の拡散係数はそれぞれ  $0.1\text{cm}^2/\text{年}$  と  $0.26\text{cm}^2/\text{年}$  および  $0.183\text{cm}^2/\text{年}$  となった。200℃までは、拡散係数は上昇したが、500℃では 200℃と比べて大きな差異はなかった。

HSC+PP について、加熱無と 200℃および 500℃の拡散



係数は  $0.03 \text{ cm}^2/\text{年}$  と、 $0.06 \text{ cm}^2/\text{年}$  および  $0.87 \text{ cm}^2/\text{年}$  となった。HSC+PP は、 $200^\circ\text{C}$  加熱において、供試体中心の温度が  $150^\circ\text{C}$  程度であり、PP 繊維(融点  $170^\circ\text{C}$ )の溶融まで至っていないため空隙の形成が少なく、拡散係数の上昇が小さいと考えられる。 $500^\circ\text{C}$  加熱は、供試体中心温度が  $480^\circ\text{C}$  となり、PP 繊維の融点を大きく超えているため、繊維溶融による空隙の形成と熱損傷によるひび割れの影響で、拡散係数が大きくなったと考えられる。

HSC と HSC+PP ともに、 $500^\circ\text{C}$  加熱の場合には、ひび割れが多数発生しているため、拡散現象のみならず、毛細管吸収による塩分の移動が生じていると考えられる。拡散係数の適用性について今後更に検討が必要であると考えている。また、塩水浸漬期間をパラメータとした検討が必要であると考えられる<sup>12)</sup>。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 加熱無供試体を基準とした強度低下の比較では、 $500^\circ\text{C}$  で加熱した供試体について、HSC と HSC+PP に差異はみられなかった。一方、 $200^\circ\text{C}$  で加熱した供試体について、HSC+PP の方が、強度低下が小さかった。
- 2) 加熱後、塩水に1か月浸漬し、硝酸銀溶液の噴霧による塩分浸透深さを確認した。その結果、 $500^\circ\text{C}$  加熱の場合、供試体全体に塩分が浸透していることが分かった。一方、 $200^\circ\text{C}$  加熱では、加熱表面から最大  $40\text{mm}$  まで塩化物が浸透していることがわかった。
- 3) 蛍光 X 線により塩化物量を計測した結果、加熱温度が高くなると塩化物量の浸透量が大きくなり、物質移動抵抗性が低下することが分かった。 $500^\circ\text{C}$  で加熱した場合、HSC に比べ HSC+PP の方が、塩化物量の値が大きくなった。
- 4) 塩化物イオン  $\text{Cl}^-$  の拡散係数の推定について、HSC は加熱無に比べて  $200^\circ\text{C}$  加熱の方が拡散係数は大きくなった。 $500^\circ\text{C}$  加熱では、 $200^\circ\text{C}$  加熱に比較して大きな差異はなかった。HSC+PP は、加熱無と  $200^\circ\text{C}$  加熱で拡散係数に大きな差異はなかったが、 $500^\circ\text{C}$  加熱で大きくなった。

今後は、耐火被覆をした供試体と RC 供試体を対象として、同様な実験を行う予定である。

#### 謝辞

LECCA2-LITE による拡散係数の検討に関して、RCCM 荒井和喜氏に多大な援助を頂いたことに謝意を表す。安部日鋼工業 辛軍青氏より、硬質砂岩碎石を提供頂いた。ここに謝意を表す。

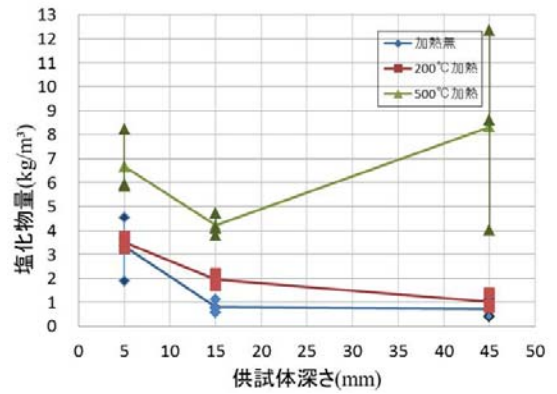


図-5 塩化物量と深さの関係 (HSC)

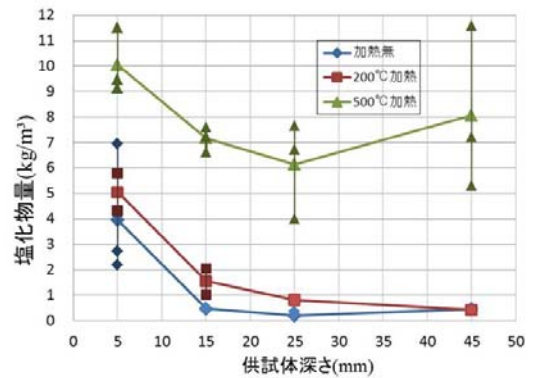


図-6 塩化物量と深さの関係 (HSC+PP)

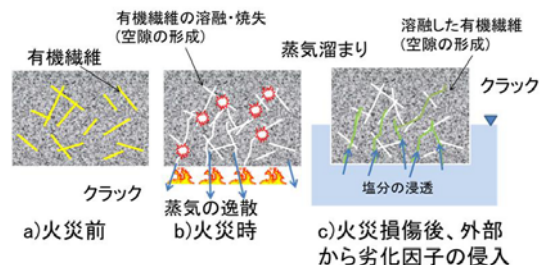


図-7 物質移動抵抗性低下の模式図

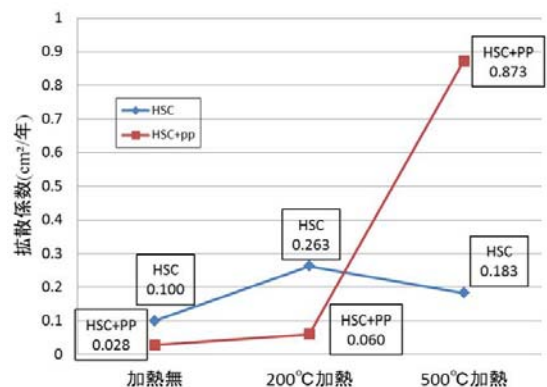


図-8 拡散係数の推定結果

#### 参考文献

- 1) 細江育男, 小柳洽: 火害を受けた道路構造物の劣化診断, コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集, pp.287-292, 2004.10
- 2) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 第2版第1刷, 2009.3
- 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 染谷勇貴, 佐藤明恵, 栗原哲彦: 高温加熱後のコンクリートの強度回復と塩分浸透深さの関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1168-1173, 2012.7
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 規準編 2007
- 8) Otsuki et al: ACI Materials Journal, No.84, pp.587-592, Nov. 1992
- 9) 金田尚志, 魚本健人: 塩化物測定用ポータブル型蛍光 X 線分析装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1095-1100, 2007.7
- 10) [http://www.rccm.co.jp/product/concrete/lecca/lecca\\_2\\_1ite.html](http://www.rccm.co.jp/product/concrete/lecca/lecca_2_1ite.html), RCCM 製品紹介ページ
- 11) 木村和広, 小澤満津雄, 六郷恵哲, 森本博昭: 繊維補強コンクリートの爆裂性状と内部蒸気圧との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.339-344, 2008.7
- 12) 細谷多慶, 森脇拓也, 綾野克紀, 阪田憲次: コンクリート中の微細なひび割れが塩分浸透性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1011-1016, 2004.7