論文　火害損傷を受けたコンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数による耐久性評価

鉄羅　健太[*1]・小澤　満津雄[*2]・迫井　裕樹[*3]・藤本　謙太郎[*4]

要旨：ポリプロピレン（PP）繊維を添加した高強度コンクリートの火害後の物質侵入抵抗性について検討を行った。本研究では，物質侵入抵抗性を塩化物イオンの見かけの拡散係数により評価した。その結果，PP 繊維が混入されているものは無添加のものより，見かけの拡散係数が大きくなり物質侵入抵抗性が低下していることが分かった。また，求めた拡散係数を用いて FEM 解析により，一次元の塩分浸透解析を行った。その結果，加熱温度が高いものは塩分浸透速度が早いことがわかった。

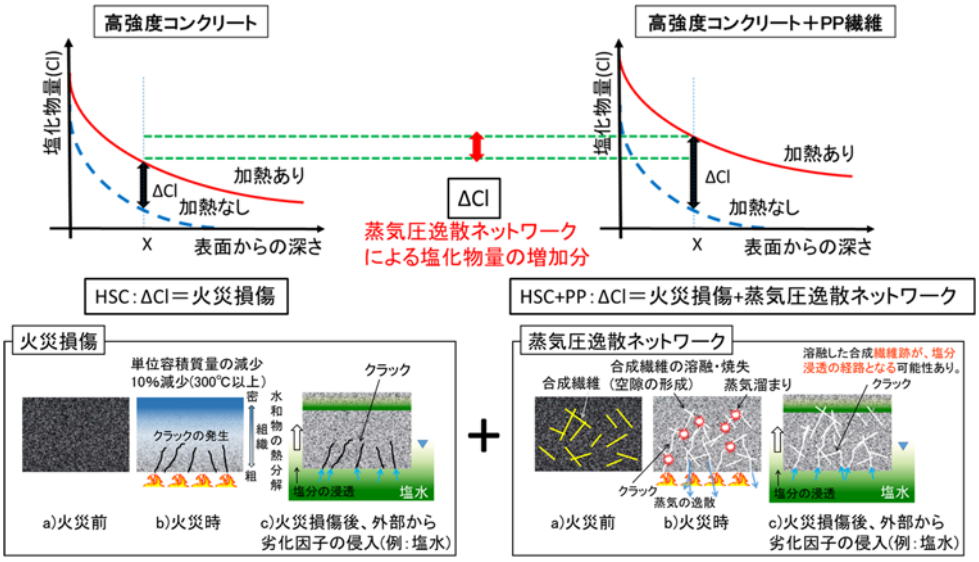
キーワード：高強度コンクリート，ポリプロピレン繊維，物質侵入抵抗性，塩分浸透，見かけの拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物が火災による損傷を受けると耐久性上問題となる。特に高強度コンクリートが高温加熱を受けると，爆裂現象が生じることが知られている[1)]。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）などの合成繊維をコンクリートに添加する方法やコンクリート躯体表面に耐火被覆材を施工する方法がある[2)]。合成繊維をコンクリートに混入する方法は，火災に伴って合成繊維が溶融し，蒸気逸散ネットワークを形成し，水蒸気圧を低減し爆裂を抑制する。しかしながら，コンクリート躯体の損傷は避けられず，火災後の耐久性の低下が懸念される。

また，加熱に伴ってコンクリートのかぶり部分には，微細ひび割れが発生し物質侵入抵抗性低下に繋がる[3)]。微細ひび割れが発生することにより，コンクリート表面から中性化の原因となる酸素や二酸化炭素，塩害の原因となる塩化物イオンなどの劣化因子が侵入し，鉄筋腐食を引き起こす恐れがある。その結果，鉄筋コンクリート部材の耐久性が低下し，部材としての力学性能も低下する可能性があるため物質侵入抵抗性の検討は重要である。しかしながら，火害後の劣化診断では受熱温度と残存強度が主な指標であり，物質侵入抵抗性の検討が十分に行われていないのが現状である。

加えて，前述した PP 繊維を混入することで火災に伴い形成される蒸気逸散ネットワークにより，火災後に外部から劣化因子が侵入しやすくなることが報告されている[4)5)]。**図－1** にそのメカニズムを示す。PP 繊維は 170℃前後で溶融するため，溶融後の空隙が物質侵入抵



図－1　PP 繊維混入による塩化物量増加のメカニズム

*1 群馬大学　工学部　社会環境デザイン工学科　学生　(正会員)
*2 群馬大学大学院理工学府　環境創生部門　准教授　博士(工学)　(正会員)
*3 八戸工業大学大学院工学研究科　社会基盤工学専攻　准教授　博士(工学)　(正会員)
*4 ピーエス三菱(株)　東京土木支店　土木技術部　設計グループ

抗性の低下に影響すると考えられる。

これまで，著者らの研究グループでは火害を受けた高強度コンクリートを対象とした塩分浸透抵抗性の研究を行っている[6)7)]。しかしながら，加熱したコンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数を検討した報告は少ないのが現状である。そこで本研究では，合成繊維を混入した高強度コンクリートの火災劣化後の物質侵入抵抗性の検討を行った。本研究では，コンクリート中への塩化物イオンの浸透を拡散現象と捉え，硬化コンクリート中に含まれる全塩化物イオン量を測定し，Fick の第二法則を用いることによって，表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数を評価した。さらに、算出した見かけの拡散係数を用いて，加熱温度ごとに 500℃まで火害損傷を受けたコンクリートの塩化物浸透解析を行った。なお，火害を受けたコンクリートは受熱温度によってコンクリート内部にひび割れが生じ，拡散ではなく移流になる場合が考えられるが，本研究では簡易的に拡散問題として扱うこととする。

2.研究対象について [7)]

既往の研究により塚越らによって、火害損傷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検討が行われている。すなわち，加熱したコンクリートの塩水浸せき試験を実施し、塩水浸せきしたコンクリートからサンプルを採取し塩化物を電子線マイクロアナライザー（以下、EPMA）によって測定している。本論文では，この結果を用いて，塩化物イオンの見かけの拡散係数を評価する。

2.1 対象コンクリート

対象とした供試体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）の二種類である。PP 繊維の寸法は、繊維長 12mm、繊維径 43μm、密度 0.91g/cm^2 である。供試体の加熱には電気炉を使用した。加熱試験方法は RILEM 試験に準拠し，炉内温度の温度上昇速度は 1℃/min とした。炉内の温度は所定の温度に達した後，1 時間保持した。加熱温度は加熱なし，100，200，300，500℃である。ただし HSC は 200℃加熱，HSC+PP は 500℃加熱の供試体は破損したため除外してある。加熱後，NaCl10%溶液に 1 ヶ月間浸せきした。その後，EPMA により塩化物イオンを評価している。

2.2 塩化物イオン量と供試体深さとの関係

図－2 に HSC と HSC+PP の EPMA 分析の結果を示す。コンター図より，全体の傾向として，加熱温度が上昇するにしたがってコンクリートが損傷し，より深部まで塩化物が浸透していることがわかる。HSC では表面近くの塩化物量が加熱前後で大きな変化はなく 20kg/m^3 前後である。一方，HSC+PP において加熱なしと 100℃加熱では表面付近の塩化物量は 20kg/m^3 前後であるが，200℃加熱や 300℃加熱になると表面付近の塩化物量は 40kg/m^3 近くまで上昇していることがわかる。200℃加熱と 300℃加熱になると PP 繊維の融点（170℃）を超えている。すなわち，PP 繊維の溶融によってコンクリート内部に空隙が生じ，蒸気逸散ネットワークが形成し，爆裂は抑制できるとされているが，この蒸気逸散ネットワークが塩分の侵入経路となり，塩分が内部に侵入したと考えられる。

3. 塩化物イオンの見かけの拡散係数

3.1 拡散方程式による見かけの拡散係数の推定

ここでは，塚越らの結果を用いて見かけの拡散係数を推定した方法について記述する。すなわち，式(1)に示す Fick の第二法則を用いてコンクリート表面の塩化物イオン量 C_0（深さ位置：0mm）およびコンクリートの見かけの拡散係数 D を推定した[6)7)]。式(1)の解を式(2)に示す。式(2)より，塩化物イオンと深さとの関係を用いて，表面からの深さ位置における塩化物量を計算した。コンクリート表面の塩化物イオン量 C_0 の推定は，塩化物量の実測値の分布図において近似曲線を引き，深さ位置 0mm である近似曲線の切片の値とした。見かけの拡散係数 D の推定は，拡散方程式の解よりある深さ位置での塩化物量の実測値を代入し，求められる塩化物量の推定値と実測値の残差平方和が最少となるときの値とした。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right) \tag{1}$$

$$C(x,t) = C_0\left\{1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right\} \tag{2}$$

ここに、

$C(x,t)$：t 年後,深さ x の塩化物イオン量（kg/m^3）

C_0：表面塩化物イオン量（kg/m^3）

x：コンクリート表面からの距離（cm）

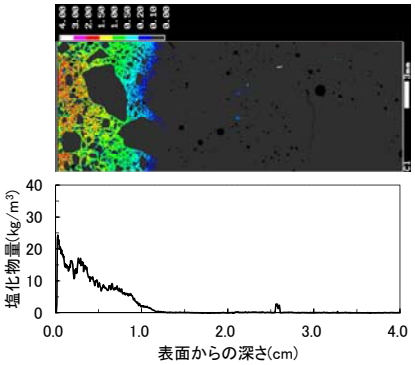
t：経過年数（年）

erf：誤差関数

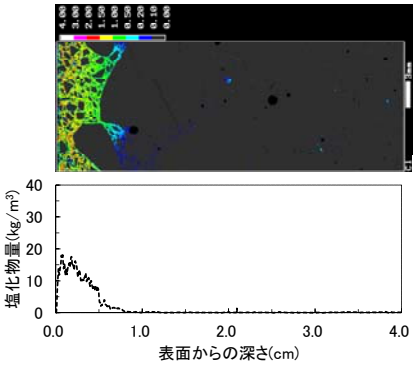
D：拡散係数（cm^2/年）

3.2 計算結果

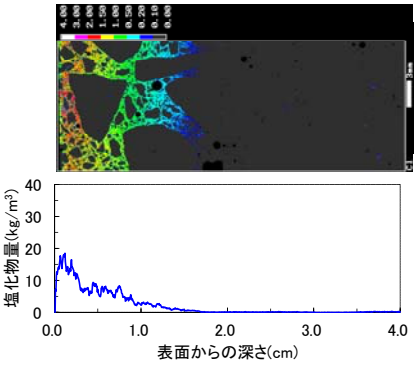
表－1 に見かけの拡散係数と表面塩化物イオン量の推定値を示す。HSC＋PP では，加熱温度が上昇するにつれて表面の塩化物イオン量が上昇していることがわかる。見かけの拡散係数に関して，HSC シリーズにおいて加熱なしでは 0.8cm^2/年であり，100℃加熱で 2.2cm^2/年となった。さらに 300℃および 500℃加熱では 27，69cm^2/年となり非常に大きな値となった。HSC+PP



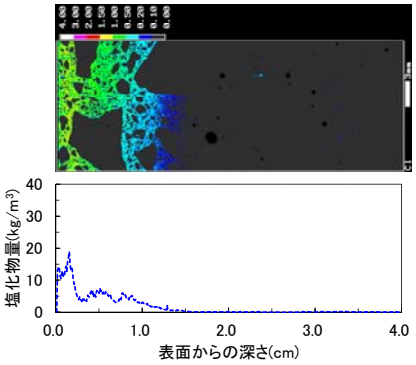
a-1) HSC：加熱なし



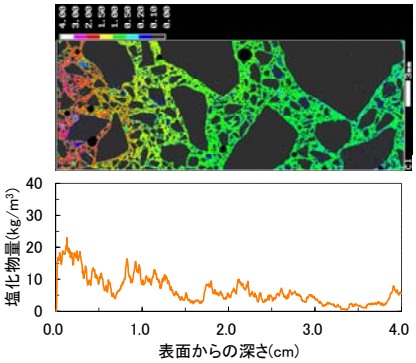
b-1) HSC+PP：加熱なし



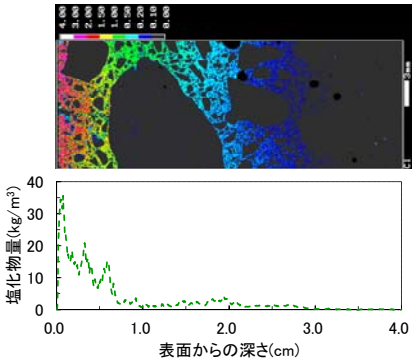
a-2) HSC：100℃加熱



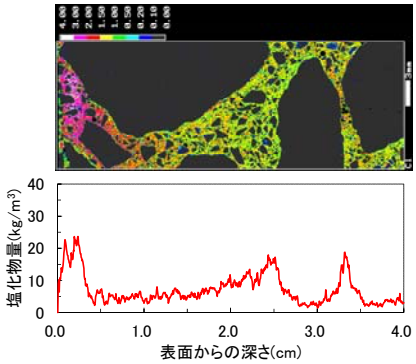
b-2) HSC+PP：100℃加熱



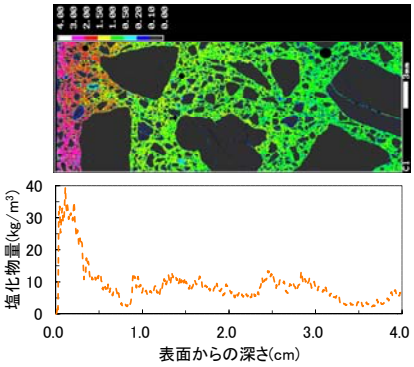
a-3) HSC：300℃加熱



b-3) HSC+PP：200℃加熱



a-4) HSC：500℃加熱



b-4) HSC+PP：300℃加熱

図－2　EPMA 分析結果

表-1　推定された D と C_0

	D (cm²/年)		C_0 (kg/m³)	
	HSC	HSC +PP	HSC	HSC +PP
加熱なし	0.8	1.1	19.5	19.7
100℃	2.2	3.1	20.9	13.5
200℃		4.8		26.1
300℃	27	35	18.6	34.6
500℃	69		21.9	

シリーズでも 200℃加熱では 4.8cm²/年程度であるが，300℃加熱になると 35cm²/年となり，200℃加熱の値と比べて見かけの拡散係数が急激に上昇していることがわかる。これは，加熱温度が 200~300℃でコンクリート内部に微細なひび割れが生じたためだと考えられる。

既往の研究では，コンクリートを海水と同程度の NaCl 濃度 0.5mol/dm³ で浸せきし，見かけの拡散係数を算出した結果がある [10]。すなわち，浸せき期間 28 日の普通強度コンクリート（W/C=55%）の拡散係数は 2.8cm²/年，高強度コンクリート（W/C=30%）で 0.95cm²/年という報告がなされている。

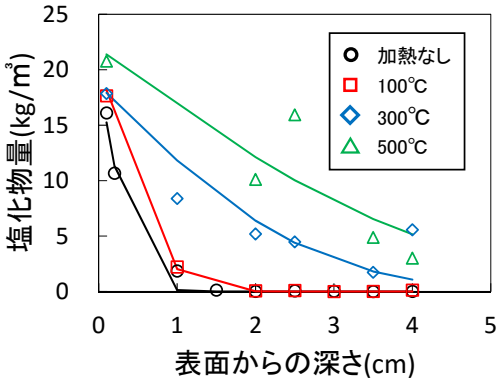
既往の研究の報告と比較すると，今回得られた見かけの拡散係数は加熱前で同程度であるが，加熱によりコンクリートが損傷すると拡散係数が増加することがわかる。

図－3，4 に HSC と HSC+PP の推定によって求めた塩化物イオン量と深さの関係を示す。図中のドット点は実測値，曲線は推定により得られたものである。本研究で行った式(1)，(2)を用いた結果は実測値をよく評価できていると考えられる。また，**図－5** に 100℃加熱と 300℃加熱における HSC と HSC+PP の塩化物イオンの深さ方向の分布を比較したものを示す。

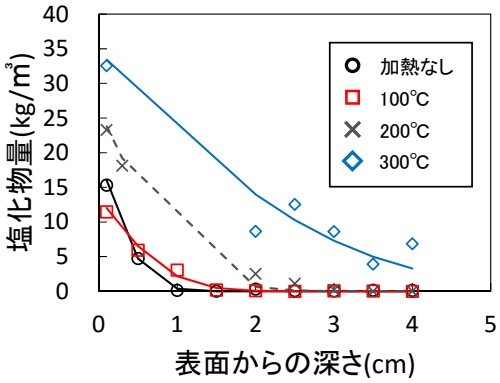
100℃加熱のものは HSC と HSC+PP で差はあまり見られないが，300℃加熱になると HSC より HSC+PP のほうが曲線は上にあり，表面からの深さのいずれの点でも HSC と比較して HSC+PP で多くの塩化物イオンが侵入していることがわかる。

3.3 加熱温度による見かけの拡散係数について

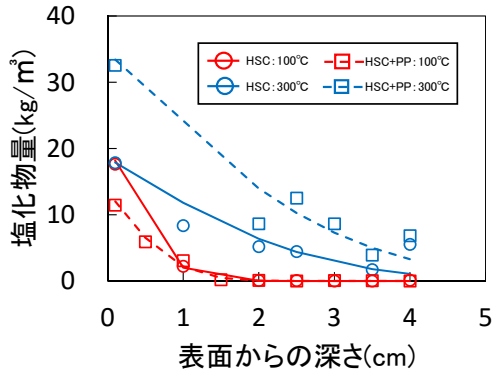
図－6 に HSC および HSC+PP の見かけの拡散係数と温度の関係を示す。推定した見かけの拡散係数より近似曲線を求めた結果，加熱温度が高くなると見かけの拡散係数が大きくなることがわかる。HSC と HSC+PP ともに寄与率 R^2 が 0.9 以上でよい相関を示していることがわかる。HSC+PP の近似曲線から 500℃



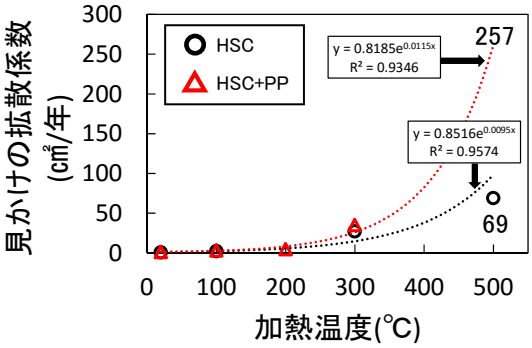
図－3　推定値と実測値との関係（HSC）



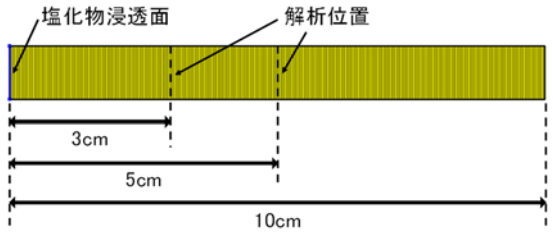
図－4　推定値と実測値との関係（HSC+PP）



図－5　推定値による HSC と HSC+PP の比較



図－6　加熱温度における見かけの拡散係数の分布



図－7　解析モデル

加熱での見かけの拡散係数を算出してみると 257cm²/年という値となった。この結果を HSC の 500℃加熱のものと比較してみると，3.7 倍大きい値となった。HSC+PP シリーズでは，爆裂現象を抑制するために混入した PP 繊維の溶融によって，蒸気逸散ネットワークが形成されるが，火災後は塩化物が浸透しやすくなり，見かけの拡散係数大きくなったと考えられる。

一方で，加熱温度が 500℃以上になると加熱に伴うセメント水和物の熱分解と微細ひび割れが増加し，組織が緩んだことから塩化物の浸透量が増加するという報告がある[4) 5)]。これらに加え，HSC+PP では PP 繊維溶融による蒸気逸散ネットワーク形成により，塩化物が侵入しやすくなる。加熱温度が 500℃以上では拡散現象というより移流現象になっていることが考えられるため，今後検討が必要である。

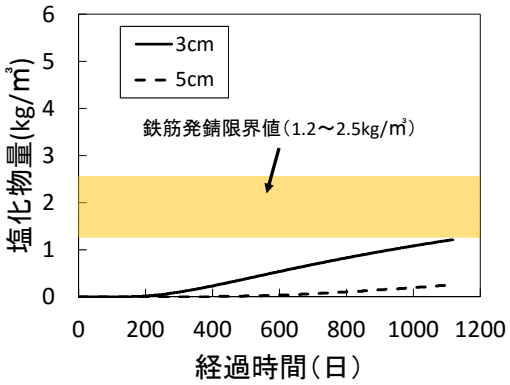
4. 解析

4.1 解析概要

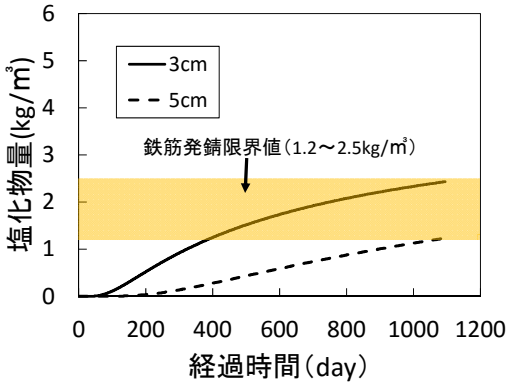
ここでは，火害を受けたコンクリートの耐久性を評価するために推定したコンクリートの見かけの拡散係数を用いて，１次元の塩化物浸透解析を行った。FEM 解析にはコンクリートの温度応力解析ソフト（ASTEA-MACS）を使用した。対象のコンクリートは高強度コンクリートに PP 繊維を混入した HSC＋PP とした。**図－7** に解析モデルを示す。対象モデルは厚みが 10cm とし，火災によって深さ 10cm まで温度が一様になったことを想定した。約 0.24mm で 410 分割とした。塩化物浸透は一面浸透とした。解析に用いた物性値は，各加熱温度の見かけの拡散係数とし 500℃加熱のものは，近似式から求めた。塩分浸透面の固定濃度境界では塩化物イオン濃度は 5kg/m³ とした。解析位置は塩化物イオン浸透面から 3, 5cm 位置とし，加熱なし，100, 300, 500℃の経過時間における塩化物の浸透量を求めた。解析年数は 3 年とした。

4.2 解析結果

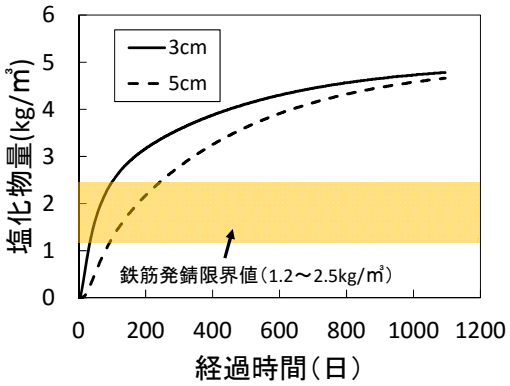
図－8～11 に各温度設定における経過時間 3 年までの塩化物量の経時変化を示す。併せて鉄筋発錆限界値 1.2～2.5kg/m³ の領域を示す。加熱温度が高くなるにつ



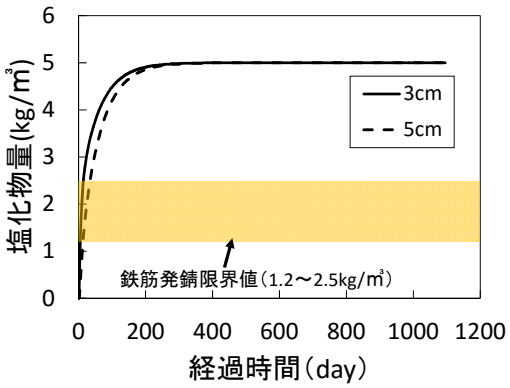
図－8　経過時間での塩化物の浸透量：加熱なし



図－9　経過時間での塩化物の浸透量：100℃



図－10　経過時間での塩化物の浸透量：300℃



図－11　経過時間での塩化物の浸透量：500℃

れて，塩化物が浸透しやすくなることがわかる。特に，加熱温度 300℃以上では，3cm 位置と 5cm 位置の同じ経過時間での塩化物量の差が小さくなっている。300℃加熱は 3，5cm 位置では約 3 年で表面塩化物イオン量に達している。また，500℃加熱では，約 200 日で 5cm 位置の塩化物量が表面塩化物イオン量に到達していることがわかる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 既往の研究結果から，火害劣化後の高強度コンクリートと PP 繊維を添加した高強度コンクリートを対象として塩化物イオンの見かけの拡散係数を推定した。その結果，加熱温度が高くなるほど，見かけの拡散係数は大きくなり，物質侵入抵抗性が低下していることが確認された。

(2) 加熱温度が高くなるほど，コンクリート表面の塩化物イオン濃度の推定値は高くなっている。特に，HSC+PP は表面の塩化物イオン濃度の増加が大きくなった。

(3) 塩化物量と深さの関係において，HSC と HSC+PP の推定値を比較すると，100℃加熱では HSC+PP のほうが HSC に比べると表面付近の値は大きくなったが，1cm 以降は差が見られなかった。300℃加熱になると HSC+PP のほうが HSC に比べると全体的に大きな値をとっており，特に表面付近では顕著である。

(4) 見かけの拡散係数と温度の関係は，加熱温度が高くなると大きくなることがわかった。特に，300℃以上では HSC と HSC+PP の差が大きくなる傾向にある。推定式から，HSC+PP の 500℃での見かけの拡散係数を算出すると，257cm^2/年となり HSC の 500℃加熱のものと比較すると 3.7 倍の大きさである。加熱温度が 500℃では，コンクリート内部の損傷が大きく，組織が疎になると考えられる。加えて，PP 繊維を添加した HSC+PP は，PP 繊維が溶融することでコンクリート内部に空隙が形成され，塩化物が侵入しやすくなると考えらえる。

(5) 推定した見かけの拡散係数を用いて HSC+PP の塩分浸透解析を行った結果，加熱温度が高いほど塩分浸透に必要な時間が短いことがわかった。

(6) 今回の試験、解析結果から、火害損傷を受けることで劣化因子が侵入しやすくなり、健全なものより耐久性の低下が早くなる可能性があることがわかった。

今後の課題として，高温時の見かけの拡散係数の取り扱いを検討する必要があると考えられる。

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。ここに謝意を表する。

参考文献

1) 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
2) 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
3) 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
4) 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
5) 岩本早耶香，迫井裕樹，小澤満津雄，川邊清伸：火害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
6) 小澤満津雄，向井佑真，谷辺徹，麓隆行，小林孝一：火害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
7) 塚越俊，小澤満津雄：火害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
8) 森本悠，桝田佳寛，杉山央，鹿毛忠継：コンクリートへの塩化物浸透挙動に関する長期曝露試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.808-813，2012
9) 鎌田亮太，小澤満津雄，明石孝太，鉄羅健太，谷辺徹：PP 繊維が火害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
10) 三原守弘，松村将充，長坂昌朗，鳥居和之：EPMA によるセメント硬化体の Cl^-の拡散係数と間隙構造の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1023-1028，2007