

# 論文 PP 繊維及び耐火被覆が高温履歴を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性に与える影響

鎌田 亮太\*1・坂本 撰\*2・谷辺 徹\*3・小澤 満津雄\*4

**要旨:** 各種爆裂対策を施したコンクリートにおける火害後の物質侵入抵抗性を塩分浸透抵抗性により評価することを目的として、高強度コンクリートにポリプロピレン繊維の添加および耐火被覆を施し、拘束リング試験を実施した。あわせて、加熱後のコンクリートを 10% の NaCl 溶液に浸漬し、塩分侵入状況を硝酸銀噴霧および蛍光 X 線分析により確認した。耐火被覆を施したコンクリートにおいて、物質侵入抵抗性の低下を抑制する傾向にあった。また、ポリプロピレン繊維を添加したコンクリートにおいて、繊維の熔融により生じる空隙がコンクリート内部での物質侵入抵抗性を低下させている可能性があることが確認された。

**キーワード:** コンクリート, 爆裂, 火災劣化, ポリプロピレン繊維, 耐火被覆, 物質侵入抵抗性

## 1. はじめに

コンクリートは火災などで急激に高温に曝された場合に爆裂現象を生じることがある。この爆裂は、コンクリートの強度が大きい場合や含水率が高いほど生じやすいとされている<sup>1)</sup>。

高温時の爆裂現象や熱損傷を抑制する方法としては、ポリプロピレン (PP) 繊維などを添加する方法と耐火被覆材を設置する方法が一般的である<sup>1)</sup>。PP 繊維を添加する方法は、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、高温時の爆裂を必ずしも防止できる訳ではない。また、PP 繊維を添加したコンクリートは火災による熱を直接受けるため、コンクリートは損傷し、損傷の程度によっては強度低下やコンクリートと鉄筋の間ではく離が生じるため、補修補強が必要となる<sup>2)</sup>。

一方、火害を受けたコンクリートは損傷し、多数の微細なひび割れが発生する。その結果、火害後のコンクリートの物質侵入抵抗性は低下し、内部の鉄筋が腐食する危険性が高まる。また、PP 繊維混入型コンクリートは、PP 繊維の熔融により空隙が生じることが、物質侵入抵抗性の低下につながる事が報告されている<sup>3),4)</sup>。

そこで、本報告では火害を受けたコンクリートの熱劣化状況に着目し、PP 繊維添加の有無、耐火被覆材設置の有無を考慮した供試体を作製し、筆者らが提案した拘束リング試験法<sup>5)</sup>を用いて、爆裂抑制効果を確認するとともに、火害後の物質侵入抵抗性を評価することとした。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験フロー

本研究の実験フローを図-1 に示す。

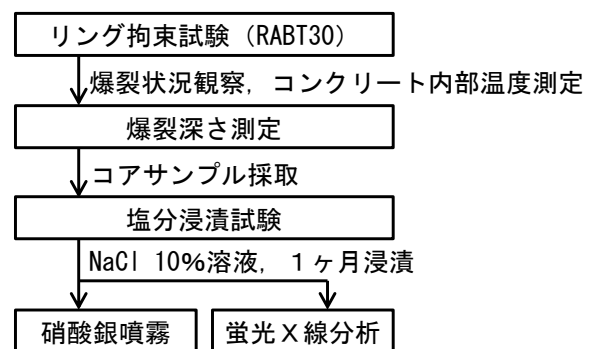


図-1 実験フロー

各種爆裂対策を施したコンクリートを対象に加熱試験を行い、爆裂深さを測定後、湿式にてコアサンプルを採取した。コアサンプルは塩水に浸漬し、硝酸銀噴霧および蛍光 X 線分析により塩分浸透抵抗性を評価した。

### 2.2 供試体

図-2 に本研究で用いた拘束リング供試体の概要を示す。鋼製リングにコンクリートを充填して供試体とした。鋼製リング (外径 300×高さ 50×厚さ 8mm) を 2 段重ねにして拘束リング (外径 300×高さ 100×厚さ 8mm) とした。なお、各供試体は、1 条件につき 2 体作製した。

### 2.3 コンクリート

粗骨材は輝緑凝灰岩、石灰岩の 2 種類とし、コンクリートの耐火対策は無対策 (AG, AL), PP 繊維の添加 (AGP, ALP), 耐火被覆材の設置 (AGFP, ALFP) の 3 種類とした。表-1, 2 にコンクリートの配合表および使用材料を示す。また、表-3, 4 にコンクリートのフレッシュ性状と強度特性および含水率を示す。強度試験は φ 100×200mm, 含水率試験には φ 50×100mm の円柱供試体を用

\*1 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 修士 (正会員)

\*2 太平洋マテリアル (株) 関東支店

\*3 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 博士 (工学) (正会員)

\*4 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

いた。なお、強度試験および含水率試験用供試体は鋼製型枠に充填した状態で、拘束リング供試体と同様に、試験に供するまで20℃の湿布養生とした。

## 2.4 耐火被覆材

耐火被覆材は実際の施工仕様と同様にはく落防止用のステンレスメッシュをコンクリート加熱面に設置し、SBR モルタルプライマーにて下地処理をした後、湿式吹付け耐火被覆材を厚さ30mmにて施工した。施工面積は□200mmの面積とした。耐火被覆材の施工仕様と一般特性を表-5に示す。

## 2.5 加熱試験

加熱試験における加熱曲線は、加熱速度が速いドイツ規格のRABT30加熱曲線を用いることとした。5分間で1200℃まで昇温し、1200℃の保持時間は25分とした。加熱時におけるコンクリート温度測定として、中央部に温度計測用の熱電対を高さ5、10、25、40、75、100mmの6箇所に設置し、温度を測定した。

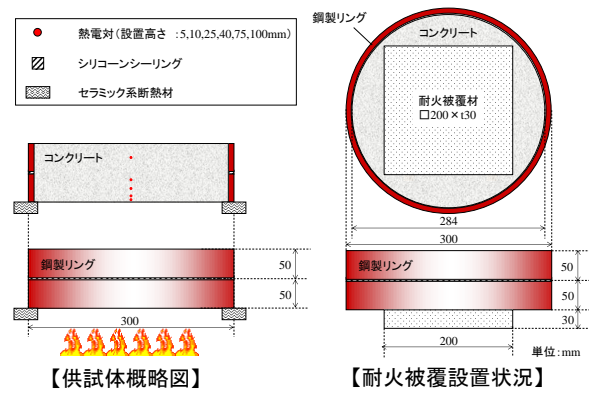


図-2 供試体概要

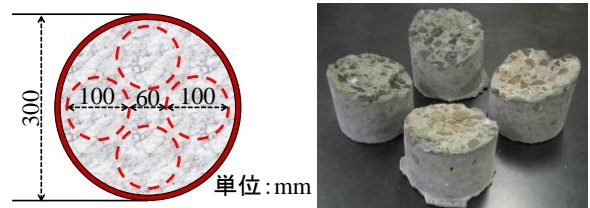


図-3 コア採取箇所 写真-1 コアサンプル状況

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
		水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G1	粗骨材 G2	高性能減水剤 SP	PP 繊維 PPF
AG	0.3	150	500	358	372	1169	-	9.5	-
AGP	0.3	150	500	358	372	1169	-	10.5	1.82
AL	0.3	150	500	358	372	-	1095	7.5	-
ALP	0.3	150	500	358	372	-	1095	10.0	1.82

表-2 使用材料

記号	詳細
C	早強ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm <sup>3</sup> )
S1	細目砕砂 (吸水率 1.06%, 絶乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> )
S2	砕砂 (吸水率 1.93%, 絶乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> )
G1	砕石 2005 輝緑凝灰岩 (吸水率 0.94%, 絶乾密度 2.83g/cm <sup>3</sup> )
G2	石灰岩 (吸水率 0.81%, 絶乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> )
SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤
PPF	ポリプロピレン繊維 (繊維長 12mm, 繊維径 43μ, 密度 0.91g/m <sup>3</sup> )

表-3 コンクリートのフレッシュ特性

記号	Air (%)	SL (cm)	Tc (°C)
AG	0.9	17.5	25.8
AGP	0.8	20.0	27.5
AL	1.1	16.0	26.0
ALP	0.9	20.0	26.4

表-4 コンクリートの硬化体特性

記号	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	含水率 (%)
AG	93.3	58.6	17.5	3.1
AGP	102.9	52.6	20.0	3.3
AL	94.8	50.1	16.0	3.2
ALP	87.5	52.4	20.0	3.4

表-5 耐火被覆材の施工仕様と一般特性

項目	詳細
耐火被覆材概要	種類 : 湿式吹付け耐火被覆材 (バーミキュライト配合軽量モルタル)
施工仕様	施工厚み : 30mm 施工面積 : 200×200mm はく落防止 : ステンレスメッシュ (線径 : 1.6mm, @50mm) 下地処理 : SBR モルタルプライマー塗布
特性	圧縮強度 : 1.5MPa 以上 絶乾密度 : 0.55~0.85t/m <sup>3</sup> 比熱 : 0.97KJ/(kg・K) 熱伝導率 : 0.14~0.30W/(m・K) 含水率 : 6.0% (気乾状態) ガス有害性 : 有害性なし

## 2.6 爆裂状況

コンクリートの爆裂状況（開始時間，終了時間）を確認するため，試験炉の観察用窓から飛散物を目視にて観察した。また，コンクリートの爆裂規模を評価するため，加熱試験後に供試体の加熱表面からの欠損深さ（爆裂深さ）を20mm間隔で測定した。

## 2.7 塩水浸漬

塩水浸漬は，爆裂深さを測定した供試体において，図-3に示す箇所より，径100mmのコアサンプルを4本採取した（写真-1参照）。なお，耐火被覆材を設置した供試体においては，耐火被覆を除去した後にサンプル採取を行った。採取したサンプルは絶乾状態とした後，加熱面の1面のみを残し，エポキシ樹脂接着剤で被覆した。その後，温度20℃の塩水（NaCl濃度10%）が入った容器の中に，1ヶ月間浸漬させた後に3日間空气中養生を行った。

## 2.8 硝酸銀噴霧試験

塩水浸漬後，コアサンプルの割裂試験を行い，破断面に硝酸銀（0.1mol/L）を噴霧し，白色に変化した状況から塩分侵入状況を目視にて確認した<sup>6)</sup>。

## 2.9 蛍光X線分析

硝酸銀噴霧後に，コアサンプル内部の塩分侵入状況を確認するため，各コアサンプルより卓上ボール盤（ドリル口径6mm）にて削孔粉を採取し，蛍光X線分析<sup>7)</sup>にて塩化物量Cl<sup>-</sup>の測定を行った。なお，削孔粉の採取位置は以下のとおりである。爆裂を生じた供試体は，供試体断面の中央付近で爆裂面から10，30，50mmとし（図-4参照），爆裂を生じなかった供試体は，加熱面から10，30，50mmとした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 加熱試験結果

コンクリート温度の測定結果を図-5に示す。耐火被覆を未設置とした供試体において，経過時間4分以降，深さ方向に徐々に急激な温度上昇が確認された。これは，温度上昇時に各深さまで爆裂が到達しているためと推察される。また，各深さにおける爆裂発生温度は，PP繊維の添加および骨材種類に係らず，200℃程度であることが確認された。これに対し，耐火被覆材を設置した供試体は，耐火被覆材の断熱効果により急激な温度上昇は見られなかった。

### 3.2 爆裂状況観察結果

表-6に爆裂観察結果，図-6～9および写真-2，3に爆裂深さ分布と爆裂状況を示す。石灰岩を用いた供試体において，爆裂規模が大きくなる傾向を示し，最も爆裂規模が大きかった水準（AL）は，最大深さ74mmの爆裂が発生した。また，PP繊維の添加により，爆裂規模は抑制されたが，完全に爆裂を防止することはできなかった。

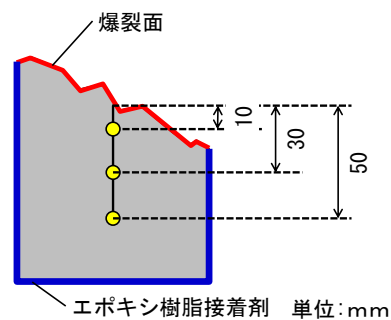


図-4 削孔粉採取箇所

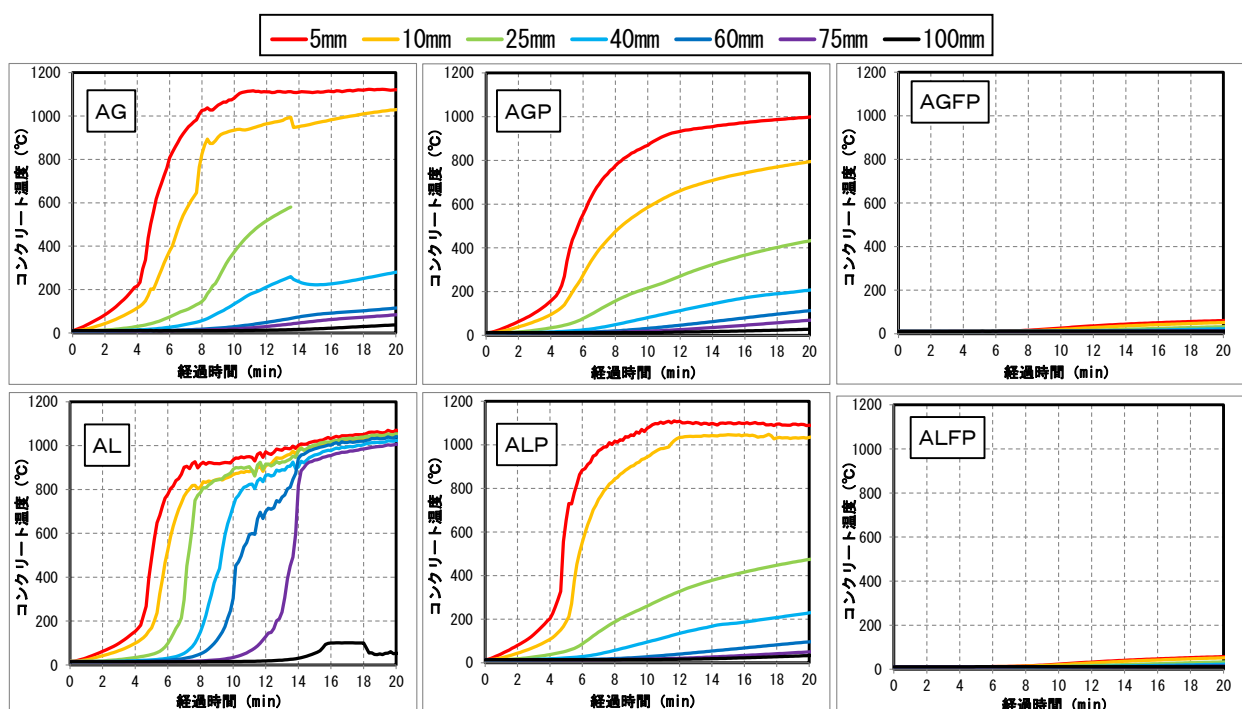


図-5 コンクリート温度

表-6 爆裂観察結果

項目	AG	AL	AGP	ALP	AGFP	ALFP
開始時間(min)	3.1	3.6	3.7	3.9	-	-
終了時間(min)	9.0	14.4	5.1	5.3	-	-
継続時間(min)	5.9	10.8	1.3	1.4	-	-
最大深さ(mm)	33	74	13	16	0	0
平均深さ(mm)	9	29	3	5	0	0

なお、耐火被覆材を設置した供試体においては、石灰岩を用いた場合でも爆裂は全く認められなかった。

### 3.3 硝酸銀噴霧試験結果

硝酸銀噴霧後の供試体写真を図-10 に示す。耐火被覆材を設置していない供試体 (AG, AL, AGP, ALP) においては、PP 繊維添加の有無に係らず、割裂面全体に発色が確認され、コンクリート内部にまで塩化物が侵入していることが確認された。耐火被覆材を設置した供試体 (AGFP, ALFP) においては、側面にエポキシ樹脂接着剤を塗布しても、塩水が浸漬したため、断面中央部の浸透深さにて評価した。その結果、加熱面から 30~35mm の範囲に発色が確認された。このことより、耐火被覆材の設置によりコンクリートの受熱温度が低減されることで、加熱に伴うコンクリートの微細なひび割れが生じにくくなり、物質侵入抵抗性の低下を抑制している可能性があることが確認された。

### 3.4 蛍光 X 線分析結果

蛍光 X 線分析装置による定量分析結果を爆裂深さと併せて図-11~13 に示す。なお、爆裂深さはコア採取箇所における爆裂深さとしている。これより、爆裂面から等距離における塩化物量に差が生じ、爆裂深さが 10mm 程度である供試体 AG において、爆裂面から 10mm 位置の塩化物量が 1.38wt% と最も高い値を示した。一方、同じ輝緑凝灰岩を使用し、PP 繊維を添加した供試体 AGP においては、爆裂面から 10mm 位置の塩化物量が 0.91wt% であった。なお、耐火被覆材を設置した供試体 AGFP, ALFP は加熱面から 10mm 位置の塩化物量が約 0.30wt% と低い値を示した。これより、爆裂面から同位置における塩化物量に差が生じていることを確認した。

ここで、コンクリート内部の各深さ位置に設置した熱電対により計測した最高受熱温度を図-14 に示す。これより、耐火被覆材を設置しない供試体においては、PP 繊維の添加、骨材種類、爆裂規模に係らず加熱面からの深さ方向の最高受熱温度はほぼ同様の傾向を示し、加熱面より 20mm 位置で 600℃程度、非加熱面も PP 繊維の融点である 170℃以上の受熱温度であった。これに対し、耐火被覆材を設置した供試体においては、5mm 位置で 100℃程度、非加熱面で 50℃程度の受熱温度であった。

更に図-14 より得られた回帰式より蛍光 X 線分析用サンプル採取箇所における最高受熱温度を推定した。最高受熱温度と塩化物量の関係を表-7 および図-15, 16 に示す。PP 繊維を添加した供試体 (AGP, ALP) は、最高受熱温度の範囲が 336~743℃であり、供試体全体の受

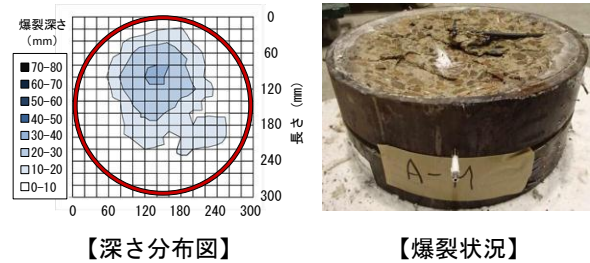


図-6 爆裂深さ (AG)

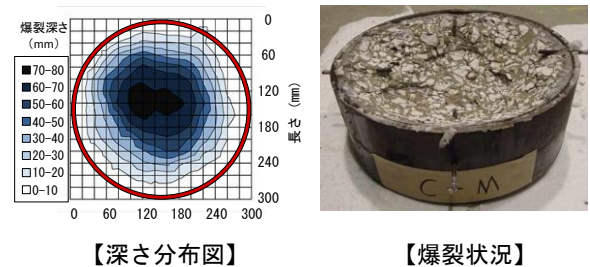


図-7 爆裂深さ (AL)

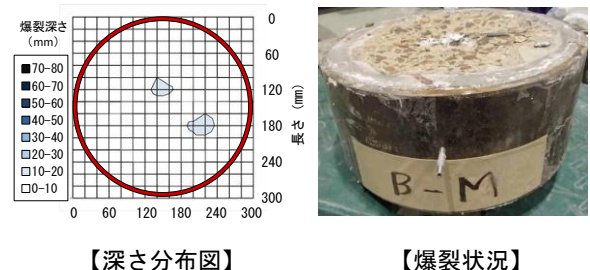


図-8 爆裂深さ (AGP)

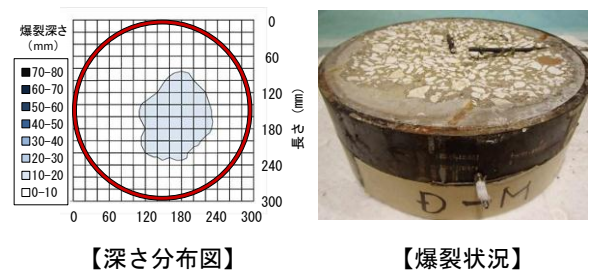


図-9 爆裂深さ (ALP)



写真-2 爆裂状況 (AGFP)



写真-3 爆裂状況 (ALFP)

熱温度も大きい。塩化物量の範囲は 0.42~0.91wt%であった。耐火被覆材を設置した供試体 (AGFP, ALFP) は、最高受熱温度の範囲が 72~100°Cであり、塩化物量の範囲は 0.07~0.38wt%であった。

以上より、PP 繊維を添加した供試体の受熱温度範囲と塩化物量は耐火被覆材を設置した供試体と比較すると大きい傾向にある。これは、耐火被覆材の設置により、受熱温度が抑制されることで、加熱に伴うコンクリートの微細なひび割れが生じにくくなり、火害後の物質侵入抵抗性を確保できる効果があることを示すものである。一方、PP 繊維を添加した供試体は PP 繊維を無添加とした供試体と比較すると、爆裂抑制効果は確認できるが、火害後における物質侵入抵抗性低下の可能性があるため、補修を検討する必要がある。通常、火害診断においては、残存強度と中性化が主な指標となっているが<sup>2)</sup>、塩分侵入抵抗性を含めた物質侵入抵抗性についても、検討が必要であることを示すものである。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) PP 繊維の添加により、爆裂は抑制されたが、完全に爆裂を防止することはできなかった。また、最高受熱温度はコンクリートの深部にわたって、PP 繊維の融点である 170°C以上であった。
- (2) 耐火被覆材を設置した供試体においては、十分に爆裂を防止しているとともに、コンクリートの温度上昇も抑制していることで、熱劣化も防止し、耐久性の面からも火害を受けても性能を確保できると考えられる。
- (3) コンクリートの最高受熱温度と火害後の物質侵入抵抗性を評価した結果、耐火被覆材を設置した供試体においては、最高受熱温度が低く、物質侵入抵抗性の低下を抑制する傾向にあった。
- (4) PP 繊維を添加した水準においては、非加熱面においても、最高受熱温度が PP 繊維の融点である 170°C以上となり、PP 繊維の熔融により生じる空隙がコンクリート内部での物質侵入抵抗性を低下させている可能性があることが確認された。

#### 謝辞

本研究は、平成 23 年度鹿島学術振興財団の研究助成ならびに平成 23 年度科学技術研究補助金基盤研究(C)研究課題番号：25420459 (代表：小澤満津雄) を受けた。ここに謝意を表する。

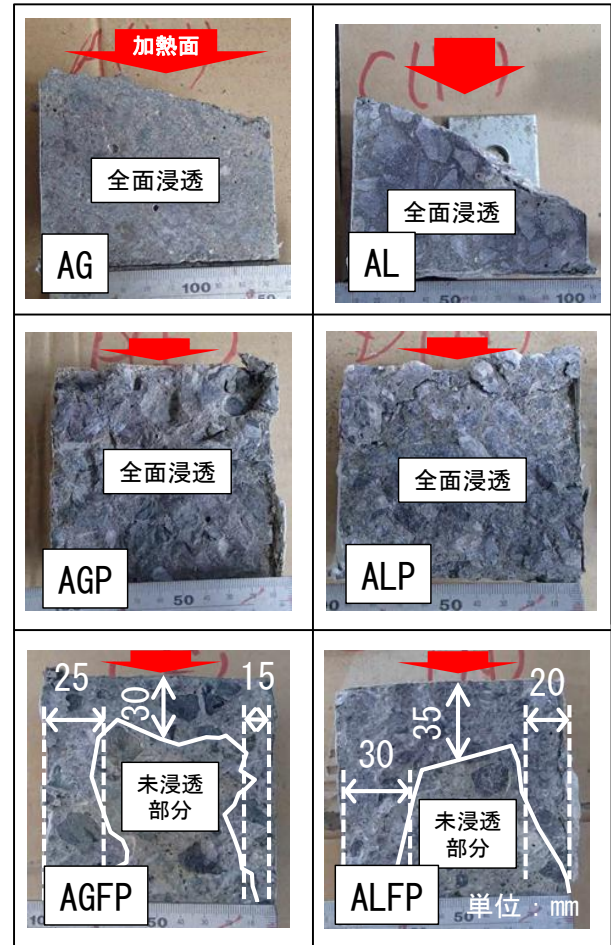


図-10 硝酸銀噴霧後供試体状況

表-7 最高受熱温度と塩化物量の関係

	最高受熱温度と塩化物量の関係		
	加熱面からの深さ (mm)	最高受熱温度 (°C)	塩化物量 (wt%)
AG	21	755.8	1.38
	41	641.8	0.61
	61	312.0	0.42
AL	55	348.6	0.63
	75	244.1	0.68
	95	189.9	0.50
AGP	12	743.8	0.91
	32	531.1	0.66
	52	368.7	0.64
ALP	17	685.9	0.60
	37	485.8	0.42
	57	335.9	0.57
AGFP	10	99.8	0.27
	30	84.7	0.38
ALFP	10	99.8	0.33
	30	84.7	0.21

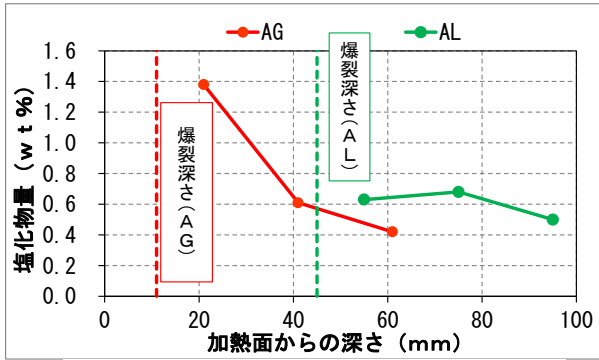


図-11 蛍光 X 線分析結果 (AG, AL)

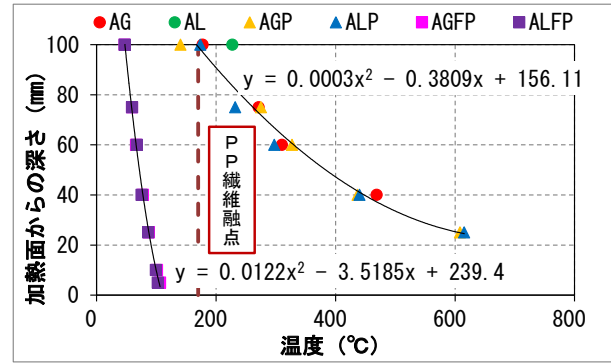


図-14 コンクリート内部の最高受熱温度

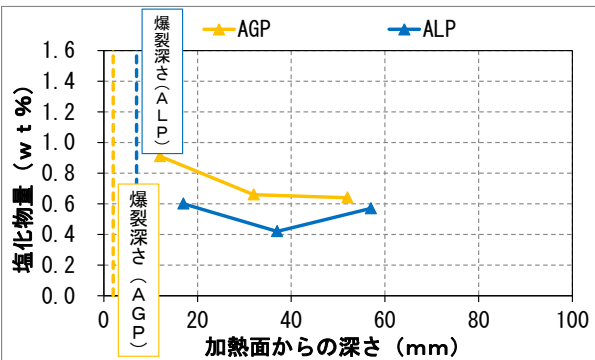


図-12 蛍光 X 線分析結果 (AGP, ALP)

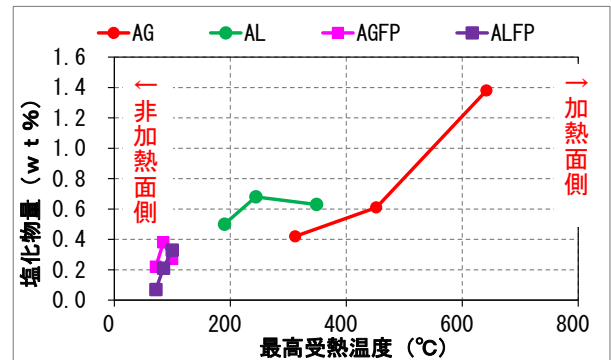


図-15 最高受熱温度と塩化物量の関係  
(AG, AL, AGFP, ALFP)

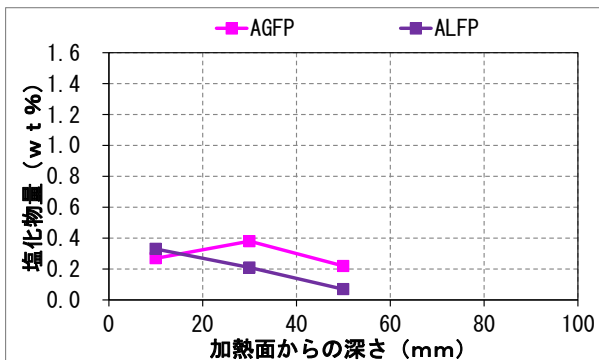


図-13 蛍光 X 線分析結果 (AGFP, ALFP)

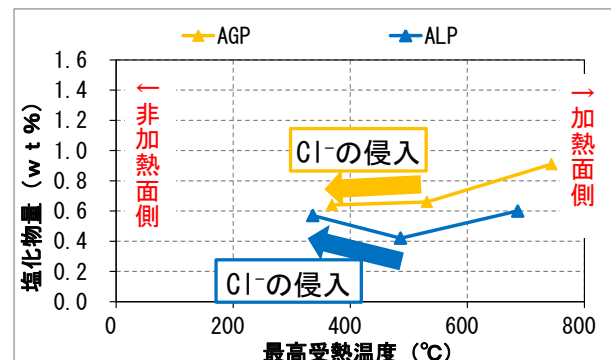


図-16 最高受熱温度と塩化物量の関係  
(AGP, ALP)

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本建築学会：建物の火害診断及び補修・補強方法，pp.13-15，2004
- 3) 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

- 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.1，114-117，2014
- 6) Otsuki et al：Evaluation of AgNO<sub>3</sub> Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials，ACI Materials Journal，No.84，pp.587-592，Nov.1992
- 7) 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.1，2007