

論文 高温加熱された鉄筋コンクリート部材の物質侵入抵抗性と内部鉄筋の腐食状況

六本木 日菜子*1・小澤 満津雄*2・鉄羅 健太*3・杉野 雄亮*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、加熱後のコンクリートに含浸材を塗布し、塩水に浸漬した。その後、塩水浸せき後の供試体の塩化物イオン濃度により物質侵入抵抗性の評価を行った。加えて、塩水浸せき後に一年間屋外暴露を実施した供試体の鉄筋腐食量を確認した。その結果、含浸材無塗布と比較して含浸材塗布量を多くすることで塩化物イオン量と鉄筋腐食量の抑制効果がみられた。

キーワード: 火害、高強度コンクリート、物質侵入抵抗性、けい酸塩系表面含浸材、鉄筋腐食量

1.はじめに

コンクリート構造物が火災などの高温環境に曝されることによって、かぶり部分が損傷し耐久性が低下することが懸念される¹⁾。加熱によってコンクリート表面から温度が上昇し、微細ひび割れの発生やセメント水和生成物の分解が生じる危険性がある。このように火害を受けたコンクリートかぶりのバリア機能が低下することが予想される。さらに、バリア機能の低下に伴い、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、塩害の原因である塩化物イオンなどの劣化因子が侵入し、鉄筋腐食が発生する危険性がある。このように、バリア機能の低下が耐久性の低下につながる危険性があるため、物質侵入抵抗性の検討は重要であると考えられる。また、高強度コンクリートが高温に曝された場合は、爆裂現象を生じる危険性がある²⁾。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がある³⁾。コンクリート中の繊維が加熱によって熔融し、蒸気逸散ネットワークを形成することで、爆裂発生要因の一つである水蒸気圧を低減することで爆裂を抑制する。しかしながら、爆裂抑制のために混入した繊維の熔融による蒸気逸散ネットワークによって、外部から酸素や二酸化炭素、塩化物イオンなどの劣化因子が侵入しやすくなり、物質侵入抵抗性が低下することが報告されている⁴⁾。PP繊維は170℃で熔融し、熔融後に空隙が生じることが物質侵入抵抗性に影響していると考えられる。しかしながら、現在の火害後の劣化診断は受熱温度や残存強度が主な手法であり⁵⁾、耐久性の評価として物質侵入抵抗性による評価が十分に行われてい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。

これまで著者らの研究グループでは火害を受けたコ

ンクリートの物質侵入抵抗性の研究を行っている⁶⁾。しかしながら、火害後のコンクリートの物質侵入抵抗性とその後の鉄筋腐食量の関係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、火害を受けたPP繊維添加型コンクリートの物質侵入抵抗性の低下をケイ酸塩系表面含浸材の塗布により抑制することが可能か検討を行った。すなわち、含浸材を塗布した火害を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性を塩化物浸透深さと塩化物イオン濃度で評価を行った。また、岩本らは500℃加熱までの含浸材による補修効果を検討している⁴⁾。だが、500℃加熱では含浸材による補修効果がみられなかったため、本研究は300℃加熱までの含浸材による補修効果を検討する。さらに、1年間の屋外暴露試験を実施し、塩水浸せき試験後の火害を受けたコンクリートの鉄筋腐食量を確認を行った。

2.研究対象について⁷⁾⁸⁾

既往の研究では鎌田ら⁷⁾、山本ら⁸⁾によって、けい酸塩系表面含浸材が火害を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性に与える影響の検討が行われている。すなわち、加熱試験を行ったコンクリートに含浸材を塗布し塩水浸せき試験を実施した。塩水浸せき後、硝酸銀噴霧による塩化物浸透深さとコンクリートからサンプルを採取し、塩化物イオン濃度を簡易塩化物量測定方法によって求めている。本論文では、この結果を用いて同様に作成され1年間屋外暴露試験を実施した鉄筋コンクリート供試体の腐食量を計測し、物質侵入抵抗性と含浸材塗布量との関係の評価を行った。

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(以下、HSC)とHSCにPP繊維を0.2%vol混入した高強度コンクリ

*1 群馬大学 理工学部 環境創生理工学科 (学生会員)

*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 群馬大学大学院 理工学府環境創生部門 (学生会員)

*4 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 修士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

	W/C	単位量 (kg/m ³)						PP 繊維
		水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤	
		W	C	S1	S2	G	A	
HSC	0.32	170	532	598	253	858	6.92	-
HSC+PP								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 ³)
S1	栃木県佐野市中町砕砂：砂岩 (表乾密度:2.62g/cm ³)
S2	栃木県佐野市仙波町砕砂：石灰岩 (表乾密度:2.64g/cm ³)
G	群馬県みどり市大間々町碎石：輝緑凝灰岩 (表乾密度:2.64g/cm ³)
A	高性能 AE 減水剤 フローリック SF500H (密度:1.02~1.10g/cm ³)
PP	ポリプロピレン繊維 (繊維長:12mm, 繊維径:50μm, 密度:0.91g/cm ³)

表-3 フレッシュ性状と力学特性

	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	温度 (°C)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	含水率 (%)
HSC	-	54.3	25.9	4.2	76.9	44.2	4.1
HSC+PP	19	-	23.7	3.7	79.0	44.7	3.0

ト (以下, HSC+PP) の二種類とした。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 に示す。供試体は H100×W100×L380mm の角柱供試体として, 3 か月間の湿布養生後に加熱試験を実施した。さらに屋外暴露試験用に鉄筋有りの供試体を作成した。使用した鉄筋は D13 で, かぶりは 50mm とした。設計基準強度は 60N/mm² であり, JIS 認定工場のレディーミクストコンクリートを使用した。表-2 に使用材料を示す。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。表-3 にコンクリートのフレッシュ性状と強度特性を示す。材齢 84 日の圧縮強度は, HSC が 76.9N/mm², HSC+PP が 79.0N/mm² であった。含水率測定用供試体は材齢 90 日 (加熱試験開始材齢) で, 105°C の乾燥炉内で 24h 乾燥させた。

2.2 加熱試験

本研究では, 供試体の含水率の差が物質侵入抵抗性に影響を与えると考え, 105°C 加熱により自由水および結合水を除去し, 基準供試体とした。コンクリートの加熱には乾燥炉及び電気炉を用い, 炉内温度と供試体中央部に設置した熱電対により供試体内部の中心温度も確認した。105°C 加熱では, 予備試験において爆裂が発生しないと判断し, 105°C に設定した乾燥炉に直接供試体を設置した。なお, 供試体全体を同一温度にするため, 8 日間炉内に設置した。200, 300°C 加熱においては, 急激な温度変化

によって爆裂が生じる可能性があった。そのため, 温度上昇速度は 1°C/min とし, 炉内温度が所定の温度に達した後, 5hr 保持し, その後自然冷却させた。加熱面は角柱供試体の長手方向の側面 4 面とした。加熱試験に用いた供試体は角柱供試体の鉄筋有りと無しとの 2 種類とした。

2.3 含浸材塗布

供試体加熱後, 乾式コンクリートカッターにて角柱供試体を 4 等分し, 加熱面一面 (型枠面) 以外をエポキシ樹脂にてコーティングを行った。含浸材は, 固化型ケイ酸塩系表面含浸材 (けい酸リチウム濃度 10%) を使用した。含浸材の塗布は, エポキシ樹脂を塗布していない 1 面に塗布量 0, 150, 300, 450g/m² で行い (n=2), 含浸材を浸透させるため, 塗布後に 7 日間の気中養生を行った。

2.4 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験は JSCE-572-2013⁹⁾ に準拠し NaCl 濃度 10% 溶液に 14 日間浸せきを行った。なお, 塩分浸透はエポキシ樹脂の塗布されてない加熱面の一面のみとした。

2.5 硝酸銀噴霧試験

塩水浸せき試験後, 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。塩化銀の生成した部分の発色状況より, 塩化物浸透深さの測定を行った。なお, 塩化物浸透深さの測定は, 供試体の割裂面の中心及び中心から 25mm 離れた位置の片面 3 箇所の塩化物浸透深さを測定し, 塩化物浸透深さはその平均値とした。

2.6 塩化物イオン濃度測定

硝酸銀噴霧後の供試体内部の塩分浸透状況を確認するため、塩化物イオン濃度の測定を行った。割裂後の供試体より卓上ボール盤にて削孔粉を採取した。削孔粉の採取箇所は、含浸材塗布面から10, 30, 50, 70, 90mm位置とし、粗骨材を避けて割裂面から数か所から採取した。なお、塩化物イオン濃度は2回の測定の平均値とした。

2.7 屋外暴露試験

塩水浸せき後の鉄筋有りの供試体において屋外暴露試験を実施した。場所は、千葉県佐倉市で約年間実施した。試験実施の様子を写真-1に示す。

2.8 鉄筋腐食量測定¹⁰⁾

屋外暴露試験後の鉄筋有りの供試体から鉄筋を取り出し、10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に浸せきし、錆の除去を行った。除去後の重量と理論上の腐食前の重量から鉄筋腐食量を算出した。なお、鉄筋の黒皮部分の補正を行うために、健全な鉄筋を用いて同様の方法で質

量の測定を行い、腐食減少量からこの値を差し引いて測定値とした。

3.実験結果

3.1 加熱試験

105℃加熱の供試体内部温度の HSC, HSC+PP の中心部の最高温度はそれぞれ、89.7℃, 96.3℃であった。200℃加熱では HSC が 223.7℃, HSC+PP が 204.4℃であった。300℃加熱では HSC が 312.1℃, HSC+PP が 304.7℃であった。詳細は、鎌田ら⁷⁾によりまとめている。

3.2 塩化物イオン濃度と供試体深さの関係

図-1, 2に簡易塩化物量計測試験により計測した含浸材塗布量による塩化物イオン濃度と供試体深さの関係を示す。加熱温度の上昇に伴い、供試体表面付近において塩化物イオン濃度が高くなる傾向が確認できた。加熱による損傷によって、微細ひび割れの発生やセメント水和生成物の分解により塩化物イオンが供試体内部まで侵入しやすくなったためであると考えられる。今回の試験結果では、200℃加熱において HSC と HSC+PP に大きな差異は見られず、PP 繊維の熔融による影響が確認できなかった。この点は、今後の検討課題としたい。一方、300℃加熱における塩化物イオン濃度は表面付近から10mm位置において HSC では 9.2kg/m³, HSC+PP では 13.0kg/m³ という結果となった。このように HSC と比べて HSC+PP のほうが表面付近の塩化物イオン濃度で高い値を示している。これは、加熱による損傷に加え、PP 繊維が約 170℃



写真-1 屋外暴露試験の様子 (千葉県)

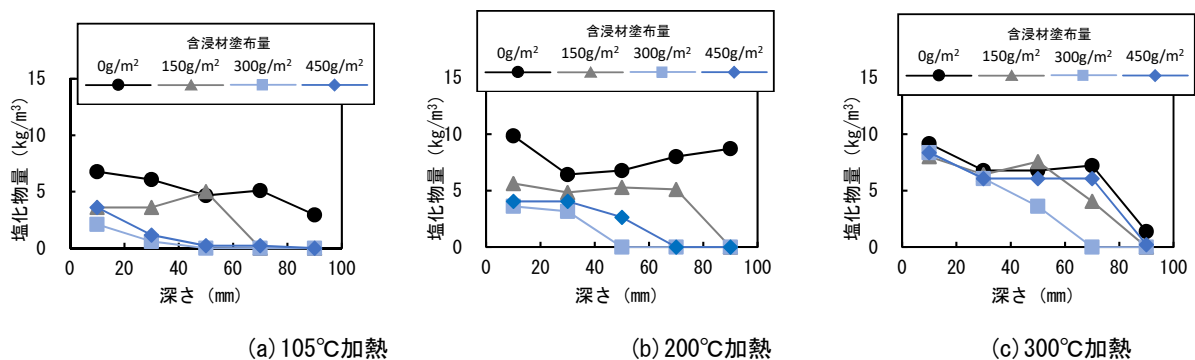


図-1 塩化物イオン濃度と供試体深さとの関係 (HSC)

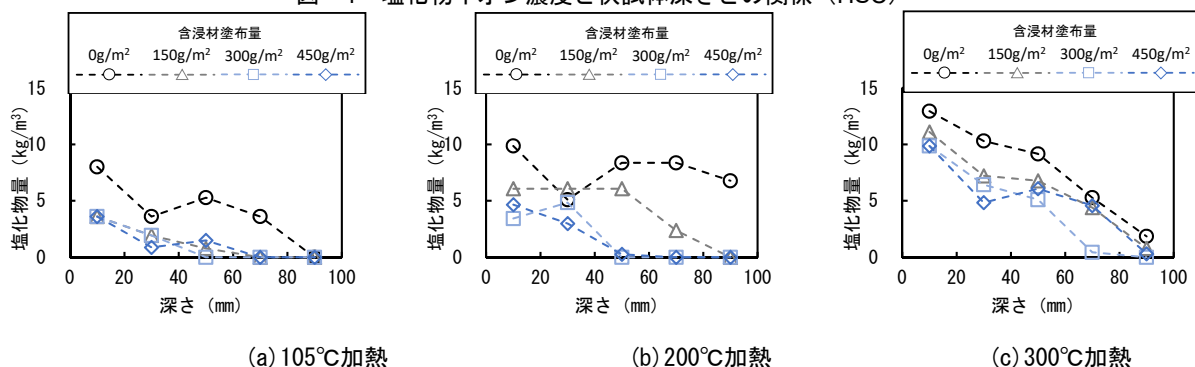


図-2 塩化物イオン濃度と供試体深さとの関係 (HSC+PP)

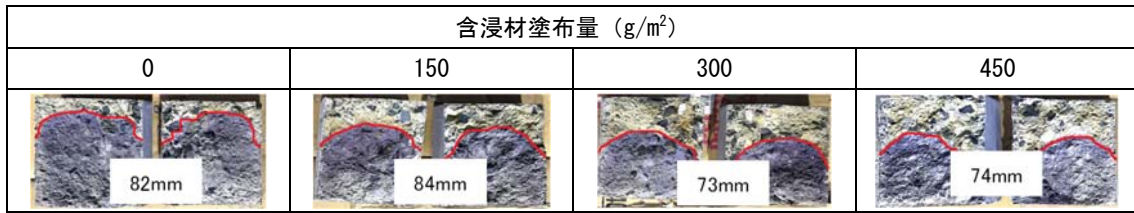


図-3 発色境界と塩化物イオン濃度との関係 (HSC 300°C)

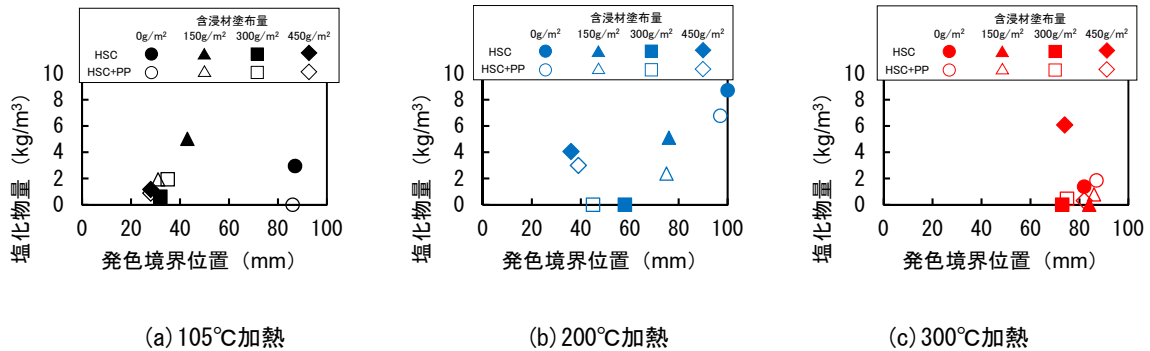


図-4 発色境界と塩化物イオン濃度との関係

で溶融することにより生じた空隙によって、塩化物イオンが浸透しやすくなったと考えられる。

HSC と HSC+PP においてすべての加熱温度で含浸材塗布量 300g/m² までは塗布量が多くなるにつれて塩化物イオンの浸透抑制効果が見られた。105°C, 200°C 加熱においては含浸材を 300g/m² 以上塗布することによって、供試体内部まで塩化物イオンの浸透を抑制することができた。火害によって表層に生じた微細ひび割れに含浸材が充填され、表層が緻密化されたことにより塩化物イオンの浸透が抑制できたと考えられる。

3.3 発色境界と塩化物イオン濃度の関係

図-3 に硝酸銀噴霧試験による塩化物浸透深さの結果の一例として 300°C 加熱の HSC の結果を示す。この塩化物浸透深さの結果を用いて、図-4 に硝酸銀噴霧試験によって測定した塩化物浸透深さの発色境界と、発色境界位置からもっと近い位置で測定された塩化物イオン濃度の関係を示す。105°C 加熱では含浸材を塗布することで無塗布のものに比べると HSC, HSC+PP とともに発色境界が深部から表面付近に近づく結果になると確認できた。300°C 加熱になると含浸材を塗布しても発色境界の位置が深部から移らない結果となった。

また、He らは硝酸銀溶液噴霧法に関する既往の研究成果¹¹⁾から変色境界位置での全塩化物イオン濃度についてまとめている。中でも、0.1%mol/L 硝酸銀溶液のみを噴霧溶液に用いているものでは、発色境界の全塩化物イオン濃度は単位結合材料の 0.2~1.0% という報告がある。本研究は単位セメント量が 532kg/m³ であるので、発色境界の全塩化物イオン濃度は He らの報告によると 1.06~5.32kg/m³ に相当する。今回の結果は、He らが実施した一面浸透試験から得られた発色境界に相当する塩化物量

の範囲と概ね一致する結果となった。しかしながら、塩化物イオン濃度の測定位置の間隔が 20mm 離れており、発色境界の塩化物イオン濃度を正確に測定できていないので、今後は発色境界位置の塩化物イオン濃度の測定を行い、検討を行っていきたい。

4 鉄筋腐食量について

4.1 鉄筋腐食性状

図-5 に含浸材塗布量の違いによる加熱温度ごとの鉄筋腐食性状の一例を示す。加熱温度上昇に伴い、孔食の発生している部分が増加していることが分かった。加熱により生じたひび割れによって鉄筋に塩化物イオンが局部的に浸透したため、加熱温度の上昇に伴い孔食の発生した部分が増加したのではないかと考えている。

4.2 鉄筋腐食量と加熱温度の関係

表-4 に測定した鉄筋腐食量、図-6 に HSC と HSC+PP の含浸材塗布量の違いによる鉄筋腐食量と加熱温度の関係を示す。HSC と HSC+PP の含浸材無塗布ではどちらも加熱温度の上昇に伴い鉄筋腐食量が増加する傾向が見られた。さらに 300°C 加熱の場合、含浸材を 450g/m² 塗布することで鉄筋腐食量を 105°C 加熱と同程度まで大幅に抑制できた。なお、HSC と HSC+PP で鉄筋腐食量の差異があまり見られなかった。塩化物イオン濃度は HSC+PP のほうが HSC よりも表面付近では大きい値を示したが、鉄筋位置付近の塩化物イオン濃度に差があまり見られなかったためであると考えられる。また、鉄筋腐食量は二回の測定の平均値とした。200°C 加熱における鉄筋腐食量は 2 回の測定値の幅が大きく、今後さらに検討を行いたい。

4.3 含浸材塗布による鉄筋腐食量抑制率

図-7 に HSC と HSC+PP の含浸材塗布量の違いによ

	含浸材無塗布			含浸材塗布量 450g/m ²		
	105℃	200℃	300℃	105℃	200℃	300℃
HSC						
HSC+PP						

図-5 含浸材塗布量の違いによる加熱温度ごとの鉄筋腐食性状

表-4 鉄筋腐食量測定結果

鉄筋腐食量 (mg/cm ²)	HSC				HSC+PP			
	含浸材塗布量 (g/m ²)				含浸材塗布量 (g/m ²)			
	0	150	300	450	0	150	300	450
105℃	36.2	26.0	26.6	31.2	19.5	21.3	20.7	24.6
200℃	63.4	64.5	24.7	47.9	67.6	47.5	26.4	51.7
300℃	68.3	69.9	58.2	30.8	65.7	43.7	49.0	38.8

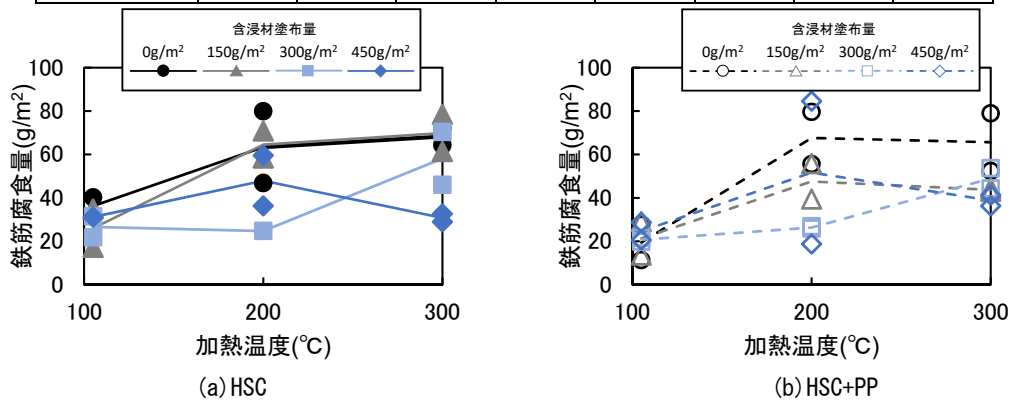


図-6 鉄筋腐食量と加熱温度との関係

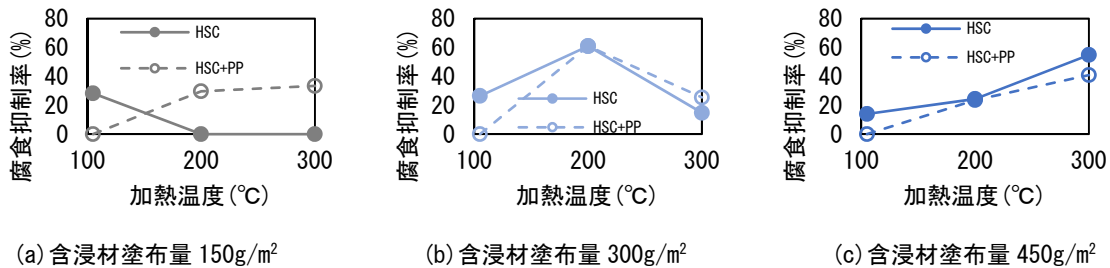


図-7 鉄筋腐食抑制率と加熱温度との関係

る鉄筋腐食量抑制率と加熱温度との関係を示す。鉄筋腐食抑制率は式(1)によって行った。

$$C_r = \frac{c-c'}{c} \times 100 \quad (1)$$

C_r : 含浸材塗布による鉄筋腐食抑制率 (%)

C : 含浸材無塗布の場合の鉄筋腐食量 (mg/cm²)

C' : 含浸材塗布した場合の鉄筋腐食量 (mg/cm²)

鉄筋腐食抑制率がマイナスの値となった場合は0とした。105℃加熱の場合は含浸材塗布量による鉄筋腐食量の違いが小さいため、鉄筋腐食抑制率も小さい結果となっている。含浸材塗布量 300g/m²を塗布した場合、200℃加熱では鉄筋腐食抑制効果がみられたが、300℃加熱になると抑制効果がみられなかった。含浸材塗布量 300g/m²とし

た場合、200℃加熱が腐食を抑制できる限界の温度である。300℃加熱になると含浸材塗布量が 450g/m² でないと鉄筋腐食抑制効果は見られなかった。なお、300℃加熱になると含浸材塗布量が 450g/m² 塗布した場合に HSC では 55%、HSC+PP では 41%の抑制効果が見られた。

4.4 鉄筋腐食量と塩化物イオン濃度の関係

図-8 に鉄筋腐食量と鉄筋位置（表面からの距離：50mm）の塩化物イオン濃度の関係を示す。加熱温度が上昇すると、含浸材の塗布量を多くしなければ、鉄筋腐食量の抑制に効果が表れないことが分かった。なお、含浸材塗布量 150g/m² と含浸材無塗布の鉄筋腐食量と塩化物イオン濃度の関係がほぼ同様な分布となった。このことから、含浸材塗布量 150g/m² では鉄筋腐食量の抑制効果

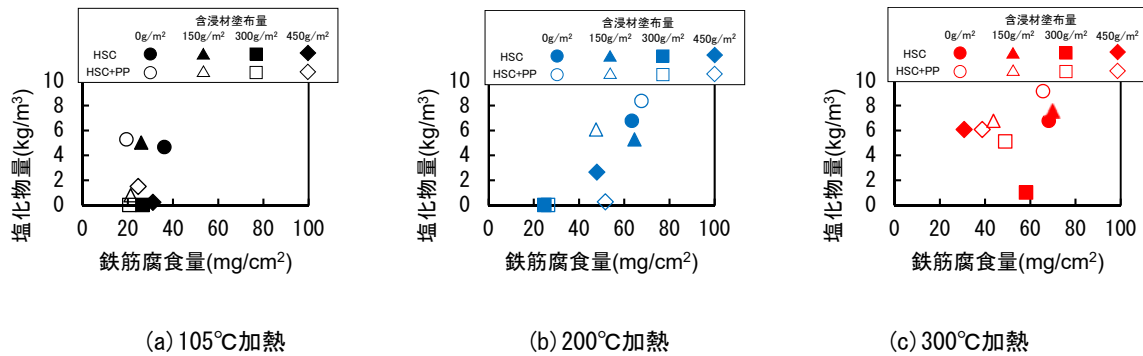


図-8 鉄筋腐食量と鉄筋位置（供試体深さ 50mm）の塩化物イオン濃度との関係

は小さい結果となり、鉄筋腐食量の抑制には最低でも含浸材を 300g/m² 塗布する必要があると考えられる。300°C 加熱の含浸材を 300、450g/m² 塗布した場合、鉄筋腐食量は抑制されているが塩化物イオン濃度は抑制できていない。これは、けい酸リチウム系表面含浸材の塗布により、アルカリ金属イオン濃度が増加する¹²⁾ことにより、鉄筋腐食量が抑制された可能性があると考えられる。

5.まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 加熱温度の上昇に伴い塩化物イオン濃度が高くなる傾向がみられた。300°C加熱の HSC+PP で表面付近の塩化物イオン濃度が大きい値を示した。これは PP 繊維の熔融によって生じた空隙により塩化物イオンが浸透しやすくなったことが考えられる。
- (2) 105°C、200°C加熱では含浸材を 300g/m² 以上塗布することによって塩化物イオンの浸透を抑制することができた。これは、火害によって生じた微細ひび割れを含浸材が充填し、表層の緻密化により塩化物イオンの浸透が抑制できたためである。
- (3) 加熱温度の上昇に伴い、鉄筋腐食量が増加する傾向がみられた。PP 繊維の有無による鉄筋腐食量の差は見られなかった。これは、HSC+PP は HSC に比べて表層付近の塩化物イオン濃度は高い値を示したが、鉄筋位置の 50mm 位置の塩化物イオン濃度に大きな差がみられなかったためと考えられる。
- (4) 鉄筋腐食量と鉄筋位置での塩化物イオン量の関係において含浸材無塗布と含浸材塗布量 150g/m² はほぼ同程度の分布となった。このことから、鉄筋腐食量の抑制には最低でも含浸材を 300g/m² 塗布する必要があると考えられる。

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
- 4) 岩本早耶香, 迫井祐樹, 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
- 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・同解説 2015
- 6) 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
- 7) 鎌田亮太, 谷辺徹, 小澤満津雄, 鉄羅健太, 明石孝太: けい酸塩系表面含浸材が火害を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性に与える影響, 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 16 巻, pp.551-556, 2016.10
- 8) 山本哲, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 谷辺徹: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1311-1316, 2016
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[規準編], pp.372-376, 2013.11
- 10) 本間大輔, 米澤敏男, 押田文雄, 山口善弘, 岡本博史, 中尾正純: 鉄筋の腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する研究: 日本建築学会構造系論文集 第 79 巻 第 701 号, p867-876, 2014.7
- 11) Fuqiang He. Et al.: AgNO₃-basec colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete, construction and building materials, vol26, pp.1-8, 2012
- 12) 土木学会: 表面保護工法 設計施工指針(案), コンクリートライブラリー, Vol.119, 145-150, 2005.5