

# 論文 塩水浸漬繰返しによる中性化した加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に関する研究

児玉 明裕\*1・大谷 俊浩\*2・秋吉 善忠\*3・古園 隆偉\*4

**要旨:** 中性化が加熱改質フライアッシュ (TMFA) を混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に及ぼす影響を調べるために、TMFA 置換率を 0, 15 および 30%とした中性化有無のコンクリート供試体を用いた塩水浸漬繰返し試験を行い、塩分浸透抵抗性および鉄筋腐食抵抗性に関する各種試験を行った。その結果、塩分浸透抵抗性に関して、TMFA 置換率に関わらず中性化による塩化物イオンの濃縮が見られたが、見掛けの拡散係数は TMFA 置換率の増加に伴い減少した。また、鉄筋の腐食面積率は中性化によって TMFA 置換率の増加に伴い増加したが、鉄筋の質量減少率は中性化有無に関わらず TMFA を混和した方が小さくなる傾向を示した。

**キーワード:** 加熱改質フライアッシュ, 塩水浸漬繰返し, 中性化, 見掛けの拡散係数, 鉄筋腐食

## 1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルに向けたコンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出削減策として、セメントクリンカーの一部代替となるフライアッシュ (以下、FA) などの副産物や廃棄物の有効活用は必要不可欠な課題であるといえる。また、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化は、資源の有効活用という点で持続可能な社会の構築に寄与するものと考えられる。筆者らはこれまで、コンクリート耐久性向上に寄与する FA の有効活用を図るために、未燃カーボンを 1.0%以下に低減させた加熱改質フライアッシュ (Thermally Modified Fly Ash) (以下、TMFA) を用いたコンクリートの特性を明らかにしてきた。耐久性に関して、中性化抵抗性はプレーンコンクリートと遜色ないこと、塩化物イオン (以下、Cl) の浸透深さは TMFA 置換率が大きいほど小さくなることなどを実験的に示した<sup>1)</sup>。

塩害環境における鉄筋腐食抵抗性については、既報実験<sup>2)</sup>において材齢 28 日強度を同一レベルとしたコンクリートに関して、TMFA 置換率が物質移動抵抗性と鉄筋腐食抵抗性に及ぼす影響を調べることを目的として、NaCl 水溶液浸漬繰返しによる促進試験を行った。その結果、TMFA 置換率が高いほどコンクリート抵抗率は大きくなること、Cl の拡散係数および鉄筋の質量減少率はプレーンコンクリート (以下、PL) のものより小さくなることなどを明らかにした。また、中性化と塩害の複合劣化における TMFA コンクリートの物質移動抵抗性に関して検討し、中性化した場合でも TMFA 置換率の増加に伴い遮塩性は向上すること等を明らかにした<sup>3)</sup>。しかしながら、その鉄筋腐食抵抗性については明らかになっていない。塩害と中性化の複合劣化では、逆に鉄筋腐食抵抗

性が劣る場合があることも報告されており<sup>4)</sup>、養生条件や FA の混和条件による影響も考慮して検討する必要がある。

そこで本論では、前報<sup>2)</sup>の中性化させていないシリーズに続き、材齢 28 日まで水中養生を行った後に、鉄筋のかぶり厚さの約 20 mm まで促進中性化させた供試体を用いて塩水浸漬繰返し試験を実施し、未中性化供試体の結果と比較検討することによって、中性化した TMFA コンクリートの鉄筋腐食抵抗性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配 (調) 合

表-1 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。また、混和材は JIS A 6201 の II 種に相当する TMFA を使用した。表-2 に配 (調) 合を示す。TMFA の材齢 28 日における強度寄与率  $k$  を 0.3 とした等価水セメント比  $W/C'$  を 55%で一定とし、TMFA 置換率は 0, 15, 30%の 3 水準 (表記はそれぞれ PL, FA15, FA30) とした。単位粗骨材量は一定とした。目標スラン

表-1 使用材料

項目	記号	種類および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>
混和材	TMFA	加熱改質フライアッシュ (S 社) 密度: 2.27g/cm <sup>3</sup> , 強熱減量: 0.8%, SiO <sub>2</sub> : 66%, 比表面積: 4300 cm <sup>2</sup> /g, フロー値比: 105%, 活性度指数: 28 日 92%, 91 日 105%
細骨材	S	山砂 表乾密度: 2.63 g/cm <sup>3</sup> , 実積率: 60.6%, 吸水率: 2.41%, 粗粒率: 2.43
粗骨材	G	砕石 表乾密度: 2.63 g/cm <sup>3</sup> , 実積率: 58.9%, 吸水率: 0.92%, 粗粒率: 6.81
水	W	水道水
混和剤	AD	AE 減水剤 (高機能タイプ)
助剤	AE	空気量調整剤

\*1 大分大学 大学院工学研究科博士後期課程環境工学専攻 ((株) サザンテック) (正会員)

\*2 大分大学 理工学部理工学科建築学プログラム教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 大分大学 理工学部理工学科建築学プログラム助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 (株) サザンテック 技術本部

表-2 配(調)合、フレッシュ性状および圧縮強度

記号	TMFA 置換率 (%)	W/C (%)	W/P*1 (%)	W/C*2 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AD (B*%)	AE*3	スラン プ値 (cm)	空気量 (%)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
						W	C	TMFA	S	G					
PL	0	55.0	55.0	55.0	48.8	180	327	0	862	904	0.65	1.0A	18.5	5.5	33.8
FA15	15	58.0	49.0	55.0	48.4	172	297	52	849	904	0.65	1.5A	19.0	5.2	33.5
FA30	30	62.0	43.0	55.0	46.1	172	277	119	790	904	0.65	2.0A	20.5	4.8	30.8

\*1: P=C+TMFA, \*2: C'=C+k×TMFA (k=0.3), \*3: 1A=B\*0.002%

表-3 試験概要

供試体寸法(mm)	試験項目	試験方法	養生方法・期間	促進環境	試験材齢(期間)
100×150×200 (φ13 丸鋼埋設 かぶり厚さ 10mm,20mm)	促進中性化	JIS A 1153	20°C水中・4週間+	20°C60%R.H.	促進期間: 32,52 週
	表面含水率	高周波容量式 (20MHz)	20°C60%R.H. 4 週間	CO <sub>2</sub> 濃度 5%	1 サイクル: 24 時間浸漬 (NaCl 10%溶液) ↓ 6 日間乾燥 (20°C・60%R.H.)
	透気性	トレント法	20°C水中・4週間*1		
	自然電位	G 社製			
	腐食速度	非破壊型鉄筋腐食 探査機(CEPRA) <sup>5)</sup>			
	コンクリート抵抗率	探査機(CEPRA) <sup>5)</sup>			
	表面吸水性	白川ら <sup>6)</sup>			
	塩分浸透深さ	0.1N 硝酸銀水溶液			
	鉄筋腐食面積率・減量	JCI-SC1			
孔食深さ	デジタルデプスマーター				
100×100×200	塩分浸透深さ	EPMA			
	拡散係数		51 サイクル 終了後に測定		
			13,15 週		

\*1 水中養生後、実験室内で 3 日間乾燥、その後エポキシ樹脂を塗布し、3 日間気中養生を行い、24 時間 20°C 水中に浸漬した後、塩分浸漬を開始。

プは 18±2.5 cm、目標空気量は 4.5±1.0%とし、所要のフレッシュ性状が得られるよう単位水量、混和剤添加率および AE 剤により調整した。供試体作製方法については既報<sup>2)</sup>を参照されたい。

## 2.2 試験方法

表-3 に試験概要を示す。筋腐食試験用供試体は、寸法 100×150×200 mm で、かぶり厚さ 10 mm および 20 mm の位置に黒皮付きのφ13 mm の丸鋼を配置している<sup>2)</sup>。材齢 28 日まで水中養生を行い、エポキシ樹脂を塗布した後、促進中性化試験装置内 (20°C, 60%R.H., CO<sub>2</sub> 濃度 5%) にてかぶり約 20 mm まで中性化させた。その促進期間は配(調)合によって異なり、TMFA 混和のものは 32 週間、PL は 52 週間に要した。その後 24 時間 20°C 水中に浸漬させ、塩水浸漬繰返し試験を開始した。塩水浸漬繰返し試験は、20°C の環境で 60%R.H. における 6 日間の乾燥と 10%NaCl 水溶液に 1 日間浸漬を 1 サイクルとし、そのサイクルを 52 週まで繰返した。その他の試験方法については既報<sup>2)</sup>を参照されたい。促進試験期間中のコンクリート表層の物質移動抵抗性を評価するため、透気性、吸水性およびコンクリート抵抗に関する試験を行った。これらの測定値は含水率による影響を受けるため、各試験の測定前に含水率も合わせて測定した。透気性および吸水性については、各サイクルの NaCl 水溶液浸漬前に、コンクリート抵抗率、自然電位および鉄筋腐食速度は 24 時間浸漬後に測定した。

EPMA による面分析には、100×100×200 mm の角柱供試体 (1 面暴露) を塩水浸漬繰返し 15 週後 (中性化無は 13 週) にそれぞれスライスし、暴露面から深さ方向に切

り出した 50×50 mm の試験片を用いて、0.1 mm 間隔 (500×500 ピクセル) で Cl 元素の X 線強度を測定し、比例法による Cl 濃度への換算を行った<sup>7)</sup>。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 含水率

図-1 に各サイクルにおける 6 日間乾燥後の含水率の経時変化を示す。図中の凡例について、中性化無の供試体は塗漬し、中性化有の供試体は白抜きで示している。0 週は塩水吸水前の初期値である。含水率について、中性化無<sup>2)</sup>では 10 週目まで増加する傾向が見られるが、その後小さくなり 26 週目以降はおよそ 6~8%を推移した。これに対し中性化有では、10 週目以降も含水率は増加する傾向にあり、すべての調査条件において 26 週以降は 10%以上で推移した。なお、一部の条件では測定範囲の 12%を超えたため図示していない。また、TMFA 置換率による影響について、中性化無<sup>2)</sup>では TMFA を混和した場合に 1~2%小さい値を示した。中性化有では明確な傾向はみられなかった。

### 3.2 透気係数および吸水速度係数

図-2 に透気係数の経時変化を示す。透気係数について、中性化無<sup>2)</sup>では全体的に 0.001~0.01×10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup> の範囲を推移しているが、中性化有では初期から 0.1~1.0×10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup> の範囲を示した。これは C-S-H の炭酸化に伴う水分蒸発による多孔化が影響したものと考えられる<sup>8)</sup>。TMFA 置換率ごとにもみると、中性化無<sup>2)</sup>では FA30 が PL よりも全体的に小さな値を示したが、中性化有では TMFA 置換率が大きいほど、全体的に大きな値を示した。

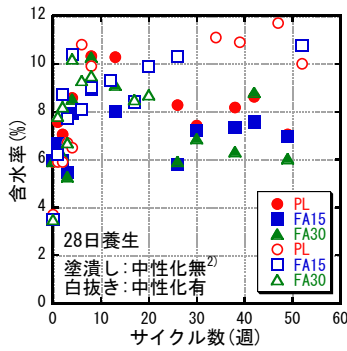


図-1 含水率の経時変化

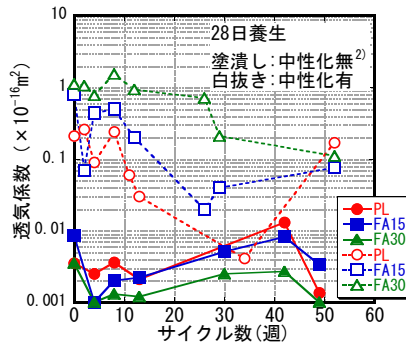


図-2 透気係数の経時変化

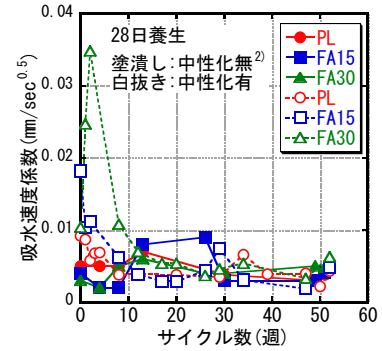


図-3 吸水速度係数の経時変化

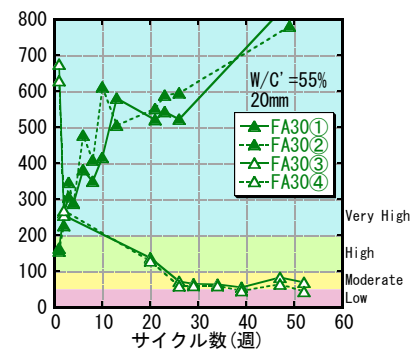
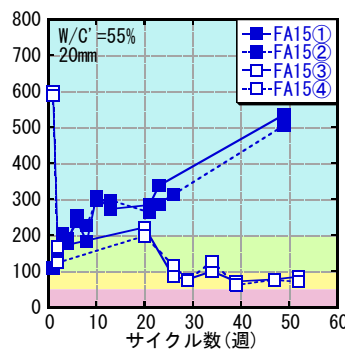
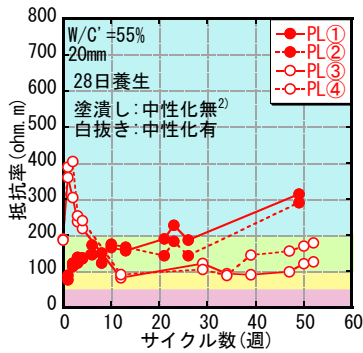


図-4 コンクリート抵抗率の経時変化

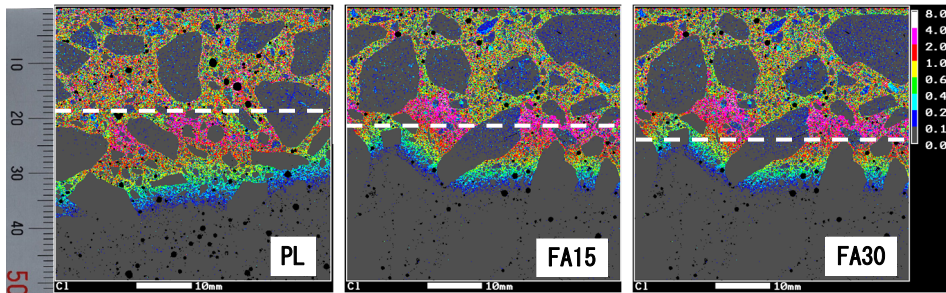


写真-1 EPMA 面分析 Cl マッピング画像 (塩水浸漬繰返し 15 週後, 中性化有)

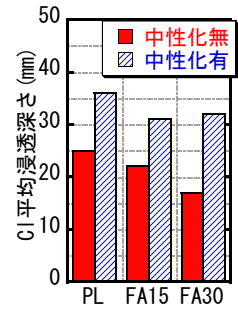


図-5 Cl 平均浸透深さ

図-3 に吸水速度係数の経時変化を示す。塩水浸漬繰返し試験初期においては中性化有の吸水速度係数が中性化無<sup>2)</sup>に比べて大きく、特にその傾向は TMFA 置換率が大きいほど顕著である。これは透気係数の場合と同様の要因が考えられる。しかしながら、10 週目以降では両者に大きな差は見られず、置換率による差も小さい。これは、含水率が中性化有の方が全体的に高かったこと、透気試験と吸水試験で評価の対象となる表層からの深さが異なるためであると考えられる。

### 3.3 コンクリート抵抗率

図-4 にコンクリート抵抗率の経時変化を示す。図中の色分けは評価基準を示している<sup>9)</sup>。0 週目は塩水浸漬開始前に 24 時間真水に浸漬した直後のデータである。図より、浸漬開始直後は中性化無<sup>2)</sup>の方が全体的に値は小さいが、サイクル数の増加とともに増加する傾向がみられた。これは材齢 1 カ月程度で浸漬を開始したことか

ら、その後に水和反応が進行したためであると考えられる。この傾向は TMFA 置換率が大きいほど顕著である。TMFA のポズラン反応により組織が緻密になったことが影響しているものと考えられる。一方、中性化有では、浸漬初期の値は高いものの、サイクル数の増加とともに抵抗率は減少した。これは、乾燥期間が中性化無<sup>2)</sup>に比べて長かったために初期の含水率は小さく、その後は増加する傾向にあったこと、また、乾湿繰返しによる塩化物イオンの浸透で電気伝導率が高まったこと等が影響しているものと考えられる。

### 3.4 塩化物イオンの浸透深さおよび見掛けの拡散係数

写真-1 に塩水浸漬繰返し 15 週後に行った EPMA 面分析による Cl マッピング画像を示す。マッピング画像に示す白線は塩水浸漬前の中性化深さを示しており、促進中性化試験における目標深さ 20 mm に対して、PL, FA15, FA30 の順に 18.5 mm, 21.1 mm, 23.5 mm であった。図

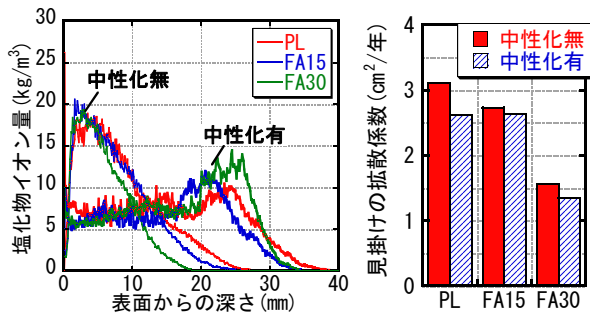


図-6 塩化物イオン量分布 図-7 見掛けの拡散係数

-5 に EPMA 分析結果から求めた Cl の平均浸透深さを示す。Cl の浸透深さは、中性化有の方が中性化無よりも大きく、中性化無では TMFA 置換率の増加に伴い減少傾向となったが、中性化有では PL に比べ TMFA 混和の調合で塩分浸透深さが減少したものの、TMFA 置換率による差は見られなかった。

図-6 に EPMA 分析結果から求めた Cl 量の分布曲線を示す。図より、中性化無では表面付近に Cl 量のピーク位置がみられるが、中性化有では中性化フロント付近にピーク位置が存在していることが分かる。これは中性化の影響により外部から浸透した Cl がフリーデル氏塩として固定化されず、可溶性の Cl のまま内部に浸透し、未中性化領域で固定化されたためだと考えられる<sup>10)</sup>。

未中性化領域における塩分浸透抵抗性を比較するために、図-6 の未中性化領域の濃度分布から算出した Cl の見掛けの拡散係数を図-7 に示す。見掛けの拡散係数は TMFA 置換率の増加に伴い減少する傾向がみられ、中性化の影響に関わらず TMFA の塩分浸透抵抗性の向上が確認された。

### 3.5 自然電位および腐食電流密度

図-8 および図-9 に自然電位および腐食電流密度の経時変化を示す。図中に評価基準<sup>5))</sup>を示している。図-8 より、自然電位は、中性化無<sup>2)</sup>ではかぶり 20 mm において 26 サイクル程度まで腐食確率が 10%以下もしくは不確定領域を推移したが、中性化有ではいずれのかぶり厚さにおいても初期から卑な値を示し、-600~-500 mV/CSE 程度の鉄筋腐食確率 90%以上の範囲を推移し、TMFA 置換率で差が見られなかった。図-9 より、腐食電流密度はかぶり 10 mm において、中性化無<sup>2)</sup>では TMFA 置換率が大きいほど小さくなる傾向が見られた。しかしながら、中性化有では TMFA 置換率が大きいほど腐食電流密度は増加する傾向が見られた。特に FA30 は、中性化無<sup>2)</sup>では 51 週時点において  $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  程度だったのに対し、中性化有では  $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  を超える供試体もみられた。これらの傾向は前述したコンクリート抵抗率の結果に対応するものであり、また後述する Cl の高濃度化等が影響しているものと推察される。

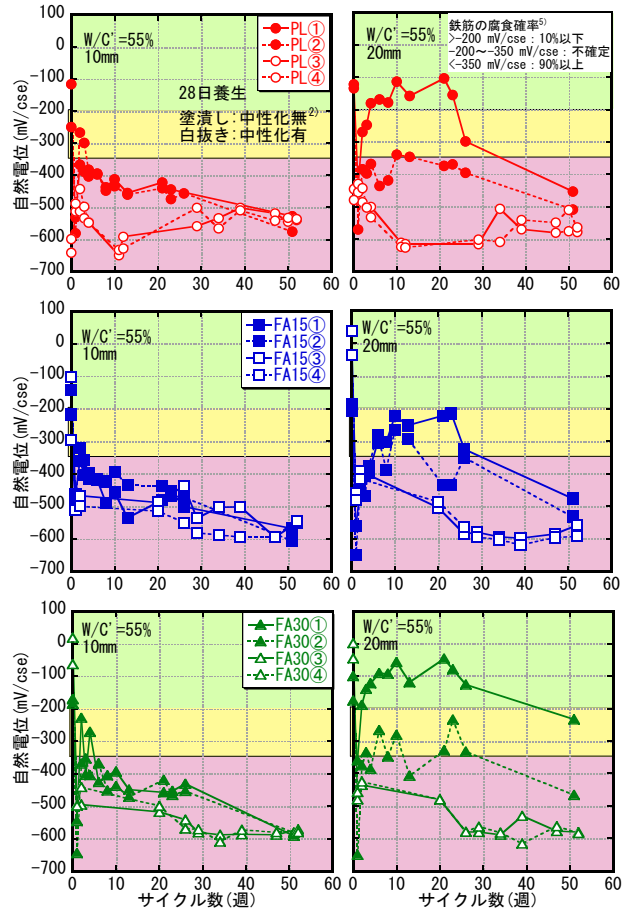


図-8 自然電位の経時変化

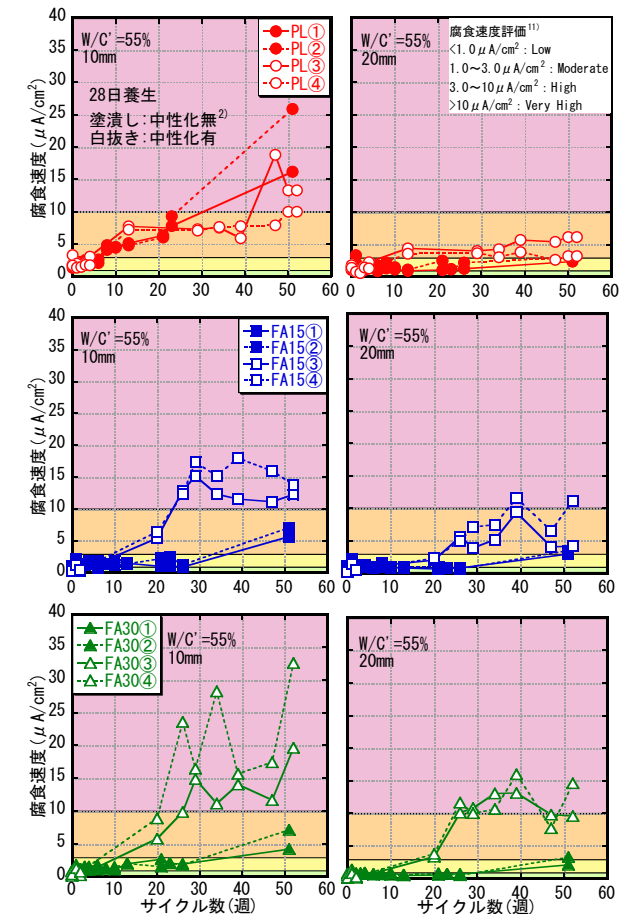


図-9 腐食速度の経時変化

表-4 中性化有供試体の鉄筋外観と腐食グレード

調査	錆除去	かぶり 10mm	腐食グレード	かぶり 20mm	腐食グレード
PL	前		II~III		II
	後				
FA15	前		II~III		II
	後				
FA30	前		II~III		II
	後				

### 3.6 鉄筋腐食試験結果

#### (1) 外観および発錆面積率

表-4 に中性化有供試体における鉄筋の外観を示す。写真はそれぞれ暴露面側を正面として示している。表に示す鉄筋腐食グレード<sup>12)</sup>については、0~IVの順に外観目視よって腐食の程度を評価したものである。中性化無の腐食グレードに関して、前報<sup>2)</sup>の結果について今回改めて見直しを行ったところ、かぶり 20mm ではいずれも 0 で、かぶり 10mm では PL が II~III、FA15 および FA30 は II であった。かぶり 10mm では、中性化の有無で腐食グレードに大きな差はなかったが、かぶり 20mm では中性化有の場合にグレード II の腐食が見られた。これは、中性化有の CI の濃縮が影響したものと考えられる。TMFA 置換による差は見られなかった。

鉄筋の発錆面積率を図-10 に示す。発錆面積率はスケッチの際に目視で錆と判定した部分から算出して求めた。図より、発錆面積率はかぶり 10mm の方が全体的に大きくなる傾向にある。かぶり 20mm において、発錆面積率は中性化無<sup>2)</sup>の場合には TMFA 置換率の増加に伴い減少傾向にあるが、中性化有ではその逆の傾向を示した。前述したコンクリート抵抗率や腐食電流密度の結果に対応するものである。また TMFA 置換率が大きいほど、かぶり 20~30 mm 近傍において高い CI 量を示しており、より腐食が生じやすい環境にあったものと推察される。

#### (2) 質量減少率

図-11 に鉄筋の質量減少率を示す。質量減少率は黒皮の質量および発錆面積率を考慮して算出した<sup>13)</sup>。黒皮の質量は、健全な鉄筋でも同溶液の浸漬により浸食することが指摘されている<sup>14)</sup> こと、また、発錆状況によって黒皮の除去時間も変化することが考えられたため、ここでは健全な鉄筋をクエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬した場合の減量を基準にして求めた。ただし、中性化有無の実験において、腐食状況によってクエン酸水素二アンモニウム水溶液の浸漬期間が異なっていた。そこで、本実験においてほとんど発錆していないとみな

せる発錆面積率 2~3% 以下の鉄筋の質量減少量と浸漬期間の関係式を求め、その関係式から得られた単位時間当たりの減少量  $1.62 \text{ mg/cm}^2/\text{day}$  を用いて、健全部の溶出量を推定して補正した。

図より、中性化の有無に関係なく TMFA 置換率の増加に伴って質量減少率が小さくなる傾向が見られた。かぶり 10 mm では、PL に比べて TMFA を混和した調査の方が質量減少率は中性化無<sup>2)</sup>で約 1%、中性化有で約 0.5% 小さくなった。また発錆面積率は中性化有の方が大きい、質量減少率は TMFA を混和した場合では同等、PL では小さくなっており、中性化した場合に単位発錆面積あたりの腐食深さは小さくなる傾向にある。この傾向は宮里らが実験的に示している結果<sup>15)</sup> と一致するものである。かぶり 20 mm においては中性化有の質量減少率が中性化無<sup>2)</sup>の場合よりも大きくなっている。中性化の有無の影響については発錆面積率に対応する結果であるが、TMFA 置換率による影響については逆の傾向を示している。すなわち、中性化した領域においては、TMFA 置換率が大きいほど腐食面積当たりの腐食深さが小さくなる傾向にある。

#### (3) 最大孔食深さ

錆除去後に計測した最大孔食深さの結果を図-12 に示す。図より、かぶり 10 mm では、中性化無<sup>2)</sup>の場合では TMFA 置換率が増加すると孔食深さは小さくなる傾向にある。一方、中性化有の場合では TMFA 置換率が増加すると孔食深さがやや大きくなる傾向にある。かぶり 20 mm では、中性化無<sup>2)</sup>の場合では TMFA を混和した調査では孔食は生じなかったが、中性化有の場合では TMFA 置換率が増加とともに若干孔食深さが増加している。また、中性化有の場合、かぶり 10 mm に比べて、かぶり 20 mm 付近の方が塩分濃度が高かったが、ほぼ同等の孔食深さであった。これは、かぶり 10 mm では表層に近く水や酸素が供給されやすいのに対し、かぶり 20 mm は塩分濃度が高く腐食が進行しやすい環境にあり、結果的に同等の孔食深さを生じたものと推察される。

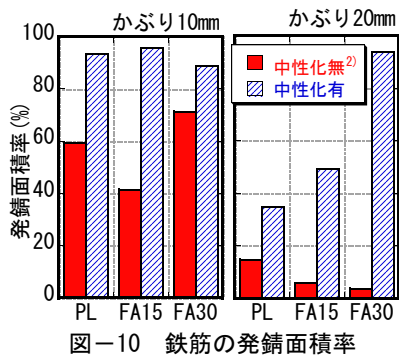


図-10 鉄筋の発錆面積率

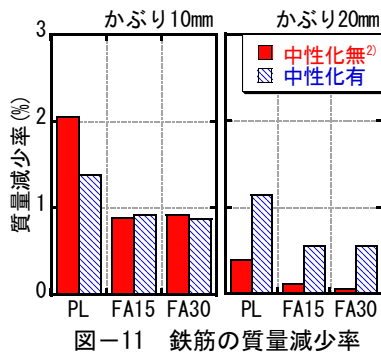


図-11 鉄筋の質量減少率

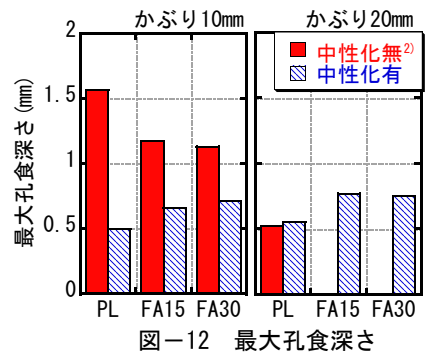


図-12 最大孔食深さ

#### 4. まとめ

本研究では中性化がTMFAを混和したコンクリートの塩分浸透抵抗性ならびに鉄筋腐食抵抗性に与える影響を調べることを目的に、材齢28日まで20℃水中養生を行った供試体を鉄筋位置まで促進中性化させ、中性化有無における各種比較を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) EPMA分析の結果、中性化によるCIの濃縮が見られ、TMFA置換率が高いほど高濃度になったが、見掛けの拡散係数は中性化の有無に関わらずTMFA置換率の増加に伴い減少傾向となった。
- (2) 鉄筋腐食状況について、中性化によってPLに比べ発錆面積率は、未中性化の場合とは逆にTMFA置換率が高いほど増加傾向を示すものの、中性化の有無に関わらず質量減少率はTMFA混和により小さくなる傾向を示した。

#### 謝辞

本報はJSPS科研費20K04773JPの支援を受けて実施した。また、実験の実施にあたり本学技術職員・遠矢義秋氏、卒論生・山崎陽生君、村松将季君をはじめとするコンクリート工学研究室の諸氏のご助力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 三島剛, 佐藤嘉昭, 大谷俊浩, 上田賢司: 改質フライアッシュを混和したコンクリートの耐久性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.511-518, 2015
- 2) 児玉明裕, 大谷俊浩, 秋吉善忠, 古園隆倅: 塩水浸漬繰返しによる加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの鉄筋腐食抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.490-495, 2022
- 3) 児玉明裕, 大谷俊浩, 秋吉善忠, 古園隆倅: 中性化が加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼす研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.628-633, 2023
- 4) 上田隆雄, 田中慎吾, 進藤義勝, 七澤章: フライア

ッシュの混和が塩害によるセメント硬化体中の鉄筋腐食環境に与える影響, 土木学会論文集, Vol.66, No.3, pp.255-267, 2010.7

- 5) Fahim Andrew et al., CEPRA-A new test method for rebar corrosion rate measurement, ASTM Selected Technical Paper, pp.59-80, 2019
- 6) 白川敏夫: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究, 第44回セメント・コンクリート研究討論会論文集, pp.8-12, 2017
- 7) 土木学会規準: EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案)(JSCE-G 574-2005)の制定, 土木学会論文集E, Vol.62, No.1, pp.246-259, 2006.2
- 8) 佐伯竜彦, 関谷輝: 混和材が塩害と中性化の複合劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.729-734, 2002
- 9) S. G. Millard, K. R. Gowers: Resistivity Assessment of in-situ Concrete: The Influence of Conductive and Resistive Surface Layers., Structures and Buildings, Vol.94, Issue 4, pp. 389-396, Nov.1992
- 10) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.2, pp.69-82, 1990
- 11) ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1999
- 12) 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針2022, p.38, 2022.6
- 13) 掛川勝, 榎田佳寛, 松林裕二, 鹿毛忠継: コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する腐食促進実験, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第681号, pp.1613-1622, 2012.11
- 14) 唐沢智之, 榎田佳寛, 河野政典, 竹内博幸: ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.873-878, 2004
- 15) 宮里心一, 大即信明ほか: モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度, 土木学会論文集, No.690, V-53, pp.83-93, 2001.11