

論文 フライアッシュを混和材に用いたコンクリートの遮塩効果に関する実験的検討

井口 重信*1・松田 芳範*2

要旨: フライアッシュを混合したコンクリートの塩化物イオン浸透抑制効果について、拡散係数による推定では説明がつかないという研究成果が報告されている。そこで、フライアッシュの配合や養生条件等を変えた試験体を製作し、塩水浸漬試験を実施し検証を行った。その結果、配合や養生条件により差はあるものの、一定以深への塩化物イオンの浸透が見られない傾向となった。また、実験結果より求められる見かけの拡散係数および表面塩化物イオン濃度の浸漬時間による変化を仮定すると、塩化物イオンの浸透深さの限界点が推測できるものと思われる。

キーワード: フライアッシュ, 塩化物イオン, 拡散係数, 養生

1. はじめに

海岸線近くに立地する鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物には塩害による被害が多く、維持管理上の問題となっている。また、このような箇所ではRC構造物を建設する場合、最外縁鉄筋のかぶりを大きくしたり、防食鉄筋を用いたりして対応するのが一般的だが、いずれも材料費や施工費が増大する原因となっている。

一方で、最近では、ASRの抑制対策や環境負荷低減のために、フライアッシュを混和材として用いるケースが増えてきている。また、フライアッシュを用いたコンクリートの遮塩効果については、土木学会の設計基準¹⁾で示されている拡散係数による推定では説明できない事象も報告もされている²⁾。

そこで、2つの方法で製作したテストピースを塩水に浸漬し、塩化物イオンの浸透性について検討した。1つは材齢が28日程度を基準に製作したテストピース（以下、モールド試験体）、もう1つは、116週間塩害環境下ではない実環境下に暴露した角柱試験体からコア削孔により

採取したテストピース（以下、コア採取試験体）である。いずれも、一般的な鉄道用RCラーメン高架橋のコンクリート配合を想定して検討を行った。それぞれ、フライアッシュの添加量や養生条件などをパラメーターに数種類ずつのテストピースを作製し塩水浸漬を行ったのち、浸漬面からの深さごとに塩化物イオン量を計測し塩化物イオンの浸透性について検討したので、以下にその概要を記す。

2. 試験方法

2.1 モールド試験体

試験パラメーターを表-1に、コンクリート配合を表-2に示す。なお、表-1、表-2には後述するコア採取試験体のデータも記す。

モールド試験体のコンクリート配合は、一般的な鉄道用RCラーメン高架橋の梁スラブを想定し、設計基準強度27N/mm²、スランプ12cmのコンクリートとした。フライアッシュを添加した試験体は、普通ポルトランドセ

表-1 試験パラメーター

試験体種別	試験体 No.	配合	養生方法	養生日数	その他
モールド試験体	MO-01	27-12-25N (FA20%)	水中(20℃)	28日	
	MO-03		水中(10℃)	28日	
	MO-04		水中(30℃)	28日	
	MO-05		水中(20℃)	7日	
	MO-23		水中(20℃)	28日	浸漬前絶乾
	MO-12	27-12-25N	水中(20℃)	28日	
コア採取試験体	CO-01	27-60-25N	気中*	116週	打設24時間後脱わく
	CO-03		気中*	116週	打設7日後脱わく
	CO-08	27-60-25N (FA20%)	気中*	116週	打設24時間後脱わく
	CO-11		気中*	116週	打設7日後脱わく その後28日目まで封かん養生

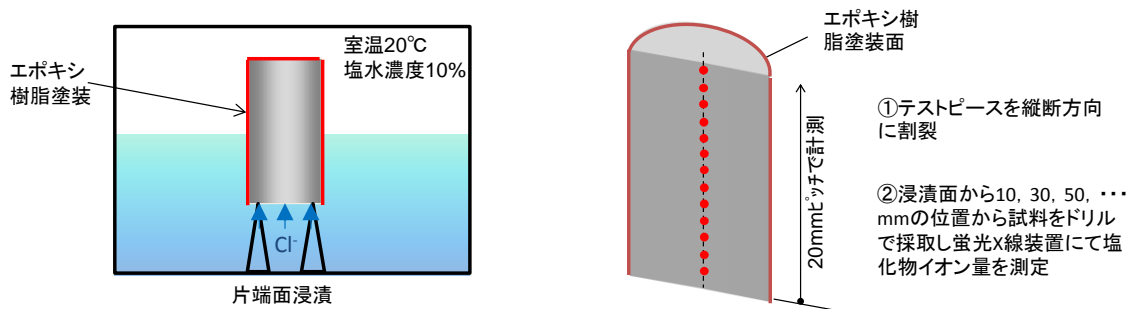
※新潟県新潟市内気中環境

*1 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター 工修 (正会員)

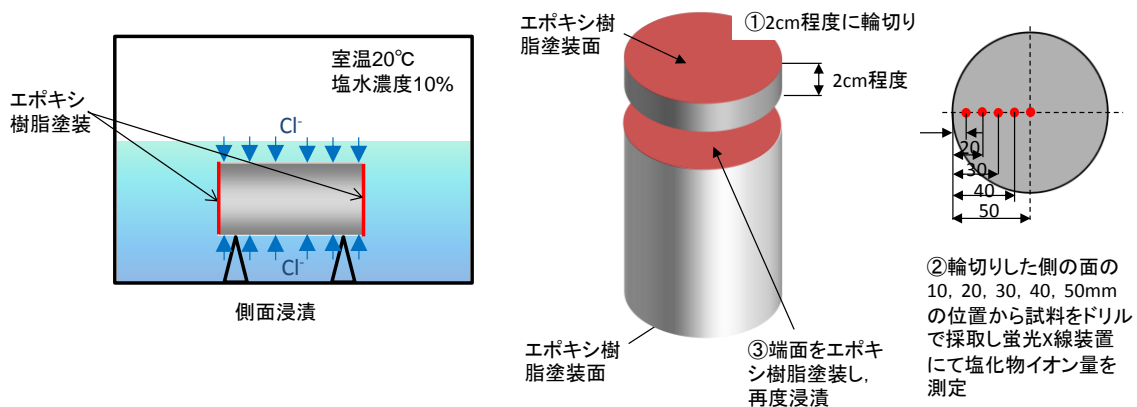
*2 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター副課長 工博 (正会員)

表-2 コンクリート配合

試験体種別	配合	W/C	W/B	単位量(kg/m ³)					
				セメント	混和材	水	細骨材	粗骨材	混和剤
					フライッシュ 酒田産Ⅱ種				高性能AE 減水剤(標準型)
モールド試験体	27-12-25N	0.51	0.51	298	-	152	766	1075	2.384
	27-12-25N (FA内割20%)	0.61	0.49	246	61	149	751	1073	2.456
コア採取試験体	27-60-25N	0.38	0.38	450	-	170	825	838	5.625
	27-60-25N (FA内割20%)	0.46	0.37	360	90	165	817	833	5.625



a) モールド試験体の塩水浸漬試験方法



b) コア採取試験体の塩水浸漬試験方法

図-1 塩水浸漬および塩化物イオン測定方法

メントの内割りで20%を置換した。28日間20°Cで水中養生したMO-01を基本に、養生温度や養生日数をパラメーターに設定した。MO-23以外の試験体は、所定の養生日数経過後に塩水濃度10%、室温20°Cの環境下で浸漬した。MO-23は28日間水中養生した後に100°Cの乾燥炉に入れ、質量が変化しなくなるまで水分を蒸発させた後に、塩水浸漬を開始した。

塩水浸漬および塩化物イオンの計測方法を図-1a)に示す。なお、図-1には、後述するコア採取試験体の塩水試験方法および塩化物イオンの計測方法についても合わせて示す。φ100mm×h200mmのテストピース側面および底面にエポキシ樹脂を塗布し、塩水槽に深さ半分程

度の深さまで浸漬させた。浸漬後は、縦断方向に割裂した後、浸漬面から10, 30, 50...mmの位置から試料をドリルで採取し蛍光X線装置にて塩化物イオン量を計測した。

2.2 コア採取試験体

コア採取を行った角柱試験体の暴露状況およびコア採取状況を図-2に示す。角柱試験体は400×400×1000の角柱形状で、一般的な鉄道用鉄筋コンクリートラーメン高架橋の柱部を対象とし、設計基準強度を27N/mm²、スランプフロー60cmの高流動コンクリートとした。試験体は、暴露期間中は地面からの跳ね返る雨水などを除い



a) 角柱試験体暴露状況



b) コア採取状況

図-2 角柱試験体暴露状況およびコア採取状況

ては直接降雨が当たらないような高架橋下に設置し、養生期間後は試験体下面からの給水のないように 100mm のコンクリート板上に設置した。コンクリートの打設直後から養生期間の間は、脱型をせず合板型枠を養生マットで覆い給水して湿潤状態を保った。所定の養生期間の後、気中にて 116 週間気中養生した。116 週間気中養生の後、直径 100mm のコアを採取し、長さ 200mm のテストピースを切り出して、塩水試験用に加工をした。

塩水浸漬および塩化物イオンの計測方法を図-1b) に示す。コア採取試験体については、コアの上下端面にエポキシ樹脂を塗布し、塩水槽にすべて浸漬させた。浸漬後は、20mm 程度の厚さで切断後、輪切りした側の面から 10, 20, 30…50mm の位置から試料をハンマードリルで採取し蛍光 X 線装置にて塩化物イオン量を計測した。測定後は切断した端面にエポキシ樹脂を塗布し、再度浸漬し、所定の浸漬を行うことを繰り返した。

なお、コア採取試験体については、採取可能なテストピース本数が限られることから、モールド試験体とは異なる方法で塩水浸漬および塩化物イオン量の計測を行ったが、事前に、両者の塩水浸漬方法および塩化物イオン量の計測方法には大きな差異がないことを確認している。

3. 試験結果

3.1 塩化物イオン濃度

図-3 に各試験体の浸漬面からの距離と、塩化物イオン濃度との関係を示す。

モールド試験体については、28 日間水中養生後に絶乾状態にした MO-23 以外については、浸漬面から 30mm 程度以深で塩化物イオン濃度が一定傾向となったことから、養生条件およびフライアッシュの配合の有無による塩化物イオンの浸透深さの差異はあまり見られなかった。MO-23 については、100mm 以深まで塩化物イオンの浸透が見られ、MO-1, MO-12 および MO-05 と比べ、塩化物イオンの浸透深さに明確な違いが見られた。

コア採取試験体については、FA を添加していない

CO-01 および CO-03 では 30mm 以深まで塩化物イオンの浸透が見られたが、FA を添加した CO-08 および CO-11 では、20mm 程度で塩化物イオンの浸透がほとんど見られず、配合による塩化物イオンの浸透深さの差異が見られた。CO-01 と CO-03, CO-08 と CO-11 を比較しても差異が少ないことから、脱枠時期の違いによる塩化物イオンの浸透深さの差異は小さかった。なお、MO-12 の 3 カ月のデータ、CO-03 の 347 日のデータについては、エポキシ樹脂の塗布漏れ等による塩水の浸透の影響により、塩化物イオン濃度が高い部分が現れたものと考えている。

3.2 見掛けの拡散係数 D_{aps} と表面塩化物イオン濃度 C_{0s}

式(1)に示す Fick の第 2 法則に基づく拡散方程式の解を用いて試験結果を回帰分析により算出した見掛けの拡散係数 D_{aps} と表面塩化物イオン濃度 C_{0s} の浸漬時間との関係を図-4 に示す。なお、図-4 には、見掛けの拡散係数 D_{aps} については浸漬日数の対数で近似したもの、表面塩化物イオン濃度 C_0 については浸漬日数の線形で近似した近似式を合わせて示す。

$$C(x,t) - C_i = C_{0s} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{aps} \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、

x : 浸漬面から全塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離(cm)

t : 供用期間(年)。(ここでは、浸漬期間(年)とした)

$C(x,t)$: 距離 x (cm)、供用期間 t (年)において測定された全塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_{0s} : コンクリートの表面における全塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_i : 初期含有全塩化物イオン濃度(kg/m³)

D_{aps} : コンクリートの見掛けの拡散係数(cm²/年)

erf : 誤差関数

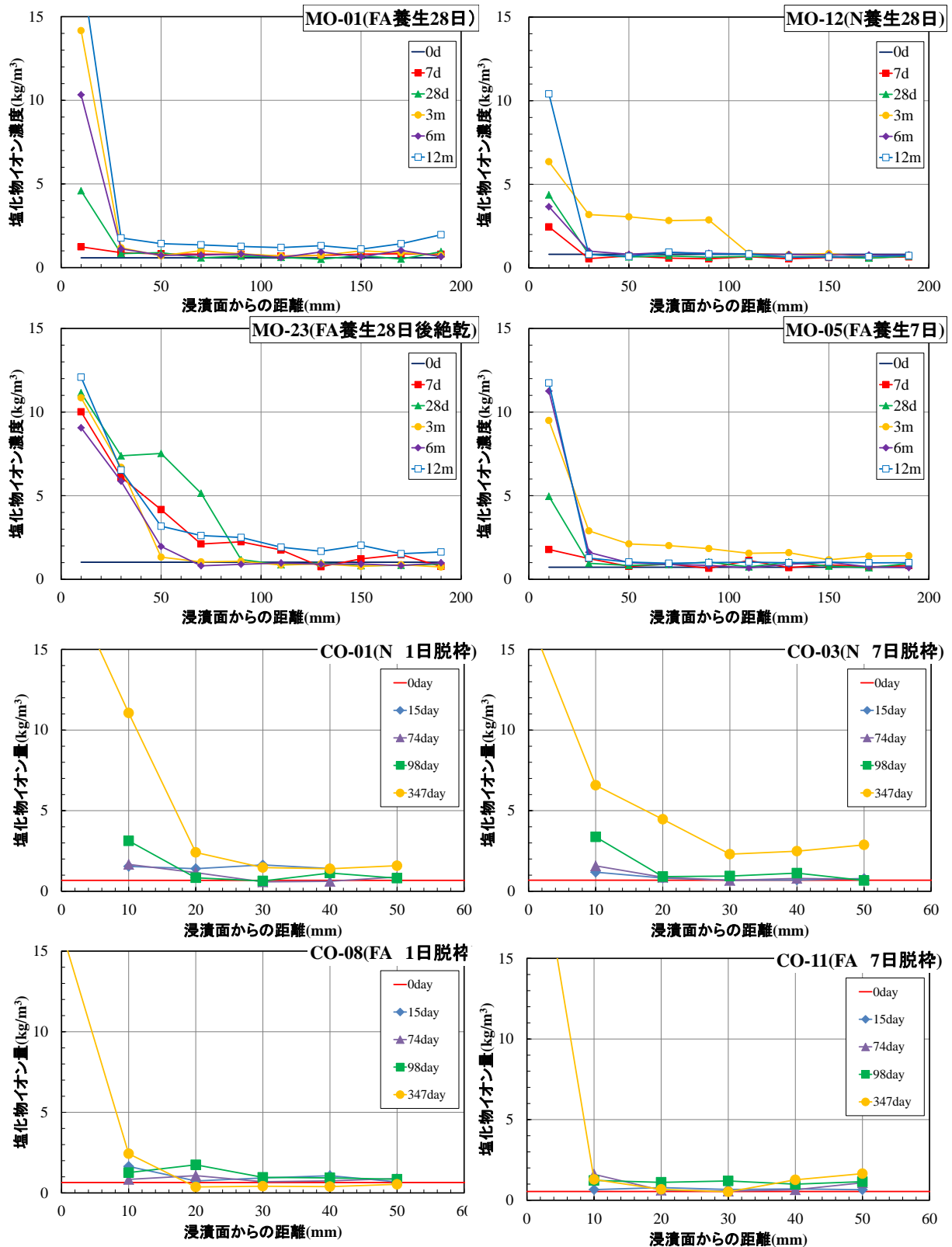


図-3 塩化物イオン濃度と浸漬面からの距離の関係

拡散係数 D_{aps} は、総じて、浸漬日数の経過ともない減少する傾向が見られ、浸漬日数の対数による近似と良い相関が見られた。モールド試験体では、養生日数が長いほど初期の拡散係数が小さく、28日養生後に絶乾状態にしたMO-23が最も拡散係数が大きくなったが、フライ

アッシュ配合の有無による差については、ほとんど見られなかった。養生温度についても、養生温度が高いほど初期の拡散係数が小さくなる傾向がみられた。コア採取試験体についても、脱砕まで期間が長いほど初期の拡散係数が小さい傾向が見られ、フライアッシュを配合した

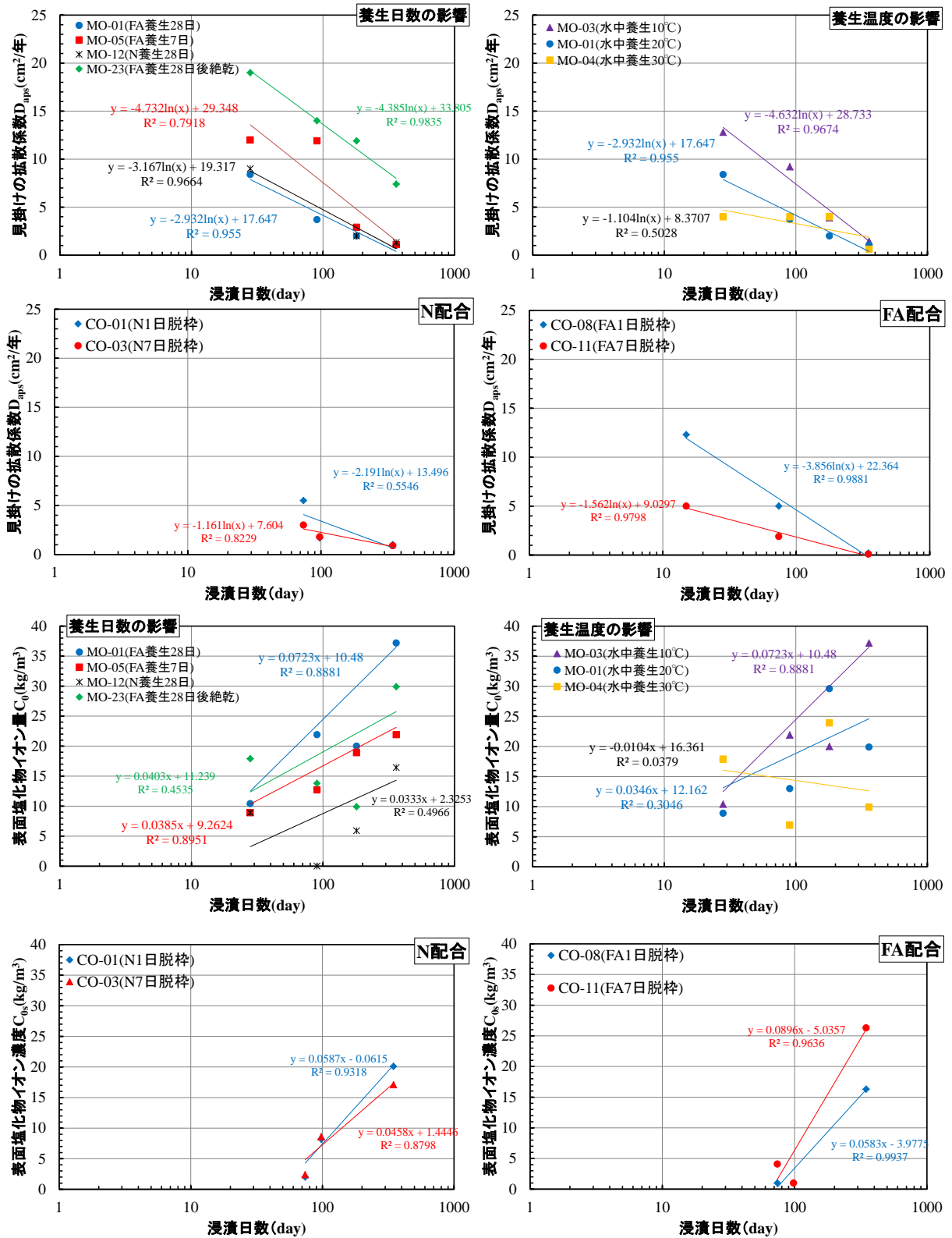


図-4 見掛けの拡散係数 D_{aps} および表面塩化物イオン濃度 C_{0s} と浸漬日数の関係

試験体のほうが、フライアッシュを配合しない試験体よりも初期の拡散係数が大きい傾向が見られた。表面塩化物イオン濃度 C_{0s} は、総じて、浸漬日数とともに増加する傾向に見られたが、近似式との相関は悪いものも見られ、今後の課題と考えている。

4. 塩化物イオン浸透限界深さに関する考察

3.で述べたように拡散係数 D_{aps} および表面塩化物イオン濃度 C_{0s} が浸漬日数とともに変化すると仮定して、塩化物イオンの浸透限界深さの推定を試みる。推定の仮定とし、拡散係数 D_{aps} および表面塩化物イオン濃度 C_{0s} は

試験結果より得られた浸漬日数との近似関係により推移するものとし、初期塩化物イオン量 C_i については試験により実測された結果を使用する。図-5に CO-11(FA7日脱枠)の場合の、塩化物イオンの浸透深さに関する推定結果を示す。

浸漬日数が182日と324日時の塩化物イオンの浸透状況はほぼ変わらず塩化物イオンの浸透が停滞していることが分かる。また、約30mm以深では塩化物イオン量の増加はほとんど見られず、塩化物イオンの浸透が停滞する限界深さは30mm程度と考えられる。試験結果では20mm程度が浸透限界深さと見られたが過大評価となっているが、浸透が止まる現象については説明できると考えられる。精度については今後の検討課題としたい。

5.まとめ

フライアッシュを用いたコンクリートの遮塩効果を確認するため、養生条件等を変えたテストピースを製作し塩水浸漬試験を実施したところ、以下のようなことが分かった。

- 1) モールド試験体についてはMO-23を除き30mm程度で、コア採取試験体についてはフライアッシュを添加した配合では20mm程度で、フライアッシュを添加していない配合でも30mm程度で塩化物イオンの浸透が停滞している傾向が見られた。
- 2) 試験結果から回帰分析により求められる拡散係数 D_{aps} は、浸漬時間とともに減少する傾向が見られ、浸漬時間の対数近似と相関が良かった。
- 3) 拡散係数 D_{aps} および表面塩化物イオン濃度 C_{0s} の浸漬時間による変化を実験結果から仮定すると、塩化物イオ

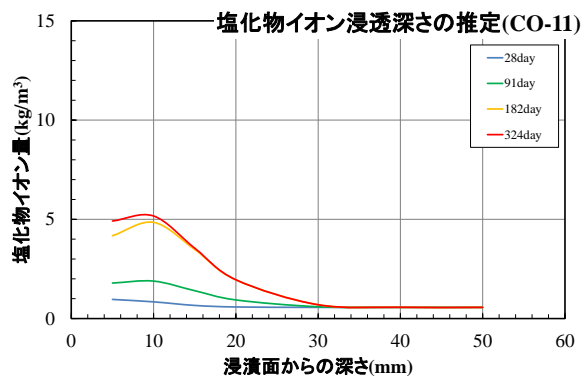


図-5 塩化物イオン浸透深さの推定 (CO-11)

ン浸透停滞と、浸透深さ限界深さの推定が可能であると思われる。

今後、浸漬日数を多くした試験体の分析や、養生条件や配合による差異の分析を進める予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.148-157，2013.3
- 2) 高橋 佑弥・井上 翔・秋山 仁志・岸 利治：実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1,2010