

フライアッシュコンクリートの塩分浸透性の迅速評価に関する電気泳動法の適用

杉山 隆文¹・Som VIRA²・辻 幸和³・大城 武⁴

¹正会員 Ph.D. 群馬大学助教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

²学生会員 工修 琉球大学大学院 工学研究科 (〒903-0213 沖縄県西原町千原 1)

³フェロー会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

⁴正会員 Ph.D. 沖縄職業能力開発大学校 校長 (〒904-2141 沖縄県沖縄市池原 2994-2)

フライアッシュコンクリートの塩分浸透性を迅速に評価するため、15Vの直流定電圧を連続印加して電気的に塩化物イオンを移動させる電気泳動法の適用を試みた。その結果、水中養生期間が91日では、フライアッシュの置換率が大きく水結合材比が小さい場合に塩分浸透抵抗性が大きくなることを示した。また、フライアッシュを細骨材の一部代替使用したコンクリートを3年間自然暴露した結果ともよく整合し、電気泳動法より得られる拡散係数(電気泳動)の評価指標としての妥当性を示した。そして、拡散係数(電気泳動)は、塩水浸漬試験から求めた見掛けの拡散係数よりも大きくなること、この主な理由は、固定化の影響による可能性が大きいことを明かにした。さらに、評価指標としてのクーロンや比抵抗の妥当性およびこれらと拡散係数(電気泳動)との比較を考察した。

Key Words : fly ash concrete, steady state chloride migration test, chloride ponding test, long-term natural exposure test, coulomb, chloride diffusion, Fick's law

1. はじめに

コンクリート標準示方書[施工編]¹⁾では、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食の照査は、コンクリートの塩化物イオン拡散係数の照査で行われる。その際、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントにおいては、実構造物からの豊富な実績データから、水セメント比を入力することで照査ができるようになった。しかし、JIS規格外石炭灰の利用やその細骨材代替としての使用などコンクリート材料の品質が今後多様化する場合、長期に及ぶ浸漬試験や暴露実験から塩分浸透性を評価することは時間の浪費が大きく、現実的ではない場合もある。したがって、コンクリートの塩分浸透性を迅速にかつ適切に評価できる評価試験方法の開発が急務である。

ASTM C1202 (AASHTO T277)^{2,3)}: Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration は、コンクリートの塩分浸透性を迅速にかつ簡便に評価するための促進試験方法として、現場の品質管理や材料開発を目的として、北米を中心に比較的多く採用されている⁴⁾。しかし、直流定電圧が60Vと大きいことに起因する溶液の温度上昇、シリカフェームやフライアッシュなどの鉱物質混和材の使用による細孔溶液中の化学組成の変化、

品質の異なるセメントや骨材の使用などがどの程度クーロンの大きさへ影響を与えるのかなどの不明な点が多く、さらなる普及に向けての研究も必要である。

ASTM C1202を改良した電気泳動法^{6)~11)}は、促進試験の一つであり、コンクリート中の塩化物イオンの移動流速を直接測定することに利点がある。しかし、電気泳動法から得られる塩化物イオン拡散係数(以後、本論では拡散係数(電気泳動)と定義する)の評価指標としての妥当性や施工編で用いられる見掛けの拡散係数との関係およびASTM法におけるクーロンとの関係は現在のところ明らかではない。さらに、環境問題への対応から今後の利用拡大が必要なフライアッシュを用いたコンクリートへの適用性についても十分なデータが報告されていない。

本研究の目的は、フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性の評価指標として、電気泳動法から得られる拡散係数(電気泳動)の妥当性を調べることにある。また、JISA6201のⅢ種に該当するフライアッシュを細骨材の一部代替として使用したコンクリートの塩分浸透抵抗性の報告は少ない。そこで、本研究では、JISのⅡ種およびⅢ種に準ずるフライアッシュを用いて、室内塩水浸漬と自然暴露実験を行い、電気泳動法の結果と比較した。

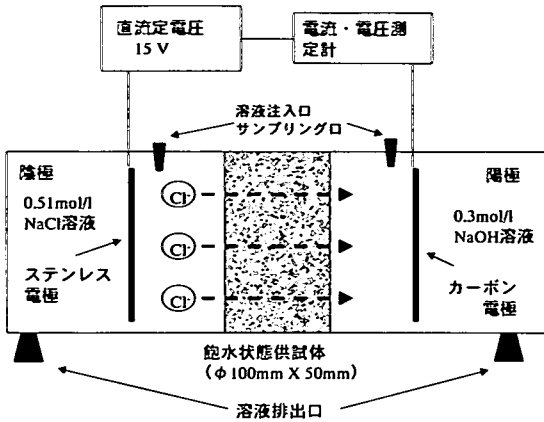


図-1 電気泳動試験の概要

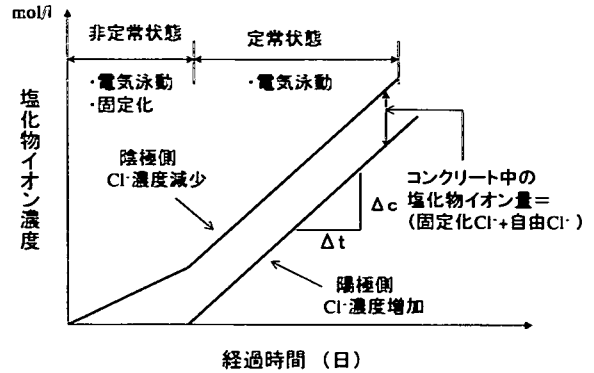


図-2 電気泳動試験結果の概念図

また、拡散係数（電気泳動）を単なる塩分浸透抵抗性のランク分け指標として使用する妥当性以外に、見掛けの拡散係数との関係も考察した。さらに、拡散係数（電気泳動）とクーロンや比抵抗との関係も調べて、ASTM 法との違いを考察した。

2. コンクリートへの電気泳動法の適用

(1) 電気泳動法の原理

電気泳動法の原理は、ASTM C1202 の原理と同じであり、コンクリートに直流定電圧を印加して、コンクリートの細孔溶液中で負電荷を持つ塩化物イオンを電気泳動させることに基づいている。したがって、塩化物イオンは、拡散による移動よりも短期間にコンクリート中を移動して、定常状態に達する期間が著しく減少される。

(2) 電気泳動試験の概要

実験装置の概略図を図-1 に示す。供試体の形状寸法は、直径が 100mm で厚さが 50mm の円盤型供試体、陰極側溶液は 0.51mol/l (3%)NaCl 溶液、陽極側溶液は 0.3mol/l NaOH 溶液である。これらは、ASTM C1202²⁾にほぼ準拠している。電極は、陰極側がステンレスメッシュで、陽極側が直径 80mm、厚さ 0.1mm の炭素板である。電極間に印加する直流定電圧は、温度上昇の影響を除くために 15V^{7,9)}として、塩化物イオンの電氣的泳動が定常状態になるまで連続して通電した。

主な測定項目は、両溶液の塩化物イオン濃度の経時変化、溶液温度、電流の経時変化、電位差、pH である。図-2 は、陰極側、陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化を模式的に表わしている。ここで、陽極側での塩化物イオン濃度の経時変化が一定に達した段階で、コンクリート

中を電気泳動する塩化物イオンの移動は定常状態に達したと考えて、その時の流束を次式から計算した。

$$J_{Cl} = \frac{V''}{A} \frac{\Delta c_{Cl}''}{\Delta t} \quad (1)$$

J_{Cl} : Cl⁻イオンの流束 (mol/(cm²·s))、 V'' : 陽極側の溶液体積 (l)、 A : 供試体断面積 (cm²)、 $\Delta c_{Cl}''$: 陽極側 Cl イオン濃度の増加量 (mol/l)、 Δt : 経過時間 (s)

(3) 電気泳動法からの拡散係数（電気泳動）の計算

本研究のように、直流定電圧を印加して、塩化物イオンが定常状態である場合の拡散係数（電気泳動）の計算方法は、Andrade⁶⁾によって、ネルンスト-プランク式を修正した式が提案されている。これを参考に、著者らは次式により、拡散係数（電気泳動）を計算することにした⁷⁾。

$$D_{el} = \frac{J_{Cl}RTL}{Z_{Cl}Fc_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \quad (2)$$

D_{el} : 拡散係数（電気泳動）(cm²/s)、 R : 気体定数 (J/(mol·K))、 T : 絶対温度 (K)、 Z_{Cl} : 塩化物イオンの電荷、 F : ファラデー定数 (C/mol)、 c_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度 (0.51 mol/l)、 ΔE : 電位差、 ΔE_c : 電極における接触電位、 L : 供試体厚さ (cm)

ネルンスト-プランク式は、希薄電解質溶液中におけるイオン種の移動に関する一般式であり、電位勾配は拡散電位に基づいている。コンクリートへの電気泳動法の適用では、これを外部定電圧に置き換えて、塩化物イオンの移動を表現したことに特徴がある。なお、大即、久田ら^{10,11)}は、定電流法に基づく電気泳動法からの拡散係数

表-1 フライアッシュの品質

項目	種類	シリーズ1	シリーズ2
		II種	III種
二酸化けい素(%)		54.7	59.3
強熱減量(%)		2.1	5.6
密度(g/cm ³)		2.43	2.18
比表面積(ブレン方法:cm ² /g)		3330	4440
フロー値比(%)		95以上	97
活性度指数*1(%)	材齢28日	80以上	80以上
	材齢91日	90以上	90以上

*1:JIS A6201の品質表示(参考)

の計算手法を提案している。本研究では、式(2)から計算されるものを拡散係数(電気泳動)と定義している。

3. 実験概要

(1) 供試体の作成

供試体は、2種類のフライアッシュに対して、それぞれシリーズ1とシリーズ2に分けた。

a) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を用いた。シリーズ1では、JIS A6201のII種に分類されるフライアッシュを使用し、シリーズ2にはIII種のフライアッシュを使用した。2種類のフライアッシュの品質を表-1に示す。

シリーズ1の細骨材は、陸砂(密度:2.61~2.63g/cm³, 吸水率:1.35~1.65%)を、粗骨材は砕石(密度:2.86g/cm³, 吸水率:0.73%, 粗粒率:6.80, 最大寸法:20mm)を、それぞれ使用した。なお、粗骨材の岩種は、凝灰岩である。

シリーズ2の細骨材は、除塩海砂および石灰石砕砂(密度:2.66および2.69g/cm³), 粗骨材は石灰石砕石(密度:2.70g/cm³, 最大寸法:20mm)を使用した。

b) 配合

各コンクリートの配合を表-2に示す。供試体は、シリーズ1として、水セメント比45~65%の普通コンクリートおよびフライアッシュを内割り置換したフライアッシュコンクリートである。コンクリートの電気抵抗は、骨材とセメントペーストの含有割合(体積比)にも支配されることから、シリーズ1では単位細骨材量および単位粗骨材量をすべて同じにし、ペーストの品質の差が顕著になるようにした。

シリーズ2では、強度増進や中性化対策として、単位セメント量を285kg/m³と一定にして、フライアッシュを細骨材の一部代替で51~244kg/m³まで使用した。また、水結合材比が35, 40%の場合に、単位粗骨材量を小さくし高流動フライアッシュコンクリートも試験した。なお、表-2には、各コンクリートの養生日数28日, 91日の圧縮

強度も示した。

c) 電気泳動試験用供試体の準備

標準の円柱型枠(直径:100mm, 高さ:200mm)を用いて作製した供試体を24時間後に脱型し、20℃の水中で養生した。養生後、上下端から30mm程度除いた残りの中央部分から、ダイヤモンドカッターで厚さ50mmの円盤型にスライスして、その円周面をエポキシ系樹脂でコーティングした。引き続き、ASTM C1202(AASHTO T277)に準拠して、供試体を減圧吸水させて^{3),9)}、試験開始日の材齢が28日および91日で試験を実施した。

d) 塩水浸漬試験用供試体(シリーズ1)

供試体の長さが400mm, 高さが100mm, 幅が100mmの角柱供試体を用いた。供試体は、打込み後24時間で脱型し、材齢28日まで水中養生を行った。3%の塩水に浸漬する浸漬面(打込み面)のレイタンスを除去後、浸漬面を除く側面および底面をエポキシ系樹脂でコーティングして、室内浸漬試験を開始した。

e) 自然暴露試験用供試体(シリーズ2)

供試体の形状寸法は、150×150×530mmの角柱供試体で、打込み面とその対面を除く4面にアクリルゴム系樹脂でコーティングした。脱型後、外気環境下で養生シートで覆い、散水して28日間養生した。

(2) 測定項目および測定方法

a) 電気泳動試験の測定

電気泳動法では、定期的に両極の溶液を採取して、その塩化物イオン濃度を自動電位差滴定装置で測定した。なお、両極の溶液を適宜全量交換して、陰極側での塩化物イオン濃度をできるだけ一定に維持し、陽極側では移動してきた塩化物イオンの蓄積量を小さく、かつ高アルカリ性を維持した。そのために塩素ガスは発生しなかった。芦田¹²⁾は、アルカリ雰囲気では塩素ガスや次亜塩素酸イオンの発生を防止できている。

電流およびpHの経時変化は、通電回路に接続されている電流計および採取した溶液を対象にしたpH計からそれぞれ測定した。温度センサーを溶液中に差し込み、温度変化も調べた。また、電位差は、簡便法として端子を直接溶液中に差し込みその電位差を測定した。実験は恒温室内(設定温度:25℃)で行った。

b) クーロンの計算

電気泳動試験から得られる試験開始24時間での電流の経時変化からクーロンを計算した。本研究での直流定電圧は15Vと小さく、ASTM C1202における直流定電圧(60V)の1/4であるため、通電時間は、ASTMの6時間の4倍である24時間とした。

c) 比抵抗の測定

関ら¹³⁾、鳥居ら⁹⁾の研究を参考に、比較的測定が簡便な比抵抗を各円盤型供試体に対して測定し、塩化物イオ

表-2 コンクリートの配合 (上: シリーズ1, 下: シリーズ2)

配合	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	単位量(kg/m ³)					セメント質量%		空気量 (%)	スランブ (cm)	圧縮強度(N/mm ²)	
			W	C	F	S	G	混和剤 ^{*1}	調整剤 ^{*2}			28日養生	91日養生
N45	45	0	153	339	0	844	1116	1.5	-	3.4	8	62.1	65.5
N55	55		165	300				1.4	-	5.8	12	40.9	53.1
N65	65		175	269				1.0	-	3.4	12	31.9	36.9
FA45-15	45	15	149	281	50	844	1116	1.5	0.02	6.3	9	49.7	58.5
FA45-30	45	30	145	226	97			1.2	0.015	4.9	9	43.8	56.5
FA55-15	55	15	161	250	44			1.0	0.01	4.1	8	40.7	53.4
FA55-30	55	30	158	201	86			0.7	0.01	4.7	8	36.2	47.7

*1: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル)

*2: FA用空気量調整剤(高アルキルカルボン酸陰イオン界面活性剤)

配合	W/C (%)	W/(C+F) (%)	単位量(kg/m ³)					x(C+F)%		圧縮強度(N/mm ²)		
			W	C	F	S(1) ^{*1}	S(2) ^{*2}	G	混和剤 ^{*3}	混和剤 ^{*4}	28日養生	91日養生
S1-0	65	65	185	285	0	544	203	1080	0.3	-	28.8	32.3
S1-1		35			244	317	118	1080	0.9	-	41.8	54.5
S1-2		40			178	379	142	1080	0.7	-	39.9	52.5
S1-3		45			126	427	160	1080	0.6	-	36.3	47.4
S1-4		55			51	497	186	1080	0.5	-	33.8	41.0
F1-2		35			244	511	191	810	-	1.7	52.9	67.3
F1-3		40			178	573	214	810	-	1.5	45.2	57.7

*1: 除塩海砂, *2: 砕砂

*3: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系), P社SP-8S

*4: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系), P社SP-8Sx2

ンの電気泳動と比較した。周波数が950Hz, 印加電圧が15Vの交流電源装置を用いた。なお, 電極として直径100mmのステンレス円板を用い, 供試体との接触には, セメントペーストを使用した。

d) 塩水浸漬試験

3%のNaCl溶液を水位を一定に保持して, 打込み面を浸漬させた。浸漬期間が365日後に, 直径50mmの円柱を浸漬方向にコア抜きして, 10~15mm間隔を目安に厚さ方向にスライスした。なお, フライアッシュコンクリートでは91日後にも測定した。塩化物の分布は, JCI-SC4による硬化コンクリート中の全塩分量の測定方法を参考に, 加熱煮沸した硝酸溶液中へ塩化物イオンを抽出させ, 次式から全塩化物イオン量を供試体の単位体積当りで計算した。

$$Cl_t = \frac{35.5}{1000} \cdot \frac{c_f \cdot V_s}{M_c} \cdot \rho_s \quad (3)$$

Cl_t : 全塩化物イオン量 (kg/m³), c_f : 抽出した塩化物イオン濃度で自動電位差滴定装置で測定 (mol/l), V_s : 抽出後溶液の定容量 (l), M_c : 粉末試料量 (kg), ρ_s : コンクリートの密度 (kg/m³)

e) 自然暴露実験

所定の期間の養生後に, 海岸近くの塩害環境下に自然暴露した。暴露環境は, 護岸上部の大気中であり, 高波の場合には波しぶきがかかる厳しい塩害環境下である。

そして, 暴露3年後に浸透方向に対してコア抜きして, 表面から10mm毎に各層をスライスして, JCI SC4法に準じて全塩分量を測定した。

4. 電気泳動法による塩分浸透抵抗性の評価

(1) 電気泳動法における塩化物イオンの移動

各シリーズのコンクリートに対して実施した電気泳動試験の結果を図-3~7に示す。塩化物イオンの濃度変化は, 図-2に対応している。陰極側の塩化物イオン濃度は, 試験開始初期から減少することを示す。陽極側では, 数日後に濃度増加を示して, やがて定常状態に至ることを示している。このような傾向は, 全てのコンクリートで同じである。なお, 式(1)による定常状態における流束の計算では, 試験終了時のデータを含めて最低5プロットに対して直線回帰したときの傾きを用いた。つまり, 定常状態を5日間以上続行した後に試験を終了した

a) シリーズ1の陽極側塩化物イオン濃度の経時変化

定常状態に達する時期およびその後の濃度増加の割合は, コンクリートの種類で明確に異なっている。定常状態に達するまで, コンクリート中の塩化物イオンは, 電気泳動による移動とセメント硬化体による固定化を繰り返しながら陽極方向に徐々に移動していると考えられる。すなわち, 細孔構造の影響に加えて, 単位セメント量が多い普通コンクリートほど, 供試体の単位体積当りに含まれるC₃A量も多くなり, 固定化される塩化物イオン

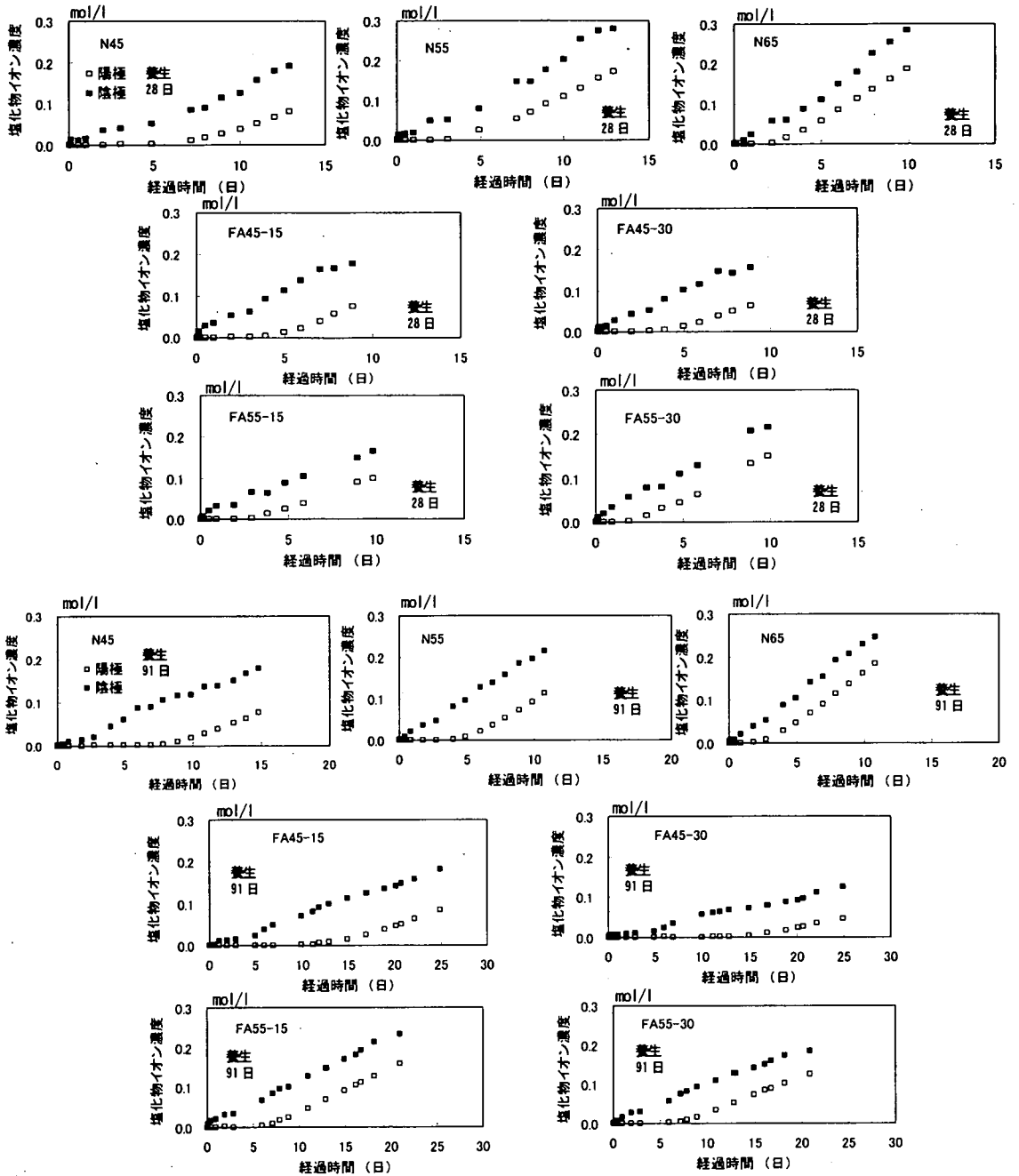


図-3 電気泳動試験における陰極側および陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化（シリーズ1：養生日数28日，91日）

量が増加して、定常状態に達する時期が遅れると予想される。固定化される塩化物イオン量が、単位セメント量が大きいN45で多くなることは、陰極側塩化物イオン濃度と陽極側塩化物イオン濃度の収支をみると明らかであり、図-3からもそのことがわかる。

定常状態における増加割合は、水セメント比が大きいほど増加している。つまり、単位骨材量は同じである

で、セメントペーストマトリックスの空隙量や空隙の連続性が増加したことによるものである。また、陰極と陽極側の塩化物イオン濃度の増減割合は同程度であり、定常状態では固定化は既に終了したものと推察される。

フライアッシュコンクリートでは、養生日数が91日に増加すると、定常状態に達する時期が増加して、その後の増加割合も水結合材比の減少と置換率の増加で減少し

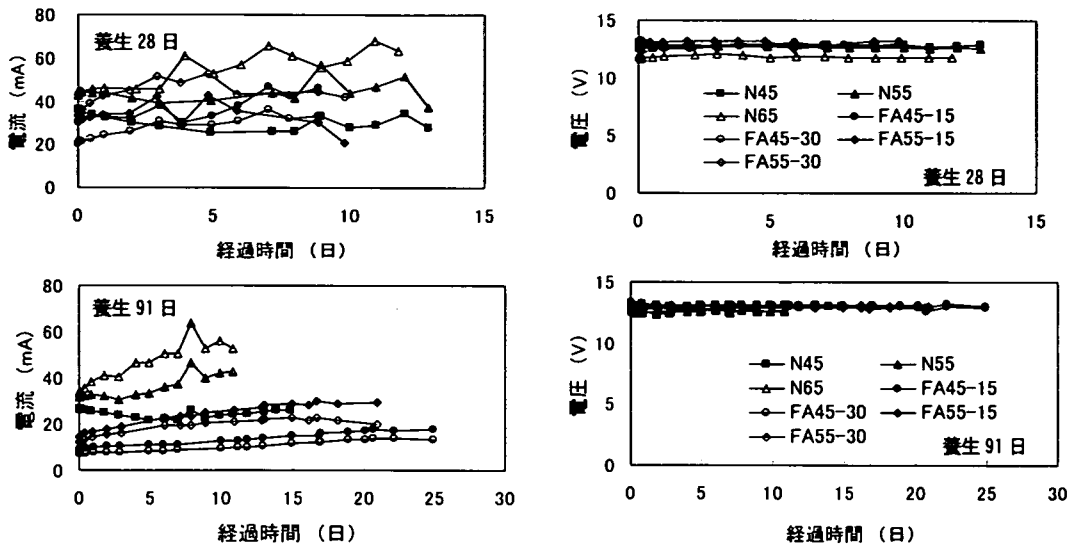


図-4 電気泳動試験における電流および電圧の経時変化（シリーズ1：養生日数28、91日）

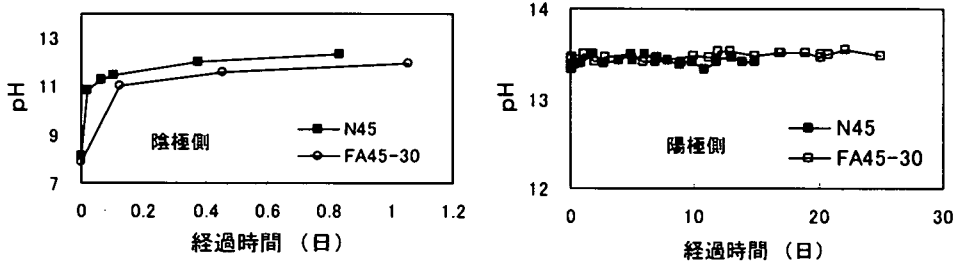


図-5 pHの経時変化

ている。つまり、塩化物イオンの電気泳動が抑制されているのがわかる。また、塩化物イオンの固定化量は、養生91日における陰極側と陽極側の塩化物イオン濃度の収支をみる限り、単位セメント量がN65よりも少ないにも関わらず、FA45-30、FA55-15、FA55-30において同等かまたは比較的多い。これは、フライアッシュに含まれるアルミナ成分による影響をある程度受けたためと思われる。これらのことから、直流定電圧下において、塩化物イオンの電気泳動の流束が、結合材の種類や水結合材比などの影響を顕著に受けており、コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性の評価が可能である。

b) シリーズ1の電流、電圧、pHの経時変化

図-4は、電気泳動試験における電流および電圧の経時変化を示している。

養生日数が91日の場合で特に、初期電流の大きさが普通コンクリートとフライアッシュコンクリートとで明かに異なり、結合材の種類によって大きく2つのグループに分けることができる。しかし、試験期間の増加により、水結合材比や置換率の差も表れており、さらに厳密な評価が可能である。ここで、特にN65、N55、FA55-15では、塩化物イオンの電気泳動が定常状態に達した後も、電

流が増加する傾向がある。これは、電流を支配する要因が、塩化物イオンだけではなく、他のイオン種も関係しており、各イオン種の輸率が変化しているためである¹⁹⁾。なお、斉藤¹⁰⁾は、電位差を印加することでカルシウムイオンも電気泳動して、セメントの水和生成物である水酸化カルシウムが溶解することを報告しているが、本研究における電位勾配、試験期間、供試体の厚さなどを考えると、水酸化カルシウムの溶解による空隙量の増加は陰極側供試体表面の極限られた範囲と推察され、塩化物イオンの電気泳動にはほとんど影響がないと思われる。

電圧の経時変化は、全てのコンクリートで認められない。電極間に印加した15Vよりも小さい13V前後で一定となっている。

図-5は、pHの経時変化の一例である。陰極側溶液のpHは試験開始24時間までの経時変化である。初期値が7.8~8.1であったが、試験開始直後から急に増加し12.6~12.8に達して、その後、溶液交換前まではほぼ安定していた。この傾向は、全てのコンクリートで同様で、電極反応によって生じた水酸化イオン(OH⁻)濃度の増加による¹⁹⁾。したがって、前述したN65、N55、FA55-15での経時的な電流増加は、OH⁻イオン濃度の増加が関係している

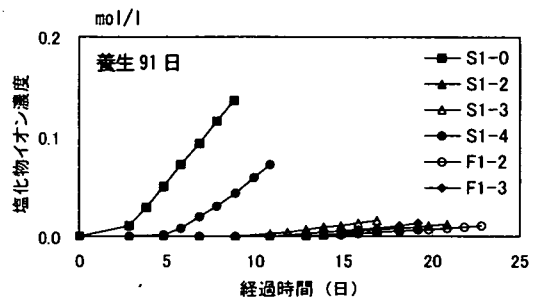
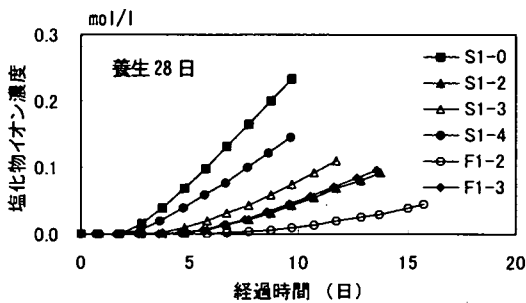


図-6 陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化 (シリーズ2)

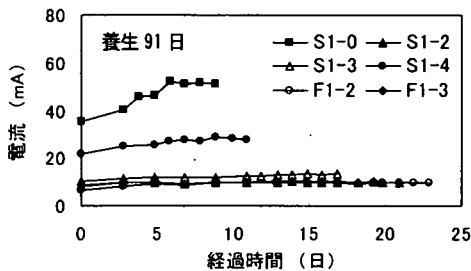


図-7 電流の経時変化 (シリーズ2, 養生91日)

と思われる。

一方、陽極側は、試験期間を通じて、pH13前後で大きな変化が認められない。この理由は、適宜溶液の全量交換を実施したことおよびコンクリートからの電気泳動と電極反応で消費されるOH⁻イオンとのバランスによるためと思われる。なお、電気泳動試験では、溶液温度の経時変化もモニターしているが、温度は室温である25℃前後で一定であった。

c) シリーズ2の陽極側塩化物イオン濃度の経時変化

図-6は、Ⅲ種フライアッシュを細骨材の一部代替で使用するフライアッシュコンクリートの試験結果である。養生日数が91日に増加すると、定常状態に達する時期および増加割合が著しく減少している。フライアッシュの添加量が多いほどその差が著しく、塩化物イオンの電気泳動に対する抑制効果が顕著である。

しかし、シリーズ1の結果も合わせると、促進試験といえども、定常状態に達する時期が10日間以上になり、試験終了まで3週間程度かかる供試体もある。したがって、現場での品質管理には不向きであり、試験目的に応じた利用方法を考える必要がある。

図-7は、養生91日の電流の経時変化である。普通コンクリート(S1-0)の電流が大きく、経時的に増加傾向であるが、他の供試体では比較的一定である。

(2) 拡散係数(電気泳動)による評価

式(1)、(2)を用いて、各コンクリートの拡散係数(電気

泳動)を計算した。表-3にそれらの計算結果を示す。

シリーズ1では、水セメント比に従いN45、N55、N65の順に拡散係数(電気泳動)は増加している。水セメント比の増加は、塩分浸透抵抗性の低下につながるとする一般的な知見に一致している。

フライアッシュコンクリートの拡散係数(電気泳動)は、養生日数が28日の場合で、普通コンクリートのN45およびN55とほぼ同程度である。しかし、養生日数が91日の場合、拡散係数(電気泳動)が顕著に減少しており、潜在的な塩分浸透抵抗性を適切に評価する場合には、養生日数が最低でも91日まで行う必要がある。一方、普通コンクリートは、既往の研究^{7,9,14)}も参考にすると、28日間の養生でも評価が可能である。フライアッシュコンクリートの拡散係数(電気泳動)が材齢とともに減少することは、鳥居ら⁹⁾のフライアッシュペーストを用いた研究結果とも一致する。

以上のことより、フライアッシュコンクリートでは、フライアッシュの置換率や水結合材比に応じたポゾラン反応の進行によって、細孔構造が緻密化することなどの影響が明確に表れており、電気泳動法による拡散係数(電気泳動)は、評価指標として妥当であると考えられる。この妥当性は、著者らが別途行った低水セメント比やシリカフェーム混入などの高性能コンクリートでも示されている¹⁴⁾。

91日以降においてもフライアッシュや化学混和剤の混入効果によって、拡散係数(電気泳動)は減少する可能性がある^{8,14)}。しかし、評価試験の実施目的を考え合わせると比較的短期間での評価が望ましいと考える。

5. 室内浸漬試験結果との比較

(1) 塩水浸漬試験(シリーズ1: 365日間)

a) 塩化物イオンの拡散性状と電気泳動法の適用性

図-8の実線は、1年間の塩水浸漬試験結果である。本研究では、常時塩水に浸漬しているので、主となる移動

表-3 拡散係数（電気泳動）と見掛けの拡散係数の比較

配合	電気泳動法		塩水浸漬試験・自然暴露実験 ^{*2}		固定化 比例定数 R,式(5)
	拡散係数(電気泳動) ^{*1} (D_e)		見掛けの拡散 係数 ^{*1} (D_{app})	表面塩化物 イオン濃度 ^{*3}	
	28日養生	91日養生			
N45	3.2	3.0	1.6	8.1	1.0
N55	5.8	5.6	3.1	9.3	0.9
N65	8.2	7.2	7.5	22.8	0.1
FA45-15	4.0	2.1	1.4	16.6	0.7
FA45-30	3.6	1.4	1.1	15.5	0.4
FA55-15	4.1	3.1	2.4	13.4	0.5
FA55-30	5.6	2.4	1.9	20.5	0.6
S1-0	10.8	6.1	9.9	14.6	-
S1-2	3.5	0.40	0.57	28.9	-
S1-3	4.9	0.68	0.67	25.2	-
S1-4	6.8	3.7	1.8	18.6	-
F1-2	1.9	0.31	0.18	26.8	-
F1-3	3.6	0.47	0.31	33.5	-

*1: $\times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$, *2: 塩水浸漬試験(365日), 自然暴露実験(3年間)の浸透分布から逆解析より計算

*3: kg/m^3

機構は拡散である。電気泳動法による拡散係数（電気泳動）が大きい供試体ほど、塩化物イオンが内部まで拡散している。N65の表層部で塩化物イオン濃度が大きい理由は、塩水浸漬期間や浸漬面のレイタンス処理によるためと思われる。

フライアッシュコンクリートも同様に、置換率や水結合材比による影響が表れており、拡散係数（電気泳動）による評価結果とほぼ一致する。

b) 拡散係数（電気泳動）と見掛けの拡散係数

図-8の点線は、電気泳動法より求めた拡散係数（電気泳動）と次式のFickの拡散方程式の解から塩化物イオンの拡散性状を予測した結果である。

$$C_d = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right) \quad (4)$$

x : 表面距離(cm), t : 経過時間(sec), erf : 誤差関数,
 C_d : x における塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3), D_e : 電気泳動法から求めた拡散係数（電気泳動）(cm^2/s)

表面塩化物イオン濃度は、塩水浸漬試験から得られた実線の塩化物イオンの拡散分布を逆解析して求めた外挿値とした。この理由は、拡散係数だけの比較を目的にしているためである。このようにして求めた表面塩化物イオン濃度も表-3に示す。

図-8より判断して、 D_e を用いた予測値は、塩水浸漬試験結果よりも塩化物イオン量が大きく、特にN45およびN55では明確である。つまり、電気泳動試験より求めた D_e は、塩水浸漬試験結果を逆解析から求めた見掛けの塩化物イオン拡散係数よりも大きいことを示している。なお、表-3には各コンクリートに対して計算した見掛けの

拡散係数を示す。

フライアッシュコンクリートでは、材齢28日で塩水浸漬試験を開始したので、浸漬試験初期では塩化物イオンが比較的多量に拡散する。そして、浸漬試験が長期化すると徐々に拡散抵抗性が増加して、拡散量も減少する。したがって、365日終了後の見掛けの拡散係数は、浸漬期間中の平均的な値である。しかし、図-8より、養生日数が91日ときの D_e と式(4)から計算した予測値は、塩水浸漬試験結果よりも大きい。そして、普通コンクリートと同様に、 D_e は、365日の塩水浸漬試験で求めた見掛けの拡散係数よりも大きい結果になった（表-3）。

(2) 固定化の影響を考慮した考察

電気泳動試験では、前述したように、固定化が終了した後の定常状態の流束に基づいて、拡散係数（電気泳動）を計算した。しかし、塩水浸漬試験では、固定化と拡散が繰り返されながら内部に移動するために、固定化される分だけ、拡散できる塩化物イオン量は減少する。したがって、電気泳動試験より求めた D_e が大きくなる原因の一つは、固定化の影響を無視して計算しているためである。このことを確認するため、固定化の影響について考察した。

反応を伴う拡散についてFickの式を適用するにあたり、佐伯・二木¹⁷⁾の研究を参考に、次式のように、固定化塩化物イオン濃度と拡散する自由な塩化物イオン濃度が比例関係にあるとする。

$$S = Rc \quad (5)$$

S : 固定化塩化物イオン濃度, R : 自由塩化物イオン濃度に対する固定化塩化物イオン濃度の割合, c : 自由塩化物イオン濃度

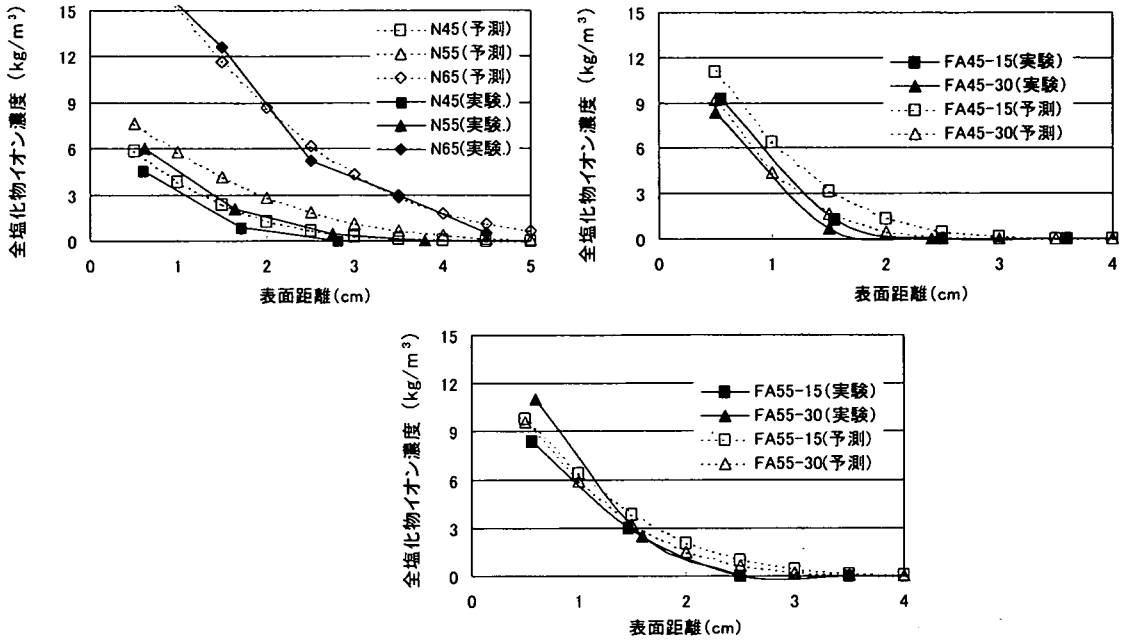


図-8 室内塩水浸漬試験結果と拡散予測結果 (Nシリーズは28日養生, FAシリーズは91日養生の D_{ef} で予測)

このような線形反応を含めた一次元方向の拡散移動で、細孔溶液中で塩化物イオンの固定化速度が拡散速度よりも速く、局所的な平衡状態に瞬時に達すると仮定した場合は、次式ようになる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{dc}{dt} \quad (6)$$

ここで拡散係数、 D が一定とすると、式(6)は式(5)の比例係数、 R を用いて次式に変換される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D}{R+1} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (7)$$

つまり、塩化物イオンの固定化を考慮することによって、見掛けの拡散係数は、拡散係数(電気泳動)の $(1/(R+1))$ 倍になると考えた。ここで、式(7)の拡散係数を電気泳動法より求めた D_{ef} として、塩水浸漬試験結果と対応するように固定化の比例定数、 R を求め、その結果も表-3に示す。

a) 普通コンクリート(シリーズ1)

比例定数 R は、単位セメント量が多いN45で大きく、N65で最も小さい。これは、単位セメント量が多いN45で固定化される塩化物イオン量が多いことを示しており、

前述のように図-3からそのことが分かる。ここで、丸屋ら¹⁸⁾の固定化係数、 α の平均値から比例定数、 R を換算すると($R = \alpha / (1 - \alpha)$)、 $R = 1.3$ となり、N45やN55と近い値になる。なお、本研究における R は、供試体の単位体積当りに対する平均的な割合である。

N65の R の値が小さいが、この理由は、塩化物イオンの移動経路に関係していると思われる、特に骨材とモルタルマトリックスの界面の移動が卓越したためと考えられる。したがって、拡散係数(電気泳動)と見掛けの拡散係数との比較においては、固定化に加えて塩化物イオンの移動経路の差異による影響も考慮する必要性が示唆された。

b) フライアッシュコンクリート(シリーズ1)

フライアッシュコンクリートは、拡散係数の経時的な減少が大きいため、塩水浸漬期間が91日までの拡散性状を予め求めて、365日の結果と比較して考察した。すなわち、養生日数91日の拡散係数(電気泳動)を用いて、塩水浸漬期間が91日以降365日までに増加した塩化物イオン濃度を式(4)から計算した。

図-9は、2層目(表面距離が約1.5cm)における全塩化物イオン濃度を比較している。式(4)からの増分予測は、塩水浸漬試験の91~365日間で実際に増加した塩化物イオン濃度よりも大きく、電気泳動試験より求めた D_{ef} が大きいことを再び示す結果になった。そこで、式(7)から、塩化物イオンの増分が一致するように、固定化の比例定数、 R を計算した(表-3)。N45やN55と比較すると、フライア

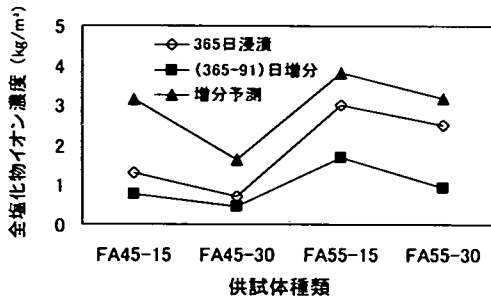


図-9 フライアッシュコンクリートの拡散予測と実測値との比較 (表面距離約 1.5cm)

ッシュコンクリートの固定化定数, R は小さく, 固定化される塩化物イオン量は普通コンクリートよりも減少していることを意味している。この固定化量の減少傾向は, 染谷ら¹⁹⁾の研究報告と一致する。

したがって, 固定化に関する比例定数, R を適切に設定することによって, 電気泳動試験より求めた D_d から, 見掛けの拡散係数を計算できることが示唆された。なお, 固定化塩化物イオン量を直接測定することは困難であるが, 電気泳動試験の陰極と陽極溶液の塩化物イオン濃度の収支から, 自由塩化物イオン量を差し引いて推定できる可能性もある。

6. 自然暴露実験結果との比較

図-10は, 3年間の自然暴露実験の結果である。フライアッシュの添加の有無やその添加量に応じて, 塩分浸透性が顕著に異なっている。また, 同一の供試体でも下面の塩化物イオン浸透性が大きい。この理由として, 上面の付着塩分が風雨で洗い流されること, 下面は打込み面であるためにブリーディングによる水みちやレイタンス層の影響が大きいことなど挙げられる。

普通コンクリート (S1-0) では, 塩化物イオンが内部にまで多く浸透しており, 表層付近で少ない。下面では, フライアッシュの添加量が 51kg/m^3 と最も少ない S1-4 で, 比較的多く浸透している。

高流動コンクリート (F1-2, F1-3) は, 3年経過後も浸透面から 3cm の深さで塩化物イオンは浸透していない。笹谷ら²⁰⁾の7年間の自然暴露実験では, フライアッシュコンクリート ($W/(C+F)=0.55$) の見掛けの拡散係数は $1.5 \sim 2.1 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ と計算されている。本研究では, 細骨材の一部代替で使用したために, 下面の見掛けの拡散係数 (表-3) は, 小さい結果になった。ただし, このように塩化物イオンの浸透抵抗性を著しく増加させたフライアッシュコンクリートについても, 塩化物イオンの浸透性を拡散方程式で近似できるかは今後検討する必要がある。

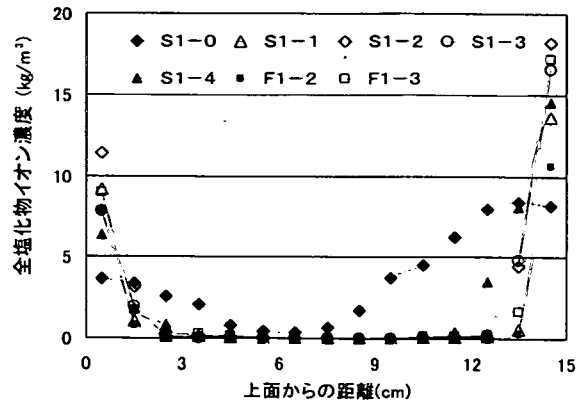


図-10 自然暴露実験結果

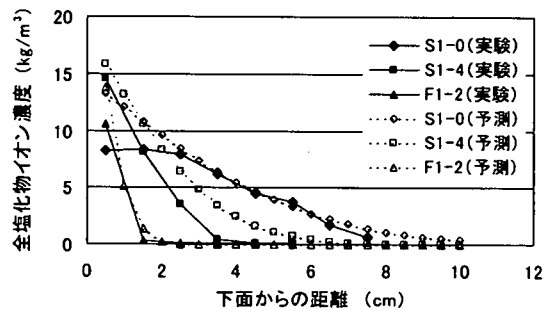


図-11 自然暴露実験結果と拡散予測 (下面から 10cm を対象)

表-3の拡散係数(電気泳動)は, 普通コンクリート(S1-0)で大きく, 次にS1-4であり, 特に下面の暴露実験の結果をよく反映している。しかし, これら以外のフライアッシュコンクリートの拡散係数(電気泳動)は1オーダー程度小さく, 塩化物イオン浸透抵抗性が極端に大きいため, 3年経過後もどの供試体の抵抗性が大きいのかについては判断できない。

S1-0とS1-4および最も拡散係数(電気泳動)が小さいF1-2の下面の結果を用いて, シリーズ1と同様に拡散係数(電気泳動)を定量的に考察する。実際の表面塩化物イオン量は経時変動するが, 逆解析における境界条件は一定と仮定して見掛けの拡散係数を計算した。なお, S1-0の浸透分布は特徴的あり, 表-3の見掛けの拡散係数は, 3層目以降で回帰して計算した。

自然暴露試験のフライアッシュコンクリートでは, 1層目と2層目の全塩化物イオン量の実測値の差が極端に大きいため, 表-3で示した表面塩化物イオン量が大きく計算される傾向にある。

図-11は, 実線が暴露試験結果, 点線が拡散係数(電気泳動)と式(4)からの予測値である。電気泳動法から求めた D_d は, 見掛けの拡散係数よりも大きいため, 予測値

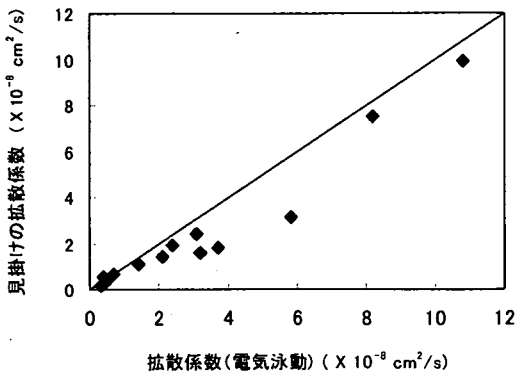


図-12 拡散係数（電気泳動）と見掛けの拡散係数との関係

は大きくなる傾向が認められる。したがって、自然暴露の結果と比較しても、拡散係数（電気泳動）は、固定化を無視している分だけ大きくなった。しかし、室内で管理された塩水浸漬試験と異なり、自然暴露では、乾・湿の繰り返し、温度変化、飛来塩分量変化などの諸条件が加わっており、固定化以外の影響も含めて今後の検討が必要である。

図-12は、表-3に示した全てのコンクリートにおける拡散係数（電気泳動）と見掛けの拡散係数との関係を図で示したものである。なお、普通コンクリートは養生日数が28日、フライアッシュコンクリートは91日での拡散係数（電気泳動）である。これまで説明してきたように、拡散係数（電気泳動）は見掛けの拡散係数よりも大きくなる傾向を示していることがわかる。

7. クーロン、比抵抗、拡散係数（電気泳動）の関係

ここでは、同じ原理に基づく2つの電気化学的手法について比較する。電気泳動法は、塩化物イオンが定常状態の流束を用いているが、ASTM法は試験開始24時間のクーロンを測定するために、塩化物イオンの電気泳動は非定常状態である。

(1) クーロンによる塩分浸透性評価

表-4は、ASTMの基準²⁾に基づいて、クーロンの大きさから判定した塩分浸透性の結果である。なお、フライアッシュコンクリートは養生日数が91日のクーロンから判定した。

表-4に示されているように、フライアッシュの使用効果が明らかで、ASTM基準から、概ね塩分浸透性が評価できる。また、鳥居らの研究⁴⁾では、見掛けの拡散係数と

表-4 クーロンによる塩分浸透性評価と比抵抗測定結果

配合	ASTM法		判定*1	比抵抗 (Ω・cm)	
	クーロン(A・s)			28日	91日
	28日	91日			
N45	2929	2250	Moderate	5813	6840
N55	3808	2800		4453	5344
N65	3916	3096		3787	5484
FA45-15	2814	780	Very Low	6594	21500
FA45-30	1955	599		9261	26865
FA55-15	2796	1287	Low	6326	14068
FA55-30	3361	1097		5467	16326
S1-0	3991	3119	Moderate	3213	4304
S1-2	2135	731		5816	15848
S1-3	2631	894	Very Low	4771	12755
S1-4	4180	1913		3143	6852
F1-2	1936	606	Very Low	6344	17084
F1-3	2110	749		5533	14676

*1: 塩分浸透性ランク²⁾—極小(Very Low);100~1000, 小(Low);1000~中(Moderate);2000~4000, 大(High);4000~ (単位:A・s)

クーロンは相関性があることを報告している。しかし、普通コンクリートと比較すると、水セメント比による差別化が適切でない。クーロンは水セメント比の増加に従って若干増加しているが、判定基準では、この程度の増加では、塩分浸透性に影響を及ぼさないと判断されたためである。また、S1-0の見掛けの拡散係数は最も大きい(表-3)、クーロンからの判定は「中」となり、他の普通コンクリート(N45~65)と塩分浸透性は同程度と判定されている。また、N45の見掛けの拡散係数は、FA55-15よりも小さいが、クーロンからの塩分浸透性の判定では逆転している。

したがって、ASTM法を見掛けの拡散係数と比較すると、低水セメント比の普通コンクリートの塩分浸透抵抗性が過小評価されるか、またはフライアッシュコンクリートの抵抗性が過大評価される可能性がある。フライアッシュコンクリートで過大評価される理由は、フライアッシュの使用によって、細孔溶液中の化学組成が異なるためであると指摘されている²⁾。塩化物イオンの拡散は、細孔溶液の化学組成、特に水酸化物イオンの影響をある程度受けると思われるが、ASTM法によって、フライアッシュコンクリートは優位に判定される可能性があると思われる。

(2) クーロンと比抵抗との比較

図-13は、全ての供試体について、クーロンと比抵抗をプロットした結果である。実線は、次式で示すクーロンと比抵抗の理論関係であり、クーロンは電流が一定の下で計算されると仮定した。

$$\rho = \frac{\Delta E}{C} \frac{A}{L} \Delta x \quad (8)$$

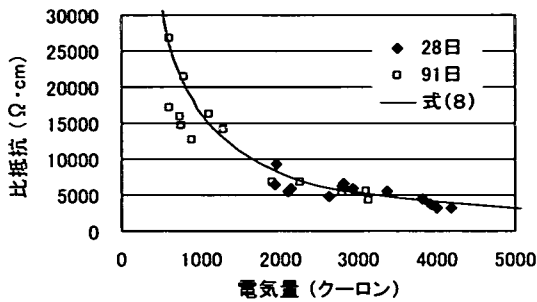


図-13 クーロンと比抵抗との関係

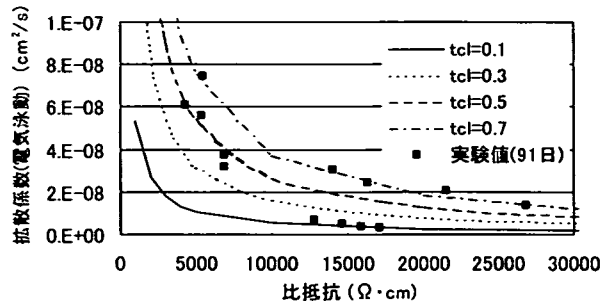


図-14 比抵抗と拡散係数（電気泳動）との関係

ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$), C : クーロン ($\text{Amp} \cdot \text{sec}$), A : 供試体断面積 (cm^2), L : 供試体長さ (cm), ΔE : 電位差 (V), Δt : 経過時間 (sec)

実験結果は、理論値とほぼ等しい関係である。つまり、ASTM 法のように短時間の測定において、クーロンは比抵抗と密接な関係を有しており、コンクリート中の塩化物イオンの電気泳動と無関係である。本研究において、試験開始後 24 時間で、塩化物イオンが未だ陽極側に達していないことから理解できる。これは、Feldman ら²⁾が、ASTM 法での陰極溶液に、塩化物イオンを含む溶液を使用する必要が無いことを報告していることに一致する。

(3) 比抵抗と拡散係数（電気泳動）との関係

関ら¹³⁾は、測定が比較的簡便な比抵抗は、コンクリートの緻密性と関係があり、塩分浸透深さともよい相関があることを報告している。

図-14 は、比抵抗と拡散係数（電気泳動）との関係である。比抵抗の増加は、拡散係数（電気泳動）の減少につながり、両者の相関が認められる。しかし、比抵抗が大きい場合に、同一の比抵抗でも拡散係数（電気泳動）が異なる。

そこで、定量的な関係を調べるために、コンクリート中で塩化物イオンが電気泳動する場合に、その電流伝達率を表す輸率を変化させて、次式から両者の関係を求め、それを曲線として同図に示した。

$$D_{el} = \frac{RTt_{Cl}}{Z_{Cl}^2 F^2 c_{Cl} \rho} \quad (9)$$

t_{Cl} : 塩化物イオンの輸率, ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$), D_{el} : 拡散係数（電気泳動） (cm^2/s), R : 気体定数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$), T : 絶対温度 (K), Z_{Cl} : 塩化物イオンの電荷, F : ファラデー定数 (C/mol), c_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度 (0.51 mol/l)

本研究の範囲では、輸率が 0.1~0.7 と広範であることが、同程度の比抵抗でも拡散係数（電気泳動）が異なる原因と考えられる。逆に、適切な輸率の設定で拡散係数（電気泳動）を推定できる可能性がある。しかし、式(9)の適用は、塩化物イオンが電流伝達イオンとしてコンクリートの細孔溶液中に存在する場合であり、その際に測定される比抵抗を用いる場合に限られる。

8. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 電気泳動試験から求めた拡散係数（電気泳動）は、コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を表す評価指標として妥当である。また、フライアッシュコンクリートの養生日数は、91 日間は必要である。しかし、試験期間が 3 週間程度要する場合もあり、試験目的に応じた利用が望ましい。
- (2) III 種フライアッシュを細骨材の一部代替で使用したコンクリートの拡散係数（電気泳動）は、添加量の増加で $10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$ まで減少しており、優れた塩化物イオン浸透抵抗性を有する。
- (3) 拡散係数（電気泳動）は、見掛けの拡散係数よりも大きく計算される。この主な理由は、拡散係数（電気泳動）では固定化の影響が無視されているためであり、適切に固定化定数を設定することによって、見掛けの拡散係数を計算することが可能と思われる。ただし、大気中の自然環境に暴露される場合には、他の要因も考慮する必要がある。
- (4) クーロンを評価指標として ASTM 法の基準に従った場合、概ね塩分浸透性を評価できる。しかし、低水セメント比の塩分浸透抵抗性が過小に評価されるか、またはフライアッシュコンクリートの抵抗性が過大評価される可能性がある。また、クーロンは、コンクリートの比抵抗と密接な関係を有している。
- (5) 簡便法である比抵抗測定からも、塩分浸透抵抗性が概

ね評価できるが、定量的な評価には、塩化物イオンの輸率を設定する必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたり、琉球大学 山田義智助手、群馬大学大学院 大畑公嗣君に多大な協力を受けました。ここに、感謝いたします。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書[施工編]-耐久性照査型（平成11年版）、土木学会。
- 2) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM Designation: C1202.
- 3) 山本明雄, ミスラ スティール：コンクリートの塩化物イオン透過性の評価に関する最近の研究動向, コンクリート工学, vol.31, No.8, pp.64-67, 1993.
- 4) 鳥居和之, 川村満紀：種々のポゾラン材料を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食状況, 第12回コンクリート工学年次論文報告集, pp.489-494, 1990.
- 5) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, 土木学会技術シリーズ, 1997（その1）, 2000（その2）.
- 6) Andrade, C. : Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements, Cem. and Con. Res. vol.23, No.3, pp.724-742, 1993.
- 7) 杉山隆文, 長岡 寛, 辻 幸和, 橋本親典：コンクリートの塩化物イオン拡散係数の算定に関する電気的泳動を利用した促進試験方法, コンクリート工学年次論文報告集, vol.18, No.1, pp.981-985, 1996.
- 8) 鳥居和之, 佐藤健一, 川村満紀：セメント硬化体の塩化物イオン透過性に及ぼすフライアッシュの影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.126-131, 1997.
- 9) 杉山隆文：コンクリートの塩化物イオン拡散係数を算定するための電気的手法を用いた新しい促進試験方法, コンクリート工学, vol.35, No.5, pp.29-32, 1997.
- 10) 久田 真：通電によるコンクリート中のイオン移動に関する研究, 東京工業大学学位論文, 1997.
- 11) 大即信明, 久田 真, 大谷隆之, 丸山俊夫：電気泳動実験によるモルタル中の塩化物イオン拡散係数の推計, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.97-105, 1998.
- 12) 芦田公伸：電気化学的手法によるコンクリートの脱塩処理技術に関する研究, 京都大学学位論文, 2000.
- 13) 関 博, 宮田克二, 北峯博司, 金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.49-57, 1992.
- 14) Sugiyama, T., Tsuji, Y. and Bremner, T.W. : Relationship between Coulomb and Migration Coefficient of Chloride Ions for Concrete in a Steady-State Chloride Migration Test, Magazine of Concrete Research, vol.53, No.1, pp.13-24, 2001.
- 15) Sugiyama, T. : Change of the Transport Number of Chloride Ions in a Migration Test for Concrete, Proceedings of the 2nd RILEM Workshop-Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, pp.51-68, 2000.
- 16) 斎藤裕司：電気化学的促進手法による水と接するコンクリートの長期耐久性予測に関する基礎研究, 群馬大学学位論文, 1998.
- 17) 佐伯竜彦, 二木 央：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動, コンクリート工学年次論文報告集, vol.18, No.1, pp.963-968, 1996.
- 18) 丸屋 剛, Somnuk, T., 松岡康訓：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.81-90, 1992.
- 19) 染谷建司, 大即信明, Tiong-Huan Wee, 長滝重義：セメント硬化体中における塩素イオンの固定化性状, コンクリート工学年次論文報告集, vol.11, No.1, pp.603-608, 1989.
- 20) 笹谷輝彦, 鳥居和之, 川村満紀, 梶川康男：海洋環境下に長期間暴露したコンクリートへの塩化物イオン浸透性, コンクリート工学年次論文報告集, vol.18, No.1, pp.957-962, 1996.
- 21) Caijun, S., Julia A. S. and Robert, J.C : Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its Implications on the Rapid Chloride Permeability Test(AASHTO T277 and ASTM C1202) Results, ACI Materials Journal, vol.95, No.4, pp.389-394, 1998.
- 22) Feldman, R.F., Chan, G.W., Brousseau R.J. and Tumidajski P.J. : Investigation of the Rapid Chloride Permeability Test, ACI Materials Journal, vol.91, No.2, pp.246-255, 1994.

(2001. 12. 27 受付)

APPLICATION OF THE STEADY-STATE CHLORIDE MIGRATION TEST FOR EVALUATING CHLORIDE INGRESS INTO FLY ASH CONCRETE

Takafumi SUGIYAMA, Sorn VIRA, Yukikazu TSUJI and Takeshi OSHIRO

As a rapid chloride permeability test, the steady state migration test has been applied to evaluate the chloride ingress into fly ash concrete. It was found that the migration coefficient was obtained from the migration test within 2 to 3 weeks and represented the ranking on chloride ingress into fly ash concrete. Fly ash concrete showed an excellent resistivity against chloride ingress as the fly ash contents increased. This has been proved from both the migration test and a long-term exposure test. In addition, the migration coefficients appeared to be used for the prediction of chloride profile in concrete with a proper bounding equation.