

論文

通電時間およびセメント種類が非定常状態電気泳動試験の拡散係数に与える影響

原沢 蓉子^{*1}， 細川 佳史^{*2}， 伊代田 岳史^{*3}

Effect of Test Periods and Cement Type for Chloride Diffusion Coefficient on Non-Steady-State Electrically Accelerated Methods

Yoko HARASAWA^{*1}, Yoshifumi HOSOKAWA^{*2} and Takeshi IYODA^{*3}

要旨： 従来の塩化物イオン拡散係数の試験による算出方法では，試験期間が長期に及び，かつセメント種類が限られてしまう．そこで本研究では短時間かつより省力化された非定常状態電気泳動試験に着目し，NT BUILD 492 および国内で提案される算出式を用いて，複数設定した通電時間およびセメント種類が拡散係数に及ぼす影響を把握した．各通電時間での浸透深さより拡散係数を算出した結果，いずれのセメントにおいても，各算出式による拡散係数の差は小さかったが，各通電時間での拡散係数には差が生じた．また，従来の方法では算出が困難な高置換高炉セメントにおいても適用できる可能性が示唆された．

キーワード： 非定常状態電気泳動試験，拡散係数，通電時間，セメント種類

1 はじめに

コンクリート構造物の塩害に対する照査において，フィックの拡散則に基づいて塩分浸透を予測し，鋼材腐食の限界状態を評価するには，塩化物イオン拡散係数の把握が必要である．コンクリート標準示方書では，拡散係数を算出するための予測式および試験方法が提示されている¹⁾．実験から拡散係数を算出する方法としては，浸せき試験や電気泳動試験がある．これらの方法は，セメント種類が限られる，試験期間が長期に渡るといった特徴が挙げられる．さらには，従来の電気泳動試験は定常状態での試験のため，実際の構造物中への塩化物イオンの浸透とは異なると考えられる．一方で，NORDTEST ではNT BUILD 492²⁾として，所定の時間通電し，非定常状態の電気泳動試験で拡

散係数を算出する試験が規格化されている．また，国内においても，塩化物イオンの浸透速度より拡散係数を算出する方法³⁾(以下，土研法と記す)が提案されている．これらの方法は，従来の定常状態の電気泳動試験と比較すると試験期間が短く，かつ省力化された試験方法である．

そこで本研究では，従来の電気泳動試験と同じ電気泳動試験装置を用いて非定常状態電気泳動試験を行い，通電時間およびセメント種類が，NT BUILD 492 および土研法の算出式より求められる拡散係数に及ぼす影響について把握した．そして，種々のセメントに対するこれらの算出式の適用性および，より短時間での通電が拡散係数算出に適用可能か検討した．さらに，本研究の非定常状態電気泳動試験から得られる拡散係数算出方法を，従来の算出方法では算出が困

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程

*2 太平洋セメント(株)中央研究所 主任研究員

*3 芝浦工業大学工学部土木工学科 准教授

表-1 コンクリートの示方配合

セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						SL (cm)	Air (%)
			W	C	BFS	FA	S	G		
N	55	48	172	313	-	-	869	968	14.5	5.8
H				313	-	-	869	967	14.5	4.5
BA				219	94	-	866	963	9.0	4.3
BB				188	125	-	868	965	13.0	3.7
BC	50	50	172	92	219	-	903	927	10.0	3.6
FB				250	-	63	896	919	16.5	4.0

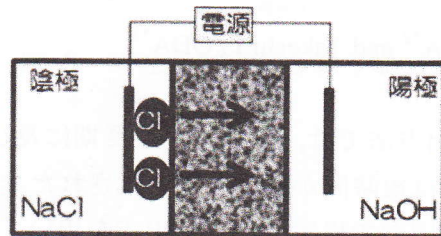


図-1 実験装置図

難であった場合に適用した。特に本研究では、塩分遮蔽性の高い、高置換高炉セメントを用いたコンクリートの拡散係数の算出が可能か検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体諸元

試験体配合を表-1に示す。配合は水セメント比、単位水量を一定とした。セメントは普通ポルトランドセメント(N)、早強ポルトランドセメント(H)、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を30%、40%、70%置換して試製した高炉セメントA、B、C種相当(BA、BB、BC)、フライアッシュを20%置換したフライアッシュセメントB種相当(FB)を使用した。コンクリートをφ100×200mmの円柱型枠に打込み、翌日に脱型を行い、材齢28日まで水中養生した。養生終了後、中央部の100mmを二分割に切り出し、φ100×50mmを試験体として使用した。前処理として、各試験体に飽和水酸化カルシウム水溶液を用いて真空飽水处理を行った。

2.2 非定常状態電気泳動試験

実験装置図を図-1に示す。電気泳動試験装置

表-2 非定常状態電気泳動試験

非定常状態電気泳動試験	
通電時間	3, 6, 12, 18, 24, 36時間
印加電圧	30V

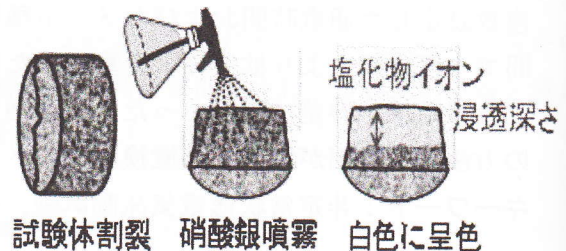


図-2 硝酸銀溶液噴霧の様子

に前処理を施した試験体を設置した後、陽極側にNaOH水溶液(0.3N)、陰極側にNaCl水溶液(3%)をそれぞれ注入した。表-2に示すように、30Vの直流定電圧を3、6、12、18、24、36時間通電した。それぞれの通電時間での通電が終了後、試験体を電気泳動試験装置から取り出し、割裂した。図-2に示すように、割裂面に硝酸銀溶液(0.1N)を噴霧し、白色に呈色した部分を中央部から10mm間隔ごとに7点測定し、その平均値を塩化物イオン浸透深さとした。非定常状態電気泳動試験では試験体は各通電時間において1本ずつ供した。本研究では、通電時間およびセメント種類による影響をみるために、印加電圧は遮塩性によらず30V一定とした。また、電圧は土木学会規準の電気泳動試験を参考にし、測定を行った。

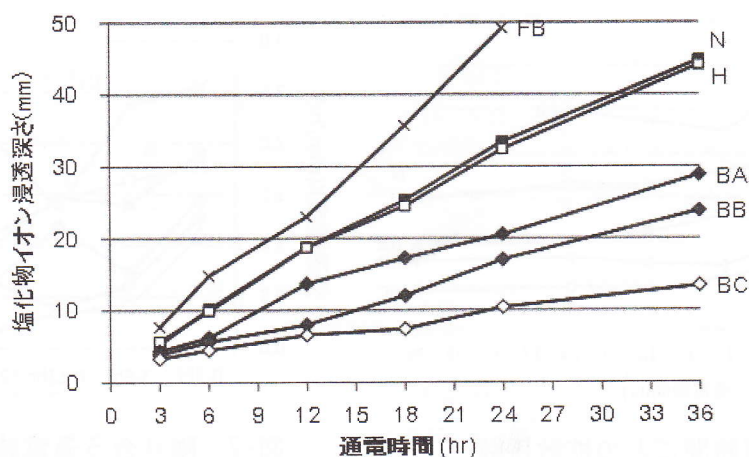


図-3 塩化物イオン浸透深さ

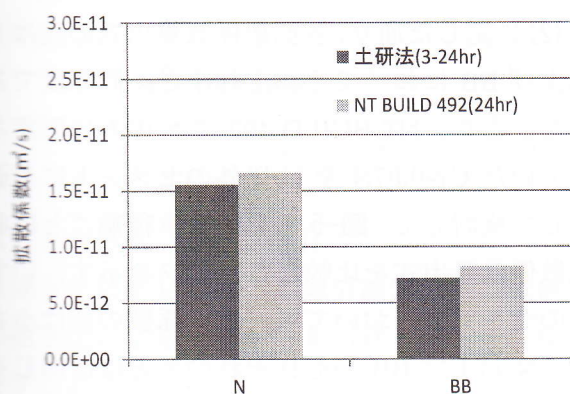


図-4 各算出式による拡散係数

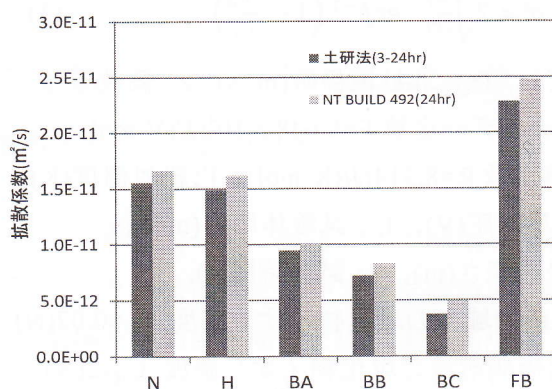


図-5 セメントごとの各算出式による拡散係数

3 実験結果および考察

3.1 実験結果

セメント種類ごとの各通电時間と塩化物イオン浸透深さの関係を図-3に示す。セメント種類によらず、通电時間が長くなるほど浸透深さは大きくなった。同一通电時間での浸透深さは、FB, N, H, BA, BB, BCの順に大きい。NとHに関しては、どの通电時間においてもほぼ同程度の浸透深さとなった。FBは36時間までの通电を終了した時点で、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧すると割裂面全体が白色に呈色したため、浸透深さは24時間通电した試験体までを測定した。FBは水和の進行が遅いため、28日水中養生後でも浸透深さが大きくなったと考えられる。他のセメントでは、通电36時間の時点においても白色に呈色した部分は50mmに達しなかった。

3.2 拡散係数の比較

(1) 拡散係数の算出方法

セメント種類ごとにNT BUILD 492式(1)および土研法式(4)より拡散係数を算出した。以下にそれぞれの拡散係数算出式を示す。NT BUILD 492では、呈色部分における塩化物イオン濃度 $C_d \approx 0.07N$ (以下、 C_d)は、Nを使用した場合とされており、セメント種類が限定されていると考えられる。本研究ではこの C_d 値を他のセメントにもあてはめて拡散係数を算出し、土研法より求められた拡散係数と比較することによって、N以外のセメントにもNT BUILD 492が適用できるか検討した。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (2)$$

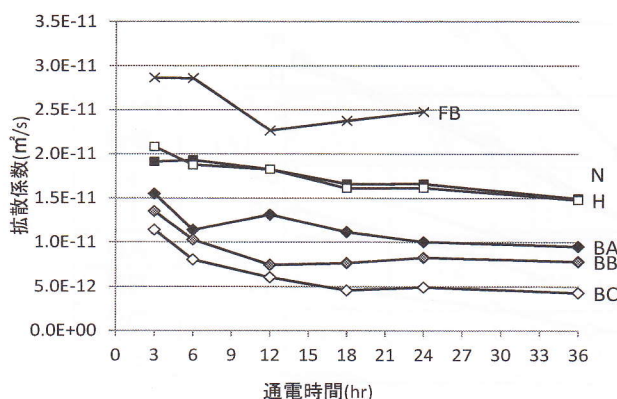


図-6 通电時間ごとの拡散係数

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2C_d}{C_0} \right) \quad (3)$$

ただし、 D_{nssm} ：拡散係数(m^2/s)、 z ：価数 $z=1$ 、 F ：ファラデー定数 $F=9.648 \times 10^4 (J/(V \cdot mol))$ 、 R ：気体定数 $R=8.314 (J/(K \cdot mol))$ 、 T ：絶対温度(K)、 U ：印加電圧(V)、 L ：試験体厚さ(mm)、 X_d ：浸透深さ(m)、 t ：試験時間(s)、 C_d ：呈色領域での塩化物イオン濃度 $C_d \approx 0.07(N)$ 、 C_0 ：陰極側溶液の塩化物イオン濃度 $C_0 \approx 2(N)$ 、 erf^{-1} ：誤差関数

$$D = k \cdot \frac{RT}{zF} \cdot \frac{L}{\Delta \phi} \quad (4)$$

ただし、 k ：浸透速度、 L ：試験体厚さ、 $\Delta \phi$ ：印加電圧

なお、浸透速度 k は原点を通る近似直線の傾きより算出した。

(2) 拡散係数算出式の影響

まず、拡散係数算出式の影響を捉えるため、一般的に使用頻度の高い N および BB を用いて、各算出式による拡散係数の比較を図-4 に示す。式(1)および 式(4)を用いて、それぞれ 24 時間通电した時点の浸透深さより D_{nssm} を、3 時間から 24 時間の浸透速度より D を算出し比較した。比較した結果、いずれのセメントにおいても、各算出式による拡散係数の差は小さい。したがって、一定電圧下で所定時間通电した試験体のうち、NT BUILD 492 を用いて浸透深さ一点から算出した拡散係数と、土研法より浸透速度から算出した拡散係数に違いはあまりないといえる。

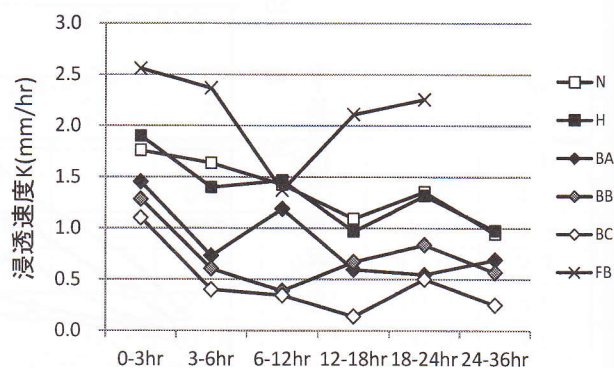


図-7 隣り合う通电時間での浸透速度

(3) セメント種類の影響

(2) に記した通り、各拡散係数算出式の差は N および BB においてそれぞれ小さく同程度であった。また、NT BUILD 492 で N のみに限定されていた $C_d \approx 0.07N$ を N 以外のセメントにも適用して検討した。図-5 にセメント種類ごとに各拡散係数算出式を比較したグラフを示す。いずれのセメントにおいても、拡散係数の差は小さく、 N および BB のそれぞれの差とほぼ同じくらいとなった。したがって、NT BUILD 492 による拡散係数の算出方法は、 N 以外のセメントにも適用できる可能性があることが示唆された。

(4) 通电時間の影響

図-6 に NT BUILD 492 よりそれぞれの通电時間のときの浸透深さを用いて算出した拡散係数をセメント種類ごとに示す。FB は通电時間 24 時間までの拡散係数のみ算出した。いずれのセメントでも、通电時間 18 時間までは通电時間が長くなるほど拡散係数は小さくなり、その後は概ね横ばいになる傾向が示された。また、図-3 より、いずれのセメントも通电時間の経過に伴い浸透深さが増加する傾向にあるのに対し、浸透深さから算出した拡散係数は、ある一定の時間までは通电時間が長くなるほど低下した。この現象については、図-7 に示した通り、通电時間が経過するごとに、各通电時間の間の浸透速度は概ね低下するため、結果的に拡散係数は減少したと考えられる。特に N 、 H においてこの傾向が顕著にみられ、 BA 、 BB 、 BC では概ね横

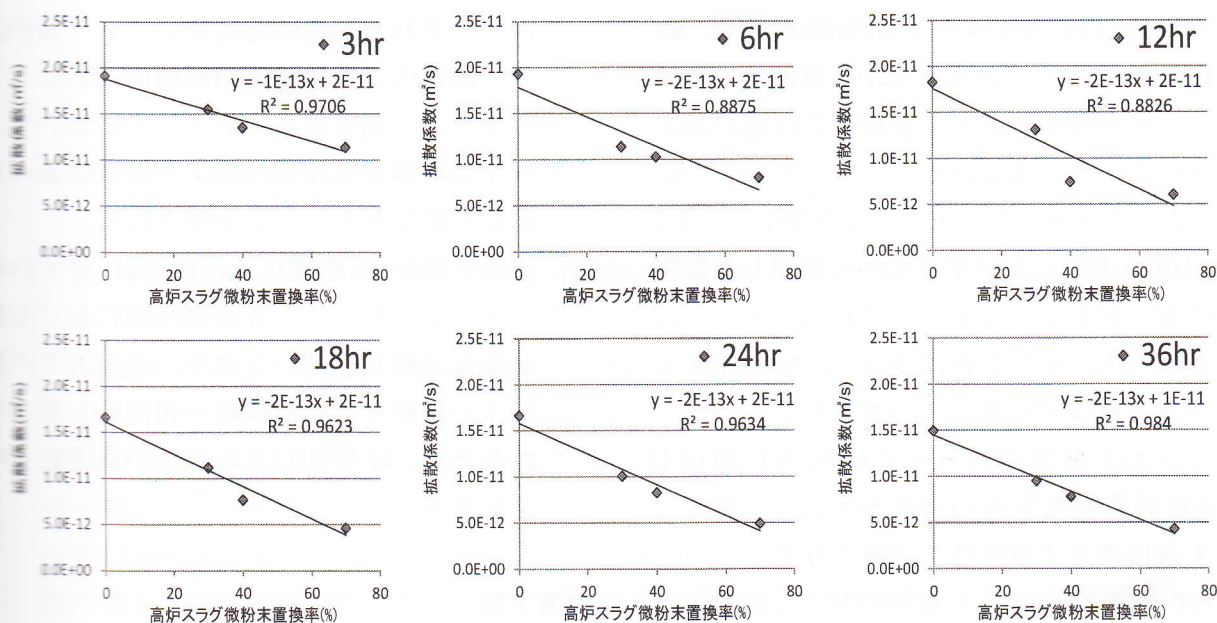


図-8 高炉スラグ微粉末の置換率と拡散係数の関係

ばいとなった。しかし電圧をかけていても、拡散係数が低下したのは、塩分固定化や空隙構造の緻密化による影響が考えられるが、今後検討をする必要がある。

4 非定常状態電気泳動試験の活用

4.1 従来の塩化物イオン拡散係数の算出方法

コンクリート標準示方書に示されている浸せき試験および電気泳動試験では、拡散係数の算出が困難な場合が考えられる。例えば、混合セメントや低水セメント比のコンクリートでは塩分遮蔽性が高いため、塩化物イオンの浸透が鈍くなり、拡散係数の算出が困難な場合が考えられる。あるいは養生不足の試験体では電気泳動試験および浸せき試験中に再水和が生じ⁴⁾⁵⁾、得られる拡散係数が小さくなる恐れがある。本研究では、混合セメントの中でも、高炉スラグ微粉末の置換率の高い高炉セメントへの適用を検討した。

4.2 高置換高炉セメントへの適用

従来の試験方法では、拡散係数の算出が困難であると考えられる高置換率の高炉セメントに対して、非定常状態電気泳動試験が適用可能か

どうかを検討する。図-8にNT BUILD 492より算出した拡散係数と高炉スラグ微粉末の置換率の関係を、通电時間ごとに示す。高炉スラグ微粉末の置換率は0, 30, 40, 70%とした。通电時間によって多少のばらつきが生じたが、通电時間が長くなるほど決定係数 R^2 は大きくなり、通电時間が18時間以上になると、傾きと切片はほぼ同程度となった。これより高置換高炉セメントに対して、非定常状態電気泳動試験で18時間以上の通电を行うことにより、拡散係数の算出が可能であることが示唆された。

5. 結論

本試験で得られた結果を以下に示す。

- 1) 非定常状態電気泳動試験において通电時間を変化させて試験を行った結果、いずれのセメント種類においても、通电時間が長くなるほど塩化物イオン浸透深さは大きくなった。
- 2) 非定常状態電気泳動試験から得られた塩分浸透深さならびに浸透速度を用いて NT BUILD 492 および土研法による拡散係数を、N および BB において比較した。その結果、

拡散係数には差があまり生じなかった。したがって浸透深さ一点から算出する NT BUILD 492 と、浸透速度から算出する土研法では、算出される拡散係数には違いはあまりないと考えられる。

- 3) N および BB 以外のセメントを用いて、NT BUILD 492 および土研法から算出した拡散係数を比較した結果、いずれのセメントにおいても、生じた差は小さく、N や BB の差とほぼ同程度であった。したがって、セメント種類の限られていた NT BUILD 492 の算出式を N 以外のセメントに対しても適用できる可能性が示唆された。
- 4) NT BUILD 492 より通電時間ごとに算出した拡散係数は、いずれのセメントにおいても 18 時間までは通電時間が長くなるほど低下し、次第に一定となる傾向がみられた。塩化物イオン浸透深さは時間の経過とともに増加するのに対して、拡散係数が減少し一定となったのは、試験中の塩分固定化や空隙構造の緻密化によるものと考えられるが、今後検討を要する。
- 5) 塩化物イオンの浸透速度は N、H では通電時間が長くなるほど減少し、BA、BB、BC においては概ね横ばいとなった。通電時間が長くなるほど塩化物イオンの浸透深さは増加したが、浸透速度は低下したことから、時間の経過とともに塩化物イオンは内部に浸透しにくくなっていることがわかった。
- 6) 拡散係数の算出が困難だと考えられる高置換率の高炉セメントに対して、NT BUILD

492 より通電時間ごとに算出した拡散係数は、いずれの通電時間においても、高炉スラグ微粉末の置換率と相関関係にある。したがって、高置換高炉セメントにおいて、非定常状態電気泳動試験より拡散係数の算出が可能であることが示唆された。

- 7) 通電時間が 18 時間以上になると、いずれのセメントにおいても各通電時間における拡散係数は概ね横ばいとなり、高炉スラグ微粉末の置換率と拡散係数の相関性も認められるため、18 時間以上の通電が最適だと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会, 2013 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013
- 2) Nordtest NT BUILD 492, “Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiment”, Nordtest, Finland, 1999
- 3) 渡辺豊, 河野広隆, 渡辺博志: コンクリートの急速塩分浸透性試験による塩化物イオン拡散係数の算定について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 663-668, 2002
- 4) 毛塚貴洋, 高橋佑弥, 岸利治, 魚本健人: 表層透気係数と電気泳動試験結果の相関に関する一検討, 第 65 回土木学会全国大会, V-298, pp. 595-596, 2010
- 5) 青山和樹, 豊村恵理, 伊代田岳史: 養生方法および期間の相違が塩分浸透に及ぼす影響, 第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会, V-7, 2012