

各種モルタル供試体を用いた非定常・電気泳動試験に関する実験的研究

(独) 土木研究所 正会員 工修 ○鈴木 聡
(独) 土木研究所 正会員 工修 中村 英佑
(独) 土木研究所 正会員 工博 渡辺 博志

Abstract : The objective of this study is to investigate applicability of the non-steady-state migration test on mortar specimens fabricated with supplementary cementitious materials, such as ground granulated blast-furnace slag and fly ash. The non-steady-state migration test was performed on mortar specimens cured in different manners. The chloride diffusion coefficient derived from the non-steady-state migration test was found to be suitable to evaluate effects of mixing of the supplementary cementitious materials and curing of different periods on resistance to chloride ingress. Additionally, the findings from test results revealed that the values of voltage applied on specimens should be set to avoid substantial increase in electrical current and temperature of catholyte solution during the test.

Key words : non-steady-state migration test, supplementary cementitious materials, chloride diffusion coefficient

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造物の建設に伴って排出される CO₂削減対策の1つとして高炉スラグ微粉末やフライアッシュなど混和材を用いたコンクリートの使用が注目されているが、これらの混和材の使用は塩化物イオンの浸透抑制に対しても効果的であることが指摘されている^{1), 2)}。塩化物イオン浸透抵抗性を評価する試験方法として、塩水に一定期間浸せきした供試体の内部の塩化物イオン濃度の分布から塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求める方法 (JSCE-G 572) や、電気泳動によりコンクリート中で定常状態にある塩化物イオンの実効拡散係数を求める方法 (JSCE-G 571) が規準化されている。ところが、一般にプレストレストコンクリート構造物に使用するコンクリートは水結合材比が低く、混和材を用いたコンクリートの拡散係数を求める際に、上記の試験では試験期間が極端に長くなることがある。

塩化物イオンの拡散係数を迅速に得るための試験方法として、非定常・電気泳動試験^{3), 4)}が提案されている。非定常・電気泳動試験では、コンクリート中に塩化物イオンを電気泳動させ、供試体割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオンの浸透深さを測定し、これを用いて拡散係数を算出する。このため、上記の試験に比べて比較的短時間かつ簡易に拡散係数を得ることが可能である。しかしながら、混和材を用いたコンクリートへの非定常・電気泳動試験の適用性は必ずしも明確にされていない。

本研究では、混和材を用いたコンクリートへの非定常・電気泳動試験の適用性と適切な試験方法を検討することを目的とした。このため、養生期間と結合材の種類が異なる供試体を対象として、塩化物イオンの拡散係数を非定常・電気泳動試験により算出し、印加電圧や通電時間の設定が試験結果に与える影響について検討した。既往の研究⁵⁾ではコンクリート中の粗骨材によって通電時の塩化物イオンの泳動が遮蔽されることが報告されているが、ここでは使用する混和材がセメント硬化体の遮塩性に与える影響を評価することに着目したため、粗骨材の影響を排除したモルタル供試体を用いて検討を行った。

2. 実験方法

2.1 非定常・電気泳動試験

非定常・電気泳動試験の概略図を図-1に示す。非定常・電気泳動試験では、φ100×50mmの供試体を使用する。今回の実験では、供試体製作時の高さ方向の材料分離の影響を排除するため、φ100×100mmの供試体

を製作し、所定の養生後（水中養生28日，91日）に，供試体の上下25mm部分を取り除き，中心の厚さ50mmの部分を用いた。切り出した供試体の円周面にエポキシ樹脂を塗布し，真空飽水処理を行った。真空飽水処理を行った供試体を電気泳動セル容器内に設置し，電動泳動セル容器の陽極側にNaOH溶液（0.3mol/l），陰極側にNaCl溶液（10%）を充填し，供試体に直流電流を通电した。なお，今回の実験では，塩化物イオンの浸透面（陰極側）を供試体の型枠底面側とした。

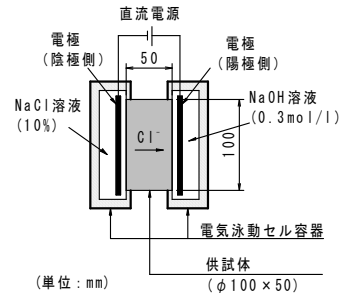


図-1 非定常・電気泳動試験の概略図

通电後，供試体を割裂し割裂面に硝酸銀溶液（0.1mol/l）を噴霧して，塩化物イオンの浸透深さを測定した。同様の手順で複数の供試体に異なる通电時間で通电を行い，塩化物イオン浸透速度kを算出し（図-2），これを式(1)に入力して拡散係数Dを算出した。

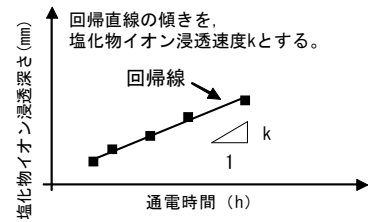


図-2 塩化物イオン浸透速度 k の算出方法

$$D = k \cdot \frac{RT}{zF} \cdot \frac{L}{\Delta\phi} \quad (1)$$

ここに，R：気体定数（=8.31J/mol/K），T：通电中の陰極側溶液の温度の平均値（K），z：塩化物イオンの電荷の絶対値（=1），F：ファラデー定数（=96485.3C/mol），L：円盤状供試体の厚さ（=50mm）， $\Delta\phi$ ：供試体表面間の電圧の測定値（V）とする。

非定常・電気泳動試験で塩化物イオンの拡散係数を算出するためには，陰極側溶液から電気泳動した塩化物イオンが陽極側溶液に到達する前に通电を終える必要がある。このため，ここで得られる拡散係数は，塩化物イオンが供試体内部の細孔溶液中で固定化をとめないながら電気泳動する際の移動のし易さを示すものと考えられる。非定常・電気泳動試験では式(1)を用いて拡散係数を算出するため，塩化物イオンの浸透が通电時間によって不均一となる場合には，式(1)のkの値が変化し，得られる拡散係数も変動する可能性が高い。本研究では，養生期間と結合材の種類が異なるモルタル供試体を用い，印加電圧や通电時間をさまざまに変化させて通电を行い，混和材を用いたコンクリートへの非定常・電気泳動試験の適用性と適切な試験方法について検討した。

2.2 モルタル配合と養生方法

モルタル配合とフレッシュ性状，圧縮強度を表-1に示す。モルタル配合は表-1に示す3種類とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し，混和材は高炉スラグ微粉末（表記：BS，比表面積：4210cm²/g，密度：2.88g/cm³）とフライアッシュ（表記：FA，比表面積：4140cm²/g，密度：2.35g/cm³）を用いた。水結合材比（W/B）は40%，砂結合材比（S/B）は2.5とした。高炉スラグ微粉末を用いた配合ではセメント質量の50%を，フライアッシュを用いた配合ではセメント質量の20%を各混和材で置換した。供試体は，室温約20°Cの実験室内で練混ぜ，打設，脱枠したのち，水温約20°Cの水中で養生を行った。

表-1 モルタル配合とフレッシュ性状，圧縮強度

記号	結合材	W/B	S/B	単位量 (kg/m ³)					フロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	
				水	セメント	BS	FA	細骨材			材齢28日	材齢91日
N40	普通ポルトランドセメント単味	40%	2.5	237	592	—	—	1480	109 × 110	7.2	76.0	87.2
N40BS50	高炉スラグ微粉末50%置換			235	293	293	—	1467	112 × 112	7.7	59.4	81.3
N40FA20	フライアッシュ20%置換			234	468	—	117	1461	119 × 120	6.7	67.0	80.0

2.3 実験パラメータ

実験パラメータの一覧を表-2に示す。水中養生期間は，材齢28日までと91日までの2種類とした。印加電圧は，水中養生28日の供試体で30V，45Vの2種類，水中養生91日の供試体で15V，30V，45Vの3種類とした。通电時間は，塩化物イオンが供試体を貫通して陽極側溶液まで到達しないように，水中養生28

日の供試体で7水準 (3~30時間) , 水中養生 91 日の供試体で5水準 (3時間~45時間) とした。なお、今回の実験は、水中養生終了直後の供試体を用いて、室温が約 20°Cに管理された実験室内で実施した。

表-2 実験パラメータ

水中養生期間	印加電圧	通電時間
材齢28日まで	30V	7水準
	45V	
材齢91日まで	15V	5水準
	30V	
	45V	

3. 実験結果

3.1 非定常・電気泳動試験による拡散係数の算出結果

非定常・電気泳動試験により算出した拡散係数を図-3 に示す。拡散係数は、水中養生期間の違いにより異なる傾向を示した。水中養生 28 日の供試体の拡散係数は、N40BS50 で最も小さく、N40 と N40FA20 で同程度となった。一方、水中養生 91 日の供試体の拡散係数は、N40BS50 と N40FA20 で小さくなり、N40 ではこれらよりも大きくなった。いずれの配合においても、同一の印加電圧で算出した拡散係数は、水中養生 28 日より水中養生 91 日の供試体で小さくなった。とくに、N40FA20 では水中養生 91 日の供試体の拡散係数が水中養生 28 日の半分以下になった。すなわち、非定常・電気泳動試験で得られた拡散係数の結果に基づくと、いずれの配合においても、塩化物イオン浸透抵抗性は水中養生期間を長くしたことで向上し、この効果はフライアッシュを用いた N40FA20 で最も大きく現れたと考えられる。

塩水浸せき試験では、供試体を塩水中に長期間浸せきするため、とくに混和材を用いた供試体では試験期間中も水和反応が進行する可能性がある。このため、養生条件が異なる供試体の塩化物イオン浸透抵抗性の差を適切に評価できるか必ずしも明確でない。一方で、非定常・電気泳動試験から得られる拡散係数は養生条件が異なる供試体の塩化物イオン浸透抵抗性の差を適切に反映することができる可能性があるため、養生条件の影響を受け易い混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透性を評価するのに適しているのではないかと考えられる。

また、通電時の印加電圧ごとに拡散係数を比較すると、いずれの配合においても、印加電圧 45V の場合の拡散係数が最も大きく、水中養生 91 日の供試体では印加電圧 15V と 30V の場合に同程度の拡散係数が得られた。このため、印加電圧を大きく設定した場合に過大な拡散係数が算出される可能性があることが懸念される。この原因を明らかにするため、次に、通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係と、通電中の電流と陰極側溶液の温度の変化に着目して考察を行った。

3.2 通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係

水中養生 91 日の供試体で得られた通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係を図-4 に示す。グラフ中には、印加電圧 15V, 30V, 45V の測定結果に加えて印加電圧ごとの回帰直線も追記している。若干のばらつきが認められるものの、回帰直線から大幅に乖離するデータは存在しなかった。このため、通電中の塩化物イオンの浸透速度は概ね一定であったと考えられる。ばらつきが生じたひとつの原因としては、供試体内部の気泡の存在が挙げられる。硝酸銀溶液噴霧後の供試体の割裂面を観察したところ、目視で確認できる程度の大きさの気泡が含まれる部分では他の部分よりも供試体の深部に塩化物イオンが浸透していた。このような供試体では内部の塩化物イオンの浸透深さが不均一となり、通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係にばらつきが生じる原因になったと考えられる。

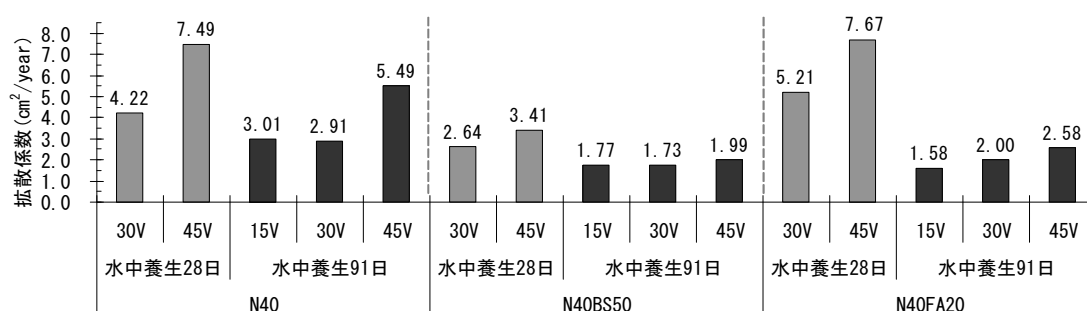
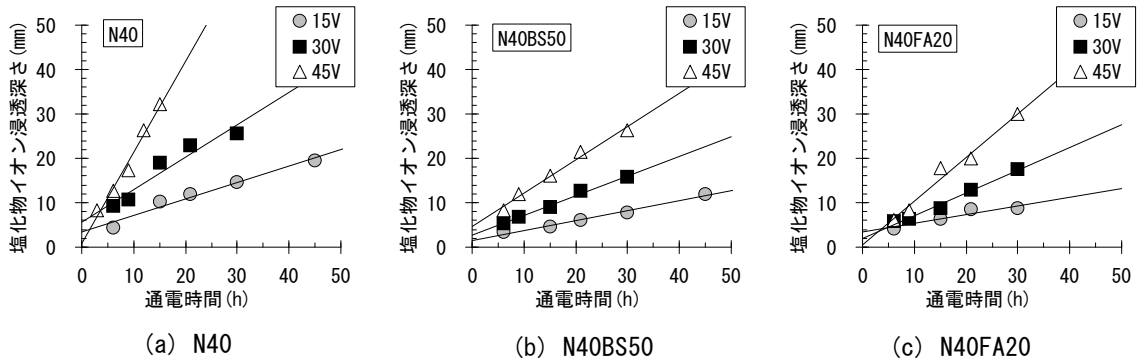


図-3 非定常・電気泳動試験による拡散係数



※N40FA20の印加電圧 15V, 通电時間 45 時間の測定結果は電源装置が不調のため不採用

図-4 通电時間と塩化物イオン浸透深さの関係 (水中養生 91 日)

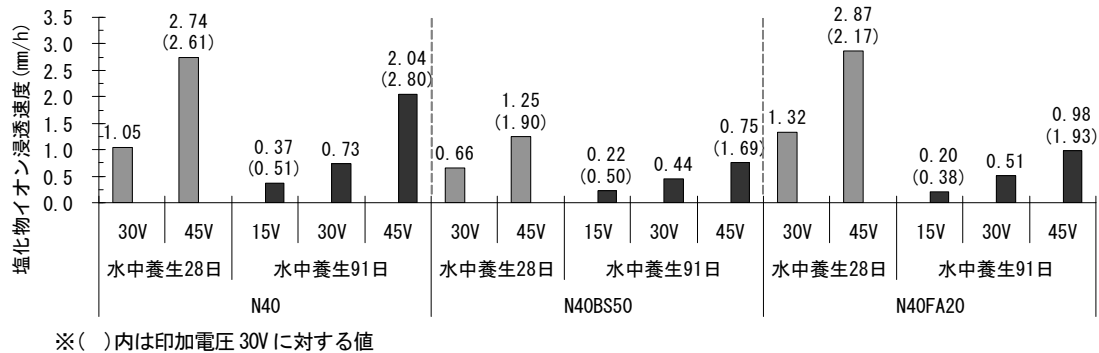


図-5 塩化物イオン浸透速度

塩化物イオン浸透速度の算出結果を図-5に示す。いずれの配合においても、印加電圧 15V と印加電圧 30V の場合は、印加電圧の増加量と塩化物イオン浸透速度の増加量が比例したが、印加電圧 45V とした場合は、印加電圧の増加量よりも塩化物イオン浸透速度の増加量が大きくなった。非定常・電気泳動試験で拡散係数を算出する際には式(1)を用いるため、印加電圧の増加量と塩化物イオン浸透速度の増加量が比例していれば算出される拡散係数も同程度となる。ところが、印加電圧の増加量よりも塩化物イオン浸透速度の増加量が大きくなるような場合には、拡散係数が大きく算出される。印加電圧 45V の場合、他の印加電圧の場合と比べて印加電圧の増加量以上に塩化物イオン浸透速度の増加量が大きくなったため、拡散係数も大きく算出されたと考えられる。

3.3 通电中の電流と陰極側溶液の温度の推移

水中養生 91 日の供試体の電流の推移を図-6に、陰極側溶液の温度の推移を図-7に示す。いずれの配合においても、印加電圧 45V の場合に、他の印加電圧の場合と比べて通电中の電流と陰極側溶液の温度が大幅に増加したことが分かる。先述したように、印加電圧 45V の場合に塩化物イオン浸透速度の増加量が大きくなったが、この原因は、印加電圧を 45V と大きくした場合に、通电中の電流が大きく、供試体内部に電気泳動した塩化物イオンの量が多かったためと考えられる。

これらのことを踏まえると、非定常・電気泳動試験を用いて拡散係数を適切に算出するためには、通电中の電流と陰極側溶液の温度が大幅に増加しない範囲内に印加電圧を設定することが必要と考えられる。今回の実験では、印加電圧 15V と 30V の場合に電流と陰極側溶液の温度の増加はわずかであり、両者で同程度の拡散係数が得られた。このため、今回の実験結果の範囲内では、印加電圧を 30V 以下に設定する必要があると考えられる。

3.4 供試体数量の違いが拡散係数の算出結果に与える影響

図-2に示したように、非定常・電気泳動試験を用いて拡散係数を算出するためには、複数の通电時間で試験を行って塩化物イオン浸透速度を算出する必要がある。この際、使用する供試体の数量を少なくするこ

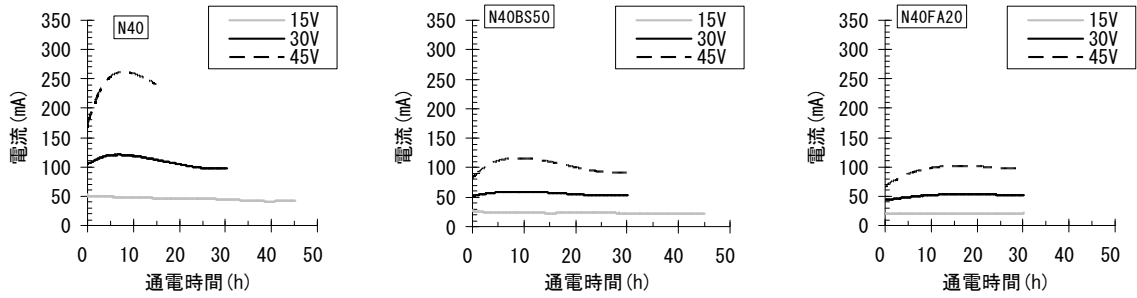


図-6 通電中の電流の推移 (水中養生 91 日)

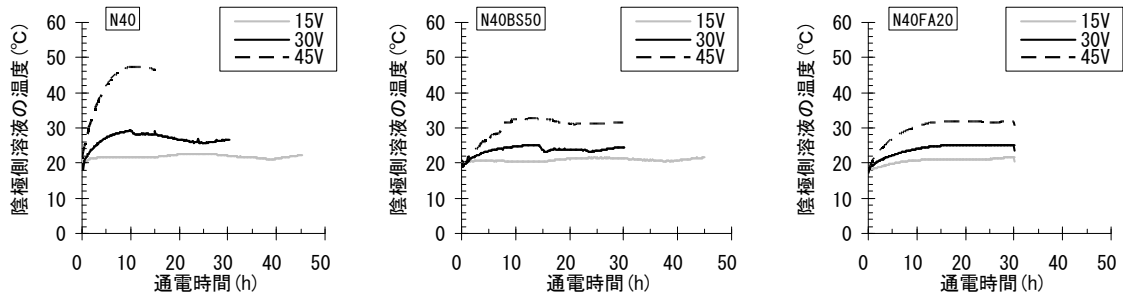


図-7 通電中の陰極側溶液の温度の推移 (水中養生 91 日)

とができれば試験期間の短期化に寄与することができるが、供試体の数量を少なくすることで拡散係数の算出精度が低下することは避ける必要がある。このため、ここでは拡散係数を算出する際に使用する供試体の数量を変えた場合の影響について検討する。

通電時間を 3 水準とした場合 (水中養生 28 日と 91 日の両方の供試体で 6 時間, 15 時間, 30 時間とした場合) と全測定結果を用いた場合の拡散係数の算出結果を図-8 に比較して示す。全測定結果を用いた場合の拡散係数は、水中養生 28 日の供試体で通電時間 5 水準, 水中養生 91 日の供試体で通電時間 7 水準の全ての測定結果を用いて算出した。また、先述したように、印加電圧 45V の場合には過大な拡散係数が算出される可能性が高いため、ここでは印加電圧 15V と 30V の結果を用いた。図-8 では、通電時間 3 水準の場合と全測定結果を用いた場合の拡散係数は概ね一致している。

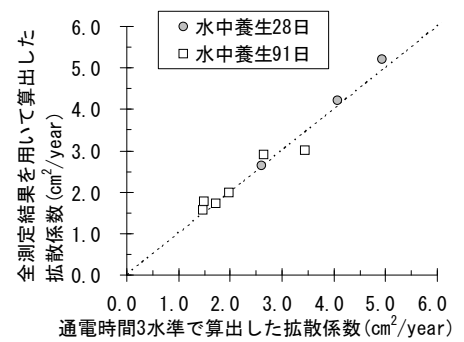


図-8 拡散係数の比較

一方、図-5 に示した通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係を精査すると、回帰直線の y 軸との切片はいずれの配合と印加電圧の場合においても正となり、原点を通過することはなかった。この原因については現時点では必ずしも明確ではないが、使用する供試体の数量を減らして通電時間 1 水準で試験を行った場合に過大な塩化物イオン浸透速度が算出される可能性があることを示している。

以上のことを踏まえると、非定常・電気泳動試験を用いて拡散係数を適切に算出するためには、通電時間 3 水準程度で塩化物イオン浸透速度を算出することが望ましいと考えられる。

3.5 積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さの関係

積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さの関係を図-9 に示す。積算通過電荷量は、通電中の電流の測定値を用いて供試体を通過した電荷量を積算して算出した。この結果によると、通電中に供試体内部を通過した電荷量が多いほど塩化物イオン浸透深さも大きくなったことが分かる。しかし、グラフを厳密に精査すると、同一の積算通過電荷量に対する塩化物イオン浸透深さは N40 と N40BS50 よりも N40FA20 で大きく、積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さの関係は配合ごとに異なる傾向を示した。また、この傾向は塩化物イオン浸透深さが大きいほど明確になり、いずれの印加電圧の測定結果においても確認することができた。米国

では積算通過電荷量を用いてコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を評価する試験方法⁶⁾が規準化されているが、今回の実験結果に基づくと、様々な混和材を使用した場合には積算通過電荷量のみで一律に塩化物イオン浸透抵抗性を評価することはできないと考えられる。コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を評価する場合、混和材の影響はマトリックス部分だけではなく粗骨材とモルタル界面の遷移帯の性状にも及ぶことが予想されるが、少なくとも種々の混和材を含むモルタルの塩化物イオン浸透抵抗性を適切に評価するためには、積算通過電荷量のように供試体の電気抵抗のみに依存する指標ではなく、通電により供試体内部に浸透した塩化物イオン浸透深さをを用いる方が望ましいと考えられる。

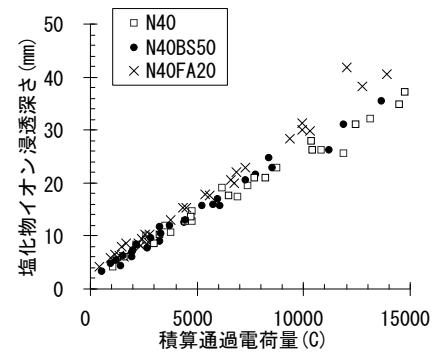


図-9 積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さの関係

4. まとめ

本論文の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 非定常・電気泳動試験を用いて算出した拡散係数を比較することで、養生条件の異なる混和材を用いたモルタル供試体の塩化物イオン浸透抵抗性を評価できると考えられた。
- (2) 非定常・電気泳動試験を用いて拡散係数を適切に算出するためには、通電中の電流と陰極側溶液の温度が大幅に増加しない程度に印加電圧を設定し、複数の通電時間での結果を用いる必要がある。本論文の範囲内では、印加電圧 30V 以下で 3 水準程度の通電時間で試験を行うことが望ましい。
- (3) 混和材を用いた供試体の塩化物イオン浸透抵抗性を適切に評価するためには、積算通過電荷量ではなく、供試体内部の塩化物イオン浸透深さに着目することが望ましい。

なお、非定常・電気泳動試験を用いて得られる拡散係数の精度については、別途実施している浸せき試験と電気泳動試験から得られる拡散係数と比較することで今後検証する予定である。

本研究は、(独)土木研究所、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、(株)大林組、大成建設(株)、前田建設工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、鐵鋼スラグ協会、電源開発(株)の共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 檀康弘, 伊与田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則: 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 4, pp. 431-441, 2009
- 2) 杉山隆文, Som VIRA, 辻幸和, 大城武: 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, 土木学会論文集, No. 711, V-56, pp. 191-203, 2002
- 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) 土木学会: コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, コンクリート技術シリーズ No55, pp. 72-78, 2003
- 5) 久田真, 大即信明, N. B. Diola, 桐山和晃: コンクリート中の塩化物イオンの電気泳動に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文集, No. 599, V-40, pp. 71-80, 1998
- 6) ASTM C 1202-10: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society of Testing and Materials, <http://www.astm.org/>