

論文 電気泳動法の実効拡散係数と浸漬法の見掛けの拡散係数との関係に関する実験的考察

鳥田 慎也*1・佐川 康貴*2・山時 翔*3・濱田 秀則*4

要旨: 本研究は、塩化物イオン拡散係数のさらなる精度の高い換算方法を考察するために、電気泳動試験および浸漬期間を3ヶ月、6ヶ月、9ヶ月、12ヶ月とした3%塩水浸漬試験を行った。その結果、電気泳動法における非定常期間が配合毎に異なること、見掛けの拡散係数が時間依存性を有するパラメータであることが分かった。また、今後のデータの蓄積により、土木学会規準に示された換算係数 k_1k_2 に電気泳動法における非定常期間を一つのパラメータとした補正を行うことで、配合等その他要因を考慮した精度の高い換算係数が得られる可能性を見出すことができた。

キーワード: 電気泳動試験, 塩水浸漬試験, 実効拡散係数, 見掛けの拡散係数

1. はじめに

塩害によるコンクリート構造物の早期劣化が現代の社会基盤において大きな問題の一つとなっている。これまでは、初期建設費が最小になるような施工が進められてきたが、そのために将来補修や更新が必要と予測されるコンクリート構造物も存在する。しかしながら、年々社会資本の維持管理に関する予算の確保が困難となってきた今、維持管理コストあるいはライフサイクルコストを最小化させた方が有利であるという考え方が一般化してきている。そのためには設計時においてより精度の高い耐久性照査を行い、適切な対策を行うことが重要である。

2007年版コンクリート標準示方書【設計編】では、コンクリートの塩分浸透抵抗性を塩化物イオンに対する拡散係数により照査を行うこととされている。その際、設計図書の参考値以外の配合を設定する場合には、既往の実績配合や信頼できるデータまたは事前試験による特性値の確認が求められている。既往の実績配合では実構造物の拡散係数と水セメント比の関係を回帰して得られた式が、また、実験による確認は浸漬試験により得られる見掛けの拡散係数が一般的である。実験による確認は浸漬試験による見掛けの拡散係数が代表的であるが、高耐久性コンクリートを対象とする場合、浸漬試験では長期にわたる試験期間が必要になるため近年では試験期間の短縮化を目的とした電気泳動試験による実効拡散係数も主流となってきている。しかし、これに関しては直接的には特性値として用いることができる段階には至っていないのが現状であり、実効拡散係数を見掛けの拡散係数に換算する必要がある。

実効拡散係数から見掛けの拡散係数へ換算するには、コンクリート表面におけるコンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いにかかわる係数 k_1 およびセメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象にかかわる係数 k_2 の二つの換算係数を乗ずることにより換算することが望ましいとされている¹⁾。この換算係数は理論上、実験により求めることが可能とされているが、それらの値を求めることは非常に困難であり、実際は見掛けの拡散係数と実効拡散係数の比から逆算して得られたデータを蓄積したものが土木学会により示されている¹⁾。しかしながら、電気泳動試験においては実効拡散係数と同じく陽極側に塩化物イオンが検出されるまでの期間も、そのコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を表している値であると考えられ、実効拡散係数のみではなく、それらも考慮することが、更なる精度の高い換算係数を求める上で重要な要素の一つになると考えられる。

そこで本研究では、浸漬試験と電気泳動試験の両試験において、ある一定期間試験を行った試験体の塩化物イオン量分布を調べ、見掛けの拡散係数および実効拡散係

表-1 使用材料

材料	種類・物理的性質
セメント C	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³ , 比表面積3360cm ² /g
高炉スラグ 微粉末 GGBFS	高炉スラグ微粉末4000 密度2.91g/cm ³ , 比表面積4070cm ² /g
細骨材 S	海砂 表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率1.59%
粗骨材 G	碎石 表乾密度2.91g/cm ³ , 吸水率0.81%

*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (学生会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻

*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	
			水 W	セメント C	高炉スラグ 微粉末 GGBFS	細骨材 S			粗骨材 G
N-55	55	47.5	175	318	-	832	1038	5.5	4.3
N-35	35	44.5	175	500	-	714	997	8.5	3.8
B-55-50	55	46.5	175	159	159	810	1051	11.5	4.6

数を求めた。また、それらの結果を比較し、陽極側に塩化物イオンが検出されるまでの期間を実効拡散係数から見掛けの拡散係数へ換算する際どのように取り扱うべきかを検討した。

2. 電気泳動試験

2.1 配合および養生条件

表-1 に実験に用いた使用材料、表-2 に実験に用いたコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。高炉スラグ微粉末は高炉スラグ微粉末 4000 (GGBFS) を使用し、セメントに対し 50% 質量置換した。以下では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを N、GGBFS を質量置換したものを B と表記する。また、細骨材には除塩した海砂を、粗骨材には砕石 2005 を使用した。混和剤には AE 減水剤および AE 剤を使用した。コンクリートの水結合材比 W/B は 55% および 35% とし、空気量を 4.0% 前後に統一した。

本研究で作製したコンクリートはφ100×200mm の円柱供試体であり、脱型後 20°C 水中養生を行った。

2.2 実験概要

各配合につき、φ100 mm 円柱供試体を作製した。材齢 28 日で円柱供試体の中央部からφ100×50mm の円板状の試験体を切り出し、各配合につき計 9 体の試験体を作製した。そのうち 3 体は電気泳動試験用供試体とし、土

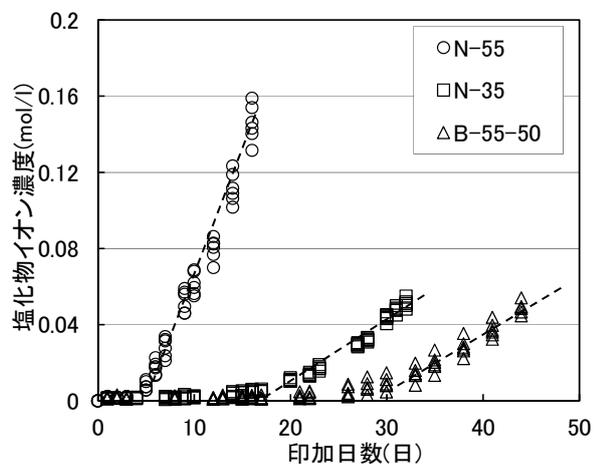
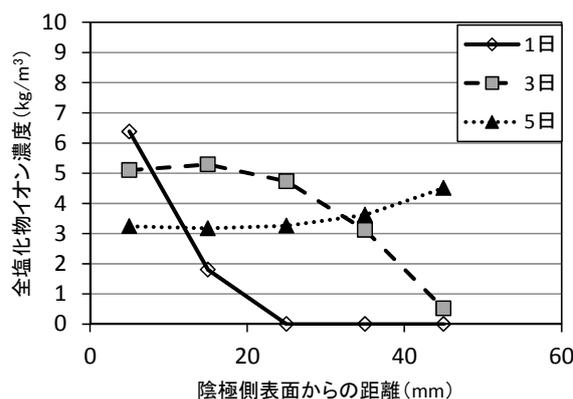
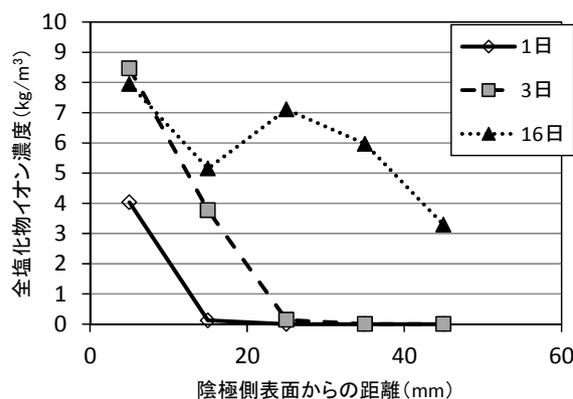


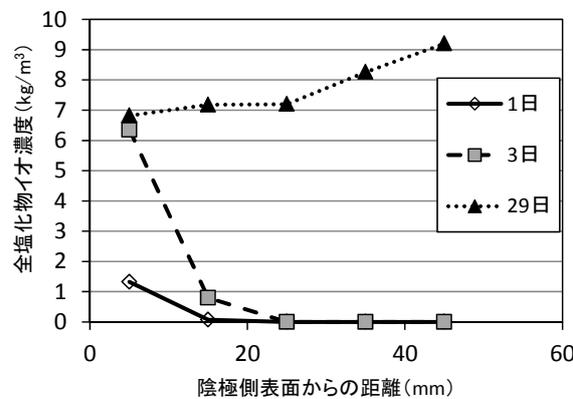
図-1 電気泳動試験における電圧の印加日数と陽極側塩化物イオン濃度の関係



(a) N-55



(b) N-35



(c) B-55-50

図-2 各印加期間における全塩化物イオン濃度

木学会規準 JSCE-G571-2003「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法」に従い電気泳動試験を行った。また、残りの6体は塩化物イオン濃度測定用の供試体とし、電気泳動試験と同条件で電圧を印加した後、電圧印加開始直後の1日目、電圧印加開始後3日目、および陽極側から塩化物イオンが検出された直後の日の3期間でそれぞれ2本ずつ試験装置から取り外した。その後試験体を陰極側から10mmの厚さに5等分に切断し分析用試料とした。また、分析試料は約5mm以下に粉碎して、風乾したものを粉碎ミルにより150 μm 以下に粉碎し、一昼夜風乾した後よく混合し、その後JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し全塩化物イオン量を測定した。

2.3 実験結果および考察

(1) 陽極溶液から塩化物イオンが検出された時期

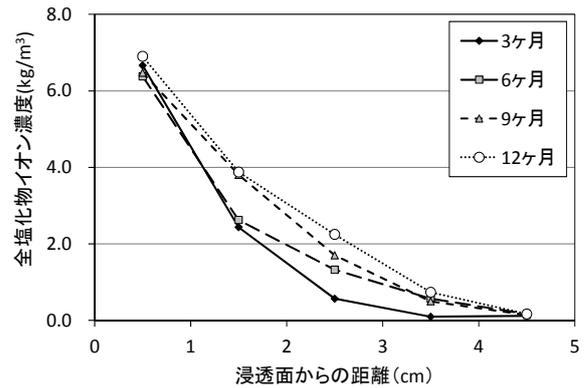
陽極溶液から塩化物イオンが検出された日は、N-55においては5日、N-35においては16日、B-55-50においては29日となった。図-1にその結果を示す。定常状態時の塩化物イオン増加割合に多少のばらつきがあるものの、陽極溶液に塩化物イオンが検出される時期と定常状態における経時変化を回帰した直線の時間軸との切片は概ね一致した。また、配合により陽極溶液から塩化物イオンが検出され始める期間が異なることが分かった。

(2) 塩化物イオン濃度分布

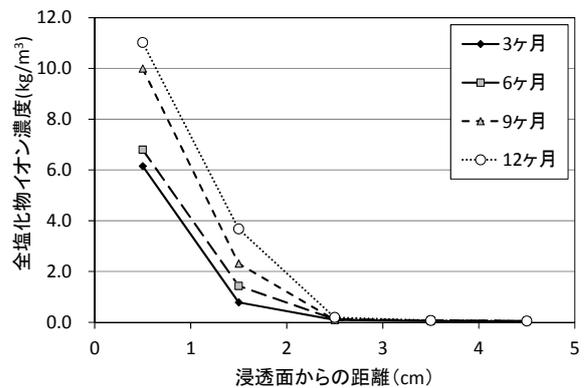
図-2に各配合における全塩化物イオン濃度分布を示す。N-55に関しては電圧印加期間1日で浸透面から深さ2cmまで塩化物イオンが浸透しており、電圧印加期間3日で浸透面から深さ4cmまで塩化物イオンが浸透していることが確認できる。また、電圧印加期間が長くなるほど全塩化物イオン量のピーク値が低下している。これは電気泳動試験の方法上、陰極側の塩水濃度が一定ではなく時間の経過とともに低下しているため、また、電圧印加期間1日で浸透面から深さ1cmではコンクリート中に十分に陰極側の溶液が浸透しているためであると考えられる。なお、試験開始時は0.50mol/lであった陰極側の塩水溶液は、試験開始1日後で0.48mol/l、試験開始後3日で0.45mol/lに低下していた。

N-35に関しては電圧印加期間1日から電圧印加期間3日にかけて浸透面から深さ1cm付近ではN-55の結果とは反対に全塩化物イオン量が増加している。これは、N-55に比べ、電圧印加期間1日では深さ1cmまでに塩化物イオンが十分浸透していないことを示している。

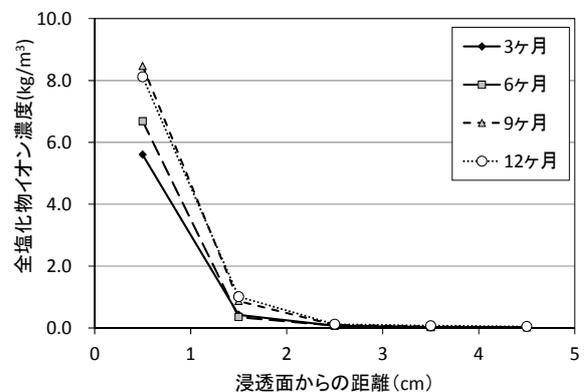
B-55-50に関してはN-35同様に電圧印加期間1日から電圧印加期間3日にかけて各スライスにおいて全塩化物イオン量が増加しており、短期間では塩化物イオンが十分に浸透していないことが確認できる。また、高炉スラ



(a) N-55



(b) N-35



(c) B-55-50

図-3 浸漬試験における全塩化物イオン濃度分布

グ微粉末を混和した配合は塩化物イオンの浸透速度が遅いことも確認できる。

また、陽極側に塩化物イオンが検出された直後の全塩化物イオン濃度分布が配合によって異なった挙動を示している。これは、電気泳動試験を行う際に、陽極側の塩水濃度が経時的に減少し、また一定の濃度まで減少した際には、塩水溶液を交換する必要があるため、陽極の塩化物イオン濃度が減少と増加のサイクルを繰り返すためだと考えられる。

なお、N-55 に対し N-35 や B-55-50 の配合の方が高い全塩化物イオン濃度を示している部分がある。これは N-35 が N-55 に対し単位セメント量が多いことや、B-55-50 は高炉スラグ微粉末の単位質量あたりの塩化物イオン固定化能が普通ポルトランドセメントよりも大きいことが原因として考えられる。

3. 浸漬試験

3.1 配合および養生条件

2.1 と同様、表-1 および表-2 に示した材料と配合で $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を作製し、脱型後 20°C 水中養生を行った。

3.2 実験概要

作製した供試体より材齢 28 日で円柱供試体の中央部分を切断し、切断面以外をエポキシ樹脂で 2 日に分け 2 回塗布し、土木学会規準 JSCE-G572-2003「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法」に従い浸漬試験を行った。なお見掛けの拡散係数は浸漬期間が短期間の場合その塩水濃度に依存する特性値であることが知られている^{2), 3)}。また、土木学会規準で示されている k_1, k_2 を試算する際に用いられた見掛けの拡散係数が 3% 濃度 NaCl 溶液による浸漬試験から算出されていること、電気泳動試験の陰極側溶液に用いられる NaCl 溶液が 3% 濃度と同等の 0.5 mol/l であることから浸漬試験に用いる塩水溶液の濃度は 3% とした。浸漬期間は 3 ヶ月、6 ヶ月、9 ヶ月および 12 ヶ月とし、浸漬期間終了後、浸透面から深さ方向に 10mm の厚さに切断し、2.2 と同様の処置を行い、全塩化物イオン濃度およびそれらの分布から見掛けの拡散係数を算出した。

3.3 実験結果および考察

図-3 に各配合の全塩化物イオン濃度分布を示す。N-55 に関しては浸漬期間に関わらず浸透面から 1cm 付近では全塩化物イオン濃度はほぼ変わらず 6.7kg/m^3 となっている。N-35 および B-55-50 に関しては浸漬期間が長くなるほど各層における全塩化物イオン濃度が増加していることが確認できる。これは 2. の電気泳動試験における初期印加時期の傾向と一致している。また、図-2 の電気泳動試験の結果と比較した場合、N-55 では印加によってコンクリート中に浸透する全塩化物イオン濃度のピーク値は浸漬試験によって浸透する全塩化物イオン濃度とほぼ等しい値となることが確認できる。なお、N-35 および B-55-50 に関しては両試験における全塩化物イオン濃度のピーク値が一致しなかったが、非定常状態において陽極側の溶液濃度を一定に保つことが出来れば、一致する印加期間が存在する可能性があることが、N-55 の結果より推察される。

図-4 に浸漬期間と見掛けの拡散係数の関係を示す。

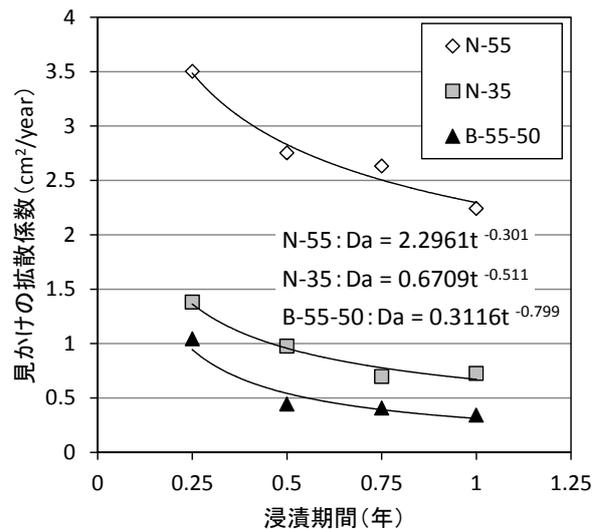


図-4 浸漬期間と見掛けの拡散係数の関係

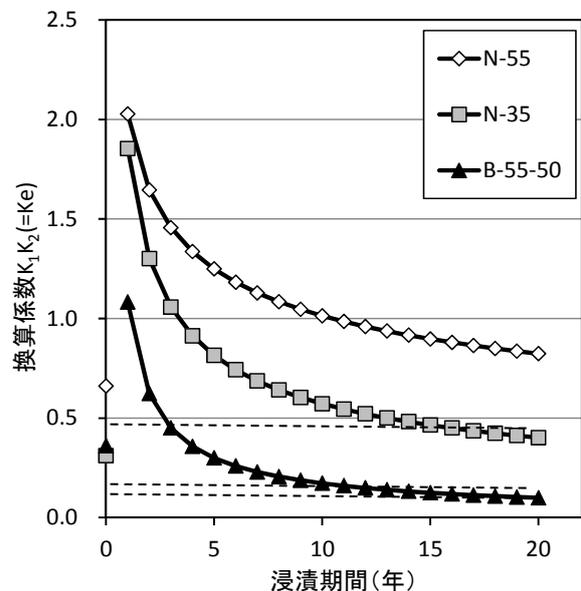


図-5 本実験における換算係数 Ke

多少の変動はあるものの全ての配合において、浸漬期間が長期にわたるほど、見掛けの拡散係数は低下する傾向を示している。また、その低下率は浸漬期間が長くなるほど減少しており、このことから、見掛けの拡散係数は時間依存性を有する値であるという既往の文献⁴⁾に一致する結果となった。また、その非定常状態における拡散係数の時間依存性は式(1)により表すことができる⁵⁾。

$$D_a(t) = a \cdot t^b \quad (1)$$

ここで、 $D_a(t)$: 見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

t : 浸漬期間(年)

これら既往文献に基づいて実験結果を累乗近似させると、 R^2 乗値は 0.9 以上となり、各配合とも図-4 に示した回帰式で回帰可能であることが確認できる。以下では本実験での見掛けの拡散係数の時間依存性を図-4 中

の数式で表せるものとして考察を行う。また便宜上、本実験により求めた換算係数を K_e 、土木学会規準に示されている換算係数を K_s と記述する。

4. K_s の補正に関する考察

本実験の実効拡散係数および累乗近似式より求めた見掛けの拡散係数の比から算出した換算係数 K_e の経時変化を図-5 に示す。なお、図には土木学会規準の換算係数 K_s ($W/C=55\%$ で $K_s=0.66$, $W/C=35\%$ で $K_s=0.31$, $W/B=55\%$ で 0.36) も併せて破線で示す。

図から、浸漬期間 1 年では K_e は 1 以上の値であり、 K_s よりも大きな値であることが分かる。しかしながら、見掛けの拡散係数の時間依存性を考慮した場合、浸漬期間が長期にわたる程、両者の差は小さくなり、B-55-50 においては大小関係が逆転する。これらの結果より、さらなる高い精度で実効拡散係数から見掛けの拡散係数に換算するためには、 K_s になんらかの補正値を与える必要がある。よってその補正値 K_r を式(2)により逆算して求めた。

$$K_r = K_e / K_s \quad (2)$$

図-6 にその結果を示す。図より、 K_r も時間依存性を有する値であることが確認できるため、今後実験により K_r のデータの蓄積および別実験との比較を行う場合は、式(1)により時間依存性による影響の少ない浸漬期間に相当するものから算出した K_r が望ましいと思われる。なお、本実験においては約 20 年程度で時間による影響が小さくなると推定された。浸漬期間 20 年において試算された本実験の補正値 K_r は N-55 が 1.25、N-35 が 1.29、B-55-50 が 0.27 となった。なお、今後は補正値 K_r と電気泳動試験における非定常状態の期間との相関関係を考察するためのデータの蓄積が必要である。

5. まとめ

- (1) 電気泳動試験を行った結果、陽極側に塩化物イオンが検出されない、非定常状態の期間が配合等により異なることが確認できた。
- (2) 異なる浸漬期間において塩水浸漬試験を行った結果、見掛けの拡散係数が時間依存性をもつパラメータであるという既往の文献と一致した。また、その時間依存性が $D_a(t)=at^{-b}$ で表されるという既往の文献と一致した。
土木学会規準に示された換算係数 K_s を算出するために用いられたデータは、浸漬期間やその他環境条件の異なるパラメータから算出されているため、各種コンクリートの換算係数の傾向はよく示せてい

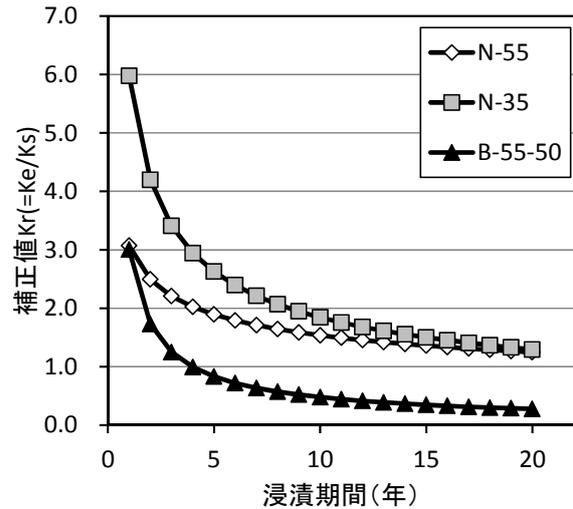


図-6 補正値 K_r の試算結果

るものの、誤差が大きいパラメータであった。そのため、 K_s の精度を高めるためには、 K_r という補正値を乗ずる必要があると考えられる。本実験内では、 K_r と電気泳動試験における非定常状態の期間との相関性を示すまでには至らなかったものの、それら相関関係を検討するために今後のデータの蓄積が重要な課題である。

参考文献

- 1) 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、No.1, 2003.9
- 2) 審良善和, 山路徹, 岩波光保, 横田弘：高炉セメントB種を用いた港湾コンクリートの塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン濃度について、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1033-1038, 2009
- 3) 高鳴笛, 濱田秀則, 佐川康貴, 平安山良和：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの塩化物イオン拡散係数に関する実験的考察、土木学会西部支部研究発表会講演概要集, V-016, pp.663-664, 2011
- 4) 壽祐太郎, 山口明伸, 武若耕司, 中島正志：コンクリートの見掛けの塩化物イオン拡散係数と表面塩化物イオン濃度の関係に関する一考察、土木学会第66回年次学術講演会概要集, V-218, pp.435-436, 2011
- 5) 細川佳史, 山田一夫, 高見満, 杉山隆文：浸せき法および電気泳動法により評価した塩化物イオン拡散係数に関する検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.725-730, 2003

