

論文 表面含浸材の遮塩性・遮水性評価に対する電気抵抗試験法の開発

阿川 清隆*1・宮里 心一*2・伊藤 哲男*3・出口 宗浩*4

要旨: コンクリート用表面含浸材の物質透過抵抗性について、短時間で材料検定でき、かつ実構造物のモニタリングにも適用できる方法を開発している。この研究の一環として本論文では、3水準の水セメント比のコンクリートに対して、8種類の表面含浸材を塗布し、電気抵抗および含浸深さを測定するとともに、塩分浸透性および透水性との関係性を評価した。その結果、表面含浸材による遮塩効果および遮水効果は、塗布面に設置した対極とコンクリート内部の鉄筋間の電気抵抗を、塗布から3週目あるいは4週目に測定することによって評価できることが明らかになり、材料検定手法としての定式化を図った。

キーワード: 表面含浸材, 電気抵抗, 塩化物イオン浸透抵抗性, 透水抵抗性, 材料検定手法

1. はじめに

従来の構造物の多くは、事後保全に近い形で維持管理されてきた。しかしながら今後は、ライフサイクルコスト低減の考え方にに基づき、劣化による性能低下が顕在化する前の時点で対処するシナリオが重要視されるであろう。この状況を踏まえて、塩化物イオンや水分の浸透を抑制するため、各種の表面処理材が活用されている。特に最近では、目視検査の容易さが利点となり、無色透明な含浸材の研究開発^{1)~6)}が進められている。

現在、図-1に示される「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説 pp.61-63 付録1 コンクリート塗装材料の品質試験方法(案) (3)しゃ塩性試験方法」や、「土木学会基準 JSCE-K524 表面処理材の塩化物イオンの浸透深さ試験方法」により、表面処理材の物質透過性が評価されている。しかしながら、例えば図-1に示すようなセル試験の場合、塩化物イオンが表面処理材を通過するには長時間を要する。また、シラン系およびけい酸塩系に拘らず含浸材を用いた場合、電気泳動試験による実効拡散係数は実現象を適切に評価できない可能性が指摘されている^{7),8)}。

一方、図-1に示されるセルを用いた方法の場合、室内

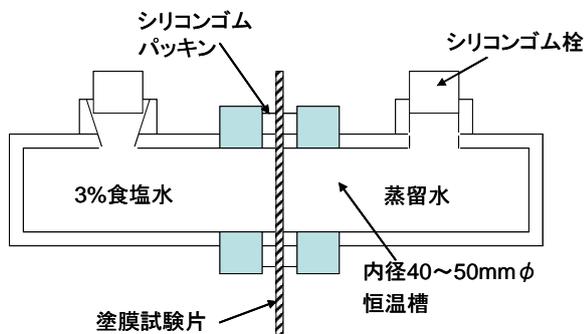


図-1 道路橋の塩害対策指針(案)での遮塩性試験法

での試験は可能であるが、実構造物における塗布後のモニタリングに用いることは不可能である。また、実構造物への適用に際し、含浸材の膜厚を測定できないため、施工品質を確認する試験方法の開発が必要である。

ここで、古典化学に基づく文献^{9),10)}によれば、オームの法則とNernst-Planck式を組み合わせると、直流電流が印加されるセメント硬化体中において、電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係は式(1)ようになる。このことから、電気抵抗の測定により、塩分浸透性を推定できる可能性が示唆される。

$$D_{Cl} = \frac{1}{\rho} \times \frac{k \times T \times \left(1 - \ln 10 \times C_{Cl} \times \frac{0.51 Z_{Cl}^4}{4 \sqrt{I} (1 + \sqrt{I})^2} \right)}{F \times e \times \sum_n (Z_n^2 \times B_n \times C_n)} \quad (1)$$

ここで、 D_{Cl} : 塩化物イオン拡散係数(m²/sec), ρ : 電気抵抗率($\Omega \cdot m$), k : ボルツマン定数 (= 1.38×10^{-23} J/K), T : 絶対温度 (K), C : コンクリート単位体積あたりのイオン濃度 (mol/m³), Z : イオンの価数, I : イオン強度, F : ファラデー定数 (= 9.65×10^4 C/mol), e : 電気素量 (= 1.60×10^{-19} C), n : イオンの種類, B : 理想溶液中の絶対移動度(m \cdot N⁻¹ s⁻¹)。

以上の背景を踏まえて、著者らは、「コンクリート用塗布材の物質透過抵抗性に対する短期評価試験方法の開発」というテーマで、表面含浸材の材料検定や実構造物における施工後の物質透過抵抗性をモニタリングする方法の開発に取り組み始めた¹¹⁾。すなわち、コンクリートの表面含浸材の物質透過抵抗性を電気抵抗により短時間で評価し、かつ実構造物のモニタリングにも適用できる方法を開発している。

*1 西日本高速道路(株) 技術部専門役 (正会員)

*2 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科教授 博(工) (正会員)

*3 西日本高速道路(株) 技術部サブリーダー 博(工)

*4 西日本高速道路(株) 技術部

以上の研究の一環として本論文では、3水準の水セメント比(W/C=43.0%, 57.5%, 65.0%)のコンクリートに対して、8種類の表面含浸材を塗布し、電気抵抗および含浸深さを測定するとともに、塩分浸透性および透水性との関係性を評価し、両者の関係を定式化する。

2. 実験手順

2.1 実験方法

(1) 電気抵抗試験

供試体の概要を図-2に示す。供試体の作製に当たってはまず、鉄筋が埋設された10×10×10cmのコンクリートを打設し、28日間水中養生を行った。その後、14日間に亘り乾燥気中(20℃, RH60%)に静置し、図-2に示すように、供試体の一面に表面含浸材を塗布した。そして、その裏側の面を除いた4面をエポキシ樹脂で被覆した。それから、1週間は再び乾燥気中で、さらに11週間は湿潤気中(20℃, RH90%)で暴露した。その間、暴露1週目、2週目、3週目、4週目、8週目および12週目に、対極板を塗布面に設置し、コンクリート内部に埋設された鉄筋との間の電気抵抗を直流で測定した。

(2) 表面含浸材の浸透深さ試験

暴露12週目の電気抵抗測定後、前述(1)に示す供試体を割裂し、JSCE-K571に準拠してシラン系表面含浸材の浸透深さを測定した。

(3) 塩分浸透深さ試験

JSCE-K524に準拠して、表面含浸材の遮塩性を評価した。すなわち、鉄筋を埋設はしないが、前述(1)に示す電気抵抗試験と同様に作製された10×10×10cmのコンクリート供試体を用いた。表面含浸材を塗布後、1週間は乾燥気中で暴露した。さらに、濃度3%のNaCl水溶液へ浸漬し、12週間が経過した後に供試体を割裂し、0.1N硝酸銀水溶液を噴霧することにより、塩分浸透深さを測定した。

(4) 透水量試験

JSCE-K571に準拠して、表面含浸材の遮水性を評価した。すなわち、前述(3)に示す塩分浸透深さ試験と同様に

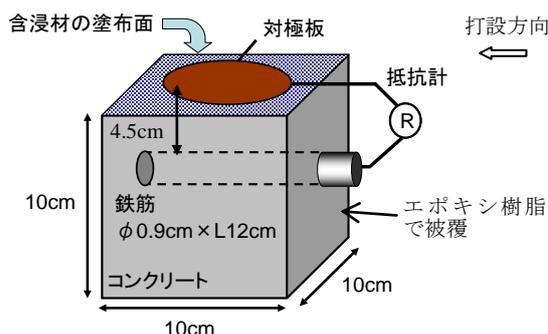


図-2 電気抵抗試験用供試体の概要

作製された10×10×10cmのコンクリート供試体を用い、表面含浸材を塗布した。それから1週間は乾燥気中で暴露した後、透水試験に供した。

2.2 実験ケース

(1) コンクリートの水セメント比

コンクリートの示方配合を表-1に示す。

(2) 表面含浸材の種類

表面含浸材の種類を表-2に示す。8種類の表面含浸材(S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, K1)およびブランクとして無塗布の、計9水準を設けた。

3. 実験結果

3.1 電気抵抗

表-3に、電気抵抗の測定結果を示す。すなわち、水セメント比が43.0%における電気抵抗の経時変化は、図-3に示す通りとなる。

ここで、水セメント比の影響を除いた比較を行うため、式(2)により電気抵抗比を算定した。

$$\text{電気抵抗比} = \frac{\text{任意の W/C のコンクリートでの表面含浸材を塗布した供試体における電気抵抗}}{\text{任意の W/C のコンクリートでのブランク供試体における電気抵抗}} \quad (2)$$

すなわち、電気抵抗比は、コンクリートの水セメント比に拘わらず、無塗布に比較して、表面含浸材を塗布した場合、電気抵抗がどの程度に増加するかを示す値である。したがって、電気抵抗比が1.0であることは、表面含浸材を塗布した場合の電気抵抗が、無塗布の場合の電気抵抗と同等であることを意味する。図-4に、電気抵抗比の経時変化を示す。また、図-5に、各暴露期間毎の電

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				(g/m ³)
		W	C	S	G	Ad
43.0	40.4	167	389	682	1050	39
57.5	43.3	167	290	773	1040	15
65.0	44.8	169	260	808	1024	13

表-2 表面含浸材の種類

No	記号	系
1	S1	シラン
2	S2	シランシロキサン
3	S3	シラン
4	S4	
5	S5	
6	S6	シラン+アミン
7	S7	シラン
8	K1	けい酸リチウム
9	ブランク	

表-3 電気抵抗の測定結果 [kΩ]

W/C (%)	表面含浸材	暴露期間(週)					
		1	2	3	4	8	12
43.0	S1	136.5	18.5	17.9	6.2	19.1	16.3
	S2	40.5	7.2	15.5	20.4	17.0	14.8
	S3	60.4	24.5	15.7	24.7	22.2	15.5
	S4	91.3	13.3	16.7	23.2	30.3	14.4
	S5	29.2	13.6	10.5	9.2	14.0	9.0
	S6	45.5	30.3	13.6	30.4	19.9	19.3
	S7	33.8	15.0	13.1	18.3	15.5	13.8
	K1	66.6	6.9	6.2	14.2	12.4	10.8
	ブランク	20.2	5.3	7.4	7.2	7.9	6.7
57.5	S1	296.5	-	-	40.0	135.0	115.0
	S2	177.0	-	-	140.0	37.0	38.0
	S3	1504.0	-	-	41.0	20.0	30.0
	S4	442.0	76.0	70.0	68.6	65.2	40.2
	S5	105.6	20.4	18.2	22.6	19.2	15.0
	S6	113.0	41.6	28.3	39.6	15.0	19.3
	S7	290.5	102.8	45.1	76.9	61.5	39.5
	K1	18.4	8.1	8.1	14.6	15.3	11.3
	ブランク	23.4	6.1	6.1	8.3	7.8	16.4
65.0	S1	460.5	54.8	43.3	42.8	27.3	26.1
	S2	371.2	43.3	81.3	65.0	36.1	20.5
	S3	265.0	46.7	40.6	68.0	28.2	27.7
	S4	341.6	70.0	69.4	75.0	55.3	38.8
	S5	84.8	24.2	19.6	25.3	22.3	20.4
	S6	162.5	41.5	24.9	35.1	22.3	24.8
	S7	270.0	96.0	57.0	55.2	38.7	38.0
	K1	13.3	8.9	7.8	18.0	47.6	18.9
	ブランク	20.1	5.6	8.2	10.9	12.6	17.3

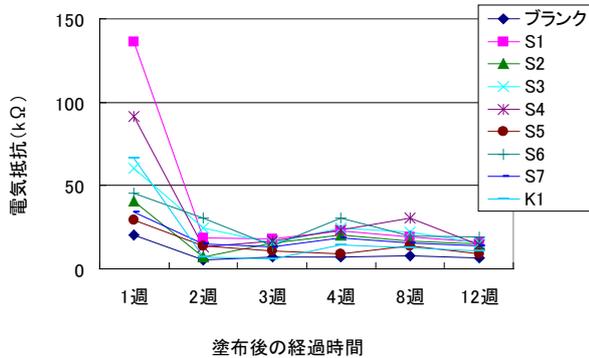


図-3 W/C が 43.0%における電気抵抗の経時変化

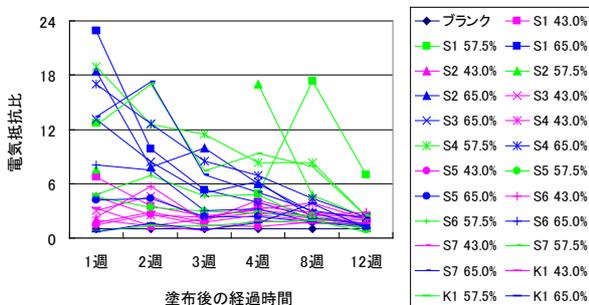
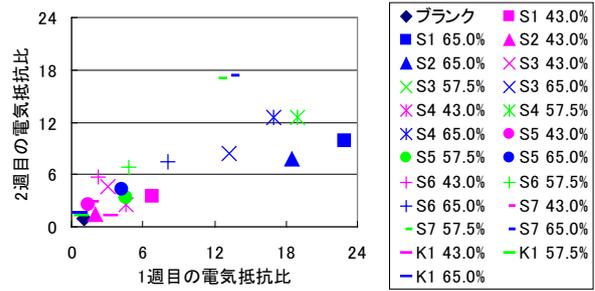
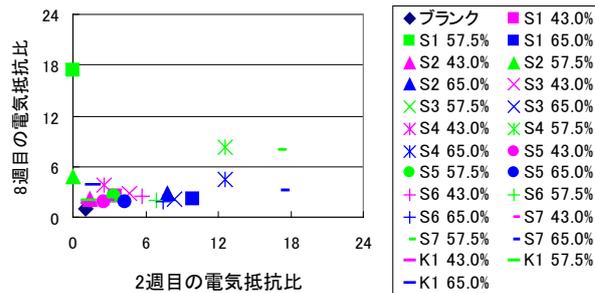


図-4 電気抵抗比の経時変化

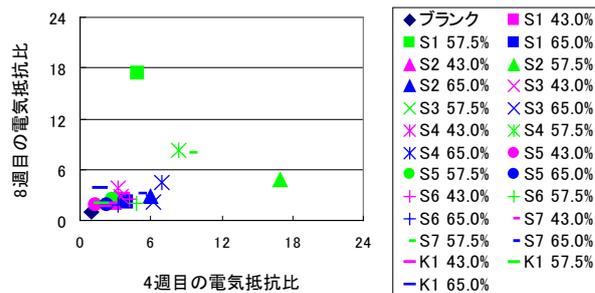
電気抵抗比の比較を示す。ここで、同じ含浸材を塗布した場合の電気抵抗比において、暴露期間による違いが無ければ、図-5において縦軸と横軸は1:1の関係になるはずである。しかしながら、2週間以内の測定値を軸にした



(1) 1週目と2週目の比較



(2) 2週目と8週目の比較



(3) 4週目と8週目の比較

図-5 電気抵抗比の暴露期間毎の比較

図-5(1)(2)によれば、その関係は認められない。一方、4週目と8週目の測定値を比較した図-5(3)によれば、2点(S157.5%, S257.5%)を除けば1:1の関係に近づいている。ゆえに図-4と図-5から、一部の測定値を除けば、電気抵抗は3週目以降に安定すると言える。ここで、塗布から早期(塗布後1~2週)において電気抵抗が安定しない理由は、含浸材に含まれるシランがミラノールに変化するなどの化学反応が起きているためと考えられる。したがって、表面含浸材の物質透過性を評価するためには、塗布から3週間以上の期間に亘る暴露の後に電気抵抗を測定する必要があると判断できる。

3.2 表面含浸材の浸透深さ

図-6に、表面含浸材の浸透深さを示す。これによれば、S4およびS5においては、何れの水セメント比でも、表面含浸材は4mm以深の内部へ浸透することが認められる。一方、S1およびS2においては、低水セメント比の場合に1mm以深の内部へ浸透しないことが認められる。

3.3 塩分浸透深さ

図-7に、塩分浸透深さを示す。ここでも、式(2)と同様に、水セメント比の影響を除いた比較を行うため、式(3)により、塩分浸透深さ比を算定した。

$$\text{塩分浸透深さ比} = \frac{\text{任意の W/C のコンクリートでの表面含浸材を塗布した供試体における塩分浸透深さ}}{\text{任意の W/C のコンクリートでのブランク供試体における塩分浸透深さ}} \quad (3)$$

図-8に、塩分浸透深さ比を示す。これによれば、シラン系では塩分浸透深さ比が0.7以下に減少し、一方けい酸塩系では概ね1であることが認められる。

3.4 透水量

図-9に、透水量を示す。ここでも、式(3)と同様に、水セメント比の影響を除いた比較を行うため、透水比を算定した。図-10に、透水比を示す。これによれば、シラン系では透水比が約0.2以下に減少し、一方けい酸塩系では概ね0.6~0.8であることが認められる。

4. 実験結果の比較整理

4.1 電気抵抗と表面含浸材の浸透深さの関係

図-11に、暴露4週目における電気抵抗比と表面含浸材の浸透深さを比較する。これによれば、電気抵抗比と表面含浸材の浸透深さの相関は低いことが認められる。

4.2 電気抵抗と塩分浸透深さの関係

図-12に、3週目以降の暴露期間における電気抵抗比と、塩分浸透深さ比の関係を示す。これによれば、3週目および4週目の電気抵抗比を用いた図-12(1)~(2)において、電気抵抗比が高いほど、塩分浸透深さ比は低減することが認められる。このことから、3週目および4

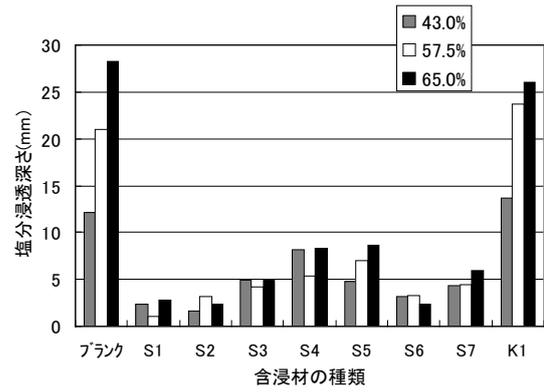


図-7 塩分浸透深さ

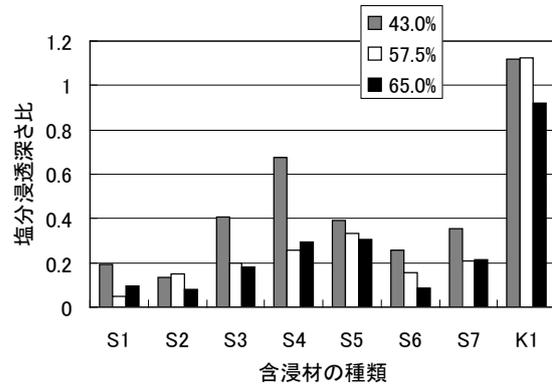


図-8 塩分浸透深さ比

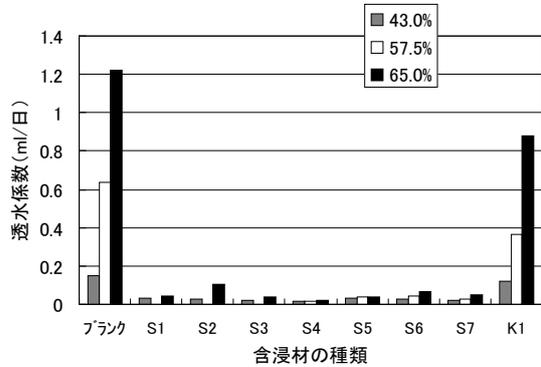


図-9 透水量

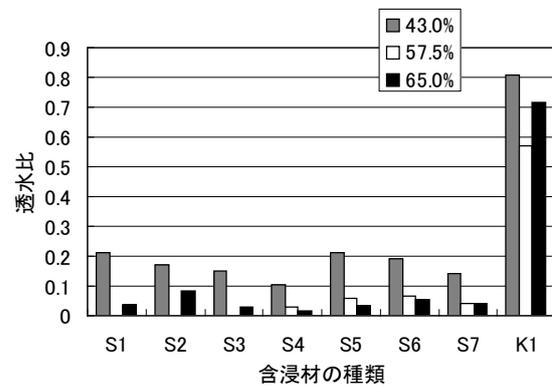


図-10 透水比

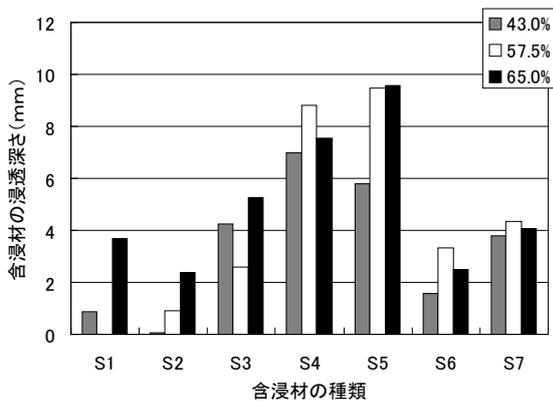


図-6 表面含浸材の浸透深さ

週目における電気抵抗試験により、表面含浸材による遮塩効果を評価できると考えられる。特に、(1)式を踏まえると、3週目および4週目における電気抵抗比と塩分浸透深さ比の関係は、式(4)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \text{塩分浸透深さ比} &= 0.71 \times 3 \text{ 週目の電気抵抗比}^{0.76} \\ &= 0.69 \times 4 \text{ 週目の電気抵抗比}^{0.75} \end{aligned} \right\} (4)$$

4.3 電気抵抗と透水量の関係

図-13 に、3週目以降の暴露期間における電気抵抗比と、透水比の関係を示す。これによれば、3週目および4週目の電気抵抗比を用いた、図-13(1)～(2)において、電気抵抗比が高いほど、透水比は低減することが認められる。したがって、3週目および4週目における電気抵抗試験により、表面含浸材による遮水効果を評価できると考えられる。特に、(1)式を踏まえると、3週目および4週目における電気抵抗比と透水比の関係は、式(5)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \text{透水比} &= 0.64 \times 3 \text{ 週目の電気抵抗比}^{-1.46} \\ &= 0.69 \times 4 \text{ 週目の電気抵抗比}^{-1.49} \end{aligned} \right\} (5)$$

5. まとめ

本論文で得られた主な結論を示す。

- (1) 表面含浸材による遮塩効果および遮水効果は、塗布面に設置した対極とコンクリート内部の鉄筋間の電気抵抗を測定することによって評価できる。この電気抵抗を利用して、室内での短期間の材料検定手法として、塗布後3・4週目における実験式(4)・(5)を活用できる。
- (2) 前述(1)の実験式は、実構造物における表面含浸材の施工中の品質管理の一つとして活用できる。

なお、今後の課題として、表面含浸材の長期に亘る遮塩性能・遮水性能の保持を確認するため、実際の現場の追跡調査と併せて、その適用性について更に検証する必要がある。

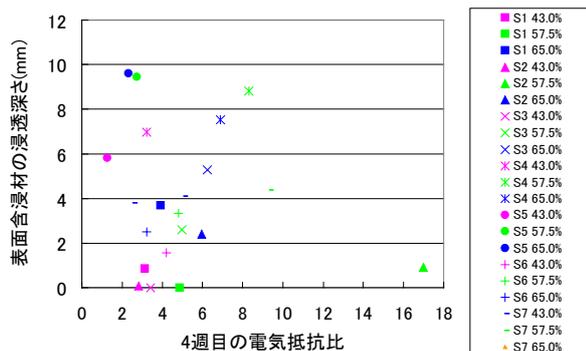
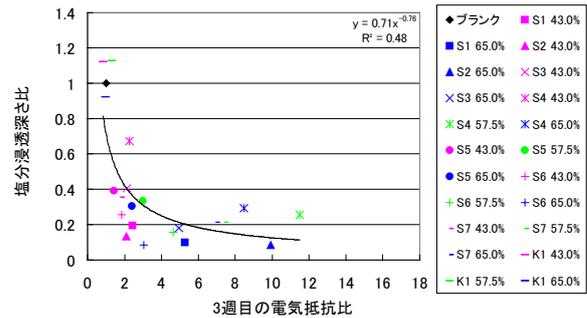
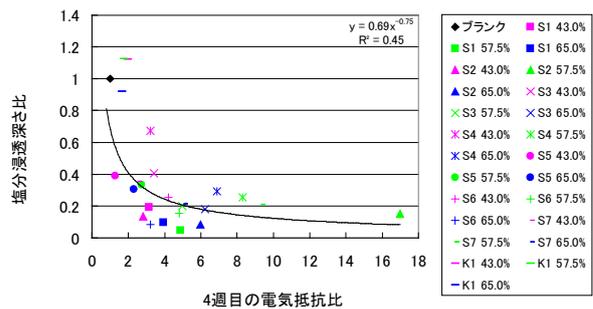


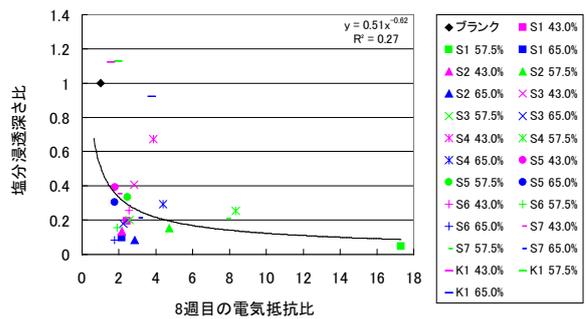
図-11 電気抵抗比と表面含浸材の浸透深さの比



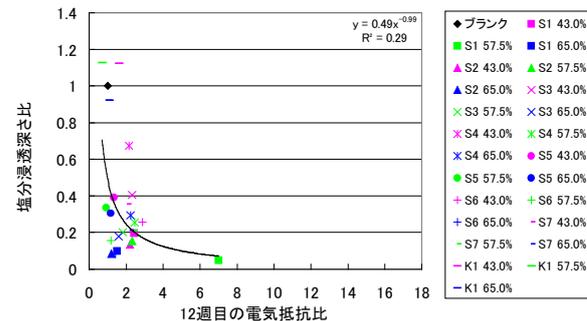
(1) 3週目の電気抵抗比の場合



(2) 4週目の電気抵抗比の場合

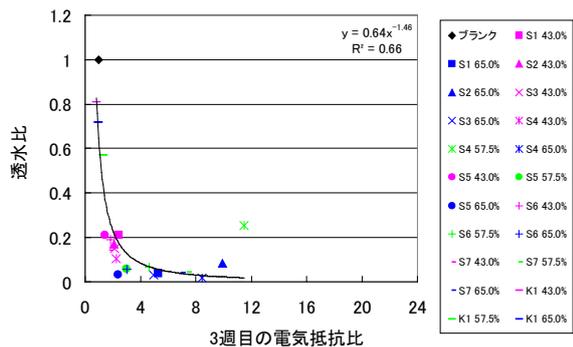


(3) 8週目の電気抵抗比の場合

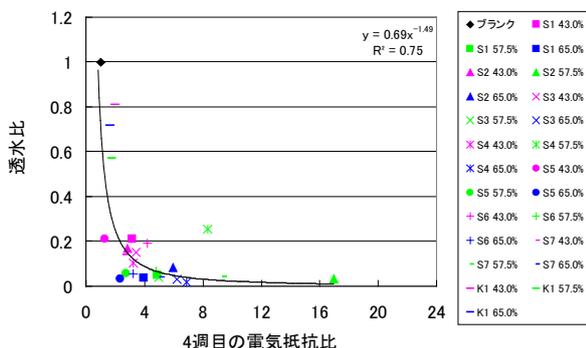


(4) 12週目の電気抵抗比の場合

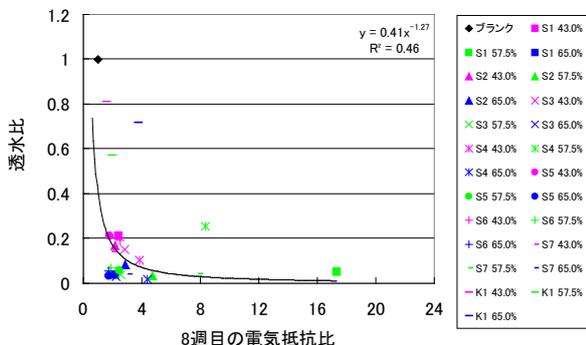
図-12 電気抵抗比と塩分浸透深さ比の関係



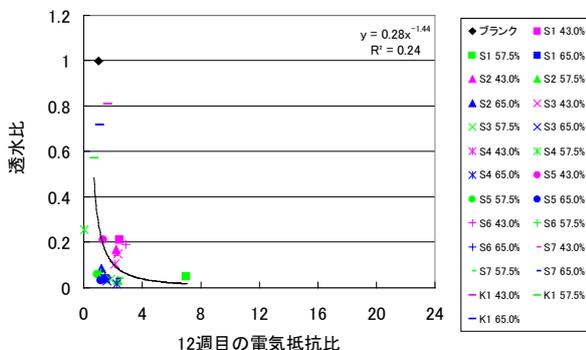
(1) 3週目の電気抵抗比の場合



(2) 4週目の電気抵抗比の場合



(3) 8週目の電気抵抗比の場合



(4) 12週目の電気抵抗比の場合

図-13 電気抵抗比と透水比の関係

参考文献

- 1) 田中博一, 滝本和志, 栗田守朗: 表面改質材を用いたコンクリートの耐久性向上に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp.667-672, 2008.7
- 2) 審良善和, 戴建国, 加藤絵万: 港湾 RC 構造物に吸水防止材を適用した場合の補修効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp.631-636, 2008.7
- 3) 林大介, 坂田昇, 田口史雄, 遠藤裕丈: 浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp.649-654, 2008.7
- 4) 加藤淳司, 田中斉, 沖野喜佳: 中性化抑制機能を付与したシラン系表面含浸材の性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp.799-804, 2007.7
- 5) 久保善司, 堀耕次, 服部篤史, 宮川豊章: シラン系表面処理がコンクリート中の水分に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp.873-878, 1996.7
- 6) 寺澤正人, 木村裕俊, 中村洋二, 鈴木基行: 寒冷地域にて使用する表面含浸材の耐久性性能試験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp.553-558, 2007.7
- 7) 遠藤裕丈, 田口史雄, 小野俊博, 登靖博: けい酸塩系表面含浸材を施工したコンクリートのスケーリング抵抗性の基礎的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp.1203-1208, 2007.7
- 8) 竹田宣典, 安田敏夫, 平田隆祥: 電気泳動試験による表面保護材の塩化物イオン遮断性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp.965-970, 2006.7
- 9) 榎原彩野, 皆川浩, 久田真: モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp.789-793, 2008.7
- 10) 榎原彩野, 齊藤佑貴, 皆川浩, 久田真: 電気抵抗率による物質透過性評価に及ぼすイオン濃度の影響, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, No.V, pp.349-350, 2010.9
- 11) 松田哲夫, 宮里心一, 小川篤生, 出口宗浩, 山口晃史: コンクリート表面含浸材の物質透過抵抗性に関する評価方法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.9, pp.237-244, 2009.10