

論文 非破壊計測結果と耐久性指標の関係性に関する基礎的研究

西村 和朗*1・加藤 佳孝*2

要旨: 本研究では、物質移動抵抗性を原位置で評価できる非破壊計測の結果と耐久性指標の関係性について検討した。また、非破壊計測は含水率の影響を受けるとされているため、含水率の影響を排除し検討した。その結果、表層透気係数は中性化速度係数や目標塩化物濃度到達時期と、電気抵抗率は中性化速度係数と実効拡散係数と、吸水係数はこれら全ての耐久性指標と関係性が確認された。

キーワード: 非破壊計測, 物質移動抵抗性, 中性化速度係数, 実効拡散係数, 見掛けの拡散係数

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期以降、急速にインフラが整備された結果、現在、老朽化したインフラの維持管理が重要視されている。建設年次に基づく画一的な対策では、単年度で必要となる予算が膨大となるため、既存構造物の劣化状況を把握し、適切な時期に対策する必要がある。既に何らかの変状が生じ、目視点検によってある程度劣化状況を把握できる構造物への対策は、各管理機関のマニュアルに従って実施可能であるが、目視点検だけでは、将来必要となる対策費用を見積もることは不可能である。膨大なインフラを将来に渡り適切に維持管理するためには、構造物の劣化の進行を適切に予測する必要がある。

コンクリートの場合、同一配合で打設された構造物であっても、劣化進行は部材位置よるばらつきが非常に大きく、場合によっては設計で想定した劣化の進行を大きく上回る場合があることが報告されている¹⁾。これは、かぶりコンクリートの品質が施工によって変動したことが原因とされている。コンクリート構造物の耐久性は、かぶりコンクリートの品質と密接な関係にあり、その品質は、使用材料や配合、複数の施工プロセスの影響を受ける。構造物の品質を竣工時に直接確認できれば、施工に伴う品質変動を把握することが可能であるが、現状では、品質の確保を主に施工のプロセス管理に拠っており、施工後の品質の確認は供試体の圧縮強度や構造物のひび割れの有無等で評価され、構造物の耐久性を直接評価できていないとの指摘がある²⁾。

このような観点から、近年、構造物の耐久性と密接に関連するかぶりコンクリートの物質移動抵抗性を原位置で評価出来る表面透気試験³⁾や、表面吸水試験⁴⁾、4プローブ法⁵⁾等が注目されており、中性化や塩害等の劣化に関する耐久性指標との関係性が検討されている。しかし、これらの試験の指標は、コンクリートの含水状態の影響を受けることが一般的に知られているため、構造物の品

質評価手法として確立するためには、含水率の影響を排除するか、含水率に応じて試験結果を補正する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、非破壊計測から得られる物理的指標と耐久性指標との関係を検討する基礎段階として、含水率の影響を排除した場合の両者の関係性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3410cm²/g）、細骨材には山梨県富士川産川砂（表乾密度 2.65 g/cm³、絶乾密度 2.62 g/cm³、F.M.2.73）、粗骨材には埼玉県秩父産砕石（表乾密度 2.72g/cm³、絶乾密度 2.67 g/cm³、F.M.6.74）、化学混和剤にはアルキルエーテル系 AE 剤およびポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤を用いた。水結合材比は 40、50、60%の3水準とした。コンクリートの配合を表-1に示す。

養生は、翌日脱型後、材齢 28 日まで気中養生（20℃ 60%R.H）、封かん養生（20℃）、水中養生（20℃）の3つの環境下で行った。

2.2 各種試験と供試体概要

(1) 表面透気試験

表面透気試験³⁾には、150×150×150mmの供試体を用いた。養生後、40℃炉乾燥に静置し、表層透気係数（以降、kTと称する）が一定になるまで経時変化を測定した。経時変化(OPC50)を図-1に示す。本研究では、測定値が一定になった時点で含水率の影響を排除できたと判断し、その結果を以降の実験結果に用いた。また、いずれの供試体でも40℃炉乾燥後にひび割れは確認されなかった。

(2) 4プローブ法

4プローブ法は、既往の文献⁵⁾に準じて行った。含水率の影響を排除するため、表面透気試験の測定終了後の

*1 東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻（学生会員）

*2 東京理科大学 理工学部 土木工学科 准教授 博(工)（正会員）

表-1 示方配合

粗骨材最大寸法 (mm)	空気量 (%)	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					W	C	S	G	AE 剤	高性能減水剤
20.0	4.5	10.0	40	45	165	413	771	986	2.07	0.248
			50			330	802	1025	1.65	0.132
			60			275	822	1051	0.96	0.103

供試体を飽水処理し、供試体に電圧 30V の電流を印加し、その時に得られる電位差電極間の電圧と供試体に流れる電流を測定し、式(1)より電気抵抗率を算出した。

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

ここに、 ρ : 電気抵抗率 ($\Omega \cdot m$)、 a : 電極間の距離 (m)、 V : 電位差電極間の電位差 (V)、 I : 供試体に流れる電流 (A)

(3) 吸水試験

吸水試験は、ASTM C 1585-04 に準じて行った。寸法 80×100×100mm の供試体を用いた。養生終了後、質量の経時変化が 0.01% 以下になるまで 40℃ 電気炉で乾燥し、80×100mm の 1 面以外にエポキシ樹脂を塗布した。その後、塗布していない面から 1 面浸せきし、1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 360 分に質量を測定した。既往の文献⁹⁾によって吸水に伴う重量増加と経過時間の平方根が比例していることが確認されているため、本研究でもこの文献に従い、重量増加と経過時間の平方根の傾きを吸水係数とした。

(4) 電気泳動試験

電気泳動試験は、JSCE-G571 に準じて行った。φ100×200mm の供試体を厚さ 50mm に切断し、側面をエポキシ樹脂で塗布した供試体を用いた。飽水処理後、陰極に 0.5mol/l の NaCl 溶液を、陽極に 0.3mol/l の NaOH 溶液を注入し、定常状態になるまで電圧 15V を供試体間に印加した。その後、陽極側の塩化物イオン量の経時変化を測定し、式(2)、(3)を用いて実効拡散係数を算出した。

$$J_{Cl} = \frac{V^{\text{II}} \Delta C_{Cl}^{\text{II}}}{A \Delta t} \quad (2)$$

ここに、 J_{Cl} : 塩化物イオンの定常状態における流速 (mol/cm²・年)、 V : 陽極側の溶液体積 (l)、 A : 供試体断面積 (cm²)、 ΔC_{Cl} : 陽極側塩化物イオン濃度の増加割合 (mol/l/年)

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 D_e : 実効拡散係数 (cm²/年)、 R : 気体定数 (8.31J/(mol/K))、 T : 絶対温度測定値 (K)、 Z_{Cl} : 塩化

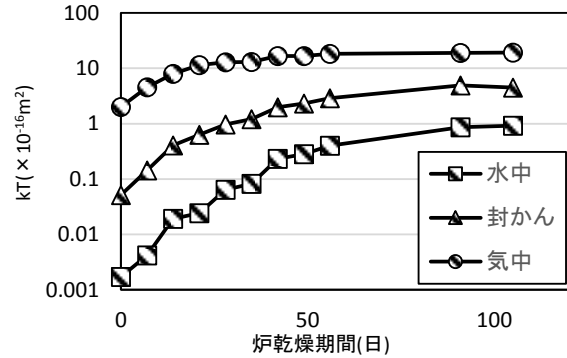


図-1 表層透気係数の経時変化(OPC50)

物イオンの電荷 (=1)、 F : ファラデー定数 (96,500C/mol)、 C_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値 (mol/l)、 $\Delta E - \Delta E_c$: 供試体表面間の測定電位 (V)、 L : 供試体厚さ (mm)

(5) 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験は、JSCE-G572 に準じて行った。φ100×200mm の供試体を厚さ 100mm に切断し、切断面以外をエポキシ樹脂で塗布した供試体を用いた。10%濃度の NaCl 溶液に 126 日間浸せきし、10mm 間隔で切断した供試体を粉碎し、電位差滴定法によって全塩化物イオン量を測定した。その後、Fick の拡散方程式を用いて、表面塩化物濃度と見掛けの拡散係数を算出した。ここで、見掛けの拡散係数と表面塩化物濃度のそれぞれの算定結果を個別に用いて、塩化物イオンの浸透を考察するのは必ずしも適切ではない。そこで、見掛けの拡散係数と表面塩化物濃度の 2 つのパラメータを同時に考慮するために、表面から 5cm の位置の塩化物イオン濃度が 2.0kg/m³ に達するまでの年数 (以降、目標塩化物濃度到達時期と称する) を、Fick の拡散方程式を用いて算出した。

(6) 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準じて行った。100×100×400mm の供試体を上面、底面および両端面 (100×100mm) の計 4 面をアルミテープでシールし、20℃ R.H.60%、CO₂ 濃度 5% の環境に静置した。促進期間 1, 4, 8, 13 週に供試体を割裂し、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さを 10 点測定した結果を平均し、 \sqrt{t} 則から中性化速度係数を算出した。

表-2 品質試験結果

配合	養生	圧縮強度 (N/mm ²)	kT(m ²)		電気抵抗率 (Ω・m)	吸水係数 (g/min ^{0.5})
			炉乾前	炉乾後		
OPC40	水中	56.5	0.001	1.013	136.3	0.5885
	封かん	48.7	0.033	1.980		0.6273
	気中	38.2	0.071	3.331		0.8784
OPC50	水中	42.4	0.001	0.923	101.9	
	封かん	35.4	0.051	4.503		
	気中	27.4	2.015	19.184		
OPC60	水中	34.0	0.008	2.887	76.1	0.9493
	封かん	30.7	0.128	11.677		0.9493
	気中	22.4	5.816	57.190		1.711

表-3 耐久性試験結果

配合	養生	中性化速度係数 (mm/year ^{0.5})	実効拡散係数 (cm ² /year)	見掛けの拡散係数 (cm ² /year)	表面塩化物濃度 (kg/m ³)	目標塩化物濃度到達時期 (year)
OPC40	水中	3.12	1.90	0.70	23.00	6.09
	封かん	11.85	2.40	0.86	22.95	4.95
	気中	22.58	1.48	0.99	18.32	4.94
OPC50	水中	5.56	3.47	0.47	27.18	8.29
	封かん	15.19	3.33	1.95	20.44	2.34
	気中	43.26	3.63	3.02	18.90	1.58
OPC60	水中	22.98	8.94	4.39	11.06	1.59
	封かん	25.60	9.60	2.63	19.22	1.79
	気中	52.77		4.88	10.19	1.53

3. 実験結果

3.1 各種試験結果

各種試験結果を表-2, 3 に示す。なお、表面透気試験、4 プローブ法、吸水試験の結果をまとめて物質移動抵抗性と称し、電気泳動試験、塩水浸せき試験、中性化促進試験の結果をまとめて耐久性指標と称す。なお、これらの物質移動抵抗性は、既往の文献^{7) 8) 9)} でいずれかの耐久性指標と関係性があると報告されている。

同じ養生条件毎に比較すると、水結合材比の低下に伴いコンクリートの物質移動抵抗性は向上することが確認された。また、耐久性指標の結果も、中性化速度係数や実効拡散係数は同様な関係が確認された。これは、低水結合材比になることで、コンクリートの内部組織が緻密化したことによると考えられる。一方、塩水浸せき試験結果である見掛けの拡散係数や目標塩化物濃度到達時期は、OPC40 と 50 の水中養生では異なる関係となった。これは、OPC40 の水中養生は密実な空隙構造だったため、塩水浸せき試験前の飽水処理が不十分であったため、塩水浸せき開始直後に塩水が急激に浸透してしまったことが考えられる。

同じ水結合材比では、水中養生、封かん養生、気中養生の順に物質移動抵抗性は大きくなることが確認された。また、耐久性指標の結果も実効拡散係数を除いて同様な関係が確認された。これは、養生環境の違いによる水和度の違いが影響していると考えられる。実効拡散係数が養生の影響を受けなかった理由は、試験期間中の水和進行が原因と考えられる。前処理である飽水処理や、電気泳動試験によって水分が供給されるため、未水和セメントと水が反応した可能性が考えられる。

以上のことから、再水和の影響が考えられる電気抵抗率と実効拡散係数についての検討は、他の養生と比較して、再水和の影響が少ないと考えられる水中養生のみを検討の対象とする。

3.2 物質移動抵抗性と耐久性指標の関係

(1) 物質移動抵抗性と中性化速度係数の関係

kT と中性化速度係数の関係を図-2 に示す。同一養生条件の場合、水結合材比の低下に伴い、kT と中性化速度係数は小さくなる傾向が確認された。また、同一水結合

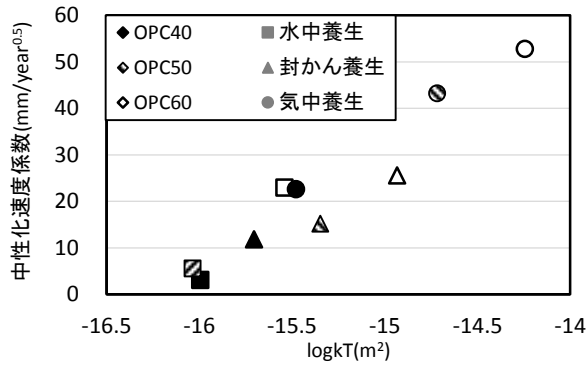


図-2 kT と中性化速度係数の関係

材比で、養生条件が変化した場合、kT と中性化速度係数は気中養生、封かん養生、水中養生の順に大きくなった。全体としては、kT の増加に伴い中性化速度係数の増加が確認され、既往の文献⁸⁾と一致する結果となった。本研究では、乾燥によって含水率の影響を排除しているため、kT はコンクリートの空隙のうち空気の通過に関与する空隙を評価していると考えられる。中性化の進行にはセメント水和物との反応も関与するが、本研究の範囲内では、セメント種類が同じであれば、中性化の進行は空隙による影響が大きいことが考えられる。

電気抵抗率と中性化速度係数の関係を図-3 に示す。水中養生では、水結合材比の低下に伴い、電気抵抗率の増加に伴い中性化速度係数の減少が確認された。これは、飽水状態の電気抵抗率は、空隙構造を評価していることが考えられる。ただし、今回の対象は3点の結果であり、検討数が少ないため、今後データ数を増やして検討する必要がある。

吸水係数と中性化速度係数の関係を図-4 に示す。同一養生条件の場合、水結合材比の低下に伴い、吸水係数と中性化速度係数は小さくなる傾向が確認された。また、同一水結合材比で、養生条件が変化した場合、水中養生、封かん養生、気中養生の順に吸水係数と中性化速度係数が増加した。このため、吸水係数の増加に伴い中性化速度係数の増加が確認され、既往の文献⁹⁾と一致する結果となった。これは、kT と同様に、前処理として炉乾燥を行ったため、いずれの供試体も含水率の影響を排除でき、空隙構造を評価できたためであると考えられる。

(2) 物質移動抵抗性と実効拡散係数の関係

kT と実効拡散係数の関係を図-5 に示す。水中養生では、両者の間には、明確な関係性は確認されなかった。

電気抵抗率と実効拡散係数の関係を図-6 に示す。水中養生では、電気抵抗率の増加に伴い実効拡散係数の減少が確認された。

吸水係数と実効拡散係数の関係を図-7 に示す。水中養生では、吸水係数の増加に伴い実効拡散係数の増加が

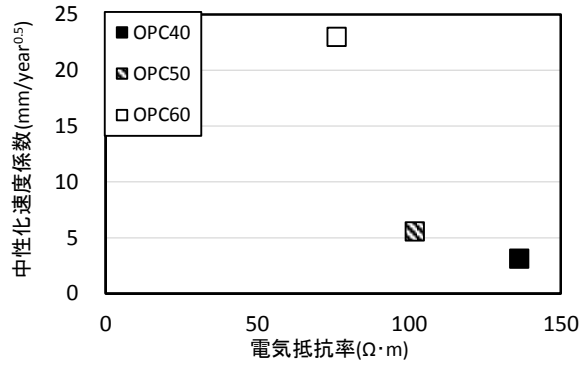


図-3 電気抵抗率と中性化速度係数の関係

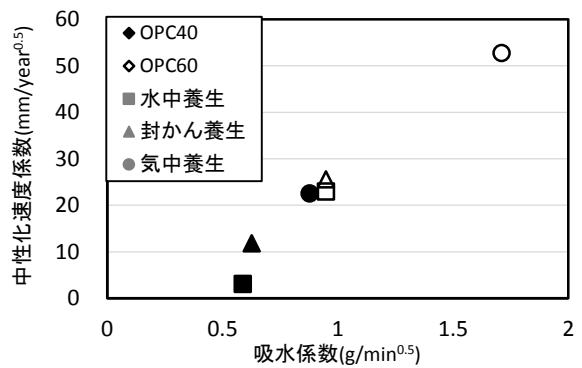


図-4 吸水係数と中性化速度係数の関係

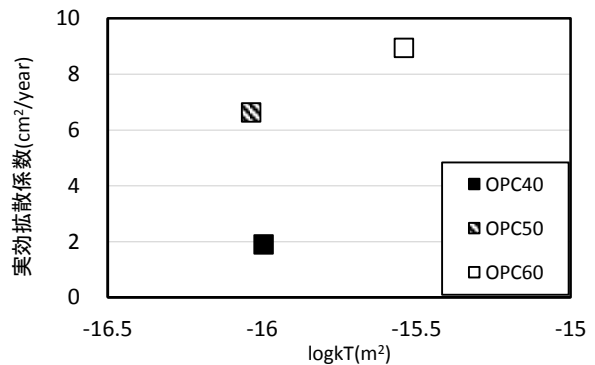


図-5 kT と実効拡散係数の関係

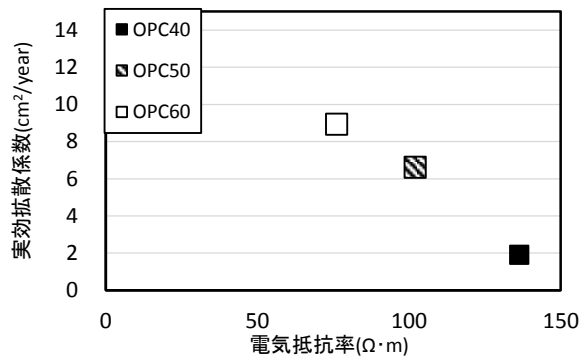


図-6 電気抵抗率と実効拡散係数の関係

確認された。

本研究では、前述したように、実効拡散係数の計測で養生の影響を考慮できなかったため、これらの結果のデータ数が少なく、本研究で得られた物質移動抵抗性と実効拡散係数の関係性は、正しく評価できていない可能性が考えられる。今後、データ数を増やすことで、関係性の妥当性について検討していく必要がある。

(3) 物質移動抵抗性と目標塩化物濃度到達時期の関係

kT と目標塩化物濃度到達時期の関係を図-8 に示す。同じ養生で水結合材比を大きい時、 kT は増加し、目標塩化物濃度到達時期は小さくなる傾向が確認された。また、水結合材比を一定とし、養生を変化させた場合、気中養生、封かん養生、水中養生の順に kT は増加し、目標塩化物濃度到達時期は減少した。これは、密実なコンクリートは、物質移動抵抗性が高いため kT が低く、塩化物イオン濃度が目標値に達するまで時間がかかることによると考えられる。また、図-2 に示した中性化速度係数の関係と比較すると、 $\log kT$ が-15.5 以上の範囲では、目標塩化物濃度到達時期が2年からほとんど変化しない傾向が見られた。

電気抵抗率と目標塩化物濃度到達時期の関係を図-9 に示す。両者の間には、明確な関係性は確認されなかった。これは、水中養生の OPC50 の結果が OPC40 と比較して、塩化物イオンの浸透量が少なかったことが原因と考えられる。既往の文献¹⁰⁾では、低水結合材比になるほど、塩化物の浸透量は少なくなることが確認されており、本研究の結果とは異なるため、実験が適切に行えていなかった可能性が考えられる。今後、供試体数を増やすことで、供試体によるばらつきも検討する必要がある。

吸水係数と目標塩化物濃度到達時期の関係を図-10 に示す。同じ養生で水結合材比が大きい時、吸水係数は増加し、目標塩化物濃度到達時期は小さくなる傾向が確認された。また、水結合材比を一定とし、養生を変化させた場合、気中養生、封かん養生、水中養生の順に吸水係数は増加し、目標塩化物濃度到達時期は減少した。両者の関係は、 kT と目標塩化物濃度到達時期との関係と類似している傾向を示した。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見をまとめると次のようになる。

- (1) 含水率の影響を排除することで、 kT や吸水係数は、中性化速度係数との関係性が確認された。また、データ数は少ないが、電気抵抗率と中性化速度係数にも関係性が確認された。
- (2) データ数は少ないが、含水率の影響を排除した場合、電気抵抗率や吸水係数は、実効拡散係数との関係性

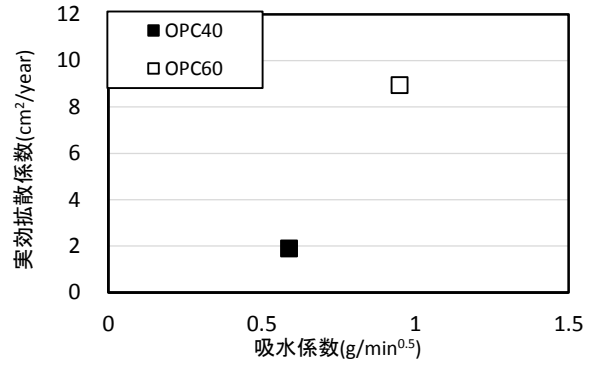


図-7 吸水係数と実効拡散係数の関係

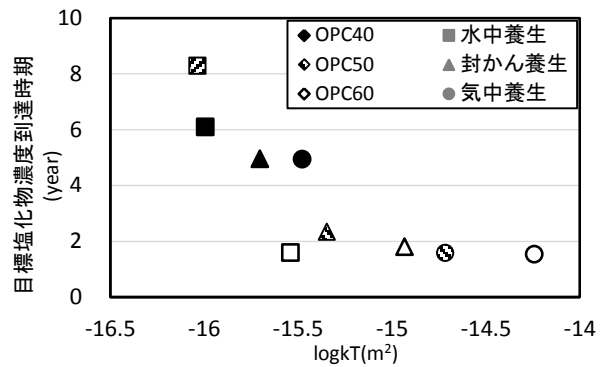


図-8 kT と目標塩化物濃度到達時期の関係

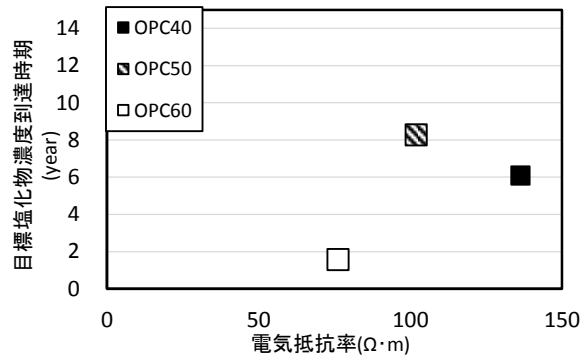


図-9 電気抵抗率と目標塩化物濃度到達時期の関係

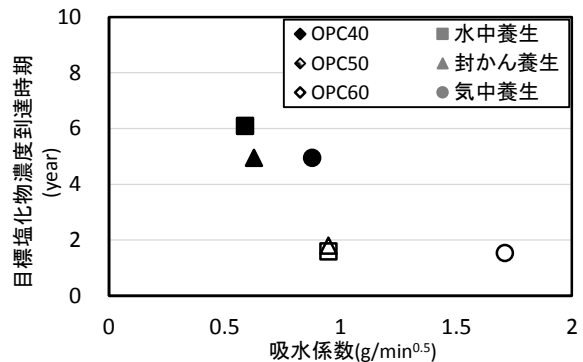


図-10 吸水係数と目標塩化物濃度到達時期の関係

が確認された。しかし、 kT と実効拡散係数には、明確な関係性が確認されなかった。

- (3) 含水率の影響を排除することで、 kT や吸水係数は、目標塩化物濃度到達時期との関係性が確認された。データ数は少ないが、電気抵抗率と目標塩化物濃度到達時期には、明確な関係性が確認されなかった。

以上のことから、表面透気試験を用いることで中性化速度係数と目標塩化物濃度到達時期を、4プローブ法を用いることで中性化速度係数と実効拡散係数を、吸水試験を用いることで中性化速度係数、実効拡散係数および目標塩化物濃度到達時期の予測を行える可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 谷村 幸裕, 長谷川 雅志, 曾我部 正道, 佐藤 勉: 鉄道 RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究, 土木学会論文集, No.760, V-63, pp.147-157, 2004
- 2) (社) 土木学会: 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, pp.320-331, 2008.4.
- 3) R.J.Torrent: A two-chamber cell for measuring the coefficient permeability to air of the concrete cover on site, *Material and Structure*, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992
- 4) 林 和彦, 細田 暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013
- 5) 皆川 浩, 齋藤 佑貴, 榎原 彩野, 久田 真: 電極の設置条件が 4 プローブ法による体積抵抗率の測定結果に及ぼす影響についての基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1087-1092, 2009
- 6) 中村 兆治, 酒井 雄也, 岸 利治: コンクリート中の液状水挙動に与える物理的ならびに化学的性質に与える影響に関する検討, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.66, pp.444-451, 2012
- 7) 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.1, pp.789-794, 2008
- 8) 加藤 佳孝, 早川 健司: 表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の耐久性設計と検査の連携に関する一考察, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.410-421, 2012
- 9) 清水 五郎, 中田 義久, 久保田 英樹: コンクリートの吸水性状に基づく中性化深さの予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.616-621, 2012
- 10) 石田 哲也, 宮原 茂禎, 丸屋 剛: ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.14-26, 2007