

論文 養生と乾燥日数が異なるコンクリートの凍害と塩害の複合劣化特性

遠藤 裕丈^{*1}・田口 史雄^{*2}・嶋田 久俊^{*3}

要旨：養生の違いによるコンクリートの凍害と塩害の複合劣化特性を把握するため、養生日数・乾燥日数の異なる供試体の打設面において、濃度3%の塩化ナトリウム水溶液を使用し、ASTM-C-672に準拠したスケーリング試験および塩分浸透試験を行った。その結果、スケーリングはコンクリート表面の飽水・乾燥度合、塩分浸透性は組織緻密性・飽水度合・凍結融解による劣化が影響することがわかった。

キーワード：コンクリート, スケーリング, 拡散係数, 複合劣化, 養生, 乾燥

1. はじめに

コンクリート標準示方書の改訂にみられるように、コンクリート構造物の設計は従来の仕様規定から性能規定へ移行し、設計段階から塩害や凍害などの照査を行うこととなっている¹⁾。北海道など積雪寒冷地のコンクリート構造物は、厳しい気象条件下で凍害と塩害の複合劣化を受ける²⁾ことから、耐久性に関する照査は特に重要となる。しかし、改訂された示方書に用いられる塩化物イオンの拡散係数の推定値のみでは、これら複合劣化の影響を考慮した設計を行う上で十分とは言い難い。これは、これまで凍害と塩害の複合劣化が耐久性に及ぼす影響について研究・報告された例はある³⁾が、複合劣化が考慮された合理的な設計法を確立するに至るまでの十分なデータが蓄積されていないことに起因している。このため、本研究では、複合劣化が考慮された合理的な設計法の確立に資することを目的とし、凍害と塩害との複合劣化特性に関する基礎的な情報を得るために実験を行った。このうち凍害は、コンクリートの配合に加えて、凍結融解作用を受ける以前のコンクリートの養生日数や乾燥日数、すなわち構造物がおかれる場所の環境条件によっても被害程度

が異なることが明らかになっている^{4),5)}。そこで実環境を想定し、打設から凍結融解試験、塩分浸透試験を開始するまでの養生日数および乾燥日数が異なるコンクリートの凍害と塩害の複合劣化特性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料, 配合

配合を表-1に示す。水セメント比は50%とした。セメントは普通ポルトランドセメント(以下「NP」), 高炉セメントB種(以下「BB」)を使用した。一般に使用されるコンクリート材料のもとで検討するため、骨材は除塩処理された海砂(密度2.70g/cm³, 吸水率0.97%, 塩化物量0.0004%), 砕石(密度2.67g/cm³, 吸水率1.58%, 最大寸法25mm)を使用した。

2.2 養生の方法

養生方法を図-1に示す。試験の開始材齢は、28日と91日とした。養生日数は、材齢28日から試験を開始するものは7日(S07-Z28)と28日(S28-Z28), 材齢91日から試験を開始するものは7日(S07-Z91)と28日(S28-Z91)および91日(S91-Z91)とした。養生は、湿らせた麻袋でコンクリート表面を覆い、20の湿気養生室に安置した。養生終了後、S07-Z

*1 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室 研究員(正会員)

*2 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室長(正会員)

*3 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室 副室長(正会員)

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C	s/a	使用セメント	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	空気連行剤	スランブ	空気量
	(%)	(%)		(kg/m ³)				(ml/m ³)		(cm)	(%)
NP50	50	44	普通ポルトランド	140	280	862	1089	700	14.0	8.8	5.4
BB50	50	44	高炉セメントB種	140	280	859	1085	700	17.5	7.4	4.6

28日は21日，S07-Z91は84日，S28-Z91は63日気中放置させ，S28-Z28とS91-Z91は気中放置を行わなかった。なお，養生終了後の気中放置は温度20℃，湿度60%の恒温室に安置した。

2.3 凍結融解試験

試験はASTM-C-672（スケーリング試験）に準拠し，図-2に示す22×22×10cm供試体を使用し，養生及び気中放置後，試験面（打設面）に淡水および濃度3%塩化ナトリウム水溶液（以下「NaCl」）を深さ6mm程度張り，-18℃で16時間凍結，23℃で8時間融解の24時間1サイクルの凍結融解作用を与え，5，10，15...（この間15サイクルおき）...120サイクル目にスケーリング量と最大スケーリング深さを測定した。試験環境は水中凍結水中融解とした。スケーリング量は，試験面から剥離片を採取し，その質量を試験面積で除して求めた。最大スケーリング深さはスケーリングが著しい箇所を任意で5箇所選定し，メジャーで深さを測定し，このうち最大値を測定値とした。試験面に張った溶液の量は常に観察し，溶液の減少が確認された時点で溶液を足し，深さ6mm程度を維持した。

2.4 長さ変化試験

10×10×40cm供試体を用い，ダイヤルゲージ法によって行った。材齢1日で脱型後，図-1に示すS07-Z91，S28-Z91，S91-Z91と同じ条件下に置き，材齢1日，7日，14日，28日，56日，91日に打設面の長さ変化と質量を測定した。

2.5 塩分浸透試験

塩分浸透試験は，22×22×10cm供試体を用い，図-1の養生終了後，試験面（打設面）に濃度3%NaCl水溶液を張って，温度20℃，湿度60%の恒温室に120日間安置させた。

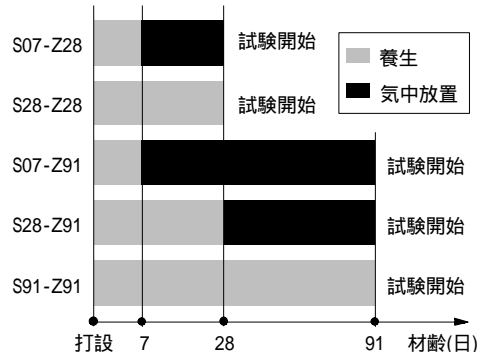


図-1 養生方法

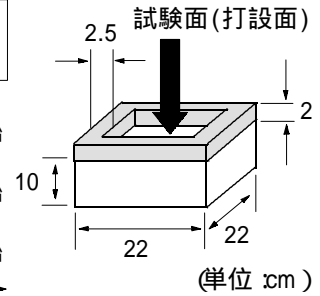


図-2 供試体

度60%の恒温室に120日間安置させた。

2.6 塩分量の測定

凍結融解120サイクル後および塩分浸透120日後の供試体をカッターを用いて打設面から深さ方向に1cm毎に5cmまで切り出して試料採取し，JIS-K-0101-1991に準拠して全塩分量を求めた。また，式(1)に示すFickの拡散方程式から拡散係数Dcを算出した。

$$C = C_0 \left\{ -\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right\} \quad \dots(1)$$

ここで，Cは時間t(s)後における打設面から深さx(cm)の塩分量(kg/m³)，C₀は打設表面の塩分量(kg/m³)，erfは誤差関数，Dcは拡散係数(m²/s)を表す。Dcの算出は簡易法⁶⁾によった。

3. 結果および考察

3.1 凍結融解試験

図-3にスケーリング量の測定結果を示す。NaClの場合，NP，BBとも乾燥を与えなかったS28-Z28，S91-Z91でスケーリング量が多い傾向がみられた。乾燥を与えたS07-Z28，S07-Z91，S28-Z91をみると，材齢91日から試験を開始したシリーズでは，試験開始直後にスケーリングしたが，後に試験面の状態が安定した。打設面のごく薄層の組織は乾燥収縮等

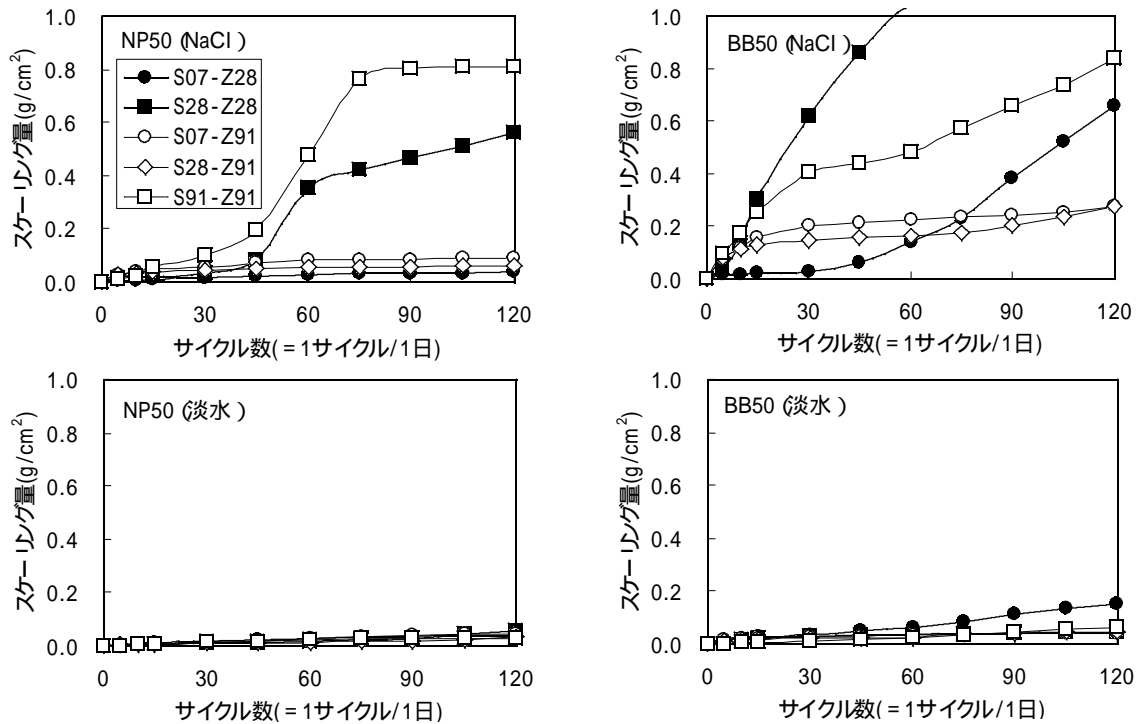


図-3 凍結融解（スケーリング）試験結果

の影響を受け、やや脆弱な傾向にあるものの、コンクリート内部の組織は材齢が長期で水和が進行し、良好な品質が形成されていると思われる。よって、ごく薄層がスケーリングした後に露出する内部組織はスケーリング抵抗性が高いため、状態が安定したと推察される。材齢28日から試験を開始したシリーズのうちBBでスケーリングが後に多く発生した。BBを用いたコンクリートは化学組成上、比較的ゆっくり硬化する⁷⁾ため、S07-Z28のBBは、十分な硬化が得られていなかった可能性が考えられる。淡水は、NaClに比べ、比較的小さなスケーリングで推移した。以上から、NaClの場合のスケーリング挙動は、養生・乾燥日数の影響を受けることが確認された。

図-4にスケーリング量と最大スケーリング深さの関係を示す。図-5のように、面積 $S(\text{cm}^2)$ のコンクリート表面が面的に均等にスケーリングした場合、コンクリート密度を (g/cm^3) とすると、スケーリング量 $m(\text{g}/\text{cm}^2)$ と最大スケーリング深さ $h(\text{mm})$ との関係は(2)式で表される。コンクリートの ρ は、表-1から概ね $2.4 \text{ g}/\text{cm}^3$ であるため、ここでは $\rho = 2.4$ とした。

$$\frac{m \cdot S}{S \cdot h \cdot 10^{-1}} = h = \frac{10}{m} \quad \dots(2)$$

実験値の回帰直線は、 $h=(10/2.4)m$ に比べてスケーリング量の増加量に対する最大スケーリング深さの増加量が大きい。これは、スケーリングが面的よりむしろ部分的に発生していることを示す。ここでNaClを用いた場合で乾燥を与えなかったS28-Z28、S91-Z91に着目すると、回帰直線の勾配は途中から緩やかに変化した。これは、部分的にある程度スケーリングした後、面的にスケーリングが発生したことを示す。また、NPに比べてBBの方が回帰直線の傾きは緩やかである。これは、BBの方が面的にスケーリングしていることを示す。

3.2 長さ変化試験

図-6に長さや質量の測定結果を示す。S07-Z91とS28-Z91の打設面は、乾燥に切り替わると、長さ、質量とも急激に減少した。長さは乾燥収縮、質量は乾燥によるコンクリート表面の水分蒸発が原因と考えられる。打設面にはレイタンスが確認でき、ブリーディング水の蒸発の影響と思われる収縮ひびわれも発生していた。乾燥を受けないS91-Z91は、質量

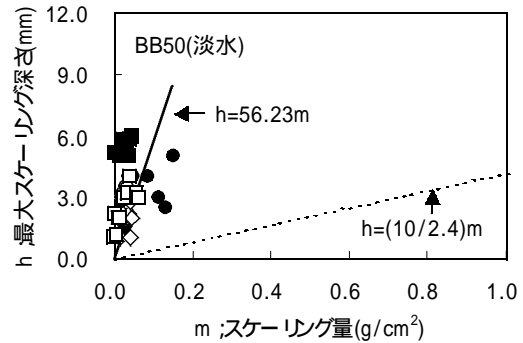
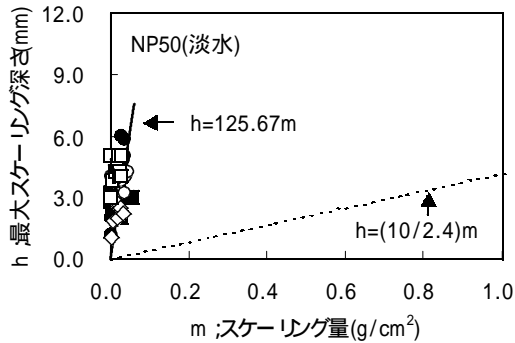
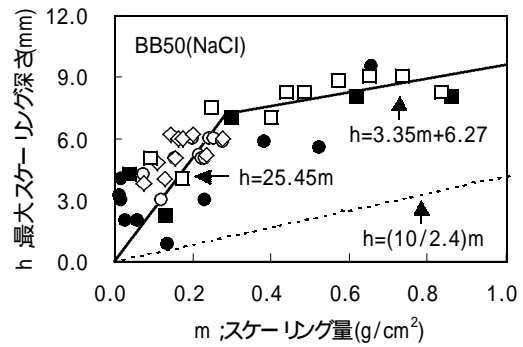
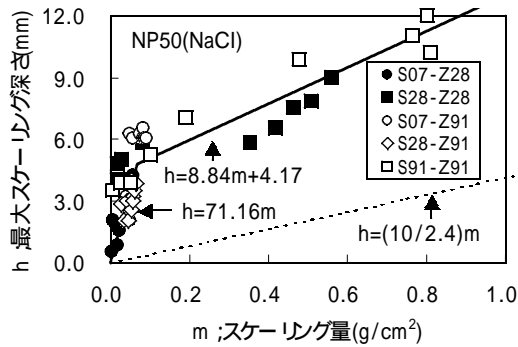


図-4 スケーリング量と最大スケーリング深さの関係

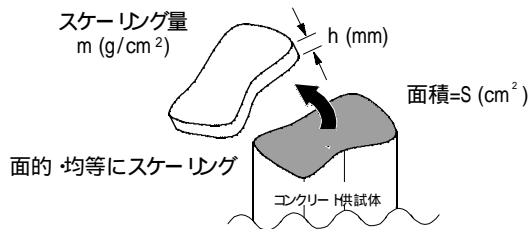


図-5 面的均等にスケーリングしたモデル図

が増加し続けている。これは、コンクリートを覆っている麻袋自体に含まれている水分をコンクリートが吸水したためと考えられる。

3.3 スケーリングの挙動に関する考察

十分乾燥されたS07-Z91とS28-Z91の打設面にNaClを張ると、乾燥した表層にNaClが多く浸透すると考えられる。表層がNaClで飽和されると層間凍結による応力差が生じ、表面は損傷を受けやすい⁸⁾とされる。また、打設面のごく薄層はブリーディングやレイタンスに加え、乾燥収縮によるひびわれが生じており、極めて脆弱で低品質と思われる。このことから、脆弱な打設面のごく薄層がNaClによる応力差で早期にスケーリングしたと考えられる。しかし、後にスケーリング挙動は安定していることから、乾燥の影響を受ける地域では、表層組織を緻密化し、表面のごく薄層が受け

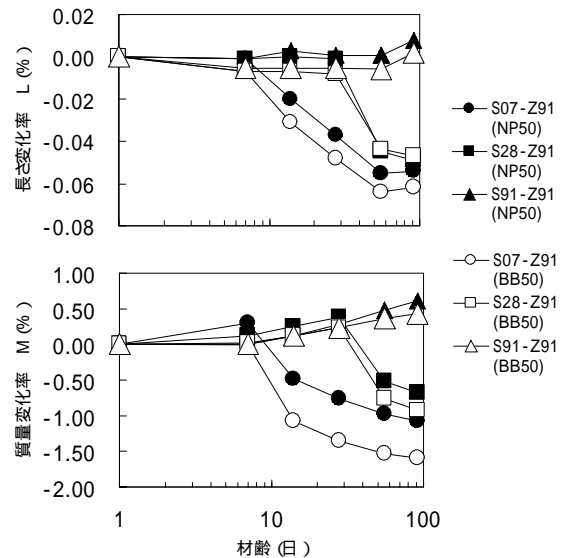


図-6 長さ変化および質量変化の測定結果

る乾燥の影響を抑制する対策が必要と考える。乾燥を受けていないS91-Z91は、図-6で質量の減少がみられず、表層に水分が多く滞留すると推察される。このため、水分とNaCl間に生じる浸透圧⁹⁾によるマトリックスの劣化が面的広範なスケーリング劣化を引き起こし、スケーリング量を著しく増加させた可能性が考えられる。S28-Z28の挙動も同様と思われる。コンクリート中の飽水度の増加が予想さ

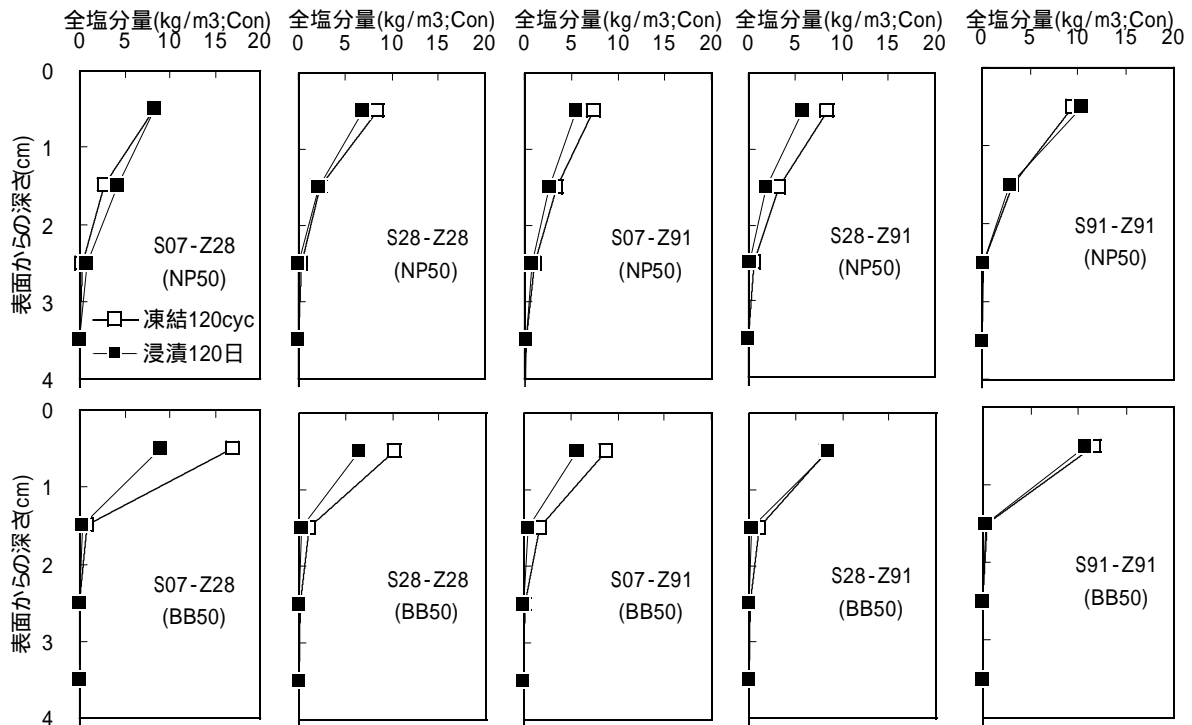


図-7 凍結融解120サイクル目の供試体および塩分浸透120日目の供試体の塩分浸透分布

れる地域では、表層組織を緻密にすることはもちろん、繊維型枠等を用いて余剰水も排出する対策が必要になると考える。

NaClは養生・乾燥の影響が顕著だが、淡水はこの影響が殆どみられない。NaClの複雑な劣化挙動は濃度差に起因すると推定されることから、淡水は濃度の影響が極めて小さいためと思われる。淡水の劣化は、主に浸透した水の凍結膨張に起因していると考えられる。

3.4 塩分浸透試験

凍結融解作用を120サイクル(1日1サイクル)与えた供試体と、NaClを張って120日安置した供試体の塩分分布を図-7に示す。NaClの浸透に伴い、表面付近に塩分の蓄積が確認される。本研究では除塩処理された海砂を使用したため、深さ3.5cm以降に塩分が殆ど含まれておらず、砂の影響は極めて小さいと言える。

3.4.1 凍結融解の影響

NaClを浸漬させた日数は同じだが、全体的に凍結融解作用を受けた供試体の方が塩分浸透量は多い傾向がみられる。これは、凍結融解作用によってコンクリート内部に微細なひび割れが発生し、塩分が浸透しやすい状態に

なったためと考えられる。

3.4.2 セメントの種類の影響

NPとBBと比較すると、深さ1.5cm以降ではBBの方が塩分量は少ない傾向を示した。これは、BBに含まれるスラグにより内部組織が緻密になり⁹⁾、浸透が抑制されたと思われる。一方、深さ1.5cm以内の塩分量は、同等もしくはBBの方が多いようである。打設面表層はブリーディング等の影響で品質は劣るとされる。またStark⁷⁾は、高炉スラグのAl₂O₃量が多くなることはフリーデル氏塩を多く生成することにつながると指摘している。このことから、打設面表層に塩分が浸透し、BBに含まれるスラグと塩分が多く結合したと考えられる。

3.4.3 養生日数および乾燥日数の影響

試験開始91日に着目すると、ごく表層付近の塩分量は養生日数が長い方が多い。この傾向は、養生日数が28日から91日にかけて顕著である。内部の塩分量は養生日数が長い方が少ないようである。これは、養生により内部組織が緻密になり、塩分浸透が抑制されたためと思われる。次に、試験開始28日に着目すると、NPの内部は91日と同じ傾向がみられる

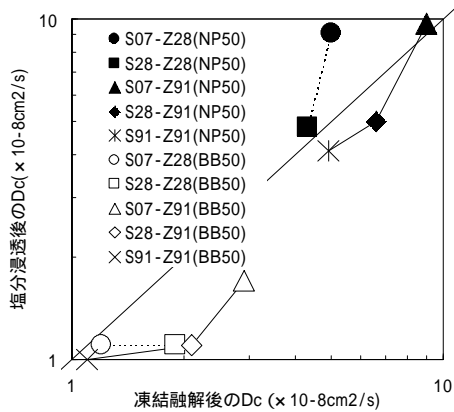


図-8 凍結融解と塩分浸透の拡散係数Dcの関係

が、表層では顕著な違いがみられない。図-6をみると、乾燥を与えないS91-Z91は材齢が28日から91日にかけて質量が増加しており、飽水度合も高まると思われる。以上から、表層の飽水度合が著しく高まると、浸透したCl⁻が表層に蓄積された水分中を移動することが可能になり、Cl⁻が多く浸透した、というメカニズムが推察される。当初、乾燥を長期に受けると収縮ひびわれ等で品質が低下し、塩分量が多くなると予想していたが、品質低下した範囲がごく表層であったために、1cm単位で測定した本研究では、この影響を調べることができなかった可能性がある。一方、BBのごく表層の塩分量は逆に養生日数が短いS07-Z28が多い。図-3をみると、S07-Z28のBBは30サイクル以降でスケーリングの進行が著しいことから、表層の品質が極めて脆弱であったため、塩分浸透量が多くなったと思われる。

3.5 拡散係数Dcによる考察

図-7から拡散係数を算出し、凍結融解作用を与えた場合と、NaClを張って120日安置させた場合の拡散係数(×10⁻⁸cm²/sで表示)の関係を図-8に示す。図-3でスケーリング量が多かったBBをみると、全体的に凍結融解を受けた方が拡散係数は大きい。また、拡散係数はNPに比べてBBが小さく、同一材齢に着目すると、全体的に養生日数に比例して減少している。複合劣化に関する耐久性照査を行うには、凍結融解の影響に加え、劣化作用を受ける前の環境条件も考慮する必要があると考える。

4. まとめ

- (1) NaClによるスケーリング劣化は、表面の飽水・乾燥度合が大きく影響する。乾燥を受けない場合は多くスケーリングする。長期の乾燥を受け、表面の品質が収縮ひびわれ等で脆弱になった場合、層間凍結による応力差と思われる影響で早期にスケーリングするものの、その後は比較的安定する。
- (2) 塩分浸透性は凍結融解作用およびセメントの種類の影響を受ける。
- (3) 塩分浸透性は、組織の緻密性とごく表層の飽水の度合が影響する。コンクリートに長期の養生を施すと組織が緻密化し、内部の塩分浸透量は減少する。逆に表層の飽水度が高まると、表層で塩分量が多くなる。

参考文献

- 1)平成11年版コンクリート標準示方書[施工編]耐久性照査型,pp.61,土木学会,2000.1
- 2)複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会,pp.62,2001.5
- 3)たとえば竹田,十河;凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集Vol.23, No.2,pp.427-432,2001.6
- 4)田畑;コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究,学位論文,1986.2
- 5)山下;コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究,学位論文,1999.3
- 6)小林,米澤,出頭;コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ3,鉄筋腐食の診断,pp.181,森北出版,1993
- 7)Stark and Wicht;Dauerhaftigkeit Von Beton (太田,佐伯訳),pp.74,pp.207,セメント協会
- 8)融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会,1999.11
- 9)高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針,コンクリートライブラリー86,pp.97,土木学会,1996.6