

論文 湿潤養生期間および温度履歴の違いがコンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼす影響

忽那 惇^{*1}・大塚 邦朗^{*2}・岩波 光保^{*3}・網野 貴彦^{*4}・

要旨：コンクリートの塩分浸透抵抗性は、セメントの種類や配合、施工環境や方法、さらには構造物の立地環境等によって大きく異なる。本研究では、湿潤養生期間、コンクリート打込み温度等の温度履歴が塩分浸透抵抗性に及ぼす影響を把握することを目的として、これらパラメータを変化させたコンクリート試験体の材齢 6 ヶ月における塩分浸透抵抗性試験（電気泳動試験および塩分浸透深さ試験）を実施した。その結果、湿潤養生期間の違いが塩分浸透抵抗性へ与える影響はほとんど見られなかったが、温度履歴の影響を強く受け、特に若材齢時に高温履歴を受けるほど、塩分浸透抵抗性が大きく低下することを確認した。

キーワード：実効拡散係数、塩分浸透深さ、温度履歴、湿潤養生期間、セメント種類

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害耐久性の照査では、コンクリート標準示方書（以下、示方書）【設計編】¹⁾等に基づく「コンクリート表面における塩化物イオン濃度」、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が用いられる。このうち、後者の塩化物イオンの拡散係数に関しては、セメントの種類と水セメント比の2つのパラメータから推定する方法が示されている。しかし実際には、セメントの種類や水セメント比のみでなく、骨材等のコンクリートの使用材料や配合、施工時の温度、打込み・締固め・養生方法等、さらには構造物を取り囲む環境によって、塩化物イオン拡散係数は大きく異なることも知られている^例（例えば、2)~6)。また、文献 7)によれば、高温履歴を受けたマスコンクリートでは塩分浸透抵抗性が著しく低下し、部材寸法等も影響することを指摘している。すなわち、実際の構造物では、設計で想定したとおりには塩害が進行しないことが多いと考えられる。そのため、セメントの種類や水セメント比以外の要因も考慮できる塩害耐久性の照査方法を確立しておくことは、構造物の種々の条件に対応した精度の高い設計照査を実現でき、構造物の長寿命化や供用後の維持管理業務の省力化に繋げられるものと考えられる。

そこで本研究では、コンクリートの塩分浸透抵抗性に与える各種要因のうち、湿潤養生期間、コンクリートの打込み温度等の若材齢時の温度履歴の影響に着目し、これらのパラメータを変化させたコンクリート試験体を用いて、これらの要因がコンクリートの塩分浸透抵抗性に与える影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 検討シリーズ

本研究では、次の4シリーズを設定した。なお、シリーズ I は示方書等に示されるとおり既知の情報ではあるが、本研究における実験条件において、シリーズ II~IV で設定した条件の違いが塩分浸透抵抗性に与える影響の大きさを比較するために実施した。本研究で実施した実験ケースを表-1 に、使用した配合を表-2 に示す。以下にシリーズ I~IV の概要を述べる。

- ・シリーズ I：セメント種類および水セメント比の違い
- ・シリーズ II：湿潤養生期間の違い
- ・シリーズ III：打込み温度および養生温度の違い
- ・シリーズ IV：打込み後 2 日間に与えた高温履歴の違い
(マスコンクリートを想定)

(1) シリーズ I (セメント種類・水セメント比)

シリーズ I では、セメント種類および水セメント比（以下、W/C）を変化させ、その他の条件は同一のもので比較した。セメントは、普通ポルトランドセメント（以下、N）、高炉セメント B 種（以下、BB）を使用し、N については W/C=0.4, 0.5, 0.6 の3配合、BB については W/C=0.5 の1配合を検討した。なお、コンクリート試験体はすべて、打込み温度 20°C で打設し 2 日後に型枠を取り外しており、セメント種類に応じて表-1 に示す水中養生（水温はすべて 20°C）を行った。その後、恒温恒湿室内（20 ± 1°C, 60 ± 3%RH）に約 6 か月間暴露した。

(2) シリーズ II (湿潤養生期間)

シリーズ II では、表-1 および図-1 に示すように、水中養生期間を変化させ、W/C=0.5 の条件でセメント種類 N および BB について検討した。水中養生期間は、示

*1 東亜建設工業(株)技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 研究員 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 東亜建設工業(株)技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ リーダー 博士 (工学) (正会員)

表-1 実験ケース

実験 シリーズ	配合 名称 表-2 参照	検討条件					暴露条件		試験項目	
		セメント の種類	W/C	打込み 温度 (°C)	湿潤養生 温度 (°C)	水中養 生期間 (日)	温度 (°C)	湿度 (%)	電気 泳動 試験	塩分浸 透深さ 試験
I	N40	N	0.4	20	20	3	20	60	○	○
III				5	5	7	5	60	○	○
II, IV				20	20	3	20	60	○	○
I, II, III, IV							60	○	○	
II							3%NaCl 水溶液	○	—	
II							60	○	○	
IV				(35)※	0※	20	60	○	—	
IV				(50)※	0※	20	60	○	—	
III				35	35	3	35	60	○	○
I				N60	0.6	20	20	3	20	60
II	BB50	BB	0.5	20	—	—	20	60	○	○
I, II					20	5		3%NaCl 水溶液	○	—
II								60	○	○
II					9	60		○	○	

※この2ケースのみ型枠存置中の温度を示している。20°Cで打込んだ直後に35°Cまたは50°Cの環境試験機の中に2日間入れ、取り出した後は脱型して直ちに暴露した(図-3参照)。

表-2 コンクリート配合

配合 名称	配合条件					単位量 (kg/m ³)					
	セメント の種類	W/C	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W	C	S	G	Ad1	Ad2
N40	N	0.4	41	8.0 (±2.5cm)	4.5 (±1.5%)	169	423	698	1,039	2.54	2.54
N50		0.5	43			157	314	784	1,075	1.88	1.88
N60		0.6	45			155	258	844	1,067	1.55	1.55
BB50	BB	0.5	42			153	306	769	1,098	1.84	2.45

※N：普通ポルトランドセメント（比重3.16），BB：高炉セメントB種（比重3.04），S：君津産山砂（表乾比重2.61），G：北海道上磯郡峯朗町産砕石2005（表乾比重2.70），Ad1：AE減水剤標準形（I種），Ad2：AE剤（I種）（100倍希釈）

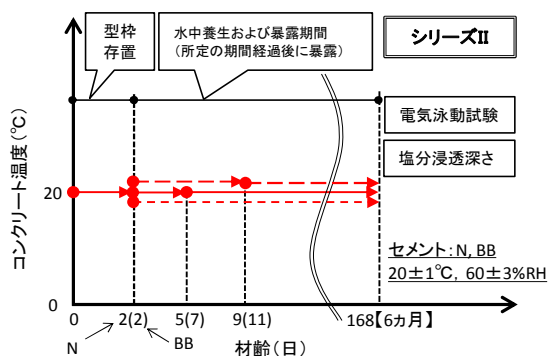


図-1 湿潤養生期間（シリーズII）

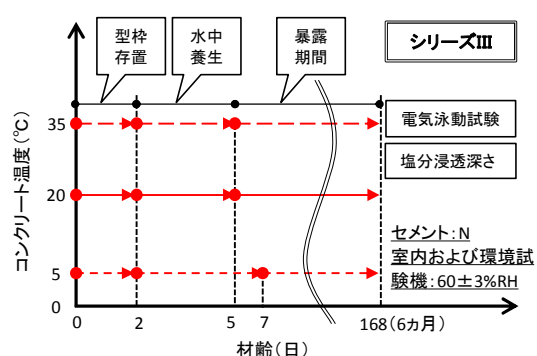


図-2 打込み～暴露までの温度履歴（シリーズIII）

方書に示される「湿潤養生期間の標準」を参考にして、Nについては、湿潤養生5日間（型枠存置2日+水中養生3日）を中心に、湿潤養生2日間（型枠存置2日+水中養生0日）、湿潤養生9日間（型枠存置2日+水中養生7日）を設定した。一方、BBについては湿潤養生7日間（型枠存置2日+水中養生5日）を中心に、湿潤

養生2日間（型枠存置2日+水中養生0日）、湿潤養生11日間（型枠存置2日+水中養生9日）を設定した。なお、水中養生温度はすべて20°Cであり、水中養生終了後は恒温恒湿室内（20±1°C，60±3%RH）に約6か月間暴露した。

また、NおよびBBとも、長期的に海水中に没した影

響も比較検討に加えるため、Nについては湿潤養生5日（型枠存置2日+水中養生3日）後に、BBは湿潤養生7日（型枠存置2日+水中養生5日）後に、20℃一定の3%NaCl水溶液に約6ヵ月間浸漬させたものも検討した。

(3) シリーズ III（打込み温度・養生温度）

シリーズ III では、表-1 および図-2 に示すように、コンクリートの打込み温度 5℃、20℃、35℃の3ケースを検討した。また、コンクリート打込み後、それぞれの打込み温度と同じ温度下の室内に試験体を2日暴露して型枠を取り外し、表-1 に示す養生温度および期間の水中養生を実施した。その後、打込み温度と同じ温度下（相対湿度は60±3%RHに制御）の室内に約6ヵ月間暴露した。

(4) シリーズ IV（若材齢時の高温履歴の影響）

シリーズ IV では、マスコンクリートを想定し、図-3 に示すように型枠存置期間中（打込み後2日間）の若材齢時の温度変化の影響を比較した。具体的には、コンクリートを20℃で打ち込んだ直後に、35℃あるいは50℃に設定した環境試験機内（湿度：60±3%RH一定）にそれぞれ2日間型枠を存置した状態で暴露し、その後、試験機から試験体を取り出して型枠を取り外し、恒温恒湿室内（20±1℃、60±3%RH）に約6ヵ月間暴露した。

2.2 試験体および測定項目

本研究に使用したコンクリート試験体を図-4 に示す。試験体はすべてのシリーズにおいて同一寸法の100×100×200mmとし、コンクリートの打込み方向に対して側面の型枠面（2面）を試験面（暴露面）とした。なお、試験体は表-1 に示す各ケースに対して2体作製した。また、表-2 に示す配合のコンクリートを各ケースに対して打ち込み型枠を取り外した後に、試験面以外の4面をエポキシ樹脂にて被覆した。

その後、約6ヵ月間、所定の暴露を行った後に、図-4 に示すように、試験体を厚さ50mmと150mmに切断し、次に示す試験を行った。

(1) 塩化物イオンの実効拡散係数

厚さ50mmの試験片を用いてJSCE-G 571-2013に準拠し電気泳動試験を行い⁸⁾、塩化物イオンの実効拡散係数を求めた。なお、以降の結果に示す実効拡散係数は、各ケース2体の平均値で整理している。

(2) 塩分浸透深さ

表-1のうち、3%NaCl水溶液中に浸漬した2ケースおよび打込み直後に高温履歴を与えたシリーズ IV の2ケースを除き、材齢6ヵ月が経過した時点で、図-4 に示す150mmに切断した試験片を20℃の3%NaCl溶液中に3ヵ月間浸漬した。浸漬後、試験片を取り出して割裂し、割裂した断面に0.1N硝酸銀溶液を噴霧して試験面の塩分浸透深さを測定した。

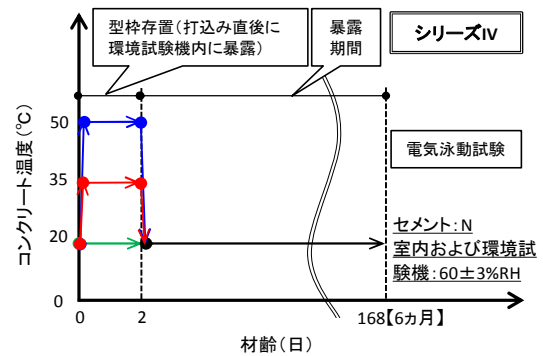


図-3 打込み直後からの高温履歴（シリーズ IV）

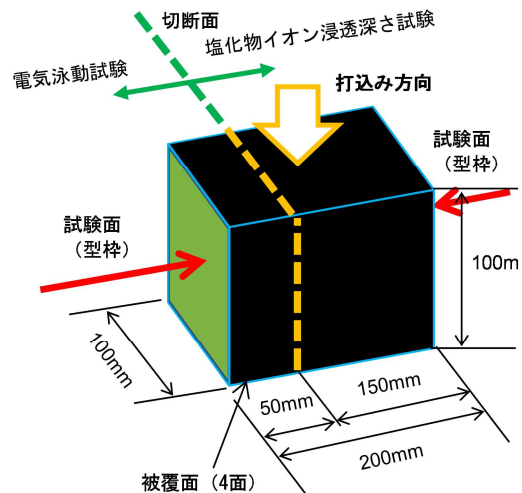


図-4 試験体概要

3. 実験結果

3.1 シリーズ I（セメント種類・水セメント比）

図-5 に、電気泳動試験から得られた塩化物イオンの実効拡散係数 D_e を比較した結果を示す。N で比較すると、W/C が大きいほど実効拡散係数 D_e は大きくなった。また、W/C=0.5 の条件におけるセメント種類で比較すると、N の実効拡散係数 D_e に対して BB は約 1/3 程度となっており、既往の知見¹⁾のとおり、BB は塩化物イオンの浸透に対して高い抵抗性を有していることが確認された。

図-6 に、塩分浸透深さの試験結果を示す。セメント N で比較すると、W/C が大きくなるほど浸透深さも大きくなっており、図-5 に示した実効拡散係数 D_e と同様の傾向を示した。一方、セメントの種類で比較すると、塩分浸透深さは、実効拡散係数 D_e ほど、N と BB で大きな違いは見られなかった。そこで、約6ヵ月間の室内暴露によって表層部のコンクリートに中性化の影響が複合した可能性を想定して、0.1N硝酸銀溶液を噴霧した試験体をさらに二分割して、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧した。その結果、BB の中性化深さは約3.2mm、N では1.2mmであり、BB のほうが中性化は進行している状

況であった。しかし、この程度の中性化深さの違いが塩分浸透深さに影響した可能性は考えにくい。既往の文献(9)によれば、塩化物イオンのコンクリート中への浸透は、濃度拡散だけでなく水の移流の影響も強く受けることがわかっている。本実験では、湿度 60%RH の乾燥環境に

約 6 ヶ月間暴露して 3%NaCl 水溶液に浸漬させたため、今回の塩分浸透深さの測定結果には、乾燥したコンクリート表層部への移流による影響が多く含まれているものと推察される。なお、本実験は今後も継続して長期材齢に対する検討を行う予定である。そのため塩分浸透深さ

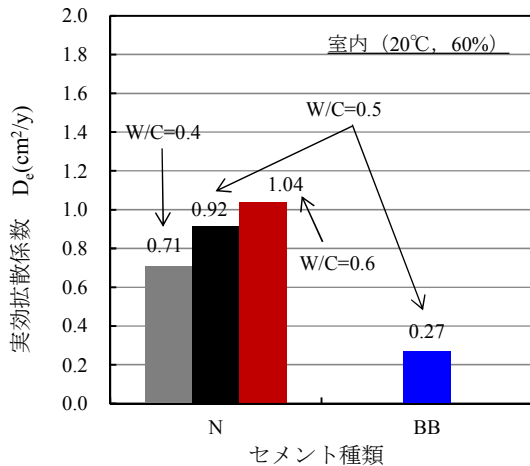


図-5 塩化物イオンの実効拡散係数 (シリーズ I)

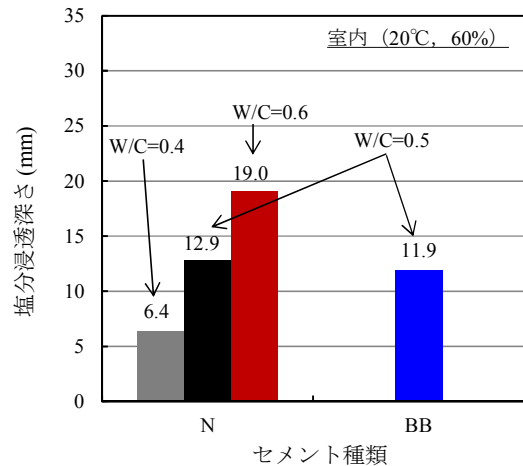


図-6 塩分浸透深さ (シリーズ I)

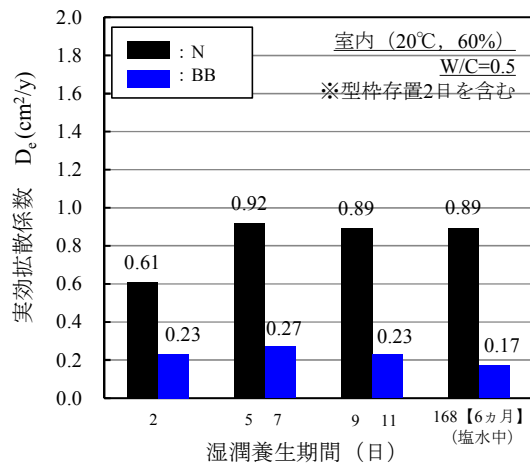


図-7 塩化物イオンの実効拡散係数 (シリーズ II)

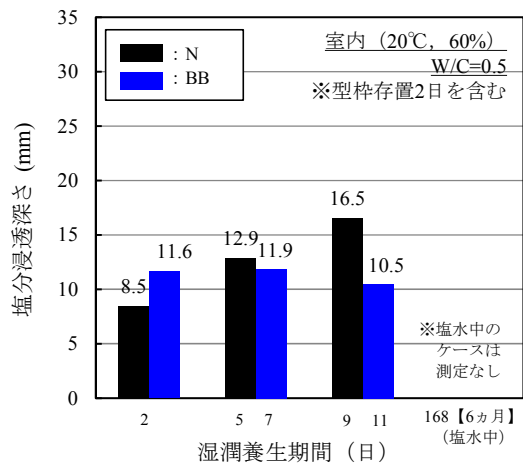


図-8 塩分浸透深さ (シリーズ II)

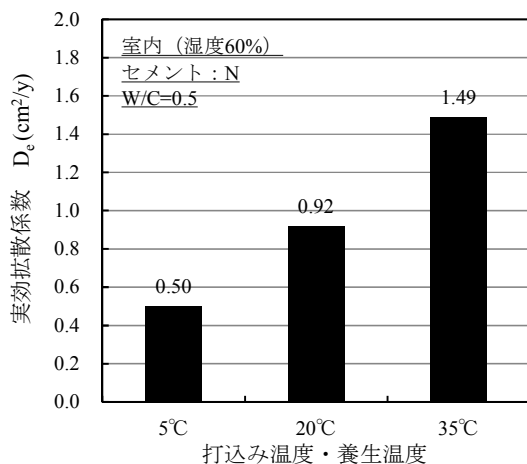


図-9 塩化物イオンの実効拡散係数 (シリーズ III)

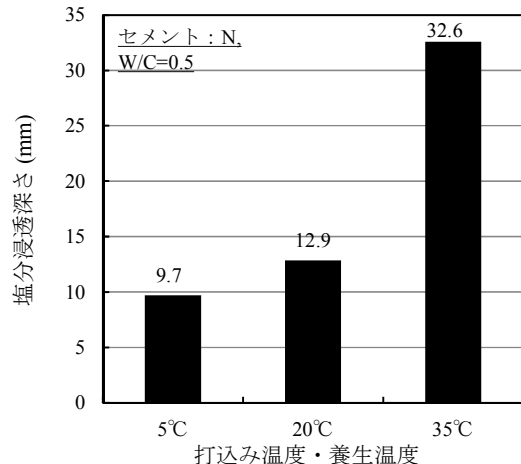


図-10 塩分浸透深さ (シリーズ III)

については、3%NaCl 水溶液浸漬前に水道水等に浸漬してコンクリートを飽和させておくなど試験方法について検討することとした。

3.2 シリーズ II (湿潤養生期間)

湿潤養生期間の違いに着目した場合の実効拡散係数 D_e および塩分浸透深さの比較結果を図-7、図-8 に示す。

図-7 によると、BB の実効拡散係数 D_e は、湿潤養生期間によらず N よりも小さくなった。また、N の湿潤養生期間の違いに着目すると、水中養生を実施していない（湿潤養生期間 2 日）ケースにおいて実効拡散係数 D_e が最も小さくなり、水中養生を実施したそれ以外のケースではほぼ同じ値を示した。一方、BB については、水中養生の有無によらず湿潤養生期間 11 日程度の範囲ではほとんど違いは見られなかったが、3%NaCl 水溶液（塩水）中に 6 ヶ月間暴露したものはわずかながらに実効拡散係数 D_e が減少する様子もうかがえた。

図-8 に示す塩分浸透深さの結果によると、シリーズ I の結果（図-6）と同様、セメント種類の違いは明瞭には認められない。また、N の湿潤養生期間の違いに着目すると、湿潤養生期間が長くなるほど塩分浸透深さが大きくなる結果となったが、BB ではほとんど違いは見られず、湿潤養生期間の違いによる影響はほとんど認められなかった。

本実験の範囲では、N の水中養生を実施していないケースで実効拡散係数 D_e が小さくなった理由を明らかにすることはできないが、本シリーズの結果を総括すると、湿潤養生期間の違いはシリーズ I で検討したセメント種類や水セメント比ほど塩分浸透抵抗性に大きな影響を及ぼしていない結果となった。ただし、多数の論文^{例えば 10)}により、塩分浸透抵抗性の向上において湿潤養生が重要であることが示されていることから、本実験における結果の妥当性については今後も検証を続ける必要があると考えている。湿潤養生期間の影響については、今後の長期材齢に対する検討を通じて再評価することを予定している。

3.3 シリーズ III (打込み温度・養生温度)

コンクリートの打込み温度および養生温度の違いに着目した場合の実効拡散係数 D_e および塩分浸透深さの結果を図-9、図-10 に示す。

これらの図によれば、実効拡散係数 D_e および塩分浸透深さとも、打込み温度および養生温度が高くなるほど増加している。とくに、実効拡散係数 D_e は打込み温度・養生温度にほぼ比例して増加し、塩分浸透深さは 35°C の高温環境において急激に大きくなった。また、シリーズ III（図-9、図-10）とシリーズ I の結果（図-5、図-6）を比較すると、打込み温度および養生温度の違いが塩分浸透抵抗性に及ぼす影響度合いは、水セメント比の違い

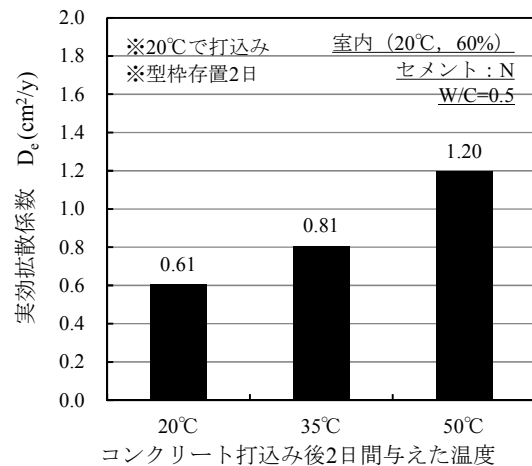


図-11 塩化物イオンの実効拡散係数（シリーズ IV）

よりも大きい様子もうかがえる。

なお、今回の実験では、所定の養生温度に約 6 ヶ月間暴露した後に 20°C の 3%NaCl 水溶液に浸漬させて塩分浸透深さを測定しているが、文献 11) によれば、高温の塩水中に浸漬したときのコンクリート中の塩化物イオンの拡散速度はより速くなることを指摘している。このことを鑑みると、暑い海洋環境（例えば 30°C の海水中）に建設されたコンクリート構造物などでは、塩分浸透深さは今回の実験結果よりもさらに大きくなるものと思われる。

3.4 シリーズ IV (若材齢時の高温履歴の影響)

図-11 に、若材齢時における高温履歴の有無に着目した場合の実効拡散係数 D_e の比較結果を示す。なお、この図に示す試験体の打込み温度はすべて 20°C であり、打込み後から型枠取外しまでの 2 日間の養生温度のみが異なっている。この結果によると、実効拡散係数 D_e は、打込み後のコンクリート温度上昇量にも大きく影響することがわかった。

なお、文献 7) においても、今回の結果と同様、若材齢時に高温履歴を受けたマスコンクリートの塩分浸透抵抗性は相当に劣るデータが示されており、特にマスコンクリートの温度ひび割れ対策として、コンクリート内部の温度勾配を低減させるために保温養生などを行ったコンクリートでは、耐久性の面がかぶり部の品質を低下させている可能性を指摘している。マスコンクリートのみならず、早期強度を得るために高温養生を採用することもあるが、このようなコンクリートで若材齢時に高温履歴を受けるとかぶり部でも水和反応が促進されコンクリート組織の緻密性が得られないという懸念がある。このような理由から、塩分浸透抵抗性を評価する場合は、特に注意を要する必要があると考えられる。

4. 塩分浸透抵抗性の評価方法の高度化に向けて

3 章の結果を踏まえると、コンクリートの塩分浸透抵

抗性の評価は、セメント種類や水セメント比の影響のみでなく、施工時や供用後の環境も考慮できるようにしておくことが重要と考えられる。とくに、本実験の範囲では、コンクリート打込み温度、硬化途中の温度上昇量、硬化後の養生温度が塩分浸透抵抗性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなり、同じセメントおよび水セメント比のコンクリートで築造した構造物（または部材）であっても、高温履歴を受ける構造物（または部材）の塩分浸透抵抗性は、示方書で推定される塩化物イオン拡散係数等の塩分浸透抵抗性よりも相当に劣る危険性が示唆された。

なお、これらの温度条件は、構造物の建設地点、施工する時期、構造物の部材寸法など、設計段階においてある程度は考慮または推定できるパラメータと考えられ、設計段階において使用できる温度条件等も考慮した塩化物イオン拡散係数等の推定式の早期構築が強く望まれる。今後も本研究を継続してデータ蓄積に努めるとともに、得られた結果を分析して、塩化物イオン拡散係数の推定式の高度化を目指したいと考えている。

5. 結論

本研究では、湿潤養生期間、コンクリート打込み温度や若材齢時の高温履歴等の温度条件が、コンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼす影響を実験的に検討した。本研究より得られた結論を以下に述べる。

- ① コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数 D_e は、コンクリートの打込み温度、養生温度ならびに若材齢時の温度上昇量に大きく影響を受け、高温履歴を受けたコンクリートほど、著しく大きくなった。
- ② コンクリートの受ける高温履歴が塩分浸透抵抗性に及ぼす影響は、水セメント比の違いによる影響とほぼ同等かそれ以上と考えられた。

なお、上記①および②の結論を踏まえると、セメント種類や水セメント比の影響だけでなく、温度条件等も考慮した塩化物イオン拡散係数等の推定式の構築が必要と考えられる。

また、本実験の範囲（材齢 6 ヶ月における試験結果）では、湿潤養生期間の違いはコンクリートの塩分浸透抵抗性に影響しない結果となったが、この結果の妥当性については今後も検証が必要と考えている。今後、長期材齢のコンクリートを使用した検討を実施する計画であるので、それらの実験を通じて再評価することを考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2012
- 2) 名和豊春, 吉田行, 田口史雄, 渡辺宏：セメント硬化体の塩化物イオン透過性に及ぼすセメント種類の影響, 土木学会第 58 回年次学術講演概要集, V-047, pp.93-94, 2003
- 3) 小倉孝道, 池津和弘, 下村匠：各種方法で求めたコンクリートの塩化物イオン拡散係数の比較, 土木学会第 60 回年次学術講演概要集, V-190, pp.379-380, 2005
- 4) 北畠裕之, 武若耕司, 前田聡, 山口明伸：コンクリート中の塩化物イオンの泳動に及ぼす骨材の影響, 土木学会西部支部研究発表会概要集, V-18, pp.A446-447, 2004
- 5) 高鳴笛, 濱田秀則, 佐川康孝, 壇康弘：高炉セメントコンクリートの塩化物イオン拡散係数評価に関する考察, 土木学会第 64 回年次学術講演概要集, V-084, pp.165-166, 2009.
- 6) 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
- 7) 福手勤, 守分敦郎, 鈴木康範：マスコンクリートとしての温度履歴を受けたコンクリートの材料特性—主に耐久性に着目したモルタルによる基礎実験—, 港湾技術研究所報告, Vol.32, No.2, pp.251-269, 1994
- 8) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書〔規準編〕「土木学会規準および関連規準」+「JIS 規格集」, 2013
- 9) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司, 福重耕平：移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.725-730, 2003
- 10) 田中亮一, 松久保博敬, 羽瀧貴士, 福手勤：繊維材吹付け湿潤養生手法の天井面への施工性と養生効果について, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, V-382, pp.763-764, 2014
- 11) 西田孝弘, 大即信明, Baccay, M.A.：鋼材腐食による鉄筋コンクリートの劣化の温度依存性に関するアレニウス則に基づく検討, 材料と環境 2006 講演概要集, pp. 363-366, 2006