

論文 PCa 製品を想定した初期高温履歴を与えたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性

佐々木 謙二*1・片山 強*2・原田 哲夫*3

要旨: 本研究では、PCa 製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートを対象として塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす結合材種類、水結合材比、養生条件などの諸要因の影響について実験的に検討した。その結果、初期高温履歴を与えた場合においても高炉スラグ微粉末を用いることや水結合材比を小さくすることにより塩化物イオン浸透抵抗性が大きくなることが確認された。また、初期高温履歴の与え方によって、全塩化物イオン濃度分布が大きく異なることが確認された。さらに、後養生方法として水分供給や水分逸散抑制した場合の塩化物イオン浸透性状に及ぼす効果は、高炉スラグ微粉末を用いた場合に顕著にみられた。

キーワード: 蒸気養生、初期高温履歴、塩化物イオン浸透抵抗性、見掛けの拡散係数、高炉スラグ微粉末

1. はじめに

コンクリートの各種性能は、材料や配合のみならず、施工の良し悪し、養生条件、暴露条件の影響を大きく受ける。その点を考慮すると、現場打ちのコンクリートよりも工場で製造されるプレキャストコンクリート(PCa)製品の方が品質が安定しており、施工の面においても工期短縮や省力化が可能である。それにもかかわらず、PCa製品の利用は拡大されていない。現在の社会状況(構造物の長期利用のための高耐久・高品質化、環境負荷抑制、副産資源の活用、熟練労働者の不足)を考慮すると、今後、PCa製品が社会状況を改善する方法として利用される機会は多いと考えられる¹⁾。PCa製品を想定した温度履歴を与えたコンクリート、特に蒸気養生を行ったコンクリートの物性に関する研究は、力学的特性を取り扱ったものが多く、耐久性に関する検討では凍結融解に関するものが多く、塩化物イオン浸透抵抗性に関する検討は少ない²⁾。

本研究では、PCa製品の高品質化、環境負荷抑制、副

産資源の有効活用の観点から、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用が広がりつつある現状を踏まえ、PCa製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす結合材種類、水結合材比、養生条件などの諸要因の影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

実験に用いた結合材は、普通ポルトランドセメント[N], Nと高炉スラグ微粉末6000(JIS A 6206)の混合系(65% : 35%)[NB]の2種類を基本とした。細骨材は海砂、粗骨材は碎石を用いた。混和剤としてPCa製品を想定したNon-AEコンクリートでは高性能減水剤を、現場打ちコンクリートを想定したAEコンクリートではAE減水剤およびAE剤を用いた。表-1に使用材料を示す。コンクリートの練上り温度が全ての場合において20℃一定

表-1 使用材料

項目	種類	品質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(N)	密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3240cm ² /g
混和材(SCM)	高炉スラグ微粉末 6000 (BFS)	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 5920cm ² /g
	フライアッシュ II 種(FA)	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 3960cm ² /g
	膨張材(Ex)	密度 2.86g/cm ³ , 比表面積 3700cm ² /g
細骨材(S)	海砂	密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.87%, 粗粒率 2.47
粗骨材(G)	碎石 (安山岩)	密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 0.69%, 粗粒率 6.66
混和剤(AD)	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE 剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

*1 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門助教 博(工) (正会員)

*2 (株)ヤマウ 技術本部開発・設計部 (正会員)

*3 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門教授 工博 (正会員)

表-2 示方配合

配合記号	結合材種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
				W	C	BFS	FA	Ex	S	G	AD	
N35	N	35	36	165	471	—	—	—	—	613	1175	1.41 ^{*1}
N40		40	37		413	—	—	—	—	648	1189	0.83 ^{*1}
N45		45	38		367	—	—	—	—	680	1195	0.37 ^{*1}
NB3535	N+BFS	35	36		306	165	—	—	—	609	1168	1.41 ^{*1}
NB4035		40	37		268	145	—	—	—	644	1183	0.83 ^{*1}
NB4535		45	38		239	128	—	—	—	676	1190	0.37 ^{*1}
NF4010	N+FA	40	37		372	—	41	—	—	638	1172	0.62 ^{*1}
NBF403510	N+BFS+FA				227	144	41	—	—	647	1195	0.72 ^{*1}
NEx4007	N+Ex				383	—	—	30	—	655	1211	0.83 ^{*1}
NBEx403307	N+BFS+Ex				249	134	—	30	—	661	1221	0.83 ^{*1}
N55	N				55	40	300	—	—	—	—	711
NB55	N+BFS	195	105				—	—	—	709	1167	0.75 ^{*2} /0.06 ^{*3}

※*1 高性能減水剤 *2 AE 減水剤 *3AE 剤

表-3 養生条件

養生条件記号	養生方法	前置時間(h)	昇温速度(°C/h)	最高温度(°C)	最高温度保持時間(h)	降温速度(°C/h)	後養生方法(材齢1日以降)
【A-D】	蒸気養生	3	20	65	4	4.5	気中養生(20°C, R.H.60%) 水中養生(20°C, 材齢7日まで) →気中養生(20°C, R.H.60%) 膜養生(20°C, R.H.60%)
【E-D】				40			
【A-W7】				65			
【A-M】							
【I-D】	保温養生(24h)						気中養生(20°C, R.H.60%)
【S】	封緘養生(20°C, 24h)						水中養生(20°C)
【S7】	封緘養生(20°C, 24h)						水中養生(20°C, 材齢7日まで) →気中養生(20°C, R.H.60%)

となるように、各材料を恒温室に保管し、一定の温度とした後に練混ぜを行った。

(2) 配合

表-2にコンクリートの示方配合を示す。PCa製品を想定したNon-AEコンクリートでは水結合材比を35, 40, 45%とし、目標空気量2.0%とした。現場打ちコンクリートを想定したAEコンクリートでは水結合材比を55%とし、目標空気量4.5%とした。いずれにおいても単位水量は165kg/m³一定とし、目標スランプ8cmとなるよう適宜混和剤の添加量を調整した。練り混ぜ後、φ100×200mmのブリキ製軽量型枠に打設を行った。

2.2 養生条件

表-3に養生条件を示す。蒸気養生条件は、最高温度、後養生方法を変化させた。前置時間は3時間、昇温速度は20°C/h、最高温度は65°Cまたは40°C、降温速度は

4.5°C/h(徐冷)、後養生方法は気中養生(気温20°C、湿度60%)、水中養生(20°C)、膜養生とした。なお本研究では、恒温恒湿槽(湿度90~95%)において所定の温度履歴を与えることにより蒸気養生を模擬した。また供試体からの水分逸散を防ぐために、供試体をビニールで密封した状態で温度履歴を与えた。

蒸気養生に代わる高温履歴の付与方法として保温養生にも着目し検討を行った。保温養生は、JASS 5 T-606:2005「簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法」に準拠して養生を行った。この養生方法は、断熱容器中に供試体を設置し、外部からの熱源を用いることなく、コンクリートの自己発熱により高温履歴を与える方法である。本研究では、厚さ300mmのポリスチレンフォームにより保温養生槽を作製し、供試体を設置した後に、その隙間をなくすために発泡ビーズを入

れて水和熱が保持されるようにした。なお、打設から脱型時までの供試体最高温度は N40 : 53.8℃, NB4035 : 50.9℃となった³⁾。

すべての養生条件において、練混ぜから 24±0.5 時間後に脱型を行い、所定の後養生を行った。後養生方法は、気中養生、蒸気養生後の降雨などによる水分供給の影響を検討するために常に水分が供給される水中養生、またコンクリート中からの水分逸散を抑制して、水和反応を継続させることを意図した膜養生とした。水中養生は材齢7日まで継続した。膜養生は脱型直後にコンクリート表面に有機無機複合型被膜養生剤⁴⁾を1m²あたり200g刷毛で塗布した。比較対象とし、初期高温履歴を与えず20℃一定で養生した場合も実施した。

なお、本研究では試験体名を「配合記号【養生条件記号】」で表す。

2.3 塩水浸漬試験

材齢28日においてφ100×200mmの円柱供試体中心部よりφ100×100mmの試験体を採取し、打ち込み面以外をエポキシ樹脂でコーティングした後、3%NaCl溶液に浸漬させた。所定の期間経過後、塩水から取り出し試験体を割裂し、割裂面に0.1N硝酸銀溶液を噴霧して塩分浸透深さを測定した。その後、浸透面から深さ方向に試料を採取し、全塩化物イオン量を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、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法により測定した。その結果をFickの拡散方程式の解で回帰して、表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 塩化物イオン浸透深さ

図-1に養生条件【A-D】の場合の塩化物イオン浸透深さの経時変化に及ぼす水結合材比の影響を示す。いずれの結合材の場合においても、水結合材比が小さいほど塩化物イオン浸透深さが小さいことが分かるが、NBの場合にはNに比べて水結合材比の影響は顕著ではない。同一水結合材比において、結合材種類の影響をみると、蒸気養生の場合でも高炉スラグ微粉末を用いた場合に、塩化物イオン浸透深さが小さいことが分かる。また、NBの場合には、Nに比べて浸漬期間の経過による塩分浸透深さの変化が少なかった。これは、塩化物イオンの固定化により表面付近に塩化物イオンが留まっていること、塩水浸漬中に未反応混和材の水和進行により緻密化したこと、蒸気養生中や後養生の気中養生中に発生したマイクロクラックが閉塞されたことにより、塩化物イオンの浸透が抑制されたためと推察される。

圧縮強度がほぼ同等(30N/mm²程度)である蒸気養生を行った40【A-D】と現場打ちコンクリートを想定した

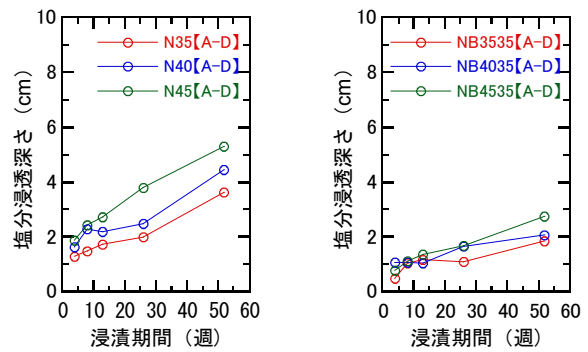


図-1 塩化物イオン浸透深さの経時変化に及ぼす水結合材比の影響

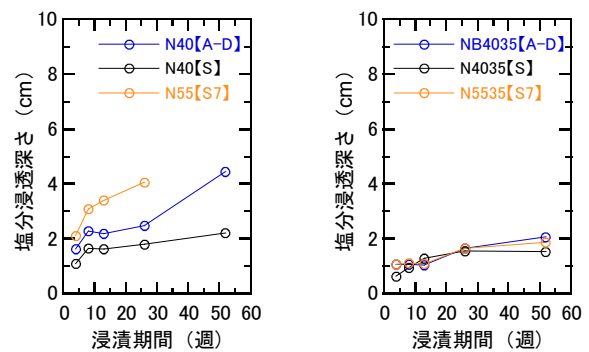


図-2 蒸気養生コンクリートと現場打ちコンクリートの塩化物イオン浸透深さの比較

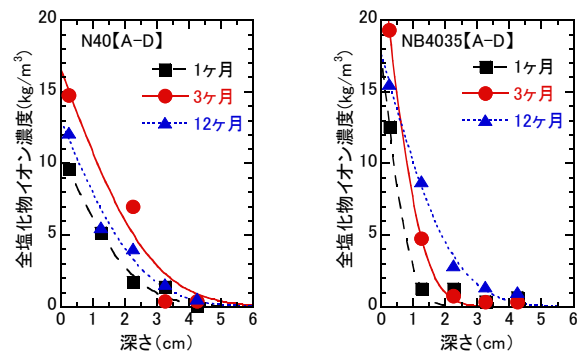


図-3 全Cl⁻濃度分布に及ぼす塩水浸漬期間の影響

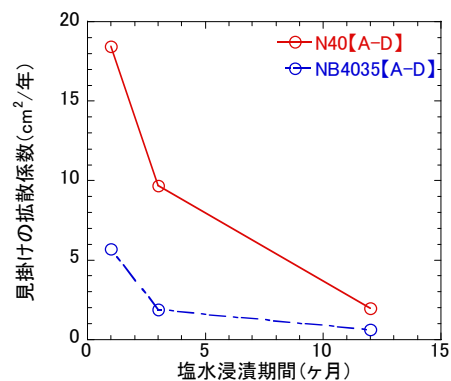


図-4 塩水浸漬期間と見掛けの拡散係数の関係

55【S7】の塩化物イオン浸透深さの経時変化の比較結果を図-2に示す。図-2には、水結合材比40%で標準養生を行った40【S】の結果も併せて示している。図より、Nの場合には、N55【S7】に比べて、N40【A-D】の塩化物イオン浸透深さが小さいことがわかる。これは、圧縮強度は同等であるものの、N40とN55ではN40の方が単位セメント量が多く、コンクリート中に浸透した塩化物イオンをより多く表面付近で固定化したためと考えられる。一方、NBの場合には、NB4035【S】の場合も含めて、塩化物イオン浸透深さに大きな違いは見られなかった。

3.2 全塩化物イオン濃度分布および見掛けの拡散係数

(1) 塩水浸漬期間の影響

図-3に全塩化物イオン濃度分布に及ぼす塩水浸漬期間の影響を、図-4に塩水浸漬期間と見掛けの拡散係数の関係を示す。図-3より、塩水浸漬期間の増加とともに内部に塩化物イオンが浸透していることが確認される。図-4の見掛けの拡散係数は、図-3の全塩化物イオン濃度分布をFickの拡散方程式の解で回帰して求めたものである。一般に、時間の経過とともに見掛けの拡散係数が減少していくことが知られているが、本研究の蒸気養生を行ったコンクリートにおいても塩水浸漬期間の増加とともに見掛けの拡散係数が減少することが確認された。したがって、早期脱型のために蒸気養生などの初期高温履歴によって強度発現を早めたコンクリートの場合においても、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の材齢依存性は無視しえないと言える。

(2) 水結合材比の影響

図-5、6に塩水浸漬期間3ヶ月および12ヶ月における全塩化物イオン濃度分布に及ぼす水結合材比の影響を、図-7に水結合材比と見掛けの拡散係数の関係を示す。図-5、6より、塩水浸漬期間が3ヶ月の場合においては全塩化物イオン濃度分布に及ぼす水結合材比の影響はあまり明確ではないが、塩水浸漬期間1年になるといずれの結合材種類においても全塩化物イオン濃度分布に及ぼす水結合材比の影響が顕著にみられる。一方、図-7の水結合材比と見掛けの拡散係数の関係においては、いずれの結合材、塩水浸漬期間においても水結合材比が小さいほど見掛けの拡散係数も小さくなっていることが確認され、塩水浸漬期間3ヶ月においても水結合材比が塩分浸透抵抗性に及ぼす影響が確認された。塩水浸漬期間3ヶ月において、全塩化物イオン濃度分布においては水結合材比の影響があまり明確ではなく、見掛けの拡散係数においては水結合材比に影響が明確に確認されたのは、塩水浸漬期間が比較的短期間であるために全塩化物イオン濃度分布には概形上顕著な差は見られなかったものの、見掛けの拡散係数は水結合材比の違い

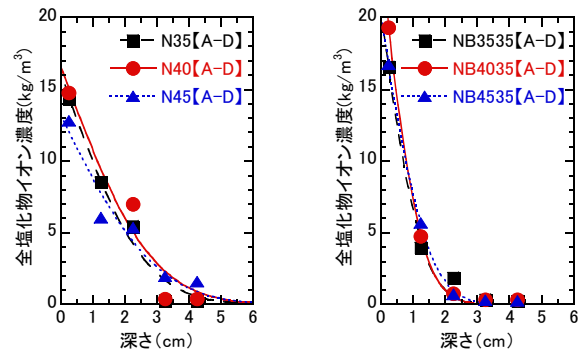


図-5 全Cl⁻濃度分布に及ぼす水結合材比の影響
(塩水浸漬3ヶ月)

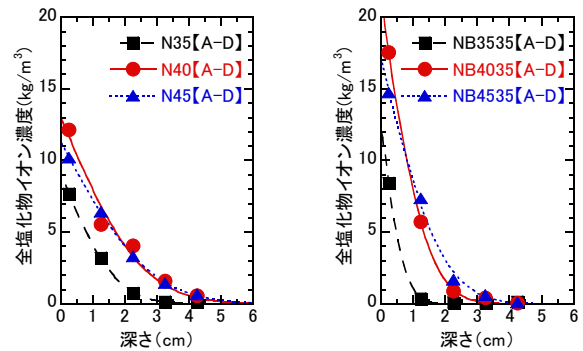


図-6 全Cl⁻濃度分布に及ぼす水結合材比の影響
(塩水浸漬12ヶ月)

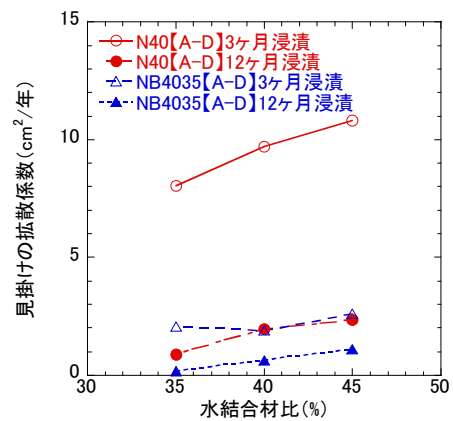


図-7 水結合材比と見掛けの拡散係数の関係

による空隙構造の相違が鋭敏に表れたためと考えられる。

(3) 初期高温履歴の影響

図-8に全塩化物イオン濃度分布に及ぼす初期高温履歴の影響を、図-9に見掛けの拡散係数に及ぼす初期高温履歴の影響を示す。図-8、9には蒸気養生を模擬した養生条件【A-D】、【E-D】と保温養生【I-D】の結果を示している。図-8より、初期高温履歴によって全塩化物イオン濃度分布に違いはあるものの、初期高温履歴に開

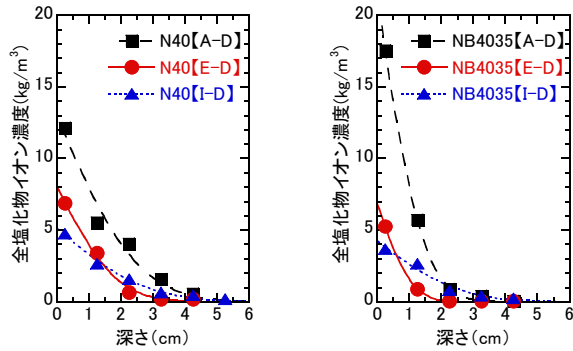


図-8 全 Cl⁻濃度分布に及ぼす初期高温履歴の影響

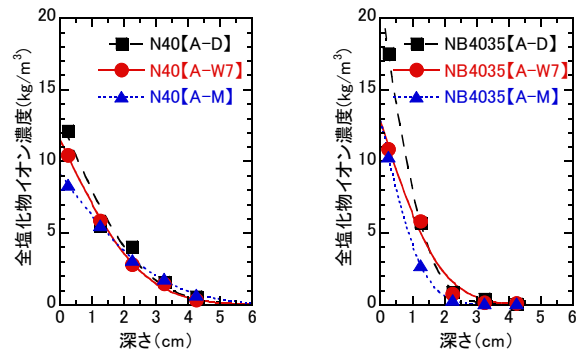


図-10 全 Cl⁻濃度分布に及ぼす後養生方法の影響

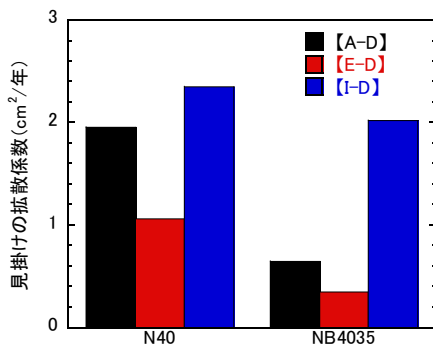


図-9 見掛けの拡散係数に及ぼす初期高温履歴の影響

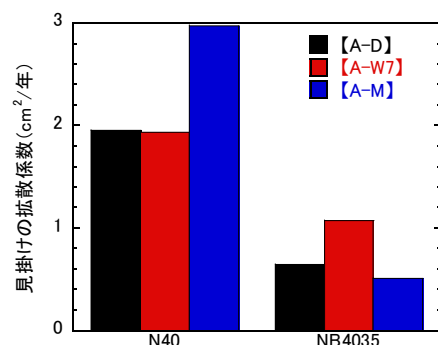


図-11 見掛けの拡散係数に及ぼす後養生方法の影響

ならず塩化物イオンの内部到達位置には大きな違いがないことがわかる。全塩化物イオン濃度分布に大きな違いが生じているのは表面部の塩化物イオン濃度が初期高温履歴によって大きく異なっているためである。同一の材料、配合、後養生方法、塩水浸漬条件であり、異なっているのは初期高温履歴のみであるので、初期高温履歴の影響により表面部の塩化物イオン濃度に影響を及ぼす塩化物イオン固定能や空隙構造が異なっているためと考えられるが、詳細については今後検討の必要がある。図-9より、見掛けの拡散係数の観点から考えると、いずれの結合材においても【A-D】に比べて、【E-D】では見掛けの拡散係数は小さくなり、【I-D】では大きくなった。これは、塩化物イオンの移動経路となっている空隙構造の違いが影響していると考えられるが、詳細については別途報告の予定である。

(4) 後養生方法の影響

図-10に全塩化物イオン濃度分布に及ぼす蒸気養生後の後養生方法の影響を、図-11に見掛けの拡散係数に及ぼす後養生方法の影響を示す。なお、膜養生【A-M】の試験体においては、被膜養生剤は塩化物イオンの浸透面には塗布されていないため、被膜養生剤そのものの塩化物イオン浸透抑制効果は試験結果に含まれておらず、被膜養生剤による蒸気養生後の水分逸散抑制効果の影響のみを示めしていると考えられる。図-10より、全塩化物イオン濃度分布からすると、【A-D】に比べて、水分

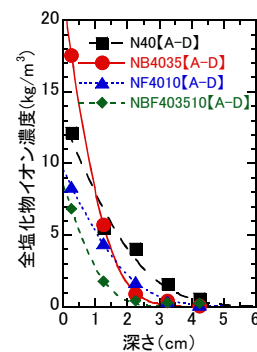


図-12 全 Cl⁻濃度分布に及ぼす混和材の影響

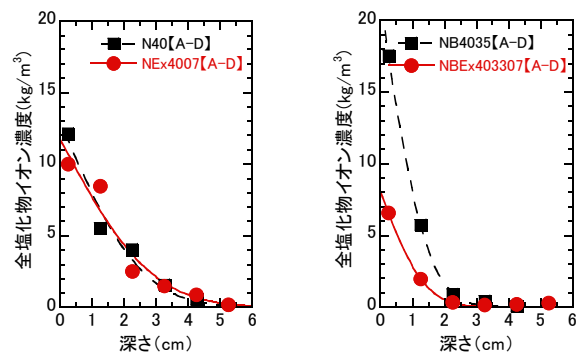


図-13 全 Cl⁻濃度分布に及ぼす膨脹材添加の影響

供給をした【A-W7】や膜養生により水分の逸散抑制した【A-M】では、塩化物イオンの浸透が抑制されている

ことが確認される。一方、図-11の見掛けの拡散係数の観点からすると、水分供給や水分逸散抑制の効果は明確に認められない。

(5) 結合材種類の影響

図-12に全塩化物イオン濃度分布に及ぼす混和材の影響を示す。ここでは、N40, NB4035に加えて、フライアッシュを内割で10%混和したNF4010, 三成分系として高炉スラグ微粉末6000を内割で35%混和およびフライアッシュを内割で10%混和したNBF403510の結果を示す。図より、三成分系とすることで塩化物イオンの浸透が抑制されていることがわかる。

図-13に全塩化物イオン濃度分布に及ぼす膨張材の影響を示す。図より、Nにおいては、全塩化物イオン濃度分布に及ぼす膨張材の影響はほとんど見られないが、NBの場合には膨張材の添加により塩化物イオンの浸透が少なくなっていることが分かり、特に、表面塩化物イオン濃度が著しく小さくなっていることが確認された。

4. まとめ

本研究では、PCa製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートを対象として塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす結合材種類、水結合材比、養生条件などの諸要因の影響について実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 塩化物イオン浸透深さは、水結合材比が小さいほど小さくなるが、NBの場合にはNに比べて水結合材比の影響は顕著ではない。また、初期高温履歴を与えた場合においても高炉スラグ微粉末を用いることにより塩化物イオン浸透深さが小さくなる。
- (2) 全塩化物イオン濃度分布や見掛けの拡散係数に及ぼす水結合材比の影響は、塩水浸漬期間1年になると顕著にみられ、蒸気養生したコンクリートの水結合材比と見掛けの拡散係数の関係を明らかにした。

- (3) 同一の材料、配合、後養生方法であっても、初期高温履歴の与え方によって、全塩化物イオン濃度分布が大きく異なることが確認された。
- (4) 後養生方法として水分供給をした場合や膜養生により水分の逸散抑制した場合の塩化物イオン浸透性状に及ぼす効果は高炉スラグ微粉末を用いた場合に顕著にみられた。
- (5) 高炉スラグ微粉末を用いた場合には、膨張材の添加により塩化物イオンの浸透が少なくなり、特に表面塩化物イオン濃度が著しく小さくなることが確認された。

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業(科学研究費補助金(基盤研究(B))、課題番号:24360168, 研究代表者:佐伯竜彦新潟大学教授)の補助を受けて実施したことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書, 2009
- 2) 大塚浩司, 庄谷征美, 阿波稔:蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.97-111, 1998
- 3) 岡野耕大, 佐々木謙二, 片山強, 原田哲夫:PCa製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの力学的特性に及ぼす結合材種類と養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1534-1539, 2012
- 4) 盛岡実, 佐々木崇, 荒木昭俊, 木田勉:有機-無機複合型塗膜養生剤の乾燥収縮低減効果と基礎物性, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.342-348, 2006