

論文 PC橋上部構造への適用を目的とした高炉セメントB種を用いた コンクリートの各種耐久性に関する検討

小池 賢太郎^{*1}・山口 明伸^{*2}・武若 耕司^{*3}・白根 勇二^{*4}

要旨：近年のアルカリシリカ反応や塩害の抑制，CO₂排出量の削減の観点から，高炉セメントB種のPC上部構造への適用が期待されている。そこで，本論文では未だ十分に検討されていない，高炉セメントB種のPC橋上部構造での適用を想定した場合の，中性化や塩害に対する耐久性の評価を実施した。その結果，高炉セメントB種を用いたコンクリートは高い塩分浸透抵抗性を有していることや，高炉セメントB種の弱点とされる中性化に対しても，適切な養生方法や表面含浸材の塗布により，中性化抵抗性を改善できることが確認された。また，分離低減剤の併用により，耐久性を損なわずに施工性を改善することが確認された。

キーワード：プレストレストコンクリート，高炉セメントB種，アルカリシリカ反応抑制，CO₂排出削減

1. はじめに

鉄筋コンクリートでは，副産物の有効利用，アルカリシリカ反応や塩害に対する耐久性の向上を目的として，混合セメントが適用される場合が多いが，プレストレストコンクリート（以下，PCとする）では，早期にプレストレスを導入するために初期の強度発現性が求められており，一般的に早強ポルトランドセメント（以下，早強セメントとする）が使用されている。最近では，地球温暖化の問題を背景に，建設工事においてもCO₂排出量を削減するための具体策の検討が課題となっており，PCの工場製品では早強セメントに混和材として高炉スラグ微粉末 6000 やフライアッシュを混合したコンクリートの適用が進められている^{1), 2)}。しかし，現場打ちのPCへの混合セメントまたは混和材の適用は，生コンクリート工場の設備上の制約から早強性を有するコンクリートを製造することが困難なため，適用事例が少ないのが実情である。さらに道路橋示方書では，高炉セメントに関して使用実績が少ないことに加え，クリープや乾燥収縮特性が必ずしも明確ではないことから，原則としてコンクリート橋の上部構造の材料として使用しないことが明記されている³⁾。

一方，鉄道工事ではアルカリシリカ反応の骨材判定区分に「準有害」が設けられ，その対策としてアルカリ総量を 2.2 kg/m³ 以下に抑制する，または，混合セメント等による対策が示されている⁴⁾。しかし，PCは鉄筋コンクリートよりも使用するコンクリートの強度が高いため，ポルトランドセメントを用いてアルカリ総量の規制値 2.2 kg/m³ 以下とする対策を実施する場合，単位セメント量と単位水量が制約される。そのため，良好な性状

や品質安定性を確保できる配合の選定が難しく，施工段階での充てん不良などのトラブル発生が懸念される。

そこで，PC橋上部構造の現場打ちコンクリートへの混合セメントの適用を検討するため，高炉セメントB種（以下，高炉Bとする）を用いたコンクリートの養生期間や養生方法が強度特性や耐久性などに与える影響について調査を実施した。混合セメントとして高炉Bを選定した理由は，全国的に最も流通している混合セメントであり，汎用性が高いためである。

本稿では，これらの検討結果のうち，中性化抵抗性および塩分浸透抵抗性について報告する。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および使用材料

検討に用いたコンクリートの配合を表-1に，使用材料を表-2に示す。コンクリートは早強セメントを用いた一般的なPC配合(45H)と高炉Bを用いた配合(45BB)，また低水セメント比コンクリートは骨材の表面水の変動による影響を受けやすく，品質のばらつきが予想されるため，品質安定性および施工性の向上を目的として45BB配合に分離低減剤を後添加した配合(45BB+M)の3配合で，呼び強度45，スランプ12±2.5cm，空気量4.5±1.5%とした。45H配合の選定は，まず，アルカリ総量が2.2 kg/m³以下となるように単位セメント量の上限を定め，本実験で利用した生コンクリート工場の強度実績によるC/W式より単位水量を決定した。そのため，一般的な配合に比べて単位水量は少なくなり144 kg/m³となったが，所定のフレッシュ性状が得られるよう細骨材率と高性能AE減水剤の添加率を調整した。一方，45BB配合は，単

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 物質生産科学専攻 修士（工学）（学生会員）

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 教授 博士（工学）（正会員）

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 教授 工学博士（正会員）

*4 前田建設工業（株） 技術研究所 材料研究室 主任研究員（正会員）

位セメント量の上限は設けずに生コンクリート工場のC/W式と室内配合試験の結果から単位セメント量と単位水量を決定し、それぞれ438 kg/m³と154 kg/m³になった。なお、実機練混ぜ試験およびポンプ圧送試験を行った結果、いずれの配合もフ

レッシュ性状が良好で施工上の問題も特になことを確認している。しかし、45Hは単位水量が少ないため骨材の表面水率変動した場合にはフレッシュ性状に影響を及ぼすことが懸念された。

コンクリートの製造は、生コンクリート工場の製造設備（容量2.5 m³、水平二軸強制練りミキサ）で行い、1バッチの練混ぜ量を2.0 m³とし、1配合あたり合計2バッチを練り混ぜた。コンクリートはトラックアジテータ車に積載し、試験体作製場所まで約20分かけて運搬した。

また、45BB+M配合のコンクリートは、生コンクリート工場にて製造した45BB配合のコンクリートをトラックアジテータ車で試験体作製場所まで運搬した後に、トラックアジテータ車のドラム内に分離低減剤を0.0008 kg/m³投入し、ドラムを全速2~3回転により作製した。なお、表-1に示したフレッシュ性状の結果より、分離低減剤を添加した45BB+Mは、分離低減剤を添加しない45BBとほぼ同程度のスランプ値および空気量を示していたものの、分離低減剤の添加前後でハンドリングが軽くなることが確認された。

2.2 検討ケースおよび養生フロー

表-3に検討ケース、試験の実施項目および参考デー

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

配合	セメント種類	W/C (%)	s/a	単位量 (kg/m ³)							フレッシュ性状	
				W	C	S1	S2	G	AD	M	スランプ (cm)	空気量 (%)
45H	H	36.0	46.2	144	400	438	381	994	5	—	20.5	5.9
45BB	BB	35.2	41.8	154	438	381	330	1031	3.07	—	11.5	5.1
45BB+M										0.0008	11.5	5.0

表-2 使用材料

種別	概要
セメント	H 早強ポルトランドセメント 密度: 3.14 g/cm ³
	BB 高炉セメントB種 密度: 3.02 g/cm ³
細骨材	S1 海砂 (鹿児島県阿久根市産), F.M=2.30, 表乾密度=2.52 g/cm ³ , 吸水率=2.43%
	S2 砕砂 (鹿児島県南九州市産), F.M=2.70, 表乾密度=2.68 g/cm ³ , 吸水率=1.41%
粗骨材	G 砕石 (大分県津久見市産), Gmax=20mm, 表乾密度=2.70 g/cm ³ , 吸水率=0.29%
水	W 工業用水, 上澄水
混和剤	AD 高性能 AE 減水剤遅延形 (ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマーの複合体)
	M 分離低減剤 (ポリエステル繊維, アクリル酸エステル, 酸モノマー共重合体, 非イオン・アニオン系界面活性剤等を主成分とする)
けい酸塩系表面含浸材	SP カルシウム付与型のけい酸ナトリウム系表面含浸材

タとして材齢28日の圧縮強度を示す。検討ケースの要因は、セメント種類、水中養生期間、養生方法、表面含浸材の塗布、および分離低減剤の添加とした。なお、表面含浸材を塗布するケースは、一般的に高炉Bを使用したコンクリートは、塩害に対しては高い抵抗性を有しているものの、中性化に対しては弱点とされているため、高炉Bを用いたコンクリートの中性化抵抗性の改善、塩分浸透抵抗性のさらなる向上を目的とした。

早強セメントを用いたH-W3は一般的なPCの施工を想

表-3 検討ケースおよび試験実施項目コンクリートの配合

ケース名	配合	養生方法および期間 (材齢)							材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)	試験実施項目			
		1日	3日	7日	14日	17日	28日	56日		促進中性化試験	電気泳動試験	塩水浸漬試験	
H-W3	45H	作製脱型	水中養生	気中養生					50.1	●	●	●	
H-W28		作製脱型	水中養生					気中養生	52.6	●	—	—	
BB-W7	45BB	作製脱型	水中養生	気中養生					43.8	●	—	—	
BB-W14		作製脱型	水中養生	気中養生					44.5	●	●	●	
BB-W28		作製脱型	水中養生					気中養生	47.7	●	—	—	
BB-C14		作製脱型	封緘養生	気中養生					42.9	●	—	—	
BB-W14 (SP)		作製脱型	水中養生	含浸材塗布+散水養生		気中養生			44.7	●	●	●	
BB-W14 (M)		45BB+M	作製脱型	水中養生	気中養生					44.7	●	●	●

※試験は、「●」印の項目について実施した。

表-4 試験項目と試験概要

項目	試験方法
促進中性化試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS A 1153 に準拠 ・ 材齢 56 日より試験開始。 ・ 寸法：角柱 100 mm × 100 mm × 400 mm
電気泳動試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ JSCE G-571 に準拠 ・ 材齢 28 日より試験開始。 ・ 寸法：円柱 φ100 mm × 50 mm
塩水浸漬試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ JSCE G-572 および JCI-CS4 に準拠 ・ 材齢 28 日より試験開始。 ・ 寸法：円柱 φ100 mm × 150 mm

定しており、材齢3日まで標準水中養生(水温20℃)とし、以降は気中養生(気温20℃、相対湿度60%)とした。高炉Bを用いた配合は養生期間の影響を把握することを目的に、標準水中養生を材齢7日(BB-W7)、14日(BB-W14)、28日(BB-W28)までとした。なお、養生期間を14日としたケースについては、実際の型枠存置による養生状態を想定して標準水中養生(BB-W14)と封緘養生(BB-C14)を比較した。

また、表面含浸材を塗布するケース(BB-W14(SP))では、材齢14日まで標準水中養生を行った後に、けい酸塩系表面含浸材を塗布し、材齢17日まで散水養生を行い、以降は気中養生とした。なお、けい酸塩系表面含浸材の選定に際しては、既往の研究より^{5), 6)}、高炉Bを使用したコンクリートであることや、表面含浸材の塗布時材齢が若材齢であることから、表面含浸材の反応に必要なCa(OH)₂の生成量が少ないことが予想されるため、カルシウム付与型のけい酸塩系表面含浸材とした。

施工性向上を目的として分離低減剤を添加したケース(BB-W14(M))では、無添加のBB-W14との比較のため、材齢14日まで標準水中養生とし、以降は気中養生とした。

試験項目と試験概要を表-4に示す。試験を実施したケースは表-3に示したとおりである。

促進中性化試験は全ケースで材齢56日から試験を開始し、所定の促進期間(7日、14日、28日、56日、91日、182日)にて中性化深さの調査および中性化速度係数の算出を行った。また、塩分浸透抵抗性の検討ケースは、早強セメントを用いたH-W3、高炉Bを用いたBB-W14、BB-W14(SP)、BB-W14(M)の4ケースで、電気泳動試験および塩水浸漬試験を材齢28日より開始した。電気泳動試験は実効拡散係数による評価、塩水浸漬試験は浸漬6ヶ月を行った後、浸漬面から10mmまでを5mm間隔で、以降は10mm間隔で供試体をスライスして、JCI-CS4に準拠して供試体中の全塩化物イオン量を調査し、見かけの拡散係数で評価した。

3. 試験結果および考察

3.1 促進中性化試験による中性化抵抗性評価

図-1~図-3に、セメント種類、養生期間、養生方法、

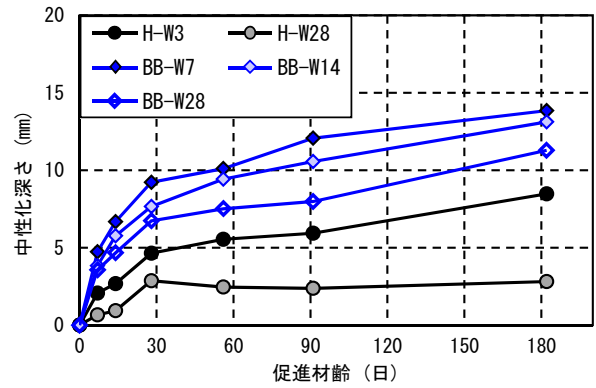


図-1 セメント種類と養生期間が中性化深さに及ぼす影響

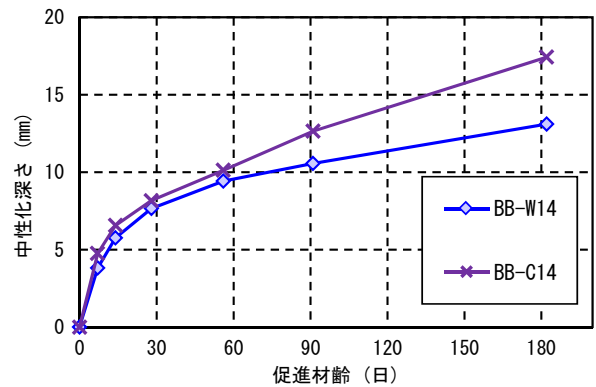


図-2 養生方法が中性化深さに及ぼす影響

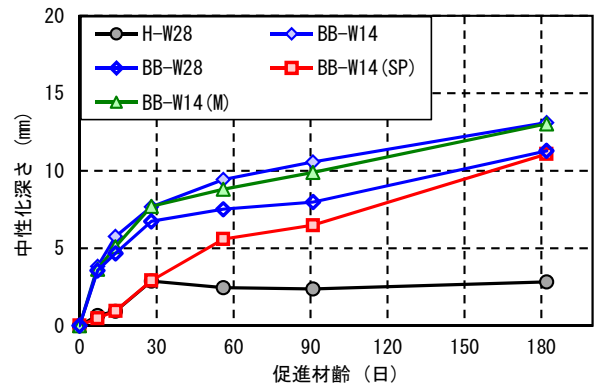


図-3 表面含浸材の塗布や分離低減剤の添加が中性化深さに及ぼす影響

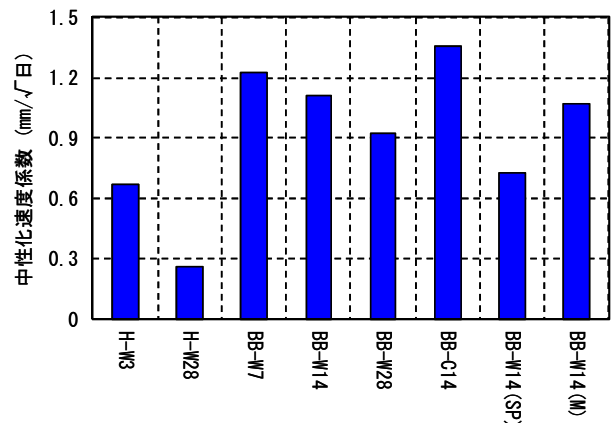


図-4 中性化速度係数の比較

表面含浸材の塗布および分離低減剤の添加を要因として実施した、促進中性化試験 182 日までの中性化深さの経時変化を示す。また図-4 には各ケースの中性化深さの経時変化から、 \sqrt{t} 則にフィッティングして算出した中性化速度係数を示す。

まず、セメント種類の違いに着目して図-1 の H-W28 と BB-W28 を比較すると、促進 182 日時点での高炉 B を用いたコンクリートの中性化深さは、早強セメントを用いた場合の 4 倍程度で、中性化速度係数も 3.5 倍となり、セメント種類の違いによって中性化抵抗性に顕著な差が確認された。これは、早強セメントと高炉 B とでセメント中に含まれるポルトランドセメント量が異なることに起因し、ポルトランドセメント量の少ない高炉 B では水和反応により生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が少ないためだと考えられる。

また、同図中の養生期間が中性化抵抗性に与える影響では、早強セメントの場合、H-W3 の中性化深さは H-W28 の 3 倍となり、中性化速度係数も約 2.5 倍となった。特に、H-W28 は促進材齢 28 日以降の進行がほとんど見られないが、H-W3 は促進材齢が進むに従い中性化が進行する傾向が見られる。高炉 B の場合も早強セメントと同様に養生期間の影響が見られ、養生期間が短いほど中性化深さと中性化速度係数が大きくなる傾向となっているが、標準水中養生 14 日とすれば標準水中養生 28 日に対する中性化深さは 1.2 倍程度に留まっていた。

次に、養生方法に着目して図-2 の BB-W14 と BB-C14 を比較すると、促進 56 日までは標準水中養生と封緘養生で中性化深さの差はほとんどないが、それ以降は徐々に差が開き、最終的に封緘養生とした場合の中性化速度係数は標準水中養生の 1.2 倍となった。これは、封緘養生を行った場合、コンクリートの表層部では標準水中養生と同程度の水和が進むものの、コンクリート内部では養生に必要な水分供給が不足していることが推察され、そのため内部の中性化抵抗性が低下した可能性が示唆された。

表面含浸材の塗布が中性化抵抗性に及ぼす影響の検討として図-3 の H-W28、BB-W14、BB-W28 および BB-W14(SP) を比較すると、表面含浸材を塗布した BB-W14(SP) の中性化深さは、いずれの促進材齢においても BB-W14 や水中養生を十分に行った BB-W28 よりも抑えている結果が得られた。さらに、促進 28 日までは早強セメントを用いた H-W28 とほぼ同程度の中性化進行となっており、促進 28 日以降では BB-W14 と同様の中性化深さの増加傾向が確認された。これは表層 2~3 mm 程度までを表面含浸材の改質効果により改質し、中性化の進行を遅延していることが考えられる。

また、分離低減剤の添加が中性化抵抗性に及ぼす影響

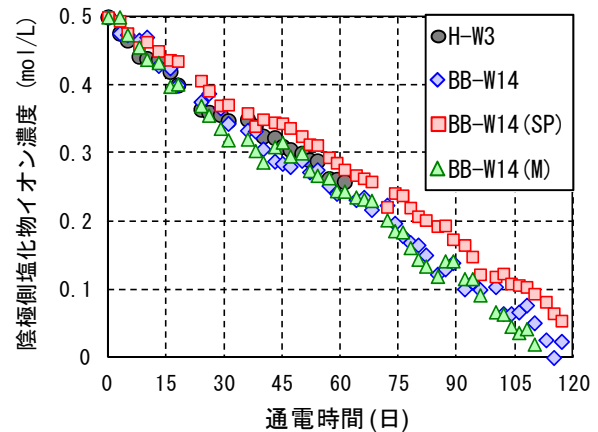


図-5 陰極側塩化物イオン濃度の経時変化

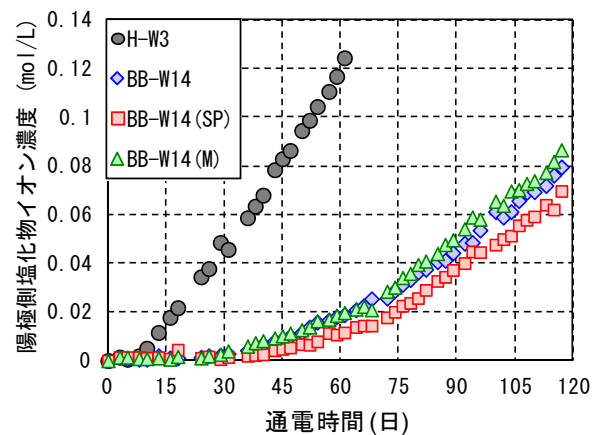


図-6 陽極側塩化物イオン濃度の経時変化

として、同図中の BB-W14 および BB-W14 (M) で比較すると、分離低減剤の添加の有無に拘わらず、中性化深さおよび中性化速度係数はほぼ同程度であり、分離低減剤が中性化抵抗性へ及ぼす影響は小さいことが確認された。

3.2 塩分浸透抵抗性の検討

(1) 電気泳動試験

陰極側および陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化を図-5 および図-6 に示す。

まず、陰極側の塩化物イオン濃度の経時変化に着目すると、いずれのケースでも、ほぼ同様の傾向を示し、セメント種類、表面含浸材の塗布や分離低減剤の添加に拘わらず、同量の塩化物イオンが電気泳動により供試体内へ流入していることが確認された。

一方、陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化に着目すると、早強セメントを用いた H-W3 は、通電開始後約 10 日目で塩化物イオンが検出され、高炉 B を用いたケースのうち BB-W14 および BB-W14 (M) では通電開始後約 30 日目、表面含浸材を塗布した BB-W14 (SP) では、通電開始後約 45 日目で塩化物イオンの検出が確認された。

さらに、陽極側塩化物イオン濃度の増加が定常状態に達するまでの期間は、早強セメントを用いた H-W3 では、塩化物イオンの最初の検出以降を定常状態として認めら

れるものの、BB-W14 および BB-W14(M)は、最初の塩化物イオン検出の約 30 日後から定常状態として認められた。また、表面含浸材を塗布した BB-W14(SP)では、最初の塩化物イオンの検出まで約 45 日要したものの、他の高炉 B のケースと同様に塩化物イオンの検出の約 30 日後から定常状態として認められた。

これは既往の研究から⁷⁾、高炉 B を用いたコンクリートの空隙構造は、空隙の屈折率が増加し、複雑化することが報告されている。つまり、空隙構造の複雑化が、電気泳動による陰極から陽極への実質的な移動距離を増加させ、定常状態までの時間を延長した要因の一つとして考えられる。また、表面含浸材を塗布した場合は、これに加えて表層部分の改質効果も合わさることで、塩化物イオンの検出がさらに遅れたと考えられる。

次に、陰極側および陽極側の定常状態における塩化物イオン濃度変化率の絶対値の比較を図-7 に示す。陰極側の塩化物イオン濃度変化率は、セメント種類、表面含浸材の塗布および分離低減剤の添加に拘わらず、ほぼ同程度の変化率であり、陰極側塩化物イオン濃度の経時変化と同様の傾向が確認された。一方、陽極側での濃度変化率は、いずれのケースでも陰極側の濃度変化率より著しく低下していることが確認された。これは、電気泳動により、陰極側から流入する塩化物イオンよりも、陽極側から流出する塩化物イオンの方が少ないことを意味し、塩化物イオンがコンクリート水和物中へ取り込まれ、固定化されていることが要因として挙げられる。特に、高炉 B を用いたケースでは、いずれも陽極側の濃度変化率は陰極側の約 1/4 と、早強セメントを用いた場合よりも低く、高い塩化物イオン固定化能力を有していることが考えられる。

陽極側塩化物イオン濃度の経時変化から算出した実効拡散係数を図-8 に示す。なお、図中には供試体間のばらつきをプロットで併せて示している。

セメント種類の違いに着目して、早強セメントを用いた H-W3 と高炉 B を用いた BB-W14 を比較すると、BB-W14 は H-W3 の約 1/2 の実効拡散係数となっており、高炉 B を用いたコンクリートが高い塩分浸透抵抗性を有していることが確認された。

表面含浸材を塗布した BB-W14(SP)の場合は、無塗布の BB-W14 よりも実効拡散係数が約 20%減少していることが確認され、前節の中性化抵抗性ほどの顕著な差ではないものの、表面含浸材の改質効果により、塩化物イオンの浸透を遅延することが確認された。

分離低減剤を添加した BB-W14(M)の場合は、無添加の BB-W14 とほぼ同程度の実効拡散係数が得られたものの、他のケースも含め供試体間のばらつきは最も小さい結果が得られた。これは、分離低減剤によりフレッシュコン

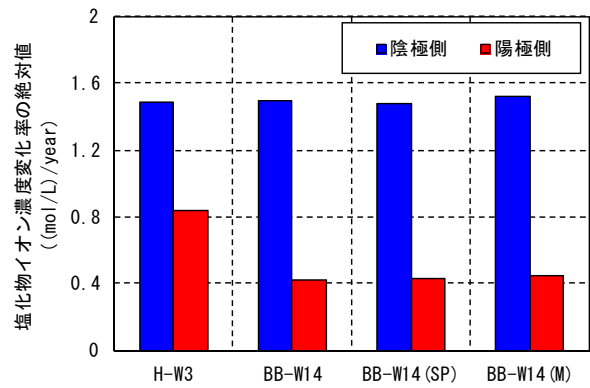


図-7 塩化物イオン濃度変化率の絶対値

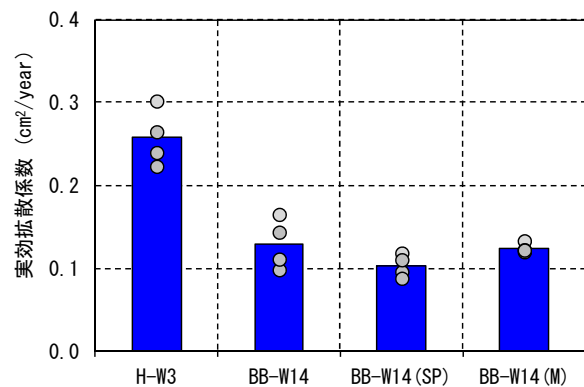


図-8 各ケースの実効拡散係数

クリートが均一化し、施工性が改善されたため、供試体間の品質が安定したことが考えられる。

(2) 塩水浸漬試験

浸漬 6 ヶ月における全塩化物イオン量分布を図-9 に示す。また、図-10 には、全塩化物イオン量分布から算出した、見掛けの拡散係数を示す。

まず、セメント種類の違いに着目すると、早強セメントを使用した H-W3 では、浸漬面からの深さ 35 mm 位置まで塩化物イオンの浸透が確認されたのに対して、高炉 B を使用した BB-W14 では深さ 25 mm で塩化物イオンの浸透を抑えていることが確認された。さらに、見かけの拡散係数による比較では、電気泳動試験で得られた実効拡散係数と同様に、BB-W14 は H-W3 の約 1/2 の見かけの拡散係数となっており、高炉 B を用いたコンクリートが高い塩分浸透抵抗性を有していることが確認された。

また、表面含浸材を塗布した BB-W14(SP)と無塗布の BB-W14 との比較では、全塩化物イオン量分布、見かけの拡散係数ともに、ほぼ同程度の結果が得られ、電気泳動試験とは異なり塩水浸漬試験では表面含浸材の改質効果を確認することは出来なかった。これは、母材となる BB-W14 自体が極めて高い塩分浸透抵抗性を有していることから、そこに表面含浸材を塗布しても相対的に改質効果は薄いのではないかと考えられる。

分離低減剤を添加した BB-W14(M)と、無添加の BB-W14

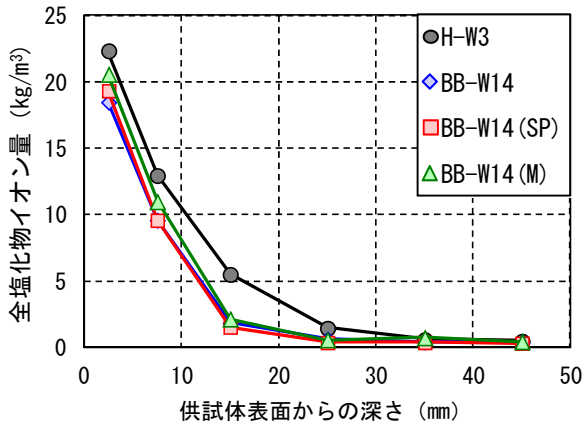


図-9 全塩化物イオン量分布の比較

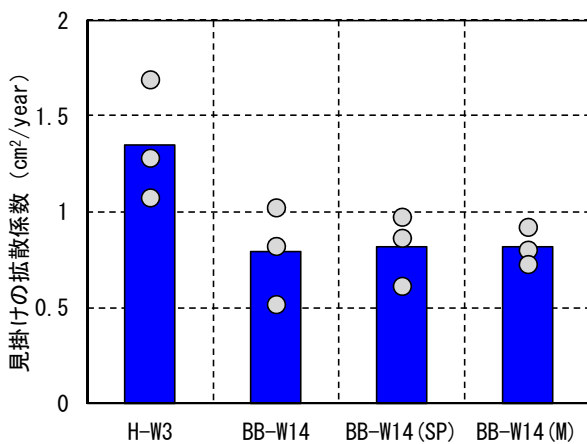


図-10 見掛けの拡散係数の比較

との比較では、促進中性化試験や電気泳動試験と同様に、ほぼ同程度の結果が得られ、また供試体間のばらつきも比較的小さいことが確認された。

4. まとめ

PC 橋上部構造の現場打ちコンクリートへ混合セメントの適用を検討することを目的に、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの耐久性について調査を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 高炉セメント B 種を用いたコンクリートは、早強セメントを用いた場合に比べて、中性化抵抗性が低下する傾向にあるが、できる限り養生期間を確保するとともに養生水を供給することや、表面含浸材の塗布により中性化抵抗性を改善できることが確認された。そのため、高炉セメント B 種の PC 橋上部構造への適用には、これらに準じた適切な養生方法および表面含浸材を採用することが望ましいことがわかった。
- (2) 高炉セメント B 種を用いたコンクリートの塩分浸透抵抗性は、早強セメントを用いたコンクリートに比べて著しく高く、見かけの拡散係数による評価では、早強セメントの場合の約 1/2 となった。

- (3) 高炉セメント B 種を用いたコンクリートに表面含浸材を塗布した場合の塩分浸透抵抗性は、明確な改質効果を確認することが出来ず、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの中性化抵抗性のさらなる改善としての利用が示唆された。
- (4) 施工時のワーカビリティの向上が目的である分離低減剤は、中性化抵抗性および塩分浸透抵抗性への影響はほとんど確認されなかった。そのため、実施工においては分離低減剤を添加した上で、適切な養生方法および表面含浸工法を採用することで、安定した品質での施工および耐久性の確保が可能になることが示唆された。

謝辞

本研究は鹿児島大学、前田建設工業（株）、コアツ工業（株）の 3 者による共同研究の成果の一部である。関係者各位に心より感謝する。

参考文献

- 1) 中村英佑, 石井豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮に関する実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol. 56, No. 3, pp. 54-60, 2014. 5
- 2) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 桁への適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 181-186, 2013. 7
- 3) 公益社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, pp. 327-331, 2012. 3
- 4) 松田芳範, 隈部佳, 木野淳一, 岩田道敏: アルカリ骨材反応の JR 東日本版抑制策の制定について, コンクリート工学, Vol. 50, No. 8, pp. 669-675, 2012. 8
- 5) 樋原弘貴, 武若耕司, 坂元貴之, 山口明伸: ケイ酸塩系表面含浸材を高炉セメントを用いたコンクリートに塗布した場合の劣化抑制効果に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-392, pp. 783-784, 2010. 9
- 6) 坂元貴之, 武若耕司, 山口明伸, 中村慎: 塗布時のコンクリート材齢の違いが表面含浸材の塩害抑制効果に与える影響について, 土木学会西部支部研究発表会, V-044, pp. 719-720, 2011. 3
- 7) 真島耕平, 川原真一, 菊地道生, 佐伯竜彦: 高炉スラグ微粉末およびシリカフェームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透抵抗性, セメント・コンクリート論文集, Vol. 66, pp. 452-459, 2012