

PC橋上部構造への高炉セメントB種の適用に関する検討

白根 勇二*1・宮本 秀樹*2・坂口 伸也*3・武若 耕司*4・山口 明伸*4・轟木 詳千*5

An Examination on the Application of Blast Furnace Slag Cement the Prestressed Concrete Bridge Super-Structure

Yuji SHIRANE, Hideki MIYAMOTO, Shinya SAKAGUCHI, Koji TAKEWAKA, Toshinobu YAMAGUCHI, Yoshikazu TODOROKI

表-1 PC 橋上部構造への高炉セメント B 種の適用検討項目

ケース	配合	養生方法および期間 (材齢)					試験実施項目					
		1日	3日	7日	14日	28日	圧縮強度 静弾性係数	自己収縮	乾燥収縮	クリープ	促進 中性化	塩水浸漬 電気泳動
H-W3	45H	製作 脱型	水中 養生	気中養生			●	●	●	●	●	●
H-W28		製作 脱型	水中養生			気中養生	●		—	—	●	—
BB-W7	45BB	製作 脱型	水中養生		気中養生		●	●	—	—	●	—
BB-W14		製作 脱型	水中養生		気中養生		●		●	●	●	●
BB-W28		製作 脱型	水中養生		気中養生		●		—	—	●	—
BB-C14		製作 脱型	封緘養生		気中養生		●		—	—	●	—



写真-1 ミスト養生の実施状況

研究の目的

近年、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、この対策としてアルカリ総量の規制（2.2kg/m³以下）、または、混合セメントの使用が示されている。プレストレストコンクリートは設計基準強度が高いため、現場打ちプレストレストコンクリートに対してアルカリ総量の規制を選択した場合には、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、充填不良などのトラブル発生が懸念される。一方で、PC 上部構造に高炉セメント B 種を適用した事例はほとんど無く、その適用性や具体的かつ適切な施工方法が明らかでない。高炉セメント B 種を現場打ち PC 部材に用いることができれば、耐久性の向上や二酸化炭素排出量の抑制にも寄与することが期待される。

技術の説明

高炉セメント B 種はプレストレストコンクリートに一般的に用いられる早強セメントと比べて、強度発現性が低くプレストレ導入が遅れること、自己収縮ひずみや乾燥収縮ひずみが大きくプレストレスが減少すること、中性化抵抗性に劣ることなどが課題として挙げられる。したがって、プレストレス導入強度に達する期間、プレストレス導入後の収縮量やクリープ特性への影響、および、耐久性の確保に必要な養生方法の検討とその期間の把握が必要と考え、これらに関する調査を実施した。

調査の結果、実施工に適用可能と判断し、養生などの工夫を施しながら長さ約 40m の PC 桁の施工を行った。

主な結論

- ・ 高炉セメント B 種をプレストレストコンクリートに適用する場合、強度発現性、プレストレス減少の抑制から、緊張力導入材齢を 10～14 日に延長することが望ましい。
- ・ 強度発現性や中性化抵抗性の点から、できるだけ水を供給する養生の実施が望ましい。
- ・ 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いことが確認された。
- ・ 高炉セメント B 種を実際の PC 桁に採用することで、良好な充填性や品質安定性を確保することができた。

*1 本店 技術研究所 材料研究室
*2 九州支店 JR 谷山高架作業所
*3 九州支店 土木営業部

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻
*5 コーアツ工業（株） 技術開発本部 開発部

PC橋上部構造への高炉セメントB種の適用に関する検討

白根 勇 二^{*1} 宮本 秀 樹^{*2}
 坂口 伸 也^{*3} 武若 耕 司^{*4}
 山口 明 伸^{*4} 轟 木 詳 千^{*5}

要 旨

コンクリート構造物に高炉セメントB種を適用することで、アルカリシリカ反応や塩害の抑制、CO₂排出量の削減が期待されるが、橋梁上部構造のプレストレストコンクリートでは、強度発現の遅れによる工程への影響、収縮特性やクリープ特性への影響が懸念される。そのため、これまでプレストレストコンクリートへの高炉セメントB種の適用の実績がほとんどない。本検討では、高炉セメントB種をプレストレストコンクリートに適用することを想定して、緊張強度、収縮・クリープ特性、耐久性の観点から必要な養生日数や養生方法について検討を行った。

検討の結果、材齢28日の強度レベルを早強セメントと同等とした場合、高炉セメントB種は緊張導入までに材齢10日程度を要すること、材齢14日で緊張した場合、緊張後の自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数は早強セメントと同等あるいは小さくなること、強度発現および耐久性の確保の観点からできるだけ水を供給する養生方法を採用することが望ましいことが明らかとなった。

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／ASR抑制／CO₂排出量削減

目 次

- | | |
|--------------|------------|
| 1. はじめに | 4. 実施工への適用 |
| 2. 検討概要 | 5. まとめ |
| 3. 試験結果および考察 | |

AN EXAMINATION ON THE APPLICATION OF PORTLAND BLAST-FURNACE SLAG CEMENT FOR THE PRESTRESSED CONCRETE BRIDGE SUPER-STRUCTURE

Yuji SHIRANE	Hideki MIYAMOTO
Shinya SAKAGUCHI	Koji TAKEWAKA
Toshinobu YAMAGUCHI	Yoshikazu TODOROKI

Synopsis:

Application of portland blast-furnace slag cement is effective to prevent ASR damage and salt damage, and to reduce CO₂ emission. On the other hand, this application may cause delay of strength development, larger shrinkage and creep. Therefore this application to the pre-stressed concrete bridge super-structure is quite rare. In this study, requirement on the curing of blast furnace slag cement concrete is examined to clarify the pre-stressing strength, shrinkage, and creep characteristics.

As the results, followings are clarified, 10 days curing is necessary for pre-stressing, 14 days curing is effective for the reduction of shrinkage and creep, and wet curing is necessary for strength and durability.

* 1 本店 技術研究所 材料研究室

* 3 九州支店 土木営業部

* 5 コーアツ工業(株) 技術開発本部 開発部

* 2 九州支店 J R 谷山高架作業所

* 4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻

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。しかしながら、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、例えば PC の工場製品では早強セメントに混和材として比表面積 6000cm²/g の高炉スラグ微粉末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)}。一方、現場打ちの PC への混合セメントまたは混和材の適用は、レディーミクストコンクリート工場の設備上の制約から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、一部の鉄道工事の規準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、アルカリ総量を 2.2kg/m³ 以下に抑制する、または、混合セメント等による対策が求められている⁴⁾。今後、骨材の供給事情から「準有害」の骨材を使用せざるを得ない場合が予想されるが、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を 2.2kg/m³ 以下とする対策を実施した場合には、単位セメント量が制限されることになる。そのため、適切な単位水量を確保できず、良好なフレッシュ性状や品質安定性を有する配合の選定が難しく、施工段階において充填不良などのトラブルが発生することが懸念される。

高炉セメント B 種（以下、高炉 B とする）は汎用性が高く、耐久性の向上にも寄与するため、PC 橋上部構造の現場打ちコンクリートに用いることができれば、多くの工事での使用が期待される。しかし現状では、適用にあたってのデータが必ずしも十分であるとはいえず、具体的かつ適切な施工方法も明らかでないことから、著者らは PC 橋上部構造の現場打ちコンクリートへの高炉 B の適用性について検討した。高炉 B は PC に一般的に用いられる早強セメントと比べて、強度発現性が低くプレストレス導入が遅れること、自己収縮ひずみや乾燥収縮ひずみが大きくプレストレスが減少すること、中性化抵抗性に劣ることなどが課題として挙げられる。

そこで、プレストレス導入強度に達する期間、プレストレス導入後の収縮量やクリープ特性への影響、お

よび、耐久性の確保に必要な養生方法の検討とその期間の把握が必要と考え、これらについて検討を実施した。さらに、本結果をもとに実際の PC 橋上部構造へ高炉 B を適用した。本稿では、これらの検討結果と実構造物への適用について報告する。

2. 検討概要

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）の 2 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 の配合選定は、まず、アルカリ総量が 2.2kg/m³ 以下となるように単位セメント量の上限を定め、本実験で利用したレディーミクストコンクリート工場の強度実績によるセメント水比と圧縮強度の関係式より単位水量を決定した。そのため、単位水量が一般的な配合に比べて少なくなり 144kg/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 の配合は、単位セメント量の上限は設けずに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 438kg/m³ と 154kg/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

表-1 コンクリートの配合

配合名	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S1	S2	G	AD
45H	H	36.0	46.2	144	400	438	381	994	5.00
45BB	BB	35.2	41.8	154	438	381	330	1031	3.07

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：3.14g/cm ³
	BB	高炉セメントB種， 密度：3.02g/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=2.52g/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=2.68g/cm ³ ， 吸水率=1.41%
粗骨材	G	碎石（大分県津久見市産）， Gmax=20mm，表乾密度=2.70g/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)

表-3 検討ケース，養生条件および試験実施項目

ケース名	配合	養生方法および期間（材齢）					試験実施項目						
		1日	3日	7日	14日	28日	圧縮強度 静弾性係数	自己収縮 試験	乾燥収縮 試験	クリープ 試験	促進中性 化試験	塩水浸漬 試験	電気泳動 試験
H-W3	45H	製作 脱型	水中 養生	気中養生			●	●	●	●	●	●	●
H-W28		製作 脱型	水中養生			気中 養生	●		—	—	●	—	—
BB-W7	45BB	製作 脱型	水中養生	気中養生			●	●	—	—	●	—	—
BB-W14		製作 脱型	水中養生			気中養生	●		●	●	●	●	●
BB-W28		製作 脱型	水中養生			気中 養生	●		—	—	●	—	—
BB-C14		製作 脱型	封かん養生			気中養生	●		—	—	●	—	—

果，いずれの配合もフレッシュ性状は良好で，施工上の問題がないことを確認している。

コンクリートの製造は，レディーミクストコンクリート工場の製造設備（容量 2.5m³，水平二軸強制練りミキサ）で行い，1 バッチの練混ぜ量を 2.0m³ とし，1 配合あたり合計 2 バッチ分を製造した．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。

2.2 検討ケース

表-3 に検討ケース，配合および養生条件を示す．検討要因は，セメント種類，水中養生期間および養生方法とした．早強セメントを用いた H-W3 は一般的な PC の施工を想定しており，材齢 3 日まで水中養生（水温 20℃）とし，以降は気中養生（室温 20℃，相対湿度 60%）とした．また，高炉 B を用いた配合は水中養生期間（以下，養生期間とする）の影響を把握することを目的に，養生期間を材齢 7 日（BB-W7），14 日（BB-W14），28 日（BB-W28）までとした．さらに，高炉 B を用いた配合については，養生方法の影響を検討するために実際の型枠存置による養生状態を想定して，20℃の環境で水中養生（BB-W14）と封かん養生（BB-C14）の結果を比較した．

2.3 各試験の概要

表-3 に各ケースの試験実施項目を示す．試験は，PC に高炉 B を適用するにあたり確認が必要と考えられるものを選定した．

(1) 硬化物性試験

圧縮強度の測定は JIS A 1108 に，静弾性係数の測定は JIS A 1149 に準拠し，表-3 に示す全てのケースについて円柱供試体（φ100×200mm）を用いて実施した．試験材齢は，3，7，14，28 日とした．

(2) 自己収縮試験

自己収縮試験は，「（仮称）高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁵⁾を参考に，角柱供試体（100×100×400mm）内に埋込み型ひずみ計を埋設する方法を採用した．拘束防止のテフロンシートを敷設した型枠内にコンクリートを打ち込み，水分の逸散を防止するために型枠全体をポリエチレンシートで覆い，室温 20℃環境下で養生を行った．材齢 1 日で型枠を取り外し，供試体全面をアルミ箔テープで覆った．自己収縮ひずみの測定は 45 H と 45 BB の 2 配合を対象とした．

(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は，自己収縮試験と同様に角柱供試体（100×100×400mm）内に埋込み型ひずみ計を埋設する方法を採用した．本検討では，プレストレス導入後の乾燥収縮ひずみを把握することを目的としており，プレストレスの導入強度を得られる材齢を試験の開始とした．プレストレスの導入強度は設計基準強度（45N/mm²）の 85%（38.3N/mm²）と仮定し，事前の室内配合試験の結果をもとに 45H が材齢 3 日（H-W3），45BB が材齢 14 日（BB-W14）を乾燥開始材齢とした．

(4) クリープ試験

クリープ試験は JIS A 1157 に準拠し，円柱供試体（φ100×200mm）を用いて実施した．載荷開始材齢は乾燥収縮試験と同様に，45H は材齢 3 日（H-W3），45BB は材齢 14 日（BB-W14）とし，同材齢に油圧ジャッキと PC 鋼棒を用いて所定の載荷応力度を供試体に負荷させた．載荷応力度は載荷開始材齢時の圧縮強度の 1/3 とし，PC 鋼棒の緊張力を±2%の範囲で管理し，定期的に再緊張を行った．なお，クリープ試験の供試体は前述の圧縮強度試験，自己収縮試験および乾燥収縮試験とは異なる日程で作製しており，クリープ試験の

供試体作製時に無載荷供試体も作製した。

(5) 促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠し、全ケースについて角柱供試体 (100×100×400mm) を用いて実施した。材齢 56 日に供試体を促進環境 (気温 20℃, 相対湿度 60%, CO₂ 濃度 5%) に移動し、所定の促進材齢 (7 日, 14 日, 28 日, 56 日, 91 日, 182 日) で中性化深さを測定し、中性化速度係数の算出を行った。

(6) 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は, JSCE G-572 に準拠し, 円柱供試体 (φ100×150mm) を用いて実施した。試験ケースは, 45H が H-W3 (材齢 3 日まで水中養生), 45BB が BB-W14 (材齢 14 日まで水中養生) とし, 実施工で想定される養生期間を考慮した。塩水は 10% の塩化ナトリウム水溶液とした。材齢 28 日に浸漬を開始し, 浸漬後 6 ヶ月において浸漬面から 10mm までを 5mm 間隔で, 以降は 10mm 間隔で供試体をスライスし, 粉碎処理後に浸漬面深さ方向の塩化物イオン量の濃度分布を測定し, 見掛けの拡散係数を算出して塩化物イオンの浸透抵抗性を評価した。

(7) 電気泳動試験

電気泳動試験は JSCE G-571 に準拠し, 円柱供試体 (φ100×50mm) を用いて実施した。試験ケースは塩水浸漬試験と同様に 45H が H-W3, 45BB が BB-W14 とした。材齢 28 日から試験を開始し, 実効拡散係数を算出して塩分浸透抵抗性を評価した。

3. 試験結果および考察

3.1 硬化物性

セメント種類および養生期間が圧縮強度に与える影響を比較するため, 図-1 に 45H と 45BB の水中養生を実施したケースの圧縮強度の試験結果を示す。

早強セメント (45H) に着目すると, H-W3 および H-W28 は材齢の初期段階で急激な強度増加を示し, いずれも材齢 3 日で緊張導入強度 (38.3N/mm²) を, 材齢 7 日で設計基準強度 (45N/mm²) に達した。また, H-W3 は養生期間が 3 日と短いにも関わらず, 材齢 28 日における H-W28 との圧縮強度の差は 2N/mm² 以下に留まっており, 早強セメントが養生期間の影響を受けにくいことがわかった。

一方, 高炉 B を用いたケース (45BB) は早強セメントよりも強度増加が緩やかとなっている。BB-W28 は材齢 28 日の圧縮強度が 47.7N/mm² となり, H-W28 の材齢 28 日の強度と比べて小さいが, 材齢 14 日で設計基準強度に概ね達しており, 緊張導入強度に達するのは材齢 10 日頃であると推察された。また, 高炉 B の水

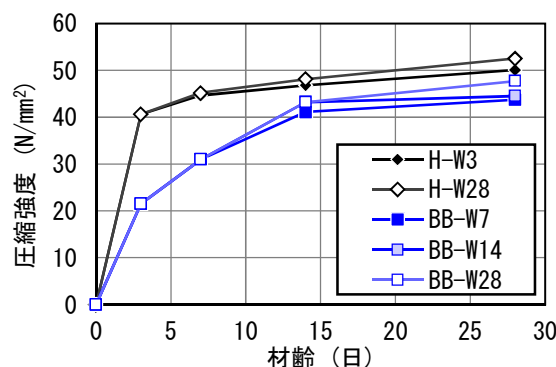


図-1 セメント種類と水中養生期間が圧縮強度に与える影響

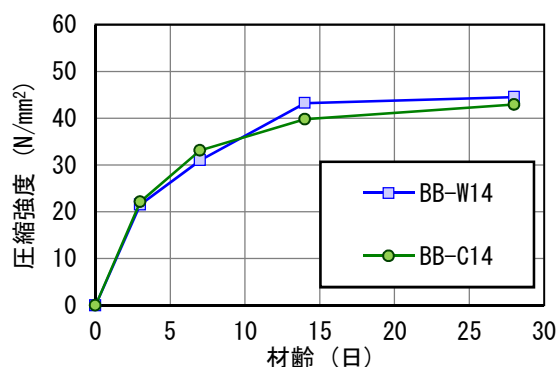


図-2 養生方法が圧縮強度に与える影響

中養生期間が圧縮強度に与える影響として BB-W7, BB-W14 および BB-W28 の結果に着目すると, 養生期間が長いほど材齢 28 日の圧縮強度が若干増加する傾向が認められた。BB-W28 と BB-W7 の材齢 28 日の圧縮強度の差は約 5N/mm² であり, 高炉 B は早強セメントよりも養生期間が圧縮強度に影響を与えることが確認された。

図-2 に, 高炉 B の養生方法が圧縮強度に与える影響として, 型枠脱型後から水中養生を行った BB-W14 と封かん養生を行った BB-C14 の結果を示す。材齢 3 日から 7 日の若材齢では養生方法の違いはほとんど見られないが, 材齢 14 日以降は封かん養生の圧縮強度の伸びがやや小さくなる傾向が認められた。PC は一般のコンクリートよりも水セメント比が小さいことから, 強度発現の傾向に養生方法の違いによる影響が現れたものと考えられる。高炉スラグ微粉末の潜在水硬性による効果を期待するためにも, 実際の施工においてはできる限り養生水を供給する養生方法を採用することが望ましいと言える。

図-3 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」⁶⁾ (以下, 示方書とする) の推定式から求めた圧縮強度と静弾性係数の関係を示した。これらと比較すると, 実験結果が推定式をやや上回る傾向にあるが, 圧縮強度と静弾性係数の関係は推定式とほぼ同様の傾向を示

しており、早強セメントと高炉 B による差は認められない。

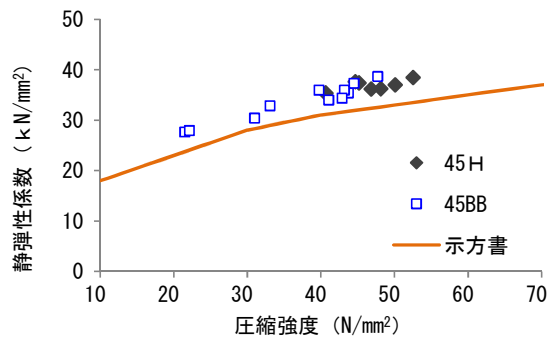


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.2 自己収縮

図-4 に 45H と 45BB の自己収縮ひずみの測定結果を示す。収縮ひずみの算出にあたっては、温度変化量とひずみの関係が屈曲している点（硬化原点）を 0 日とし、また、熱膨張係数による補正を行い、上昇温度や環境温度の変化によるひずみをキャンセルした。図-4 より、45H は材齢 1 日で大きく収縮する傾向が見られたが、その後の収縮は緩やかに進行し、材齢 180 日の自己収縮ひずみは $222 (\times 10^{-6})$ となった。一方、45BB は材齢 1 日までに $-30 (\times 10^{-6})$ 程度の膨張ひずみを示した後、材齢 7 日までに比較的大きく収縮して $113 (\times 10^{-6})$ に達し、材齢 180 日には $312 (\times 10^{-6})$ となった。以上の結果より、45BB の自己収縮は、45H よりも材齢初期（概ね 7 日程度）の変化が非常に大きく、長期的にも自己収縮ひずみが大きくなることが確認された。

高炉 B を用いた PC は強度発現に応じて緊張材齢を定めることが想定される。プレストレス導入後の自己収縮がクリープ特性に影響を与えることが懸念されるが、単純に自己収縮ひずみの結果を比較するだけではこの影響を評価することができない。そこで、任意の材齢でプレストレスを導入した場合に式 (1) の関係が成立すると仮定し、45BB について任意の緊張開始材齢（材齢 3 日から 28 日）に対して緊張後 180 日の自己収縮ひずみを算出した。その結果を図-5 に示す。

$$\varepsilon'_{as}(t-t_0) = \varepsilon'_{as}(t) - \varepsilon'_{as}(t_0) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon'_{as}(t-t_0)$ ：緊張材齢 t_0 日から材齢 t 日までに变化する自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 $\varepsilon'_{as}(t)$ ：材齢 t 日における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 $\varepsilon'_{as}(t_0)$ ：材齢 t_0 日で緊張する際に既に生じている自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$) である。

図-5 には、45H を材齢 3 日で緊張した場合の 180 日後における自己収縮ひずみ ($136 (\times 10^{-6})$) も図示した。45BB を材齢 3 日で緊張すると 180 日後の自己収縮ひずみは $277 (\times 10^{-6})$ となり、45H とは $141 (\times 10^{-6})$

の差が生じている。しかし、45BB を材齢 14 日で緊張すると 180 日後の自己収縮ひずみは $155 (\times 10^{-6})$ となり、45H（緊張材齢 3 日）とほぼ同等となった。この程度のひずみ差は、乾燥収縮ひずみや温度収縮ひずみによる変化量と比べて小さく、実用上問題ないと考えられる。したがって、緊張材齢を遅らせることで緊張後の相対的な自己収縮ひずみが小さくなり、プレストレス導入後のクリープへの影響を軽減させることができることが示唆された。

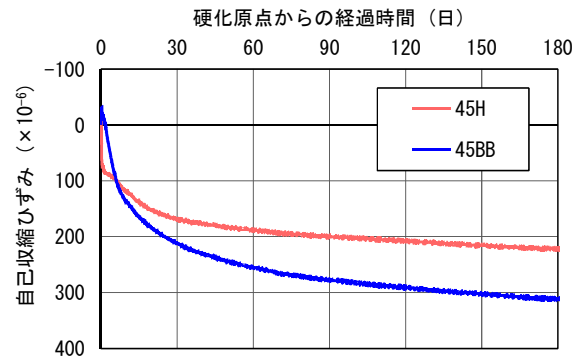


図-4 自己収縮ひずみの比較

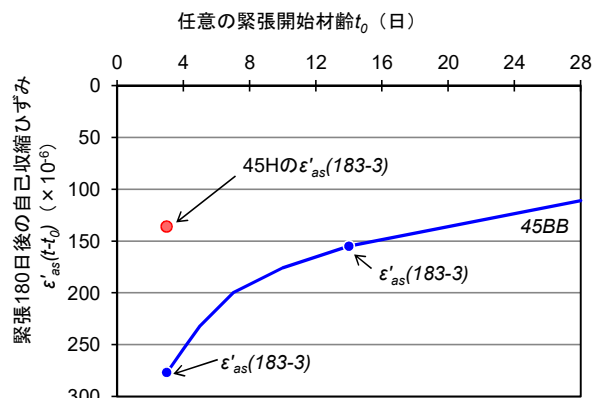


図-5 緊張開始材齢と緊張後 180 日の自己収縮ひずみ (45BB)

3.3 乾燥収縮

実際の施工状態を想定し、45H は材齢 3 日 (H-W3)、45BB は材齢 14 日 (BB-W14) を乾燥開始材齢として乾燥収縮試験を実施した。図-6 に乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。前述の自己収縮試験の結果の通り、自己収縮ひずみは長期的に継続しており、乾燥収縮ひずみの測定結果は乾燥後の自己収縮成分も含まれたものとなっている。

図-6 より、高炉 B を用いたコンクリートの乾燥開始材齢を強度発現に応じて遅らせることで、早強セメントを用いた H-W3 よりも乾燥収縮ひずみが小さくなり、乾燥開始 180 日で $80 (\times 10^{-6})$ 程度の低減効果が現れた。これは、乾燥開始の遅延による初期の自己収縮成分が排除されたことによる効果のほかに、高炉スラグ微粉

末の化学反応による水分消費によって乾燥による水分逸散が相対的に減少したことや、空隙構造の違いによるためと推察される。

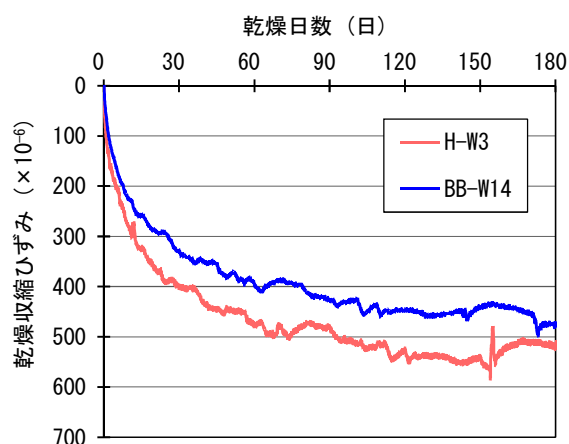


図-6 乾燥収縮ひずみの比較

3.4 クリープ特性

45H の荷重材齢を 3 日 (H-W3) , 45BB の荷重材齢を 14 日 (BB-W14) として、クリープ試験を行った。

クリープ係数の経時変化を図-7 に示す。クリープ係数は式(2)および式(3)を用いて算出した。

$$\mu_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\sigma} = \frac{\varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st}}{\sigma} \quad (2)$$

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_e} \quad (3)$$

ここに、 μ_{ct} : 単位応力あたりのクリープひずみ [$\times 10^{-6} / (N/mm^2)$] , ε_{ct} : クリープひずみ ($\times 10^{-6}$) , σ : 荷重応力度 (N/mm^2) , ε_{at} : 全ひずみ ($\times 10^{-6}$) , ε_e : 荷重時弾性ひずみ ($\times 10^{-6}$) , ε_{st} : 無荷重ひずみ ($\times 10^{-6}$) , ϕ_t : クリープ係数である。

図-7 には示方書に示されるクリープ係数の推定式を用いて計算した結果も示した。

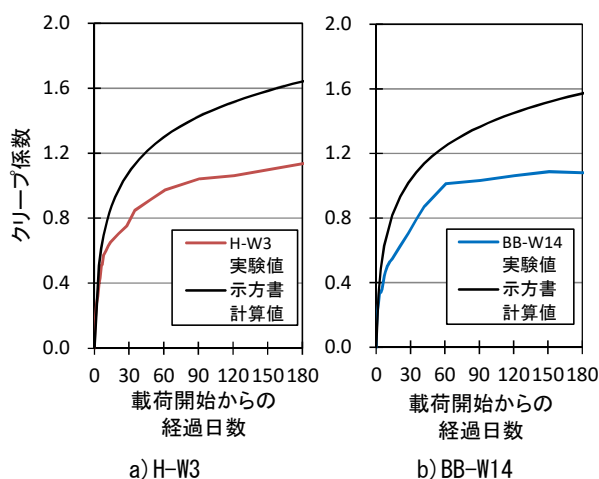


図-7 クリープ係数の経時変化

図-7 より、材齢 3 日で荷重した H-W3 と材齢 14 日で荷重した BB-W14 のクリープ係数はほぼ同等の結果となった。これは、両ケースの荷重時における硬化物性や収縮特性に大きな差がなかったためと考えられる。高炉 B は早強セメントに比べて強度発現が遅く、収縮量が大きい、荷重材齢を遅らせることでクリープ係数の影響も小さくなることが示唆される結果となった。また、実験値は示方書の計算値よりも小さく、単位応力あたりのクリープひずみと同様に安全側の結果となった。

3.4 中性化抵抗性

図-8 および図-9 に、セメント種類、養生期間および養生方法を要因とした促進中性化試験の結果を示す。

まず、セメント種類の違いに着目して 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 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水酸化カルシウムの量が少ないためと考えられる。

次に、養生期間が中性化抵抗性に与える影響に着目

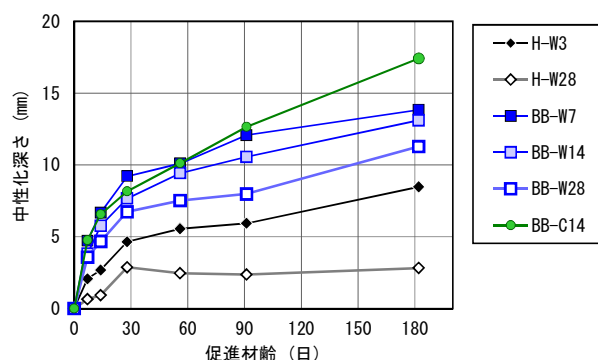


図-8 中性化深さの経時変化

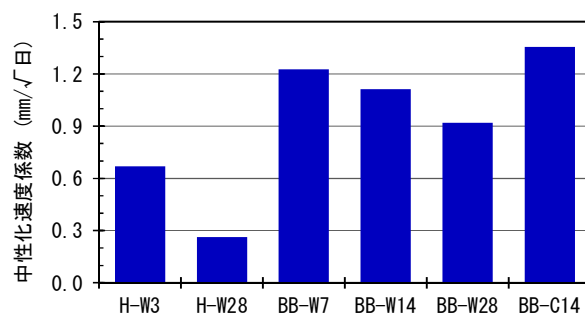


図-9 中性化速度係数の比較

すると、早強セメントの場合は 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た。一方、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認められ、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たが、水中養生 14 日とすれば水中養生 28 日に対する中性化深さは 1.2 倍程度に留まった。

養生方法に着目して BB-W14 と BB-C14 を比較すると、促進 56 日までは水中養生と封かん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、最終的に封かん養生とした場合の中性化速度係数は水中養生の 1.2 倍となった。これは、封かん養生を行った場合、コンクリートの表層部では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。これは、PC の水セメント比が小さいために封かん養生では水和に必要な水分が不足したためと考えられ、高炉 B を用いた PC の施工においては、できる限り養生水を供給する養生方法を採用することが望ましいと言える。

3.5 塩分浸透抵抗性

実際の施工状態を想定し、水中養生期間を 45H は材齢 3 日 (H-W3)、45BB は材齢 14 日 (BB-W14) として塩水浸漬試験を実施した。浸漬 6 ヶ月における全塩化物イオン量の濃度分布を図-10 に、また、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図-11 に示す。なお、図-11 には供試体間のばらつきを示すため、3 本の試験結果と平均値を示した。

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、見掛けの拡散係数による比較では、BB-W14 の平均値は H-W3 の約 1/2 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。

電気泳動試験における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-12 および図-13 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

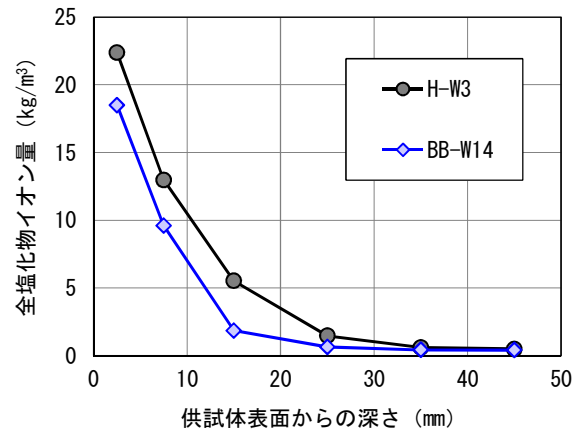


図-10 全塩化物イオン量の濃度分布

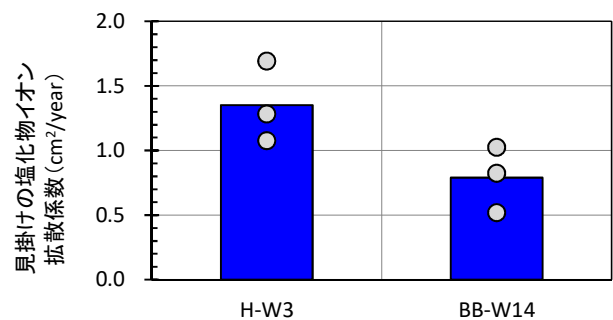


図-11 見掛けの拡散係数の比較

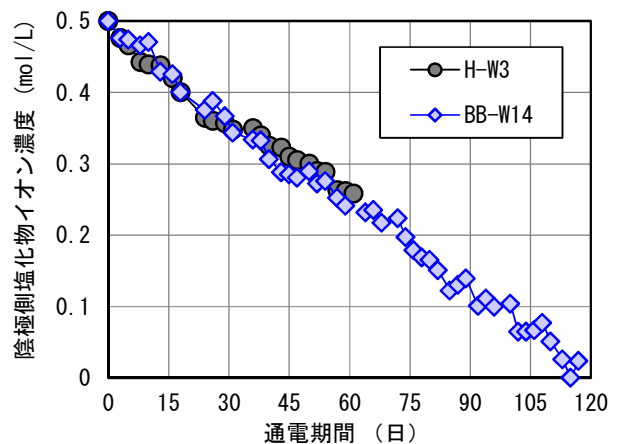


図-12 陰極側の塩化物イオン濃度の経時変化

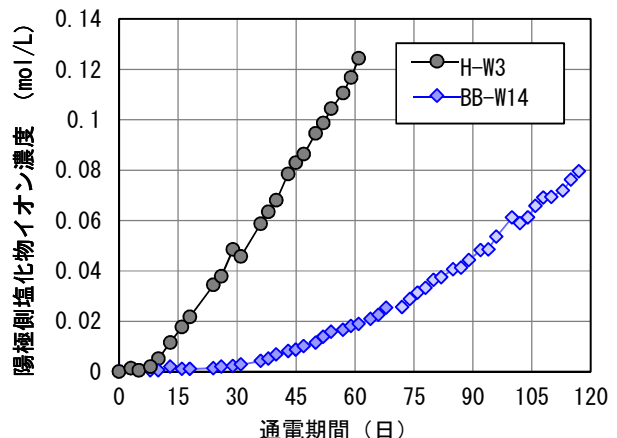


図-13 陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化

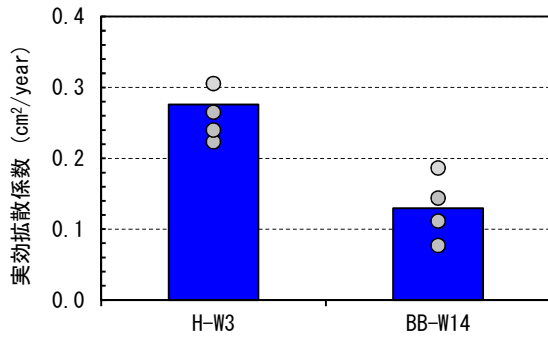


図-14 実効拡散係数の比較

日目で塩化物イオンが検出され、高炉 B を用いた BB-W14 は通電開始後約 30 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から定常状態が認められるものの、BB-W14 は最初の塩化物イオンの検出から約 100 日経過してから定常状態が認められ、その増加割合も BB-W14 の方が小さくなっている。これらの結果は、高炉 B を用いたコンクリートの水和物中へ塩化物イオンが取り込まれ固定化されたことや、空隙構造の違いによる影響と推察される。

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-14 に示す。図-14 には 4 本の供試体の試験結果と平均値を示した。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 の平均値は H-W3 の約 1/2 の実効拡散係数となっており、見掛けの拡散係数と同様に、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。

4. 実施工への適用

3 章の各種試験の結果から、高炉 B を PC に適用するには、強度発現性、収縮特性、緊張後のクリープへの影響、中性化抵抗性の確保の観点から、養生期間の延長や、できる限り養生水を与える養生方法の採用が望ましいことが明らかとなった。

実際の鉄道 PC 橋上部工（長さ約 40m、高さ 3.2m の PC 桁）において、骨材の供給事情から化学法によるアルカリシリカ反応の骨材判定区分が「準有害」に該当する骨材を使用せざるを得ない工事があり、コンクリートの仕様は設計基準強度が 45N/mm²、使用セメントが早強セメントであった。しかしながら、アルカリシリカ反応の抑制、夏季の施工における良好なワーカビリティの確保と充填不良などの防止を目的に、使用セメントを高炉 B に変更することが望ましいと判断し、高炉 B によるコンクリートを採用した。高炉 B を適用



写真-1 PC 桁の養生設備外観



写真-2 ミスト養生の実施状況

することでフレッシュ性状が安定したコンクリートを供給でき、施工上のトラブルも無く、仕上りの良い桁を構築できた。

なお、高炉 B を用いた PC に対して確実に給水養生を実施するため、写真-1 および写真-2 に示すように PC 桁全体をシートで覆い、材齢 10 日までミストによる噴霧養生を実施した。

5. まとめ

PC 橋上部構造の現場打ちコンクリートへ高炉セメント B 種を適用するにあたり、強度発現性、収縮特性、クリープ特性、耐久性の把握が重要であると考え、これら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コンクリートよりも強度発現が遅れる傾向にあり、材齢 28 日の強度レベルを同等とした場合、緊張導入材齢は 10 日程度に延びることがわかった。
- (2) 高炉セメント B 種は早強セメントよりも自己収縮ひずみが大きい、早強セメントの緊張導入材齢を 3 日、高炉セメント B 種の緊張導入材齢を 14 日で比

較すると、その後の相対的な自己収縮ひずみの差は小さくなった。

- (3) 早強セメントの水中養生期間を 3 日、高炉セメント B 種の水中養生期間を 14 日とし、その後の乾燥収縮ひずみを比較すると、高炉セメント B 種の方が小さくなった。
- (4) 高炉セメント B 種の緊張材齢を遅らせることで、クリープ係数は早強セメントと同程度となり、乾燥収縮試験と同様にクリープ特性への影響が小さいことが示唆された。
- (5) 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で中性化抵抗性を改善できることが確認された。
- (6) 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いことが確認された。
- (7) 高炉セメント B 種を実際の PC 桁に採用することで、良好な充填性や品質安定性を確保することができた。

謝辞：本検討にあたり、九州旅客鉄道株式会社の関係者の方々、鹿児島大学大学院の小池賢太郎氏に多大な

るご協力を得ました。ここに感謝の意を記します。

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) 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) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（II），pp.209-210，1994.5
- 6) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，p.39，2013.3
- 7) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.105-108，2013.3

