

# 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物

松山 高広\*<sup>1</sup>・大村 一馬\*<sup>2</sup>

PC 構造物の耐久性向上や環境負荷低減を目的として、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの適用が増加している。本稿では、BSPC 研究会での活動を中心に、早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 に置換したコンクリートの PC 構造物へ適用について、適用事例、耐久性向上効果確認の取組みや、今後の展望について紹介する。

キーワード：高炉スラグ微粉末、耐久性、製造、施工

## 1. はじめに

近年、PC 構造物の耐久性向上や環境負荷低減を目的として、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの適用が増加している。従来から耐久性が高いとされてきた PC 構造物に対して、さらなる耐久性の向上が望まれるようになった背景のなかには、1990 年代以降、建設から 50 年以上経過し、沿岸部の飛来塩分や、寒冷地での凍結防止剤散布に起因する塩害事例、良質な骨材の減少による ASR 劣化事例などが、PC 構造物においても顕在化してきたことがあげられる。

一方で、遮塩性が高いことや ASR 抑制効果を有することが知られていた高炉セメントを用いたコンクリートは、従来より海洋構造物やダムなどの無筋構造物や RC 構造物に多く利用されてきたが、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも強度発現が緩やかであるため、比較的初期に強度発現が必要となる PC 構造物への適用は困難であった。

このような状況のなか、1995 年 3 月に高炉スラグ微粉末が JIS 化 (JIS A 6206 コンクリート用高炉スラグ) されたことを契機に、基礎研究を経て、2000 年 6 月に『高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物研究会 (BSPC 研究会)』(以下、本研究会) を設立し、PC 構造物への高炉スラグ微粉末の適用を目的として活動を開始した<sup>1)</sup>。



\*<sup>1</sup> Takahiro MATSUYAMA

BSPC 研究会  
会長



\*<sup>2</sup> Kazuma OOMURA

BSPC 研究会  
技術委員長

本稿では、本研究会の活動を中心に、早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 に置換したコンクリートについて、PC 構造物への適用事例、各種耐久性の検証、製造・施工の取組みや、今後の展望について紹介する。

## 2. 適用までの取組み

JIS A 6206 には、高炉スラグ微粉末 3 000、同 4 000、同 6 000、同 8 000 の 4 種類が規定されているが、このうち、本研究会では、主に早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 に置換した結合材を用いたコンクリートに着目して活動を行ってきた。

この結合材選定の根拠は、主に PC 工場製品への適用を目的として、下記の理由による。

- 1) 塩分浸透抑制効果が期待できる置換率を確保<sup>2)</sup>
- 2) ASR 抑制効果が期待できる置換率を確保<sup>2)</sup>
- 3) プレストレス導入時期を従来と同等とできる強度発現性を確保

上記項目について、既往の指針類を参考に、置換率を耐久性確保の面で十分な 50% とし、高炉スラグ微粉末の種類を、基礎研究で確認した結果から従来と同等の強度発現性が確保できる粉末度の高炉スラグ微粉末 6 000 とした。

早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 に置換したコンクリートを PC 製品に適用するにあたり、フレッシュ性状や設計に必要な硬化コンクリートの諸物性、プレストレス導入時期を含めた製造サイクル、塩化物イオン浸透抑制効果、凍結融解抵抗性、中性化の程度など、主に試験室レベルでの確認を、1995 年 10 月から 1998 年 3 月の期間で、日本材料学会委託研究「高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物開発検討委員会」<sup>3)</sup> にて実施した。

この研究成果から、早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 に置換したコンクリートが PC 工場製品の製造面や耐久性面での要求を満足することが示され、実構造物へ適用されることとなった。また、2 000 年に入り、実物大の PC 桁を試験体として用いた研究により収縮・クリープ特性が確認されたこと<sup>4)</sup> により、従来からの設計・製造方法で対応できることが確認され、橋梁部材への適用が進んできた。

### 3. 適用実績の推移

本研究会の会員会社から収集した、高炉スラグ微粉末6000をセメントの50%置換した結合材を用いたコンクリートが適用されたPC構造物の実績を以下に示す。1998年竣工の屋嘉比橋（ポストテンション方式2径間単純中空床版橋）<sup>3)</sup>、2000年竣工の俵山4号橋（プレテンション方式単純中空床版橋）<sup>4)</sup>の主桁への適用以降、2017年5月現在359件の実績が報告されている。適用実績の大部分を橋梁上部構造が占め、PC矢板（写真-1）や、小規模下水処理施設、スノーシェッド、建築部材、鉄道軌道部材への適用事例もある。

主な発注機関別に分類した実績の割合を図-1に、海外での橋梁実績1件と広域利用されている鉄道軌道部材3件を除く国内355件の地域別の実績数を図-2示す。国と地方自治体が約86%を占めており、日本全国の幅広い地域で採用されている。

本研究会の収集した実績のうち、橋梁上部構造の物件数およびコンクリート量の推移を図-3に示す。2000年代前半は急激な実績の増加が見られた。その後2009年頃からは緩やかな増加に転じている状況である。

さらに、橋梁上部構造のうち、鋼橋へのPCaPC床版適用実績の推移を図-4に示す。橋梁上部構造の実績の増加が緩やかになる一方で、2009年頃からPCaPC床版の実績

が伸びており、単年ごとの実績数のうち、鋼桁へのPCaPC床版適用実績の占める割合が増加している。2013年以降は、単年ごとの実績の半数以上が鋼橋へのPCaPC床版実績となっている。

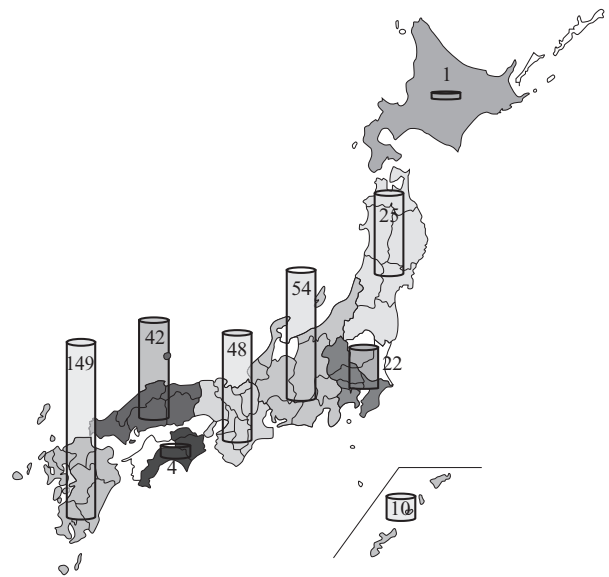


図-2 国内地域別実績数



写真-1 港湾関係に用いるPC矢板への適用例

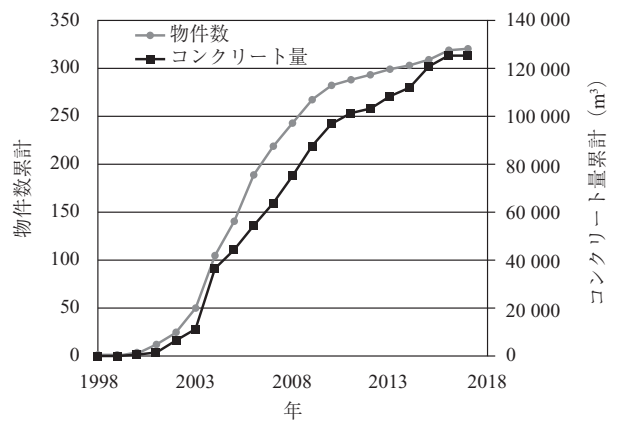


図-3 国内橋梁上部構造実績の推移

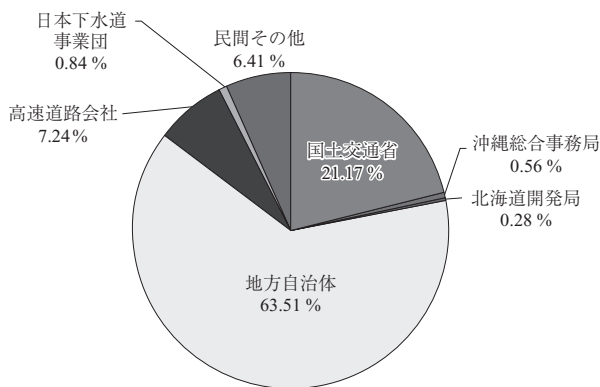


図-1 主な発注機関別実績割合

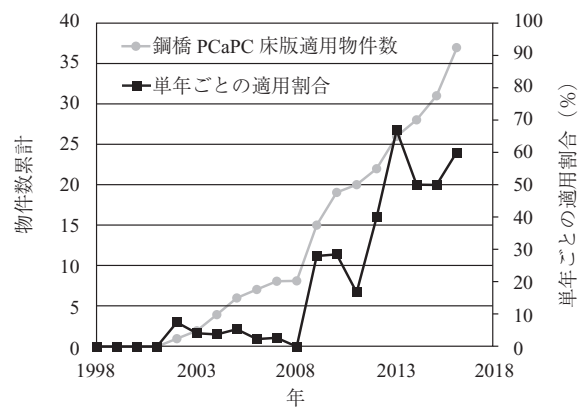


図-4 鋼橋へのPCaPC床版適用実績の推移

## 4. 採用理由の推移

図 - 5 に主な採用理由の年代別比率グラフを示す。採用理由の傾向としては、2000 年代前半までは、飛来塩分や凍結防止剤に起因する塩害対策が採用理由の多くを占めていたが、その後、ASR 抑制目的や、塩害対策や ASR 対策を含めた総合的な耐久性向上を目的とするケースが増えてきた。また、後述する耐久性向上効果のほか、本稿では割愛するが、副産物利用の観点での環境負荷低減効果<sup>6)</sup>を目的としたものも多く見受けられる。

なお、近年、各学協会での副産物の利用に関する研究が活発に行われており、今後も耐久性向上や環境負荷低減を目的に実績は増加すると予想される。

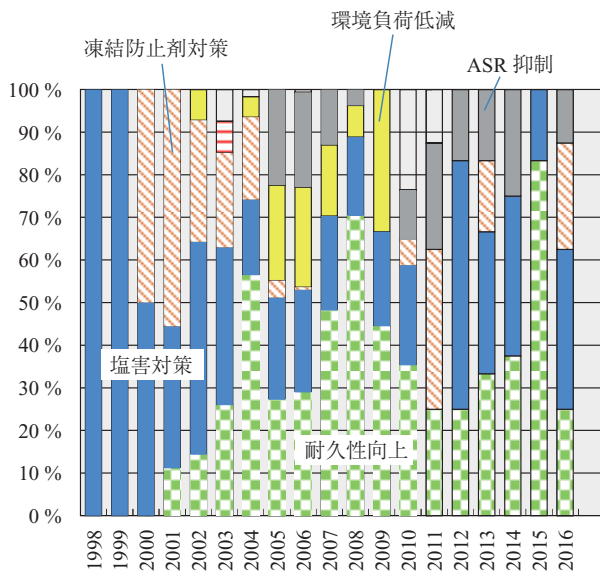


図 - 5 主な採用理由の年代別比率

## 5. 耐久性向上効果確認の取組み

### 5.1 概要

耐久性向上に関しては、既往の知見や各方面で行われている研究成果からも、高炉スラグ微粉末を適用することで効果があることは確認されていたが、実構造物への適用効果の検証として、実構造物もしくは実構造物と同等のコンクリートを用いた試験体による各種暴露試験を行ってきた。ここでは、工場製品の PC 部材に適用した圧縮強度 50 N/mm<sup>2</sup> (水結合材比 30~35%程度) のコンクリートについて実施した、下記項目についての検証事例を紹介する。

- 1) 海岸線付近での飛来塩分の浸透抑制効果
- 2) 寒冷地での凍結防止剤の浸透抑制効果
- 3) 促進条件下での ASR 抑制効果

### 5.2 海岸線付近での飛来塩分の浸透抑制効果

早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6000 に置換したコンクリート (以下、スラグ配合) が早強ポルトランドセメント単味のコンクリート (以下、早強単味配合) と比較して塩害に強い理由として、

- 1) 早強単味よりもコンクリートが緻密となり、外部か

らの塩化物イオンがコンクリート内部へ浸透しにくくなること

- 2) 高炉スラグ微粉末は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> がポルトランドセメントより多く含まれているため、フリーデル氏塩として固定化される塩化物イオンも多くなり、鉄筋の腐食に影響の大きい細孔溶液中の塩分量のが少なくなる

などがあげられる。

この効果について、複数の橋梁での検証を行ってきた。ここでは、道路橋示方書に示される塩害対策区分 S 地域の飛沫滞に位置する橋梁 (写真 - 2) について、桁製作時に同時に作製した供試体を架橋位置付近に暴露し確認を行った事例を示す<sup>7)</sup>。

スラグ配合と、比較用の早強単味配合の供試体を用意し、これらの比較を行い効果の検証とした。

図 - 6 は、暴露 11 年目の供試体の EPMA 画像である。白い部分が塩化物イオンが浸透している範囲である。早強単味配合が約 40 mm の深さまで浸透しているのに対し、スラグ配合は深さ約 25 mm までに抑制されていることがわかる。

ほかの橋梁においても、早強単味配合と比較して塩化物イオン抑制効果が高いことが確認されている。



写真 - 2 沿岸部での検証橋梁の例

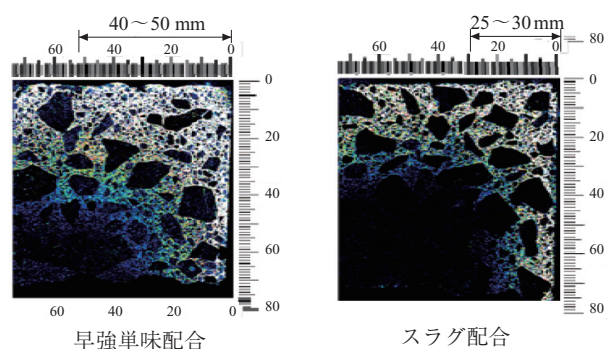


図 - 6 暴露 11 年目の EPMA 画像 (塩化物イオン)

### 5.3 塩害抵抗性および凍結融解抵抗性の確認

冬季に路上に散布される凍結防止剤による塩害および凍結融解による凍害に対する抵抗性の検証事例を示す。



工場製品の主桁およびPC版にスラグ配合を用いた橋梁(写真-3)について、構造物と同時に作製した供試体を用いて、構造物付近で竣工時から暴露試験を実施した。暴露開始後10年を経過した供試体の調査結果を下記に示す。

- 1) スラグ配合は早強単味配合よりも内部の塩化物イオン量が少なく、塩分浸透を抑制している結果であった(図-7)。
- 2) 供試体の外観を確認した結果、早強単味配合およびスラグ配合ともに表面スケーリングなどの劣化は認められない結果であった(図-8)。



写真-3 寒冷地での検証橋梁の例

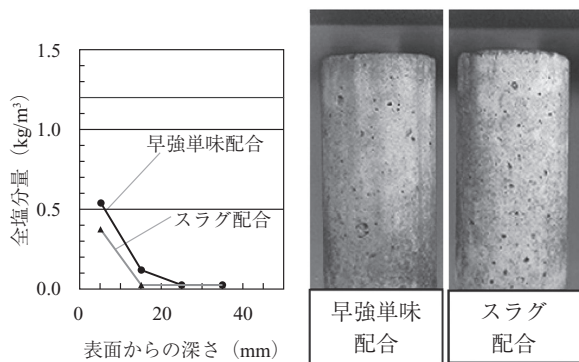


図-7 全塩分量比較

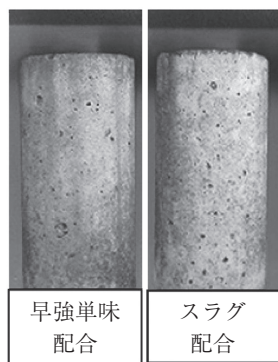


図-8 表面劣化比較

#### 5.4 ASR抑制効果の確認

早強単味配合とスラグ配合で作製したプレテンション方式のPC梁試験体の比較によるASR抑制効果の確認事例を紹介する<sup>8)</sup>。

ASRの発生を促進させる目的で、化学法およびモルタルバー法により、ASR反応性が高いと判定された細骨材・粗骨材と、NaClを18.9kg/m<sup>3</sup>(等価Na<sub>2</sub>O量で10kg/m<sup>3</sup>)添加した練混ぜ水を用いて製作したPC梁部材を8年間の屋外暴露に供した。写真-4にPC梁試験体の暴露状況を示す。

ここでは、梁側面の膨張量(縦・横)、曲げ耐力、採取コアのゲル生成状況の確認結果を下記に示す。

- 1) スラグ配合は早強単味配合に比べ、ASRによる膨張量を1/3～1/2程度に抑制する効果が確認された(図-9)。

- 2) ASRによる劣化が抑制されたスラグ配合は、早強単味配合に比べ、暴露期間が経過しても、曲げ耐力の低下が小さい結果であった(図-10)。
- 3) 载荷試験後のPC梁から採取したコアの状況から、スラグ配合は早強単味配合よりも、ゲルの生成量が少ないことが確認された(図-11)。



写真-4 PC梁試験体の暴露状況

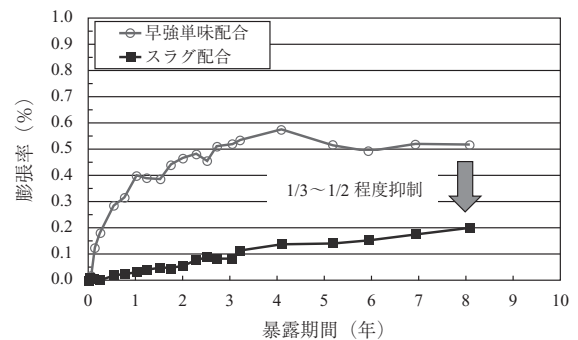


図-9 膨張量

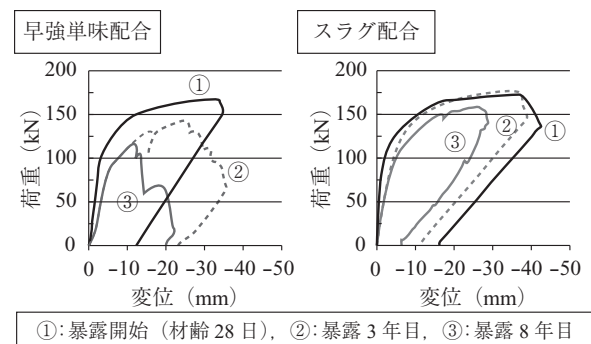


図-10 曲げ耐力

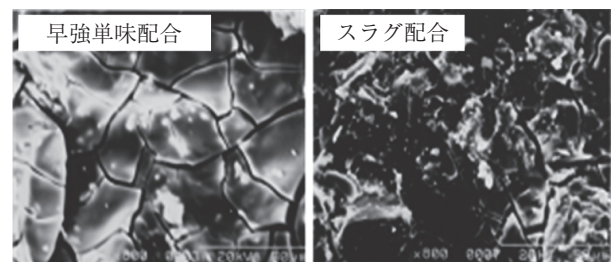


図-11 ゲルの生成状況

## 6. 製造・施工に関する取組み

### 6.1 製造・施工における留意点

製造・施工における留意点として、本研究会内での認識や、学協会での施工報告ならびに各研究機関での報告内容の共通事項として、主に下記の項目があげられる。

- 1) スラグ配合は早強単味配合に比べ、材齢初期の自己収縮やスランプロスが比較的大きい傾向であることに留意する必要がある。
- 2) 初期養生の良否がコンクリートの品質やスラグ配合の耐久性向上効果に大きな影響を与える。
- 3) 現場打ちへの適用には、高炉スラグ微粉末 6 000 を貯蔵するサイロなど、現地生コン工場の設備の確認が必要である。
- 4) 現場打ちへの適用には、現場環境に適した打設計画、養生方法などについて十分な検討を行う必要がある。

上記も含め、PC 橋へのスラグ配合の適用にあたっては、(国研) 土木研究所と(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会による共同研究成果である、「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅱ)」<sup>6)</sup>を参照されたい。

### 6.2 現場打ちへの適用例

321 件の橋梁の実績のうち、20 件については、現場打ちに適用した実績である。ここでは、現場打ちの主桁への適用例と、工場製品と現場打ちの組合せの事例を紹介する。

塩害対策区分 S の海岸部に新設された水門管理橋(中空床版桁橋)の現場打ちの主桁に適用した物件では、施工が 11 月の冬季であったため、蒸気設備を投入して施工を行うなどの工夫がなされた(写真 - 5、図 - 12)<sup>9)</sup>。

また、塩害により劣化した沖縄自動車道の竣工後約 30 年経過した橋梁の架替え工事において、耐久性向上を目的として、工場製品のプレテンション中空連結桁、現場打ちの連結部および地覆・壁高欄にスラグ配合を適用した事例(写真 - 6)<sup>10)</sup>などがある。

これらの現場打ちへの適用では、材料の調達や施工方法の工夫など、入念な計画のもとで実施されている。

なお、現場打ちへのスラグ配合の適用が増加しているが、

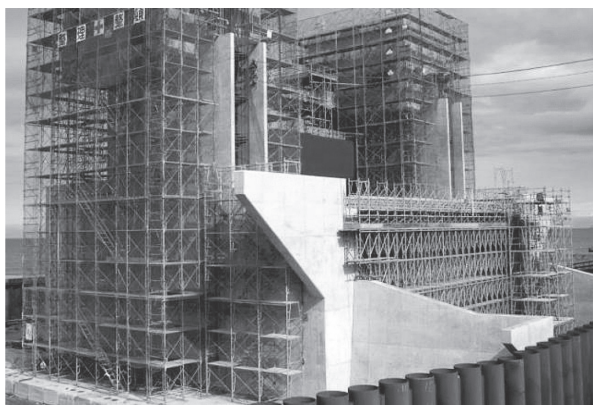


写真 - 5 主桁への現場打ちの適用事例

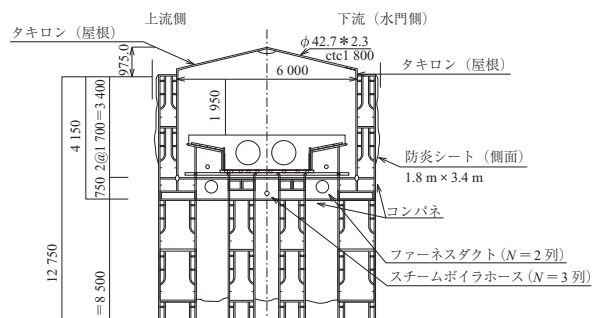


図 - 12 現場での蒸気養生の実施例



写真 - 6 工場製品と現場打ちの組合せの事例

これは、施工者の工夫やノウハウの蓄積に加え、スラグ配合適用への発注者の理解や、レディーミクストコンクリート工場の協力があったのことで理解している。

## 7. 今後の課題

早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 に置換したコンクリートの PC 構造物への適用については、前述した耐久性能や製造・施工における留意点のほか、環境負荷低減効果などのデータやノウハウが蓄積されてきている。

しかしながら、PC 構造物には、橋梁上部構造 1 つに着目してみても、主桁、地覆、壁高欄など、さまざまな部材で構成されており、それぞれの部材に求められる強度や耐久性能も異なることや、たとえば外部からの塩分の供給量や骨材事情の違いなど、構造物の置かれる環境条件が異なる。

このため、PC 構造物全体の耐久性・環境負荷低減効果の向上にあたっては、必ずしも「早強ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 に置換したコンクリート」が生産性を含め最適であるとはかぎらない。

今後、PC 構造物のさらなる耐久性や環境負荷低減効果の向上と生産性向上のバランスを最適なものとするために、種々の要求性能に見合った高炉スラグ微粉末の粉末度、ベースとなるセメント種類およびこれらの置換率の選定手法の確立が望まれる。

## 8. おわりに

本稿では、早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000に置換したコンクリートのPC構造物へ適用について、BSPC研究会での活動を中心に示した。偏った内容となっていることもあろうかと思うが、ご容赦願いたい。なお、PC構造物への高炉スラグ微粉末の適用については、本研究会以外にも多数の研究成果や実績を有するほかの研究会や委員会の情報も参考にされたい。

本研究会は、現在(株)安部日鋼工業、オリエンタル白石(株)、(株)ピーエス三菱、IHIインフラ建設(株)、前田製管(株)、三井住友建設(株)、日鉄住金高炉セメント(株)の7社で構成している。発足以降、先生方のご指導のもとに高炉スラグ微粉末の有効性に関する確認試験などを行い、発注機関へのプレゼンテーションを行ってきた。

今後も、高炉スラグ微粉末の活用が、環境や人に優しく高耐久なPC構造物の構築に寄与することを願うとともに、本研究会においてもこれに貢献すべく、更なる技術の向上を図っていく次第である。

### 参考文献

- 1) 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物研究会ホームページ：<http://bspc-study.com/>
- 2) 土木学会，コンクリートライブラリー 86，1996
- 3) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレスト

- 4) 石田裕一，江崎守，前田悦孝，坂本賢次，松下博通：高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC橋の設計・施工－熊本高森線俵山4号橋－，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.3，pp.45-51，2000
- 5) 上津敏，田中相幸，豊福俊泰：塩害に対応した高耐久性PC構造物の建設－屋嘉比橋上部工工事－，コンクリート工学，Vol.37，No.3，pp.20-23，1999
- 6) 土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅱ）－混和材を用いたプレストレスト・コンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）－，共同研究報告書第472号，2016
- 7) 豊福俊泰，神山徳夫，上津敏，田中和幸，辛軍青，前田悦孝，福地啓太：塩害に対応した高耐久性PC橋の建設と性能評価に関する16年間研究報告，土木学会論文集，Vol.73，No.1，pp.16-35，2017
- 8) 國富康志，石井豪，辛軍青，鳥居和之：ASR促進暴露試験による高炉スラグ微粉末を用いたPC梁の耐荷力特性，プレストレストコンクリート，Vol.57，No.3，pp.68-74，2015
- 9) 蓑田理希，塩谷由明，和田晃一，古川柳太郎：高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートの現場打ち検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.153-158，2004
- 10) 福永靖雄，石塚純，田中正裕，吉村徹：高炉スラグ微粉末を用いた沖縄自動車道・億首川橋におけるリニューアル工事，コンクリート工学，Vol.47，No.2，pp.53-59，2009

【2017年8月30日受付】



刊行物案内

## 会誌「プレストレストコンクリート」講座集 2016年1月

本書は、本工学会が発行する会誌「プレストレストコンクリート」に掲載された連載記「講座」のバックナンバー（1963～2014年）を系統的に整理して単行本化したものです。

「講座」では、プレストレストコンクリートに関連する材料、設計、施工、維持管理、数値解析等、多岐にわたる技術を取り上げ、各分野の専門家による当時の最新技術の紹介や適当な専門書がないテーマの解説がされています。この機会に、過去の貴重で良質な連載記事「講座」を体系的な知識習得にお役立てください。



### 冊子の構成

講座集 1.	建築編
講座集 2.	施工・品質管理編
講座集 3.	施工・品質管理編
講座集 4.	設計編
講座集 5.	材料編
講座集 6.	PCに関する試験および測定入門講座編
講座集 7.	PCの新しい材料入門講座編
講座集 8.	FEM解析・耐震解析・温度応力解析編
講座集 9.	よくわかる補修・補強・非破壊検査編
講座集 10.	プレストレッシングの基本編
講座集 11.	わかりやすいPC技術編

セット販売価格（全11冊 化粧箱入）  
 定価 27,000円＋税／送料 1,500円  
 会員特価 22,000円＋税／送料 1,500円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会