

報告 高炉スラグ微粉末(6000cm²/g)を用いた PC プレキャスト床版性能確認試験報告

高野 茂晴*1・酒井 秀昭*2・横山 博司*3・前田 悦孝*4

要旨：高炉スラグ微粉末は，コンクリート構造物の耐久性向上に寄与すると共に，製鉄所の副産物であることより環境への負荷を低減できる材料である。このような特徴に着目して，鋼少数鉋桁道路橋用のプレストレストコンクリート（以下 PC と記す）プレキャスト床版に高炉スラグ微粉末を早強ポルトランドセメントの代替として適用することについて検討を行った。本検討においては，高炉スラグ微粉末を用いるとポルトランドセメントの場合に比較して大きいと言われる収縮特性に特に着目して，各種材料実験および実物大 PC プレキャスト床版製作試験を実施し，その適用性を検証した。

キーワード：高炉スラグ微粉末，プレストレストコンクリート，プレキャスト床版

1. はじめに

第二東名・名神高速道路においては，厚板鋼材の製造技術および溶接技術の進歩による主桁の大断面化により，主桁本数を減少させ，製作の合理化による工事費の削減および省力化等を目的に，図 - 1 に示すような PC 床版を有する桁間隔 6m 程度の少数鉋桁構造が開発され，全面的に採用されている。そして，この PC 床版の更なる合理化・工期の短縮及び工事費の削減

を目的として，図 - 2 に示すような工場製作 PC プレキャスト床版が採用されている。

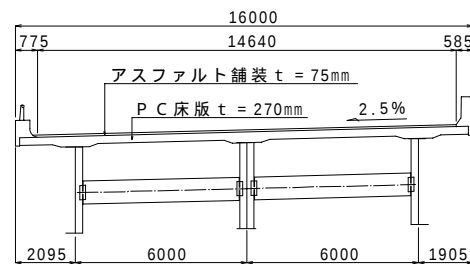


図 - 1 鋼少数鉋桁(3 主桁)標準断面図

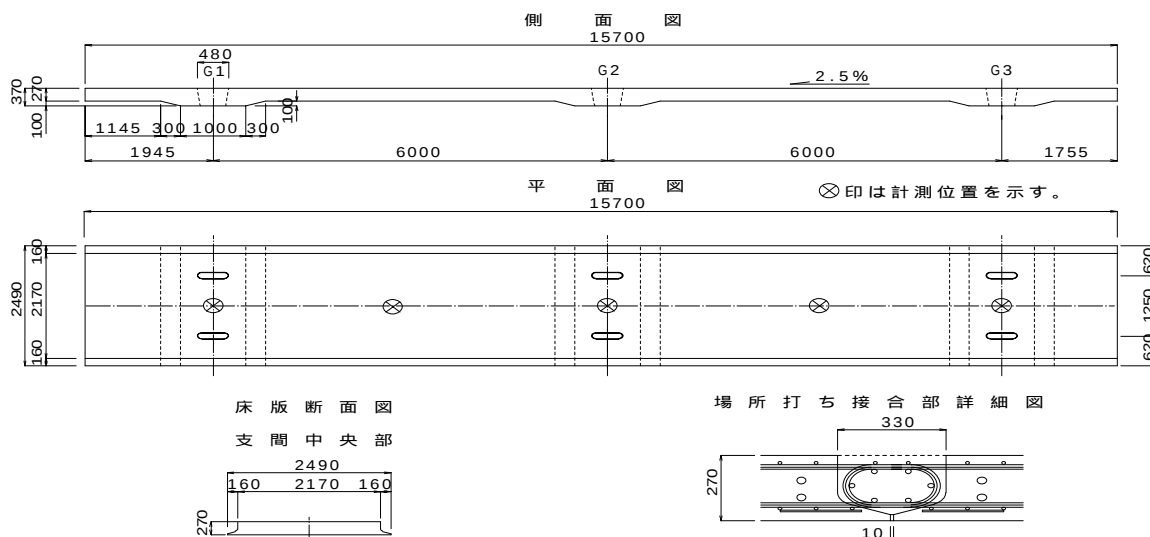


図 - 2 PC プレキャスト床版

*1 株式会社安部工業所技術本部技術部（正会員）

*2 JH日本道路公団中部支社豊田工事事務所

*3 株式会社安部工業所技術本部（正会員）

*4 新日鐵高炉セメント株式会社技術開発センター

PC プレキャスト床版に用いるコンクリートは、プレテンション方式であること等から、一般に早強ポルトランドセメントによる設計基準強度 50N/mm^2 の高強度コンクリートが用いられている。

早強ポルトランドセメントは、自然地盤を掘削し石灰岩を採取するとともに、その製造過程において多量の CO_2 を排出すること等により、環境への負荷が比較的大きい材料である。

近年、高強度コンクリートに高炉スラグを利用するため、初期材齢の強度の増加を目的として通常の高炉スラグをより微粉末としたタイプの製品が開発されており、PC プレキャスト製品に試験的に採用されている¹⁾。高炉スラグ微粉末を早強ポルトランドセメントの代替（置換率 50%）として用いる場合は、高炉スラグが製鉄所の副産物であることから、環境への負荷が大幅に低減できること、一般に耐久性が向上することなどの大きなメリットがある。

本報告は、高炉スラグ微粉末を早強ポルトランドセメントの代替として用いる PC プレキャスト床版への適用について、検討を行った性能確認試験の報告である。

2. 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの特性

高炉スラグ微粉末は早強ポルトランドセメントと混合した場合、早強ポルトランドセメント単体では得られない以下の優れたコンクリートの特性が得られる⁵⁾。

- 1) 水密性が向上する。
 - 2) 塩化物イオン浸透抑制による鉄筋の発錆抑制に効果がある。
 - 3) アルカリシリカ反応の抑制に効果がある。
 - 4) 粉末度の大きい高炉スラグ微粉末を使用することにより、ブリージングが少なく流動性に優れる。
 - 5) 初期強度の向上を図り、高強度のコンクリートを得ることができる。
- 一般に高炉セメントに用いられる高炉スラグ

の比表面積は $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度であるが、今回対象とするのは $6000\text{cm}^2/\text{g}$ であり、早強ポルトランドセメントを使用した配合に対して 50% 程度置き換えても、若干の配合の修正で同等程度の強度が発現する⁵⁾。

3. 高炉スラグ微粉末の PC プレキャスト床版への適用検討

3.1 適用に当たっての課題と検討

図 - 2 に示す PC プレキャスト床版に高炉スラグ微粉末を適用するに当たっては、このような大型床版への適用実績がないことから、以下の課題があると考え、性能試験を実施した。

- 1) コンクリートの配合
- 2) コンクリートの基本物性（特に収縮特性）
- 3) 実床版の施工性
- 4) 実床版の収縮特性

特に、高炉スラグ微粉末を用いるとポルトランドセメントの場合に比較して大きい⁸⁾と言われる収縮特性に着目して検討を行った。

本性能確認試験では、現状の早強ポルトランドセメントのみを用いた配合のコンクリート（表 - 1 参照）と高炉スラグ微粉末を用いた配合（早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ を 50% 置換の配合）のコンクリートを比較することにより適用の妥当性を検討するものとした。

表 - 1 早強ポルトランドセメントの示方配合（設計基準強度 50N/mm^2 ）

スラグ 置換率 (%)	水結合 材 比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
			水 W	セメント C	スラグ BFS	細骨材 s	粗骨材 G
0	37.0	39.0	146	395	-	694	1101

尚、本報告では、前者の配合を“H”もしくは“早強”，後者の配合を“H+BFS”もしくは“高炉”と標記する。また、温度補正を行う場合のコンクリート線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/$ とした。

3.2 コンクリートの配合

(1) 配合条件

高炉スラグ微粉末を PC プレキャスト床版へ適用するに当たり、以下の項目を配合条件として配慮し、製作 PC 工場において、適切なコンクリート配合の検討を行った。

- 1)PC 導入時圧縮強度；材齢 16 時間で 35N/mm²
- 2)配合強度；58N/mm²（標準養生 材齢 28 日）
- 3)高炉スラグ微粉末置換；置換率 50%
- 4)スランプ；作業性を考慮し、12±2.5cm
- 5)空 気 量；4.5±1.5%
- 6)使用材料；表 - 2 参照

表 - 2 高炉スラグ微粉末使用 PC プレキャスト床版使用材料

セメント (C)	早強ポルトランドセメント(密度3.13g/cm ³)
細骨材 (S)	揖斐川産川砂(密度2.61g/cm ³)
粗骨材 (G)	揖斐川産川砂利(密度2.64g/cm ³)
混和剤 (AD)	HP-11(密度1.09g/cm ³)
A E 剤 (AE)	AE300
水 (W)	上水道水(密度1.00g/cm ³)
混和材 (BFS)	高炉スラグ微粉末 粉末度6000cm ² /g (密度2.91g/cm ³)

(2) 配合の検討

PC 工場の実績に基づいた水セメント比 W/C = 36%，細骨材率 s/a = 41.5%を基本配合とし、W/C を±3%に振った 3 種類の配合について試し練りを実施し、(1)配合条件の強度を満足する W/C = 34%の表 - 3 に示す配合を決定した。

この表 - 3 に示す配合について PC 工場での設備を用いて実機練りを実施し、本配合が PC プレキャスト床版製造における配合条件を満足することも確認した。

表 - 3 試し練りより決定した示方配合

スラグ 置換率 (%)	水結合 材 比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	スラグ BFS	細骨材 s	粗骨材 G
50	34.0	41.1	142	209	209	723	1048

3.3 コンクリートの収縮

(1) 概要

試し練りで決定された配合のコンクリートについて、試験室における乾燥収縮試験を行い、コンクリートの収縮特性に関する確認を行った。本収縮特性に関しては PC プレキャスト床版を

製造する PC 工場の標準的蒸気養生（図 - 3 参照）も考慮した。

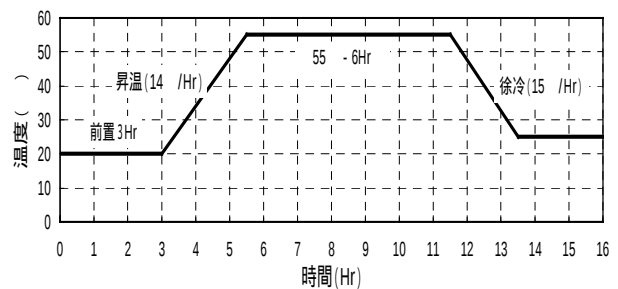


図 - 3 蒸気養生の温度パターン

本試験室における収縮特性試験に用いたコンクリートについて、圧縮強度、弾性係数に加えて引張強度、曲げ引張強度の各強度特性に関して試験を実施し、高炉と早強が同等の強度性状を示すことも確認した。これらの内、圧縮強度試験結果を図 - 4 に示す。

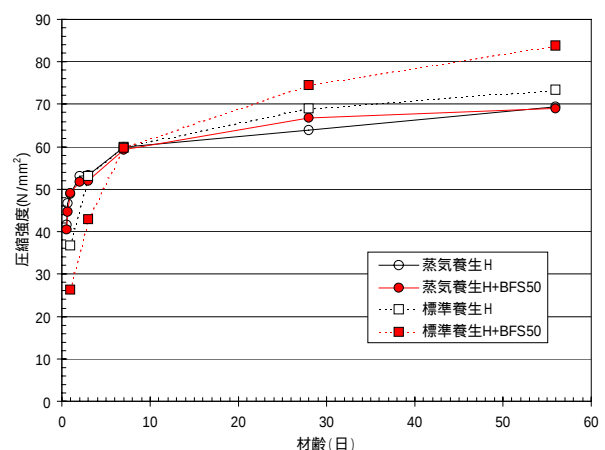


図 - 4 圧縮強度試験結果

(2) 乾燥収縮

乾燥収縮の測定は、JIS A 1129「コンクリートの長さ変化試験方法」に準じて測定した（材齢 7 日を基長）。ただし、蒸気養生の場合には実際の製品環境を考慮して、打込み蒸気養生後 16 時間で脱型し、材齢 24 時間を基長として計測を行った。計測結果を図 - 5 に示す。

本結果より、蒸気養生の場合、高炉と早強は同等の傾向を示す。標準養生の場合、材齢 4 週までは高炉の方が大きい傾向を示すが、材齢とともに高炉と早強の乾燥収縮と材齢の関係は同等となる傾向を示すことが確認できた。

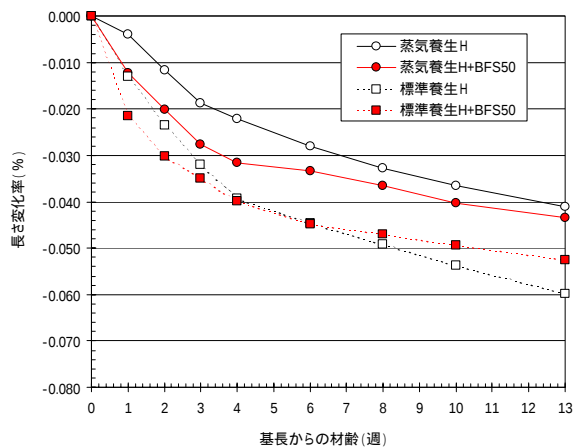


図 - 5 コンクリートの乾燥収縮

本試験より乾燥収縮に関しては，高炉スラグ微粉末を用いても長期的には従来と同様に取り扱えばよいと考えられる結果が得られた。

3.4 実床版の施工性

(1) 概要

図 - 2 に示す PC プレキャスト床版へ高炉スラグ微粉末を適用するにあたり PC 工場が高炉と早強の実物大試験体をそれぞれ 1 体製作し，実床版の施工性について確認した。

今回製作した実物大試験体の状況を写真 - 1 に示す。



写真 - 1 実物大試験体の保管状況

(2) 施工性について

PC プレキャスト床版の一般的な製造工程は，型枠セット 鉄筋，PC 鋼材配置 PC 鋼材緊張 コンクリート打設 蒸気養生 プレストレス導入 製品保管の順序である。～ の作業を 24 時間で行う工程が最も効率的である。

本工程を考慮し，3.2(1)に示すようにプレス

トレス導入強度 35N/mm^2 発現に必要な蒸気養生時間を 16 時間としてコンクリート配合を決定した。

本実物大試験体製作において，コンクリート打設，養生，プレストレス導入，および製品保管等の作業性に関して高炉と早強について比較した結果，両者の作業性に差がないことが確認できた。そして，今回の実物大試験体製作(製作から製品保管)において高炉スラグ微粉末を用いた PC 床版に有害な変形，ひびわれなどが観察されていないなど，早強の試験体と比較して特に問題となる点も認められていない。

よって，高炉スラグ微粉末の PC プレキャスト床版への適用は実用的に問題ないと考えられる。

3.5 実床版における収縮特性

(1) 概要

従来より高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは，収縮（自己収縮を含む）が大きいと言われている⁸⁾。

そこで，3.4 に示す実物大試験体製作時において，蒸気養生開始よりコンクリートのひずみを計測し実床版における収縮特性の確認を行った。

(2) ひずみ計測結果

図 - 2 の G1，G2，G3 およびその中間の 5 点で，床版中央ラインの断面中央部でひずみを計測した。各測定位置でのひずみ計測結果は同様の挙動を示した。G1 と G2 の中間点計測結果の高炉と早強の比較を図 - 6，図 - 7 に示す。

図 - 6 には，蒸気養生開始からのひずみ計測位置でのコンクリート温度履歴，および外気温度変化を示す。

図 - 7 には，計測位置での収縮（自己収縮，乾燥収縮），プレストレス，プレストレスのクリップ，および温度変化の影響を全て含んだ実床版コンクリートのひずみ履歴を示す。

図 - 6 と図 - 7 の比較より材齢 3 日までは実床版コンクリートのひずみは蒸気養生温度履歴

の影響を強く受けていると考えられる。

この蒸気養生による温度の影響を分析することは難しく、実床版コンクリートの収縮は、図 - 5 の材齢 1 日および 3 日における高炉と早強の長さ変化率に差がないことから、蒸気養生温度の影響が薄れる材齢 3 日を基点として、計測ひずみを補正して求めるのが適切であると考えられる。

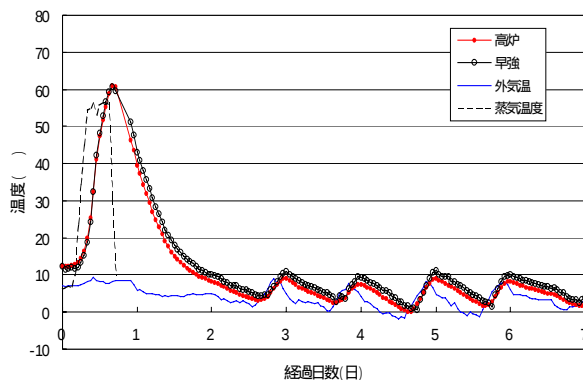


図 - 6 実床版の温度履歴

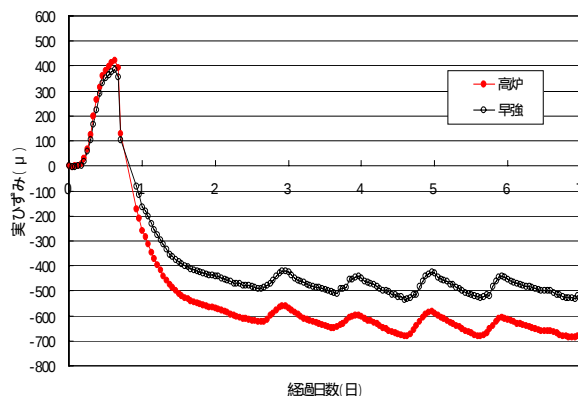


図 - 7 実床版の全実ひずみの挙動

(3) 実物大試験体の収縮特性

前項(2)の検討結果より、図 - 7 に示す全ひずみ履歴を図 - 6 の温度履歴に基づき温度補正を行い、材齢 3 日を基点として実床版コンクリート収縮ひずみの履歴を求めた。高炉と早強のこの収縮ひずみの比較を図 - 8 にまとめて示す。

ただし、ここで求めた収縮ひずみには、プレストレスによるクリープの影響が含まれる。

プレストレス導入は、プレストレス導入時コンクリート強度管理としており、クリープ・乾燥収縮は、蒸気養生を行う場合においても大差

ないと考えられる。よって、現行の道路橋示方書の設計値⁹⁾(材齢 4~7 日の乾燥収縮=200 μ, クリープ係数=2.6)を用いて収縮量を求め、図 - 8 に実床版における設計ひずみとして示す。

また、クリープ係数については高炉と早強ではほとんど差異がないことが確認されている⁵⁾。図 - 8 より以下のことがわかる。

- 1) 3.3 の材料試験と同様に高炉は早強に比較し初期において収縮は大きいが、長期では同等となる。
- 2) 高炉と早強の計測ひずみは、現行の設計条件より算定した実床版の設計収縮ひずみより小さく、この設計値を満足する。

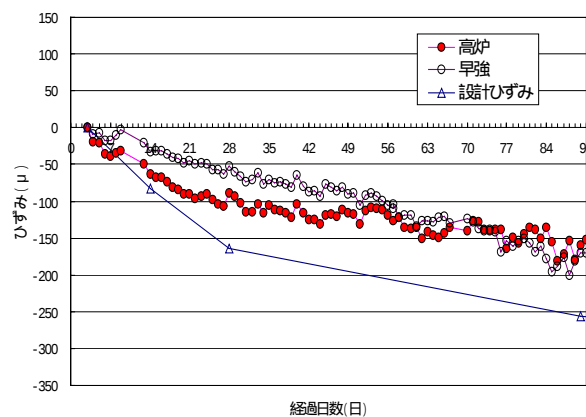


図 - 8 実床版の材齢 3 日を基点とした補正ひずみと設計ひずみ

以上の実物大試験体のひずみ計測結果より、高炉スラグ微粉末を用いた時の収縮量は、長期的には早強と同等の収縮量を示すこと、および PC プレキャスト床版の設計に考慮している設計収縮量を満足することより、高炉スラグ微粉末の PC プレキャスト床版への適用は、設計的には問題ないと考えられる。

3.6 検討結果のまとめ

高炉スラグ微粉末を PC プレキャスト床版へ適用するにあたり、配合、養生条件を決定し実物大試験体製作、および蒸気養生を考慮した材料試験を行い、下記事項が確認された。

- 1) 早強の配合よりも水セメント比を 3%低い配合とすることにより、早強と同等以上の初期強度特性が得られる高炉の配合を決

定することができた。

- 2) コンクリートの収縮に関する材料試験により、高炉の方が初期収縮量は大きい、長期的には高炉と早強の収縮量は同等になると推察される結果が得られた。
- 3) 実床版を用いて、コンクリート打設、プレストレス導入、および製品保管に関する作業性を検討し、高炉は早強と同等の施工性であることを確認した。
- 4) 実床版において収縮特性を計測し、材料試験結果と同様に高炉の方が早強よりも、初期において収縮量が大きい、高炉の収縮量は、現行の設計値を満足すること、および長期では早強と同等となることより、高炉の採用は設計的に問題ないことが確認された。

以上のように、高炉スラグ微粉末を PC プレキャスト床版へ適用するに当たり考えられる課題について検討し実用的に問題ないことが確認された。

4. まとめ

第二東名・名神高速道路における鋼鈑桁橋において、製作の合理化、コスト縮減、および省力化等を目的として工場製作 PC プレキャスト床版が採用されている。

近年 PC プレキャスト製品への採用実績のある高炉スラグ微粉末 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ には、原材料である高炉スラグが製鉄所の副産物であることより環境への負荷が大幅に低減できること、耐久性が向上すること等の利点があることから、本 PC プレキャスト床版に適用することを検討した。

配合試験、材料実験、および実物大 PC プレキャスト床版製作確認試験実施において、現状の早強ポルトランドセメントのみを用いた配合のコンクリート（早強）と高炉スラグ微粉末を用いた配合（早強ポルトランドセメント＋高炉スラグ微粉末 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ を 50% 置換の配合）のコンクリート（高炉）について比較し、適用の

妥当性を検討し、PC プレキャスト床版への高炉の採用は問題ないことが確認された。

今後、本検討結果に基づき、環境保全、耐久性向上の有効性により PC プレキャスト床版への適用と実用化が図られ、高炉スラグ微粉末の幅の広い活用が推進されることを期待するものである。

5. おわりに

今回の実験研究に当たり、二羽淳一郎 東京工業大学教授、梅原秀哲 名古屋工業大学教授、藤井卓 東京農工大学名誉教授に計画からまとめに至るまで御指導をいただいたことに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 水口、藤田：第二東名・名神高速道路の橋梁概要 - 名古屋建設局 -、プレストレストコンクリート、Vol.41, No.2, pp.27 ~ 33, 1999
- 2) 石田、江崎、前田：高炉スラグ微粉末を用いた PC 橋の設計・施工、プレストレストコンクリート、Vol.42, No.3, pp.45 ~ 50, 2000
- 3) 藤井：環境にやさしいコンクリート、pp.85 ~ 91, 鹿島出版会, 2000
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリ - 第 86 号、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針, 1986
- 5) 日本材料学会：報告書「高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発」, 1998
- 6) 鉄鋼スラグ協会：報告書「鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用について」, 1991
- 7) 日本コンクリート工学協会；自己収縮研究会委員会報告, 1996.11
- 8) 田澤、宮沢、佐藤：高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの自己収縮、第 19 回セメントコンクリート研究討論会論文報告集, pp.23 ~ 28, 1992
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書 コンクリート橋編, 1986.12