

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

日本道路公団中部支社豊田工事事務所 酒井 秀昭
 (株)安部工業所技術本部 和佐 勇次郎
 同 上 横山 博司
 (株)安部工業所技術本部技術部 正会員 ○高野 茂晴
 新日鐵高炉セメント(株) 前田 悦孝

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 程度の少数鉸桁構造が開発され、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。

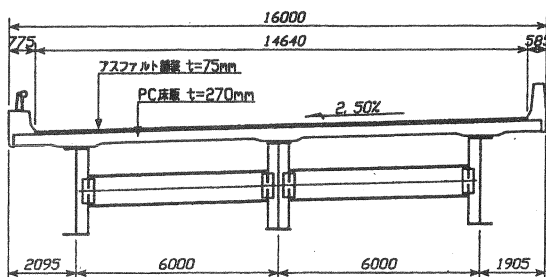


図-1 鋼少数鉸桁(3主桁)標準断面図

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を用いること等から、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/mm² 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 CO₂ 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。

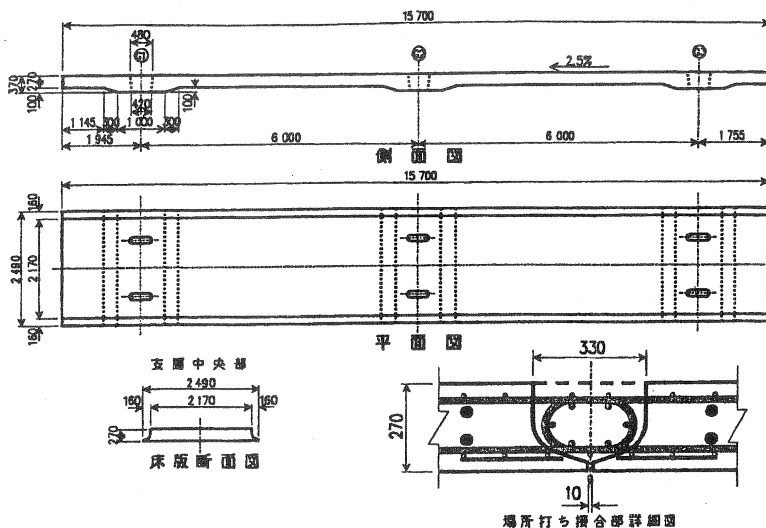


図-2 PC プレキャスト床版

2. 高炉スラグ微粉末の適用に関する課題

高炉スラグ微粉末は普通ポルトランドセメントと混合した場合、普通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。²⁾

- 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。

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験がないことを考慮し、以下の4項目に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の検討
- 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³⁾と言われる収縮特性に着目して検討を行った。

本報告では、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 6000cm²/g を 50%置換の配合) のコンクリートについての比較検討により適用の妥当性を検討するものとした。

尚、本報告書では、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”と表記する。また、温度補正を行う場合のコンクリート線膨張係数は 10×10⁻⁶/°Cとした。

3. コンクリートの配合

(1) 配合条件

以下の配合条件にて、PC工場において高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合の検討を実施した。

- ・高炉スラグ微粉末置換；置換率 50%
- ・PC 導入時圧縮強度；材齢 16 時間で 35N/mm²
- ・配合強度；58N/mm² (標準養生 材齢 28 日)
- ・スランプ；作業性を考慮し、12.0±1.0cm
- ・空気量；4.5±0.5%
- ・使用材料；表-1 参照

表-1 使用材料

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

(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%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高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合として、W/C=34%の表-2に示す配合を決定した。

表-2 試し練りより決定した示方配合

結合材の種類	スラグ置換率 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能減水剤 (・C%)
				水 W	セメント C	スラグ BFS	細骨材 S	粗骨材 G	
H+BFS50	50	34.0	41.1	142	209	209	723	1048	0.60

また、本示方配合に

ついて、PC工場において
実機練りをし、必要配合
条件を満足することを確
認した(表-3参照)

表-3 実機練り試験結果

	フレッシュコンクリートの性状			コンクリートの圧縮強度(N/mm ²)	
	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	材齢 16h (蒸気養生)	材齢 28日 (標準養生)
試験結果	13.0	3.6	15.1	42.7	67.1
配合条件	12.0±2.5	4.5±1.0	-	35 以上	58 以上

4. コンクリートの物性

(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および自己収縮試験を行い、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)を考慮した。

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ついても試験を実施した。

高炉と早強が同等の強度性状を示すことを確認した(図-4参照)。

(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。蒸気養生を行った場合は、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、①蒸気養生の場合、高炉と早強は同等の傾向を示す。②標準養生の場合、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。

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従来と同様に取り扱いえよとえられる結果が得られた。

(3) 自己収縮

自己収縮の測定は、JCI自己収縮研究委員会報告の「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」に準じて測定した。⁴⁾

供試体寸法は、10×10×40cmとし、図-7に示すように鋼製型枠の底面の内側にテフロンシート(厚さ1mm)両端部の内側にポリスチレンボード(厚さ3mm)を入れ、次に型枠内側側面、端面および底面にポリエステルフィルム(厚さ0.1mm)を入れ、型枠の拘束を防いだ。供試体の中心に埋め込み歪計を設置し、供試体中心部の温度も測定した。コンクリートは成型後直ちに仕上げ面をポリエステルフィルムで覆った。脱型後は、供試体をアルミ箔粘着テープ(厚さ0.05mm)でシールし、恒温恒湿室内(20±2°C、60±5%RH)で測定した。

温度20°C一定条件で試験した標準養生の場合の始発時を基点

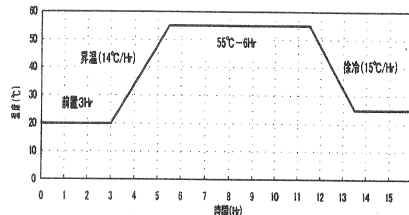


図-3 蒸気養生の温度パターン

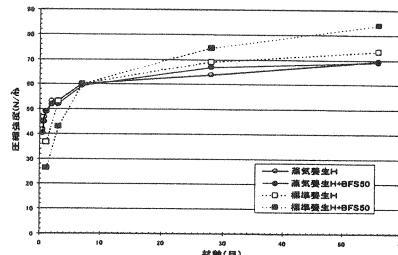


図-4 圧縮強度試験結果

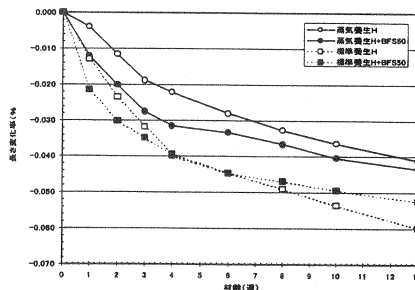


図-5 コンクリートの乾燥収縮

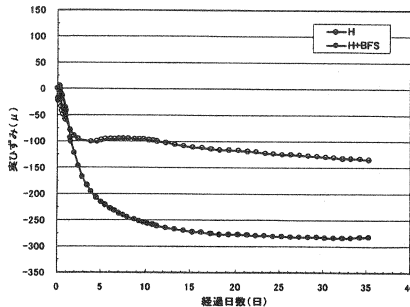


図-6 始発時点の自己収縮
(雰囲気温度20°C一定(蒸気養生))

とした試験結果を図-6 に示す。

本試験結果より①早強の場合は、材齢3日までに収縮量がほぼ収束し、収縮量は 150μ 弱である。②高炉の場合、3日までは早強と同等であるが材齢20日前後まで収縮が続き、収縮量は 300μ 弱であり、早強に比較して 150μ 程度大きくなっている。

(4) まとめ

高炉と早強コンクリートの物性としては、①乾燥収縮に関しては同等である。②自己収縮は、早強に比較して高炉が大きく、その値は 150μ 程度である。また、早強の自己収縮は材齢3日程度の初期にほぼ終了するが、高炉は、材齢20日前後まで自己収縮が増加する。

5. 実物大試験体による製造確認試験

(1) 概要

図-2 に示すPCプレキャスト床版についてPC工場にて実物大試験体の製造確認試験を下記項目を目的として実施した。製作PC床版の保管状況を写真-1 に示す。

- ①プレストレス導入時を含む製作時作業性
- ②製作時および保管時のPC床版収縮特性

(2) 製作時作業性の確認

プレキャストPC床版の一般的な製造工程を図-8 に示す。工程は、製造効率を考慮して毎日コンクリート打設を行うように計画される。このため、プレストレス導入時コンクリート強度を確保する養生時間が重要となる。

本実物大試験体製作に置いて、コンクリート打設、養生、コンクリート強度性状(表-4参照)、および製品保管等に関する作業性については、高炉スラグ微粉末を用いた場合も従来と同等であることを確認した。

表-4 実物大試験体コンクリート強度試験結果

養生条件	材齢	圧縮強度(N/mm ²)	要求性能(N/mm ²)
蒸気養生	1日(16h)	39.7(高炉)	≥35
		36.8(早強)	
標準養生	28日	66.1(高炉)	≥58
		61.8(早強)	

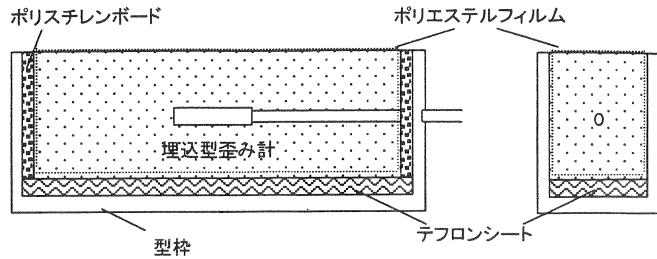


図-7 自己収縮測定供試体の打込み時の状況

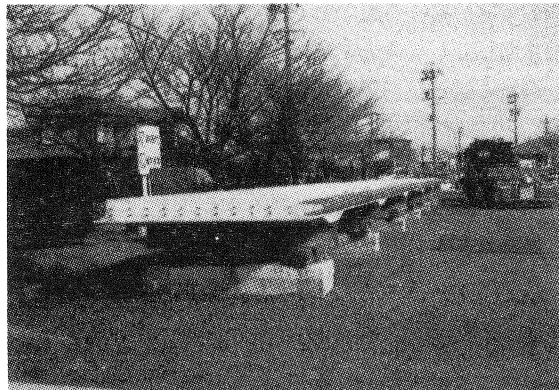


写真-1 実物大試験体の保管状況

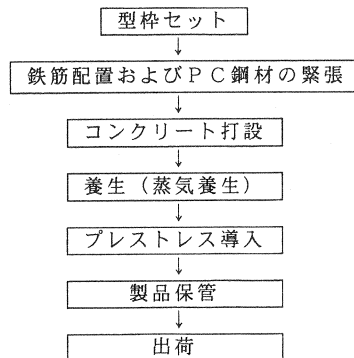


図-8 PCプレキャスト床版の製造工程

(3) 実床版における温度および収縮特性

従来より高炉スラグ微粉末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。

本製造確認試験では、
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お
よび温度計測を実施し実
床版における収縮特性の
確認を行った。

図-9 に実物大試験体ひ
ずみ計測位置を示す。

蒸気養生開始直後からのひずみ計測結果の一例を図-10~12 に
示す。ひずみの挙動は、全ての計測点で同様な傾向を示すことよ
り本計測位置、図-9 の②にて検討する。

図-10 よりコンクリートの全ひずみ履歴は材齢3日前後で収縮
から膨張側に変化し再び収縮側に変化していることがわかる。こ
れは、図-11 に示すコンクリートの温度履歴が主因であり、材齢
3日前後まで蒸気養生が影響しPC床版と外気温に差が発生してい
ることによるものと考えられる。

蒸気養生の影響が残る材齢3日までは、蒸気養生によるコンク
リート自体の性状、および温度の影響によりコンクリートの収縮
特性を正確に把握することは現状では難しいと考えられる。

ここで、図-12 の高炉と早強の全ひずみ差の挙動において、材
齢1日から3日の変化はそれほど無いことを考えれば、今回の場
合、試験体コンクリート温度が安定する材齢3日を基点として、
試験体の収縮挙動を評価することにより、全体的挙動は把握でき
るものと考えられる。

次に、図-10 に示す全ひずみ挙動と図-11 の温度履歴をもとに、
材齢3日を基点としてコンクリート収縮ひずみの挙動を求める。
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。

現行の道路橋示方書⁵⁾に従い設計値(材齢3日以降の乾燥収縮
=200 μ 、クリープ係数=2.6)による収縮特性を計算し、上記計測
値と併せて図-13 にまとめて示す。本結果より、①高炉は早強に
比較して初期において収縮が大きい長期的には同等となる。
②高炉においても現行道路橋示方書の収縮に関する設計値を満足
することが確認でき、高炉スラグ微粉末のPCプレキャスト床版
への適用は、設計上問題ないと考えられる。

今回の実物大試験体による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、ひびわれなどは確認
されていないなど、現状の早強ポルトランドセメントを用いた試
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。

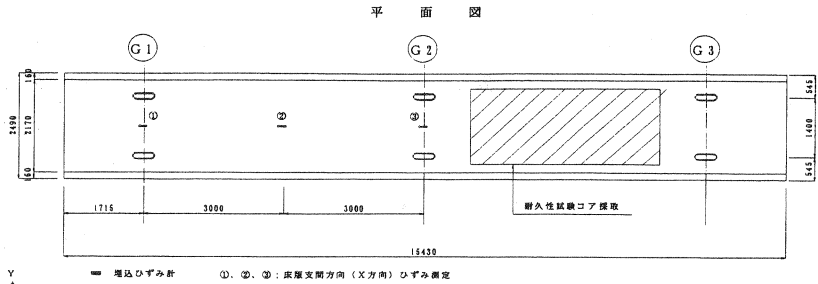


図-9 実物大試験体ひずみ計測位置

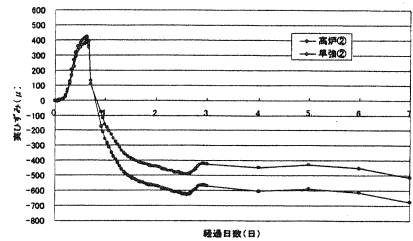


図-10 実床版の全ひずみの挙動

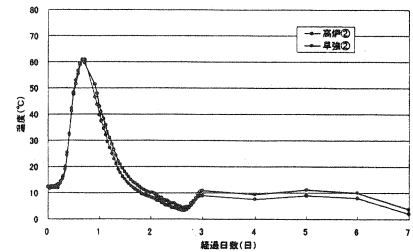


図-11 実床版の温度履歴

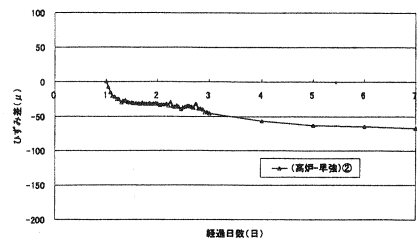


図-12 高炉と早強のひずみ差の挙動

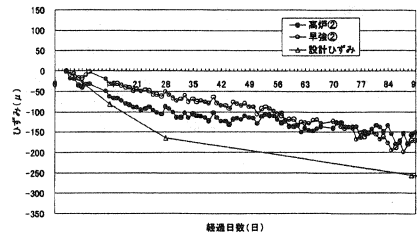


図-13 補正ひずみと設計ひずみ
(材齢3日を基点)

(4) 実床版確認試験のまとめ

実物大試験体の耐荷力を確認するために図-14 に示す方法により載荷試験を行い、高炉スラグ微粉末を用いた PC 床版と早強 PC 床版を比較して同等の耐荷力があることを確認した (図-15 参照)。

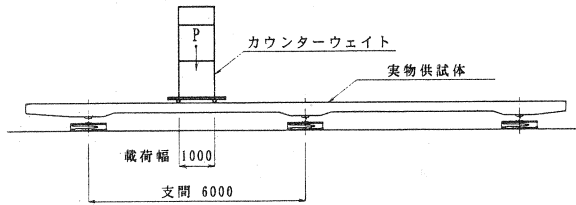


図-14 載荷試験要領図

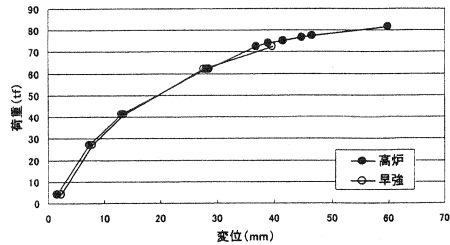


図-15 荷重と変位の関係

また、今回作成した図-9 の実物大試験体より資料を採取し、中性化試験、塩素イオン浸透試験を実施し、中性化については早強と同等であり問題なく、塩素イオン浸透深さについては早強に比較し少ない結果が得られており、従来の実績で示されている耐久性向上に関しても確認されている。²⁾

以上ように、高炉スラグ微粉末を PC プレキャスト床版へ採用するにあたり、考えられる課題について検討し従来と同等であることが確認されたことより、適用に関して問題ないと考えられる。

6. まとめ

高炉スラグ微粉末 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ を早強ポルトランドセメントの代替えとして PC プレキャスト床版へ適用する利点として耐久性向上、地球環境の保全が挙げられる。

今回の実物大試験体製作等の確認試験により、収縮特性、強度特性および施工性に関して問題ないことが確認された。

今後、上記に示す有効性により 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。

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頂いたことに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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 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
- 2) 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コンクリート構造物の開発、1998.3
- 3) 田澤栄一、宮沢伸吾、佐藤剛、橋本聖三：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
- 4) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告、1996.11
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編、平成8年12月