

報告 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

蓑田 理希^{*1}・塩谷 由明^{*2}・和田 晃一^{*3}・古川 柳太郎^{*4}

要旨：高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートは耐塩害性などに優れており，PC 構造物において，早強ポルトランドセメントと組合され適用されつつある。しかし，現場打ちへは，ほとんど実施されていない。そこで，高炉スラグ微粉末 6000 と早強ポルトランドセメントの組合せにおいて，強度発現性に影響があると考えられる寒中時の強度発現性状を室内試験により確認し，その結果を踏まえて配合や養生手法などを検討し，PC 構造物の現場打ちに適用した。その結果を報告する。

キーワード：高炉スラグ微粉末，強度発現，養生，冬季施工，現場打ち。

1. はじめに

PC 構造物はプレストレスによりひび割れを制御できることや，RC 構造物と比較して高強度のコンクリートが用いられていることなどから，耐久性が高い構造である。しかし，沿岸部や寒冷地で凍結防止剤が散布される環境では，コンクリート自体が劣化する場合があることが分かっている。その対策として，高炉スラグ微粉末を用いて耐久性向上を目指した PC 構造物の採用事例が増えている。しかし，事例のほとんどが工場製品であり，現場打ちでは実施されていないのが現状である。これは，実施工の寒中および暑中条件での諸性状のデータがほとんどないためであると考えられる。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを現場打ちに適用するためには，それらのデータを得ることが必要である。そこで，今回，冬季における高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの現場打ちを実施する機会を得たため，室内試験において高炉スラグ微粉末 6000 と早強ポルトランドセメントの組合せで，寒中を想定した条件での強度発現性を確認し，その結果を踏まえて現場打ちを実施したので報告する。

2. 室内試験

2.1 使用材料

結合材は，早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 を組み合わせて用いた。前者は PC 構造物で一般的に用いられており，後者は粉末度が高く初期強度発現性に優れ，比較的容易にかつ安定して供給されることが選定理由である。細骨材は砕砂と山砂を 30 : 70 で混合して

表-1 使用材料

材 料	摘 要	
セメント	早強ポルトランドセメント	
混和材	高炉スラグ微粉末 6 0 0 0	
細骨材	砕砂	産地・・・白山 FM=2.74
	山砂	産地・・・九戸郡野田村 FM=2.85
細骨材混合比 (砕砂 : 山砂 = 30 : 70)		
粗骨材	砕石	産地・・・白山 最大寸法 25mm
混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系)	

*1 (株) 安部工業所 技術開発部技術開発課長補佐 (正会員)

*2 (株) 安部工業所 技術開発部次長

*3 (株) 安部工業所 東北支店工務部工事課主任

*4 新日鐵高炉セメント (株) 生産技術部部长

表-2 配合

配合	水結合材比 W/B (%) (B=C+BFS)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m ³)					混和剤 A (C×%)
			水 W	セメント C	高炉スラグ 微粉末 BFS	細骨材 S	粗骨材 G	
H	43	38.7	170	396	—	663	1107	1.1
H+BFS	40	37.6	168	210	210	631	1107	1.0

※H：早強ポルトランドセメントのみの配合

H+BFS6000：早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 の配合

いる。表-1 に使用材料を示す。

2.2 配合

配合は、早強ポルトランドセメントのみの配合を試験練りによって決定し、これを基にして高炉スラグ微粉末 6000 を用いた試験練りを実施して適切な配合を決定した。早強ポルトランドセメントのみの配合は水セメント比が 43%であったのに対して、高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合は、材齢 7 日における必要強度を確保するため、水結合材比を 40%とした。設計基準強度は 36N/mm²であるが、プレストレス導入時強度が材齢 7 日で 27N/mm²であり、水結合材比は後者で決めている。高炉スラグ微粉末 6000 の置換率は強度発現性と耐久性を考慮し、過去の研究や実績¹⁾²⁾³⁾などから 50%とした。表-2 に基とした早強ポルトランドセメントのみの配合と高炉スラグ微粉末を用いた配合を示す。

2.3 試験方法

高炉スラグ微粉末を用いた場合、養生温度が初期強度発現性に影響を与えられ⁴⁾。そこで、冬季の気温条件を想定し、養生条件は 5℃封緘、10℃封緘および標準養生とした。供試体はそれぞれの温度条件の恒温室内で養生を行った。

2.4 試験結果

材齢 28 日まで、各養生条件について圧縮強度試験を実施した。図-1 に材齢と圧縮強度の関係を示す。

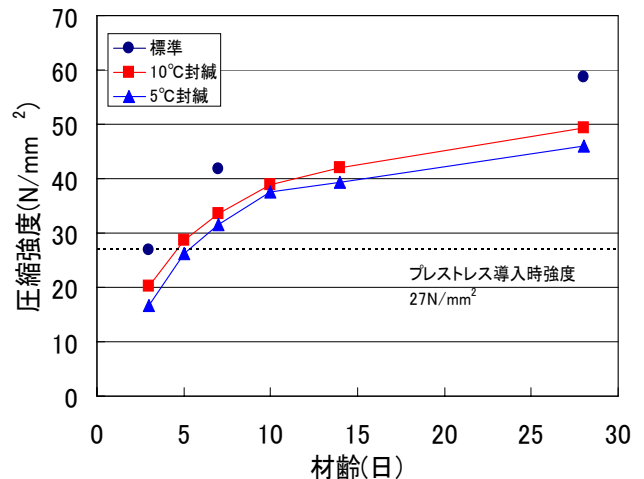


図-1 材齢と圧縮強度の関係

5℃封緘および10℃封緘の両者について材齢 7 日の圧縮強度がそれぞれ 31.5N/mm², 33.5N/mm²であり、プレストレス導入時強度 27N/mm²を上まわっている。この結果から、現場施工時のコンクリート躯体の周辺温度は、5℃以上であれば必要強度を得ることができると考えられる。ただし、本工事においては、コンクリート温度を 10℃以上で管理する事とした。

表-3 設計条件

橋 長	25.400m
桁 長	25.320m
支間長	24.620m
幅 員	5.200m (0.600m+4.000m+0.600m)
荷 重	A 活荷重
雪荷重	w=1.0 kN/m ²
平面線形	R=∞
斜 角	θ=90° 00' 00"

3. 現場施工

3.1 工事概要

対象とした構造物は、東北地方の沿岸部に架かるポストテンション方式単純中空床版橋である。沿岸部の塩害対策を目的に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートが採用された。橋梁の設計条件を表-3に示す。

3.2 養生設備

コンクリート打設時期が11月であり、施工位置の過去の気象データから最低気温が-5℃になることが予測されたため、寒中コンクリートとしての対応を行った。橋全体を上屋で覆い外気の影響を受けにくくするとともに、スチームボイラーおよびジェットファーンレスを用いて給熱および加湿を行うこととした。これらの設備は

外気温が-5℃であっても上屋内雰囲気温度を20℃に保てる能力を確保した。養生設備外観を写真-1に示す。



写真-1 養生設備外観

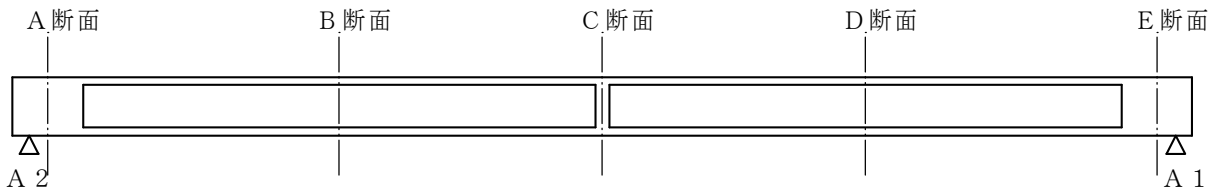


図-2 計測断面位置図

表-4 計測断面位置

計測断面	A	B	C	D	E	外気	
A2支点からの距離(mm)	405	6660	12310	17960	24215	-----	合計
計測箇所数	19	19	12	12	12	1	75
備考	端横桁	標準部	中間横桁	標準部	端横桁	設備外	

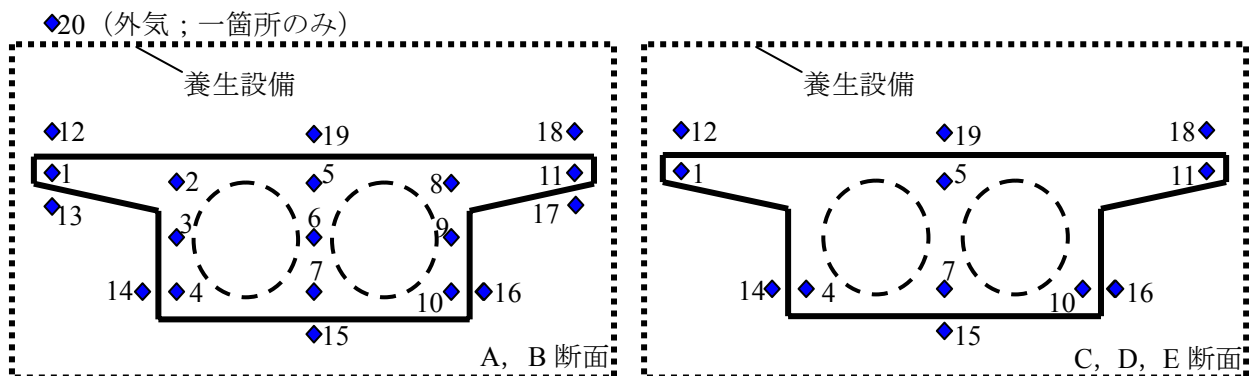


図-3 計測断面詳細図

3.3 温度計測概要

養生設備内について、桁端部、標準部および中間横桁部の各断面のコンクリート温度および雰囲気温度を、養生設備外において外気温度を、それぞれ熱電対を用いて1時間間隔で材齢7日まで計測した。計測断面位置を図-2および表-4，計測断面詳細を図-3に示す。

3.4 コンクリートの打込み

コンクリートの品質目標，製造および運搬，打込み時状況を表-5，6，7にそれぞれ示す。コンクリートの練混ぜ時間は，生コンプラントが初めて扱う配合であったため，余裕をみて90秒とした。

表-5 品質目標

項目	目標値
呼び強度	36
スランプ	12±2.5cm
空気量	4.5±1.5%

表-6 製造および運搬

項目	内容
ミキサ形式	強制二軸
練混ぜ時間	90秒
運搬時間	55分

表-7 打込み時状況

項目	内容
コンクリート温度	14~17℃
外気温	9~17℃
打込み時間	9時~15時
コンクリート量	70m ³

3.5 温度計測結果

コンクリート温度は打設後24時間程度で最高温度となり，その後，材齢7日まで緩やかに降下している。各断面の最高温度はそれぞれの断面中央付近で65.2~58.8℃であった。一方，部材

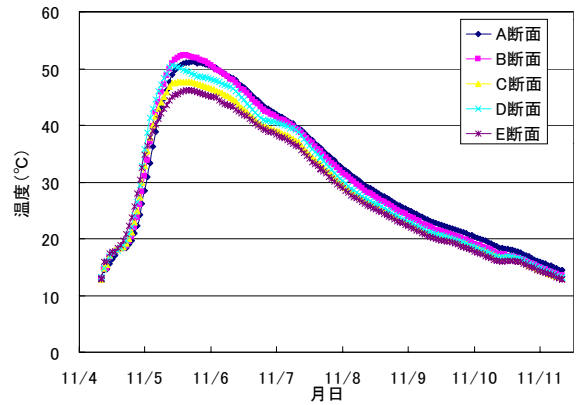


図-4 コンクリート温度

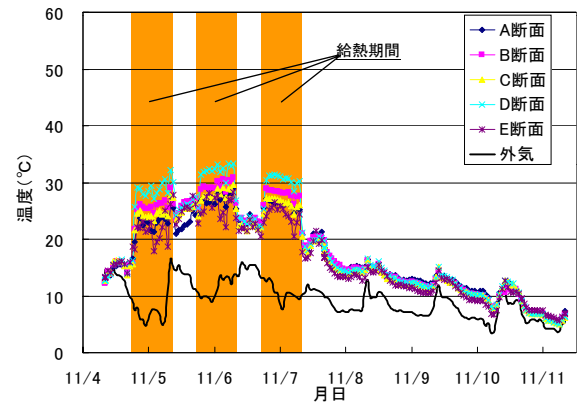


図-5 上屋内雰囲気温度および外気温

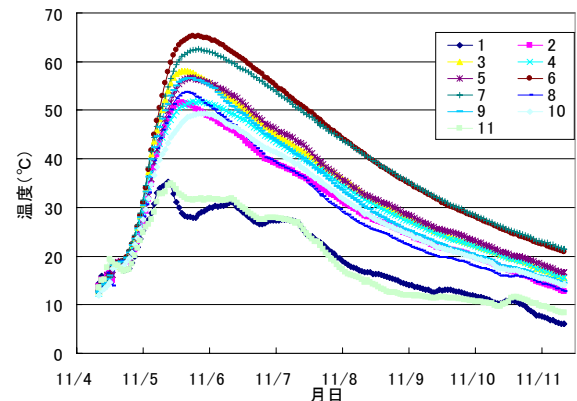


図-6 A断面コンクリート温度（横桁部）

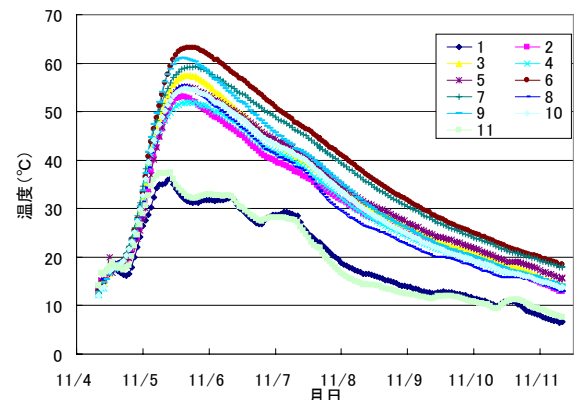


図-7 B断面コンクリート温度

厚が薄い張出し床版先端の最高温度はそれぞれの断面で 43.0～32.6℃であった。また、各断面毎の平均最高温度は 52.3～46.2℃であった。養生設備内雰囲気温度は、スチームボイラーおよびジェットファーンレス使用時の平均温度が 26.9℃まで上昇した。このときの平均外気温は 10.0℃であった。スチームボイラーおよびジェットファーンレスを用いていないときの打設後 4 日から 7 日までの養生設備内平均温度は 12.3℃であり、このときの平均外気温は 7.7℃であった。給熱などを行っていない状態でも、コンクリートの発熱を養生設備で保温することで約 5℃の雰囲気温度差を得ることができたと考えられる。スチームボイラーおよびジェットファーンレスは、外気温が低下すると考えられた夜間（17 時頃～翌日 8 時頃）について材齢 3 日まで実施した。各断面のコンクリート温度計測結果を図-4 に、上屋内雰囲気温度および外気温を図-5 に示す。また、横桁部と標準部のそれぞれの断面でのコンクリート温度計測結果を図-6, 7 に示す。図-6, 7 の結果の凡例 1～11 と断面位置 A, B は、3.3 温度計測概要で示す位置と対応している。

3.6 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験供試体を養生設備内および養生設備外に設置し、それぞれの圧縮強度を計測した。養生設備内に設置した供試体はコンクリート躯体上面にて養生を行った。その結果、養生設備内で養生を行った供試体の圧縮強度は 34.4N/mm²であり、プレストレス導入時必要強度 27N/mm² を満足した。一方、養生設備外で養生

表-8 圧縮強度および雰囲気温度計測結果

		養生設備内	養生設備外
圧縮強度 (N/mm ²)	σ7	34.4	31.1
	σ28	46.4	—
雰囲気 温度 (℃)	最大	33.4	16.5
	最小	5.1	3.4
	平均	17.2	9.3

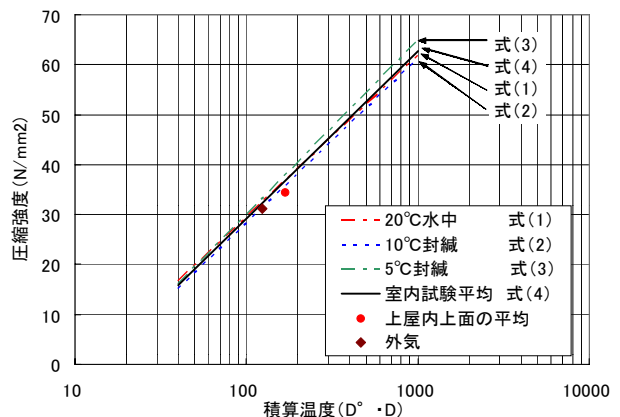


図-8 積算温度と圧縮強度の関係

を行った供試体についてもプレストレス導入時必要強度を上まわる 31.1N/mm² を記録した。これは外気温が、最低気温 3.4℃、養生期間中の平均気温 9.3℃であった影響によるものと考えられる。しかし、養生設備内の雰囲気温度および圧縮強度が外気中の場合と比較してともに大きくなっていることから、養生設備の効果により強度発現性状が改善されたことが充分推察できる。圧縮強度試験結果および雰囲気温度を表-8 に示す。また、積算温度と圧縮強度の関係を図-8 に示す。図中の直線は、室内試験の結果から求めた標準養生、10℃封緘および5℃封緘の近似式である。それぞれの近似式を式(1)、式(2)、式(3)に示す。なお、式中の x は積算温度、y は圧縮強度を示す。

$$y = 14.044 \ln(x) - 35.183 \quad \text{式(1)}$$

$$y = 14.337 \ln(x) - 37.785 \quad \text{式(2)}$$

$$y = 15.178 \ln(x) - 40.010 \quad \text{式(3)}$$

これらの直線はよく一致しており、平均すると式(4)で表される。

$$y = 14.520 \ln(x) - 37.659 \quad \text{式(4)}$$

各点は材齢 7 日での現場計測の値である。これらの積算温度の算出⁵⁾は、養生設備内に配置された供試体に対しては、打設したコンクリート上に供試体を置いたため上屋内の上面のみの雰囲気

気温を用いて算出している。養生設備外の供試体には外気温を用いた。

その結果、現場計測の値は、室内試験結果と比較した場合、よく一致していると考えられる。

4. まとめ

早強ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末 6000 で 50%置換したコンクリートについて現場打ち施工を冬季に実施し、次の知見を得た。

- (1) 橋体をシートで覆い給熱および加湿を行い、コンクリート温度について各断面の平均値を 10℃以上に保つ養生を行った結果、今回の事例においては、材齢 7 日においてプレストレス導入時圧縮強度 27N/mm^2 を満足する事ができた。
- (2) 想定した気温までは低下しなかったものの、養生設備を用いることで、強度発現性状を改善することができた。
- (3) 上屋を用いてコンクリートの自己発熱を保温することで、給熱を行うことなくコンクリート周辺の温度を外気温よりも高く保つことができる。
- (4) 実施工において、事前に行う室内試験による圧縮強度と積算温度の関係をj用いることで、施工時の養生温度と圧縮強度のj関係が予測できる。

これらの結果から、冬季以外の日平均気温が 10℃を上まわる時期であれば、通常の早強ポルトランドセメントのみのコンクリートと同等に

扱う事ができると考えられる。そして、冬季においてもコンクリート温度を適切な温度で管理することにより、所定の強度を得ることができると考えられる。また、今回の施工時期は 11 月初旬であったこともあり、冬季の中では気温が高めであったため、より低温となる環境条件においては、養生設備の性能や効果など検討が必要である。本施工例が今後の同種工事の参考になり、より耐久性の高い PC 構造物の提供に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 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，日本材料学会，1998.3
- 2) 上津 敏，田中 和幸，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，pp20-23，1999.3
- 3) 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，pp45-51，2000.5
- 4) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，土木学会，1996.3
- 5) コンクリート標準示方書[施工編]，土木学会，2002