

論文 PC 桁に適用した高炉スラグ微粉末混和コンクリートの収縮・クリープ性状

鶴田 浩章*1・松下 博通*2・吉富 泰一*3・前田 悦孝*4

要旨: 実際に使用される桁と同一サイズの PC 桁を用い、従来の早強ポルトランドセメントのみの配合と比較して高炉スラグ微粉末の混和により収縮やクリープにどのような違いが生じるかを把握することを目的として、軸方向ひずみを測定した。また同時に同一のコンクリートで角柱供試体の軸方向ひずみも測定し、サイズの違いによる影響についても検討した。その結果、高炉スラグ微粉末混和の有無によらず、角柱供試体で大きな乾燥収縮ひずみを示しても、桁では設計で用いられている乾燥収縮 200×10^{-6} 以下という値を満足すること、及びクリープ係数も設計で用いられるものより小さくなることがわかった。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, PC 桁, 乾燥収縮, クリープ, 蒸気養生

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造物の高耐久化を図る上で高炉スラグ微粉末を使用することの有効性については、室内試験のレベルでは確認されている¹⁾。しかし、高炉スラグ微粉末を使用し、蒸気養生を必要とする PC 構造物の実規模での乾燥収縮・クリープ性状を調査した例は少なく、構造物の設計・施工にかかわる物性値のデータの蓄積が急がれている。

そこで本実験では、実際の橋梁に使用される桁と同一のプレテンション式 PC 桁を試験体として、従来の早強ポルトランドセメントのみを使用した場合と高炉スラグ微粉末を使用した場合で乾燥収縮・クリープ性状の相違を検討した。また同一材料を用いて別途製作した角柱供試体についても乾燥収縮・クリープの測定を行い実

規模の桁との比較を行った。本論文では桁に関しては実際の設計に生かすために鉄筋による拘束も収縮性状の中に入れて考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用した材料は、セメントは早強ポルトランドセメント (密度 3.14 g/cm^3)、混和材は、高炉スラグ微粉末 (密度 2.91 g/cm^3 、比表面積 $6100 \text{ cm}^2/\text{g}$)、細骨材は佐賀県佐賀郡大和町産の川砂 (密度 2.55 g/cm^3 、粗粒率 2.87)、粗骨材は熊本県鹿本郡鹿北町産の碎石 (2005、密度 3.00 g/cm^3 、粗粒率 6.57)、混和剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤である。

2.2 配合

表-1 にコンクリートの配合を示す。表中の配

表-1 コンクリートの配合

配合 No.	スラグ置換率 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						目標空気量 (%)	目標スランブ (cm)
				水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材	混和剤		
①	50	35	43	160	229	228	732	1143	2.29	2±1	10±2.5
②	0	40	43	160	400	-	768	1173	3.20	2±1	10±2.5

*1 九州大学大学院講師 工学研究科建設システム工学専攻 工修 (正会員)

*2 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 工博 (正会員)

*3 (株)安部工業所技術本部開発部次長

*4 新日鐵高炉セメント(株)技術開発センター製品開発グループリーダー (正会員)

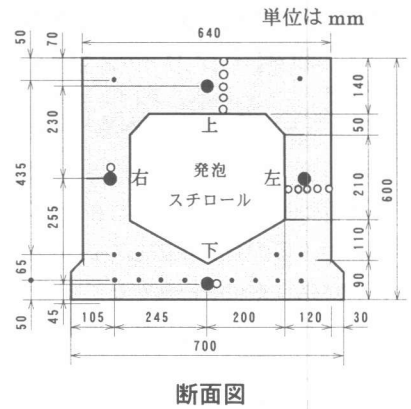
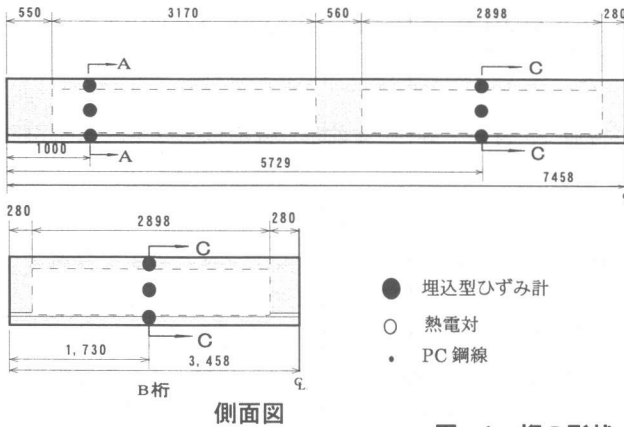


図-1 桁の形状寸法

表-2 桁の種類

桁の種類	配合	プレストレス及び長さ
A桁 (PC桁)	①	プレストレス導入
	②	製品と同一の長さ
B桁 (RC桁)	①	プレストレス未導入
	②	製品の1/2の長さ

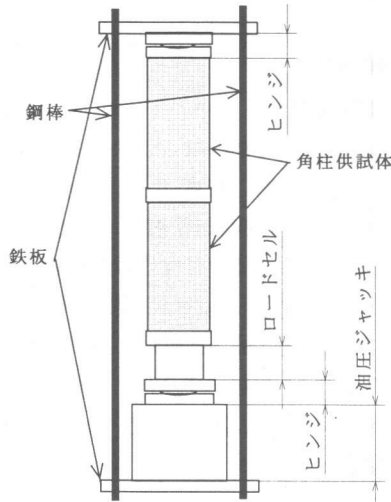


図-2 クリープ試験概略図

合 No. の①は高炉スラグ微粉末を用いた配合(以降スラグ混和), ②は混和材を用いない従来の配合(以降早強単味)である。水結合材比が異なるのは、PC 桁のプレストレス導入時に必要なコンクリートの圧縮強度 35N/mm^2 を満たすようスラグ混和の配合を決定したためである。

2.3 試験体

試験体として、表-2 に示すような桁、および $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を作製した。A 桁は B 桁を打設して 8 日後に打設した。A 桁でプレ

トレス導入後の収縮を、B 桁で乾燥収縮を測定した。A 桁へのプレストレス導入は脱型後すぐ行った。角柱供試体には屋外曝露用と 20°C -RH60%の恒温恒湿室内用のものを作製し、ともに乾燥収縮とクリープの測定を行った。クリープ試験における荷重時刻は桁のプレストレス導入に合わせ、荷重荷重の大きさは桁下部の PC 鋼線位置の応力に合わせた。桁・角柱供試体とも軸方向ひずみを埋込型ひずみ計で、その位置でのコンクリート温度を熱電対で測定した。桁の詳細を図-1 に、角柱供試体のクリープ試験の概略図を図-2 に示す。ひずみ計は中心部に発泡スチロールを配置した断面に図-1 のように埋め込んだ。養生及び保管の条件は以下の通りである。

・試験桁及び曝露供試体

同一養生条件とし、蒸気養生を行った。蒸気養生中の雰囲気温度は図-3 に示すとおりであった。脱型は打設後 18 時間後に行い、脱型

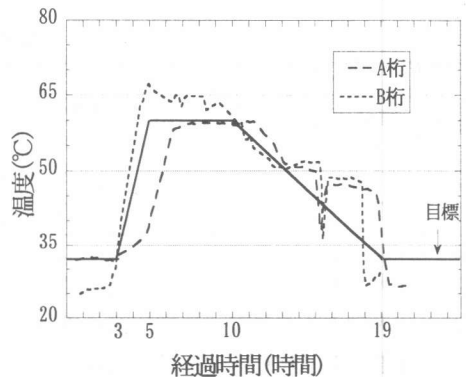


図-3 蒸気養生中の雰囲気温度

後は製品と同様雨ざらしで保管した。

・20℃-RH60%下の供試体

養生条件は試験桁と同様で、途中打設後 15 時間で養生シート内から出し、保温して移動させ、20℃-RH60%の恒温恒湿室において打設後 18 時間で脱型し保管した。

・標準養生供試体

蒸気養生せずに翌日脱型、20℃水中養生した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの圧縮強度・静弾性係数

表-3 にコンクリートの圧縮強度及び静弾性係数を示す。表よりプレストレス導入時に必要な圧縮強度を満たしている事がわかる。

表-3 コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数

	配合 No	屋外曝露		室内		標準養生	
		脱型時	28日	脱型時	28日	28日	
圧縮強度	A桁 作製時	①	41.5	64.1	43.3	57.2	58.4
		②	35.7	55.6	36.0	50.3	54.6
	B桁 作製時	①	39.4	61.5	40.9	52.6	57.8
		②	36.1	57.5	37.2	51.8	56.0
静弾性係数	A桁 作製時	①	2.65	3.19	2.74	3.07	3.10
		②	2.70	3.12	2.74	3.09	3.24
	B桁 作製時	①	2.48	3.23	2.46	2.90	3.05
		②	2.55	3.18	2.52	2.98	3.12

圧縮強度：(N/mm²) 静弾性係数：(×10⁴N/mm²)

3.2 ひずみ測定値

本実験では温度補償ひずみ計を使用している。そこでまず全データを実ひずみ(温度膨張も含めたひずみ)に変換したが、この実ひずみは非常にコンクリート温度の影響を受けるため、コンクリートの収縮・クリープ性状を正しく判断できない。この影響を除去するためにコンクリートの線膨張係数を用い温度補正する必要がある。コンクリートの線膨張係数については、まず設計計算で一般的に用いられている 10×10⁻⁶/℃を用いた。しかし、この値を用いるとスラグ混和と早強単味とで日間変動の補正に差が出てくる。B桁の実ひずみの日間変動は乾燥によるものよりも温度の変化によるもののほうが卓越している。そこで 図-4 のようなコンクリート温度と実ひずみの 1 日の変化を材齢 7 日毎に描き、その近似直線の傾きの平均を線膨張係数とした。

桁においては部材位置によりコンクリート温度の変化量が違っている。ひずみの変化量はコンクリート温度に依存している事を考えると、見かけ上平面保持が成り立たないような値を示すことも考えられる。断面は必ず平面保持が成り立つので、桁で測定されたものは温度による正確な変形を示していないと考えられる。そのため今回用いた線膨張係数は屋外に曝露している角柱供試体より求めたものを用い、スラグ混和が 10.5×10⁻⁶/℃、早強単味が 8.3×10⁻⁶/℃であった。

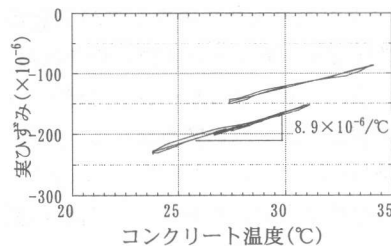


図-4 コンクリートの線膨張係数の求め方

また蒸気養生をしているため、初期材齢で大きな温度降下がある。この期間は実ひずみの変化量も大きく、その影響を除くために乾燥収縮測定用のひずみは、温度の落ち着いた時点をお点とした。そのため恒温恒湿室内の角柱供試体については上記の線膨張係数による温度補正を行っていない。0 点は、桁では材齢約 74 時間、屋外曝露角柱供試体は材齢約 48 時間、室内角柱供試体は材齢約 36 時間とした。また PC 桁及びクリープ試験用角柱供試体のひずみは載荷終了直後を 0 点とした。

3.3 乾燥収縮

図-5 に B 桁の収縮を、図-6 に角柱供試体の乾燥収縮の経時変化を示す。ここで B 桁の収縮は断面の右側の値と左側の値の平均値を示している。屋外に曝露している角柱供試体と桁は、雨天時に膨張を示している。高炉スラグ微粉末を混和したほうがやや膨張量が大きい、桁ではほぼ同じ収縮ひずみを示しているといえる。角柱供試体の場合はその差がよりはっきり現れている。このことより高炉スラグ微粉末を混和した方がより湿度の影響を受けやすいと考えら

れる。桁では両配合とも湿度の影響を考慮したとしても 50 日頃までには収縮は終わっているといえる。室内の角柱供試体では初期において高炉スラグ微粉末混和の方が明らかに大きい、40 日ごろに同程度となり、その後はほぼ同じかやや高炉スラグ微粉末混和の方が大きくなる。

このタイプのプレテンション方式の PC 桁では早強ポルトランドセメントを用いる場合、コンクリートの乾燥収縮を 200×10^{-6} として設計することになっている^{2), 3)}。室内の標準的な試験における乾燥収縮は、どちらの配合でも約 600×10^{-6} とかなり大きな値を示すが、B 桁のひずみを乾燥収縮と考えると実際の桁では最大でも乾燥収縮は 100×10^{-6} 以下となり高炉スラグ微粉末の混和による悪影響もないといえる。

また図-6 には平成 8 年制定の土木学会コンクリート標準示方書の収縮ひずみ予測式(式(1))によって求めた計算値も示している。

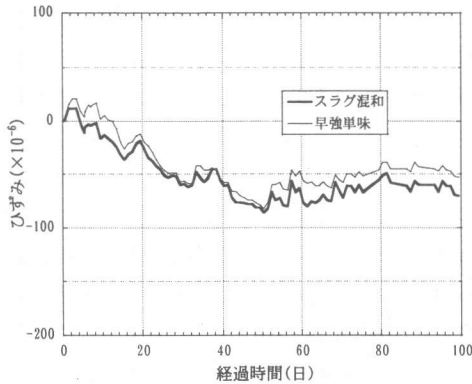


図-5 B 桁ひずみ

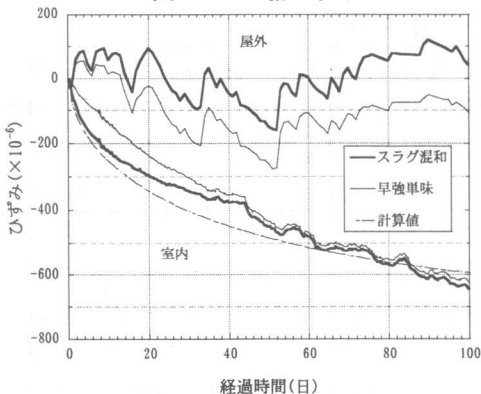


図-6 乾燥収縮(角柱供試体)

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \left[1 - \exp\left\{ -0.108(t - t_0)^{0.56} \right\} \right] \epsilon'_{sh} \quad (1)$$

ここで、

$$\epsilon'_{sh} = -50 + 78 \left[1 - \exp(RH/100) \right] + 38 \ln W - 5 \left[\ln(V/S) / 10 \right]^2$$

Σ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)

$\Sigma'_{sh}(t, t_0)$: コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

RH: 相対湿度 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

W: 単位水量 (kg/m^3)

$$(130 \text{ kg}/\text{m}^3 \leq W \leq 230 \text{ kg}/\text{m}^3)$$

V/S: 体積表面積比 (mm)

$$(100\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm})$$

t_0 及び t : 乾燥開始時及び乾燥中のコンクリートの有効材齢 (日)

この予測式では体積表面積比が 100~300mm となり本供試体のように小さいものでは適用の範囲外となっているが、 $V/S=22.2\text{mm}$ として計算した。約 80 日までは計算値のほうが大きく、その後実測値のほうが大きくなっているが、予測式と実測値はよく合っている。

3.4 クリープ

表-4 にプレストレス導入時のコンクリートの圧縮応力を、図-7 に弾性ひずみを示す。導入応力の計算にはプレストレス導入時における円柱供試体の圧縮試験によって得られた静弾性係数を用いている。導入応力は桁下部で圧縮強度の約 4 割の大きさであり、図のように平面保持は成り立っているといえる。

クリープひずみは PC 桁 (A 桁) のひずみから同材齢の RC 桁 (B 桁) のひずみを除いたものであるが、先に述べたように A 桁より B 桁の打設日が 1 週間早いため B 桁の 0 点を移動させる必要がある。しかし 3.2 で述べたように屋外に曝露している桁は湿度の影響を大きく受けるため、この 1 週間のずれがクリープひずみに影響を与えクリープの評価ができない。図-5 より A 桁のプレストレスを導入したとき (経過時間 5 日) にはまだほとんど収縮をしていないので、A 桁のプレストレス導入時の B 桁のひずみを乾燥収縮の 0 点としてクリープひずみを算出した。

表-4 プレストレス導入時のコンクリートの圧縮応力

導入時の 応力 (N/mm^2)		上	中	下
	スラグ混和	4.5	9.8	15.4
早強単味	4.7	9.9	15.5	

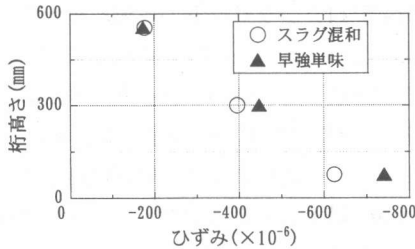


図-7 弾性ひずみ(PC桁)

図-8、図-9に桁のクリープひずみの経時変化を、図-10に角柱供試体のクリープひずみの経時変化を示す。図-8、図-9中の凡例にある上下左右は、図-1におけるひずみ計の位置を表す。桁では明らかに高炉スラグ微粉末混和の方が小さなクリープひずみを示しているのがわかる。また両桁とも載荷応力の大きさに合わせて、桁の下ほどひずみが大きくなっている。ひずみの大きさに違いはあるが、両桁とも平面保持はほぼ成り立っている。屋外曝露の角柱供試体では約10日までは高炉スラグ微粉末混和の有無によらず同程度ひずみを示すが、その後は高炉スラグ微粉末を混和した方が桁と同様小さくなる。室内の角柱供試体では高炉スラグ微粉末を混和した方が初期からひずみが大きくなっている。屋外曝露の桁と角柱供試体で高炉スラグ微粉末を混和したものの方がひずみが小さくなったのは、雨による影響の受けやすさによるものではないかと考えられる。桁のほうは載荷100日後で収縮はほとんど収束していると思われるが、角柱供試体では屋外・室内とも載荷から100日経過した時点でもまだ収縮が進行している。

次に桁下部と角柱供試体を比較すると角柱供試体のほうが大きい。約100日経過後で、高炉スラグ微粉末混和のほうが約2.5倍、早強単味のほうが約1.4倍となっている。桁の変形は、圧縮力を受けている場合でも鉄筋拘束等の影響で、角柱供試体で得られる結果よりも小さい事

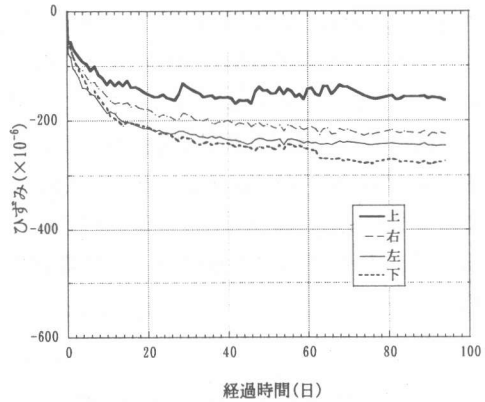


図-8 桁のクリープひずみ(スラグ混和)

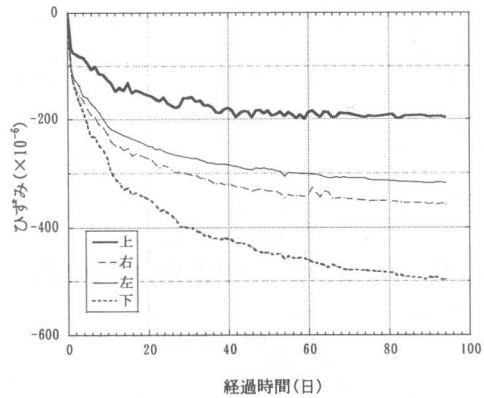


図-9 桁のクリープひずみ(早強単味)

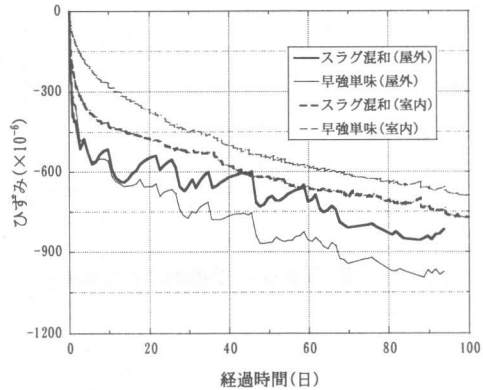


図-10 クリープひずみ(角柱供試体)

がわかる。

3.5 クリープ係数

図-11、図-12に桁のクリープ係数の経時変化を、図-13に屋外曝露角柱供試体と室内角柱供試体のクリープ係数の経時変化を示す。桁では、コンクリートの位置によりクリープ係数が異なる結果となり、どの部分についても高炉ス

ラグ微粉末を混和したほうが小さくなっている。クリープと同様に屋外曝露の角柱供試体では、高炉スラグ微粉末を混和したほうが小さく、室内では高炉スラグ微粉末を混和したものの方が大きい。このタイプのプレテンション方式のPC桁ではコンクリートのクリープ係数を中埋合成分前までが $\phi=1.2$ 、その後を $\phi=1.8$ として設計す

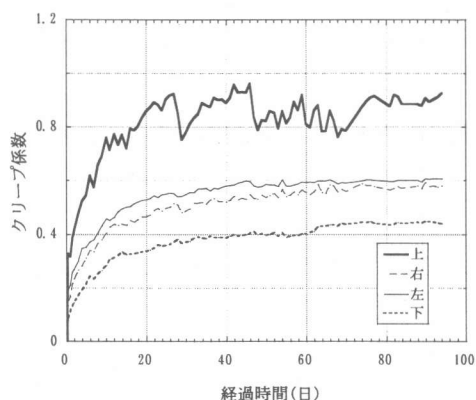


図-11 桁のクリープ係数(スラグ混和)

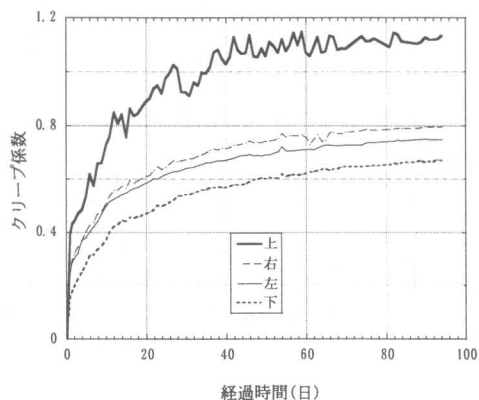


図-12 桁のクリープ係数(早強単味)

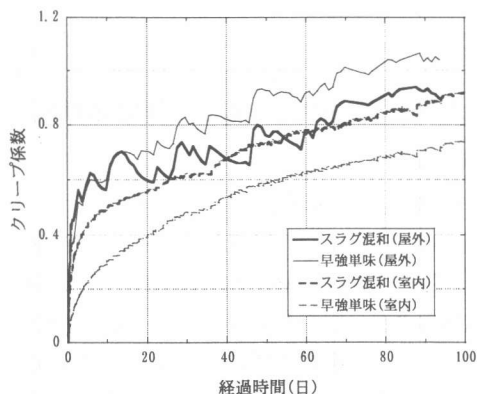


図-13 クリープ係数(角柱供試体)

ることになっている^{2),3)}が、桁、角柱供試体ともこの値より小さくなっている。

4. まとめ

早強ポルトランドセメント単味及び高炉スラグ微粉末混和コンクリートの乾燥収縮とクリープ性状について得られた結果を以下に示す。

(1) コンクリートに高炉スラグ微粉末を混和した場合、 $20^{\circ}\text{C}-\text{RH}60\%$ の恒温恒湿室において $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体の乾燥収縮ひずみが 600×10^{-6} 以上と大きな値を示したが、実環境における実部材の乾燥収縮ひずみはプレテンションPC桁の設計で用いられている乾燥収縮ひずみの 200×10^{-6} より大きくならなかった。これは湿度や鉄筋の拘束の影響が大きいと考えられる。

(2) 蒸気養生を行い、高炉スラグ微粉末を混和した場合でも乾燥収縮は土木学会コンクリート標準示方書の収縮ひずみ予測式より求められる計算値とほぼ一致した。

(3) 高炉スラグ微粉末を混和した方が湿度の影響を受けやすく、収縮がやや小さくなった。

(4) 蒸気養生を行い、高炉スラグ微粉末を混和した場合でもクリープ係数は、プレテンションPC桁の設計で用いられているクリープ係数よりも小さくなった。また高炉スラグ微粉末混和の有無による大小は屋外と室内とで逆の結果が得られた。

参考文献

- 1) 高耐久性PC構造物開発検討委員会：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，日本材料学会，1998.3
- 2) 建設省土木研究所編：土木構造物標準設計第18～20巻 解説書，全日本建設技術協会，pp.13-18
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会：JIS橋げたによるPC道路橋設計・製造便覧，プレストレスト・コンクリート建設業協会，p.21，1995