

(19) 高耐久性 PC 桁の収縮・クリープ性状

九州大学大学院工学研究科 ○坂本 賢次
九州大学大学院工学研究院 正会員 松下 博通
同 上 陶 佳宏
(株)安部工業所 福岡支店 正会員 江崎 守

1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を有するため、セメント・コンクリートの混和材として広く利用されており、省資源・省エネルギーや炭酸ガスの抑制等、地球環境の保全にも貢献する建設材料として注目されている。また高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、水密性、耐海水性、耐薬品性、アルカリ骨材反応抑制などの点で優れており、耐久性向上を目的に使用されることも多い。近年高粉末度の高炉スラグ微粉末が開発され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使用されるようになってきており、その有効性については、室内試験レベルの詳細な検証がなされている^{1), 2)}。しかし、供試体レベルと実規模では、大きさの違いによって温度変化や水分移動などが相違するためコンクリートの力学的挙動も異なるものと予想される。またさらに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事例は少なく、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混和材として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。その際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含めて考察を行った。

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 3.14g/cm³)、混和材は、高炉スラグ微粉末 (密度 2.91 g/cm³, 比表面積 6100cm²/g)、細骨材は佐賀県佐賀郡大和町産の川砂 (密度 2.55 g/cm³, 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/cm³, 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。これら 2 つの配合で、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/mm² を満たすようスラグ混和の配合を決定したためである。

表-1 コンクリートの配合

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

2.3 試験体

試験体として、表-2 に示すような桁を作製した。A 桁は B 桁を打設して 8 日後に打設した。A 桁でプレス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。両桁ともに、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。また同一材料を用いて別途製作した 10×10×40cm の角柱供試体についても乾燥収縮を測定し、圧縮強度測定用としてφ10×20cm の円柱供試体作製した。養生及び保管の条件は以下の通りである。写真-1 に桁及び円柱供試体の屋外における曝露状況を示す。プレストレスを導入した A 桁の支承部は、実際の橋梁と同様にゴム支承とし、B 桁については 1m 間隔に配置したローラーにて支持し自由に变形ができるようにした。乾燥収縮測定用の角柱供試体は、ローラーで支持して B 桁の上に静置した。

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

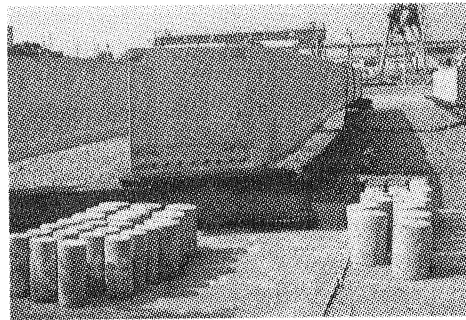


写真-1 桁曝露状況

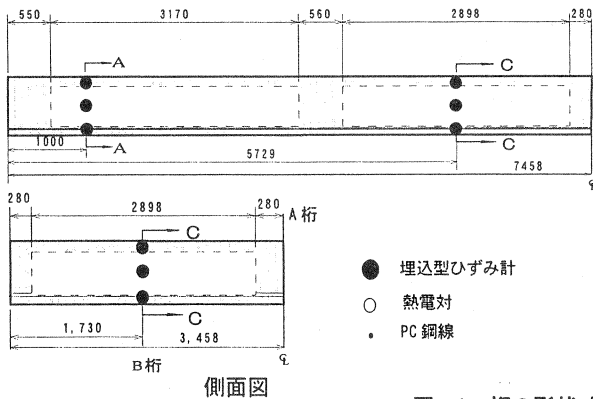
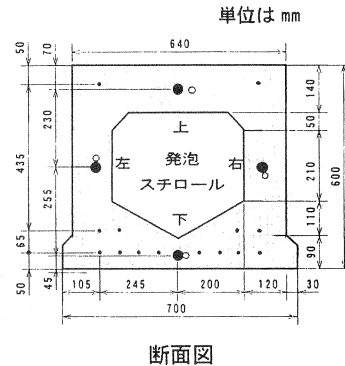


図-1 桁の形状寸法



断面図

・試験桁及び角柱供試体・円柱供試体

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-2 に示すとおりであった。脱型は打設後 18 時間後に行い、脱型後は製品と同様雨ざらして保管した。

・標準養生供試体

蒸気養生せずに翌日に脱型し、20℃で水中養生した。

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 35N/mm² を満たしている事がわかる。また弾性係数に関しては、脱型時は早強単味のほう

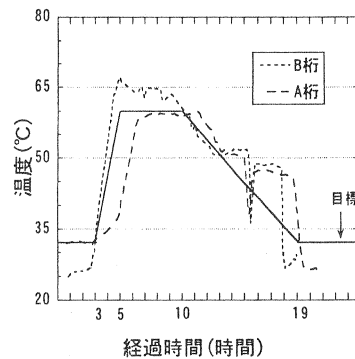


図-2 蒸気養生中の雰囲気温度

が大きい、材齢 28 日ではスラグ混和のほうが大きく
なっている。

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、屋外に曝露している本実験
における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 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を用いた。図-3 にそ
の結果を示す。しかし、図のように線膨張係数として $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
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。これは高炉スラグ微粉末を用いると、温度がコンクリート
の収縮に与える影響が異なるためと考えられる。

また 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ことを考えると、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。そのため今回線膨
張係数は同じ環境に曝露している角柱供試体より求めたものを用
いた。図-5 にそれにより得られた線膨張係数の変化を示す。デ
ータは図のように初期ではその変化が大きい材齢 14 日以降を、
また長期にはほぼ一定の範囲に分布しているため材齢 4 ヶ月
までとし、その平均を線膨張係数とした。その結果線膨張係数は、
スラグ混和で $9.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、早強単味で $8.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を使用した。

図-6 に蒸気養生開始から約 10 日間の、気温および B 桁コンク
リート温度の経時変化を示す。図中の上・右は図-1 における熱
電対の位置を示す。B 桁のコンクリート温度は外気温の影響を非
常に受ける。また、蒸気養生をしているため図に示すように、初
期材齢でコンクリート温度は大きく変化している。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も 0 点とした。0 点は、桁では材齢約 74 時間、
角柱供試体は材齢約 48 時間とした。また PC 桁のひずみはクリー
プを測定するため、載荷終了直後を 0 点とした。PC 桁におけるプレ
ストレスの導入は、打設後約 18 時間で
行った。

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		標準養生
			脱型時	28日	28日
圧縮 強度	A桁 作製時	①	41.5	64.1	58.4
		②	35.7	55.6	54.6
	B桁 作製時	①	39.4	61.5	57.8
		②	36.1	57.5	56.0
静弾性 係数	A桁 作製時	①	2.65	3.19	3.10
		②	2.70	3.12	3.24
	B桁 作製時	①	2.48	3.23	3.05
		②	2.55	3.18	3.12

圧縮強度：(N/mm²) 静弾性係数：(×10⁴N/mm²)

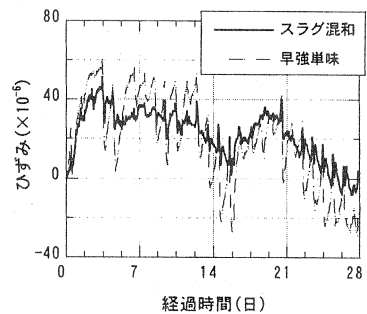


図-3 線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とし
て補正したときの収縮ひずみ

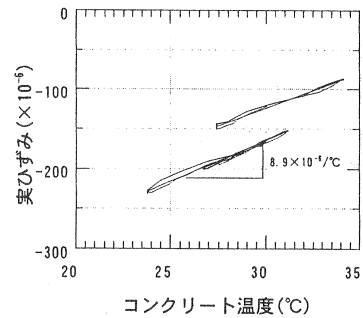


図-4 コンクリートの線膨張
係数の求め方

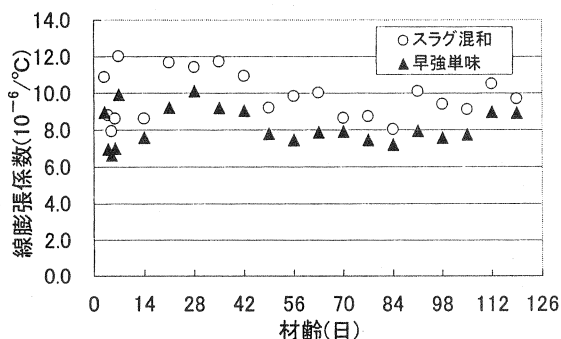


図-5 線膨張係数の変化

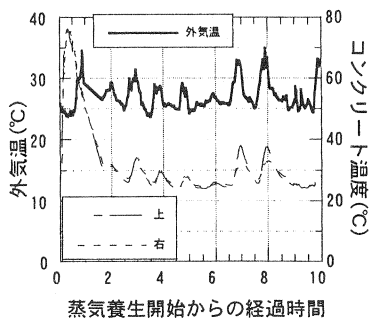


図-6 初期のコンクリート温度

3.3 乾燥収縮

図-7にB桁の収縮ひずみの経時変化を示す。ここで収縮ひずみは断面の右側と左側の値の平均値を示す。また1日のうちでコンクリートの温度が最も低いと考えられる午前10時の値を用いた。ここでの乾燥収縮には、鉄筋の拘束および自己収縮も含む。図を見ると、膨張を示している部分がある。これは雨天時に相当し、桁が水分を吸収したためだと考えられる。特に270日以降は梅雨にあたり、そのために大きな膨張を示したのではないかと考えられる。またこの時期の膨張は高炉スラグ微粉末を混和したほうがやや大きい。このことより高炉スラグ微粉末を混和したほうがより湿度の影響を受けやすいと考えられる。全体的にはほぼ同じ挙動を示しているといえる。

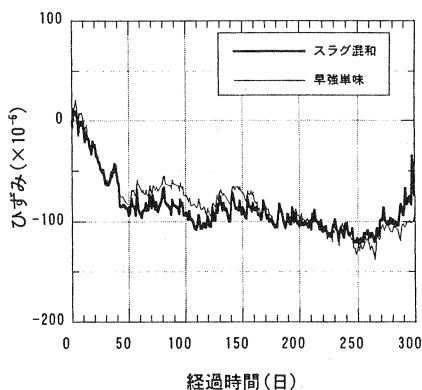


図-7 B桁ひずみ

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^{3), 4)}。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ひずみは 150×10^{-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。

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-8にそのときのコンクリートの弾性ひずみを示す。導入応力の計算には脱型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。

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

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。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桁プレストレス導入時のB桁のひずみを乾燥収縮の原点としてクリープひずみを算

出した。

図-9 に桁のクリープひずみの経時変化を示す。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。図より、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。さらに桁の下部にいくほどその差は大きくなっている。図-8 よりプレストレス導入時の弾性ひずみが桁の下部にいくほど差が大きくなっているが、これもこのような結果になった要因の一つではないかと考えられる。また両桁とも載荷応力の大きさに合わせて、桁の下ほどクリープひずみが大きくなっている。ひずみの大きさに違いがあるが、両桁とも平面保持はほぼ成り立っている。プレストレス導入直後より 300 日が経過した現在でもまだクリープによる収縮は続いているといえる。

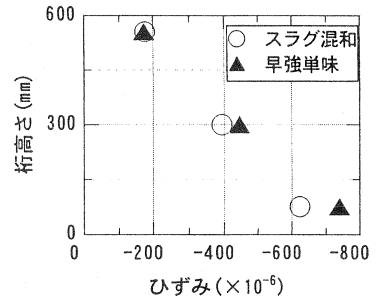


図-8 桁の弾性変形量

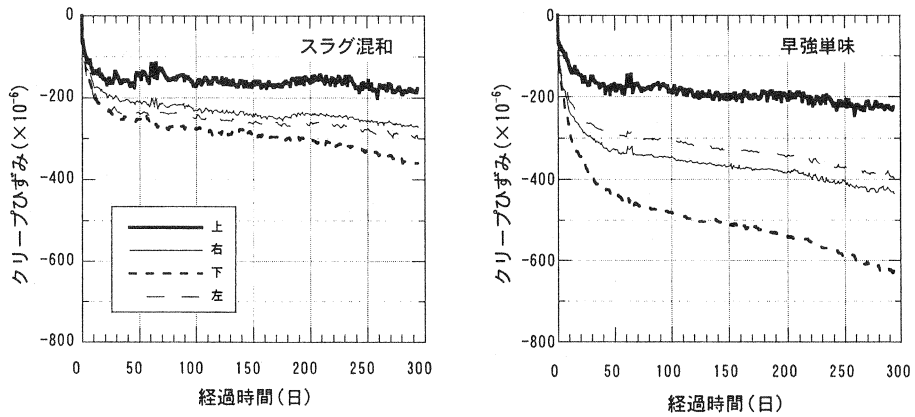


図-9 クリープひずみ

3.5 クリープ係数

図-10 にクリープ係数の経時変化を示す。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、

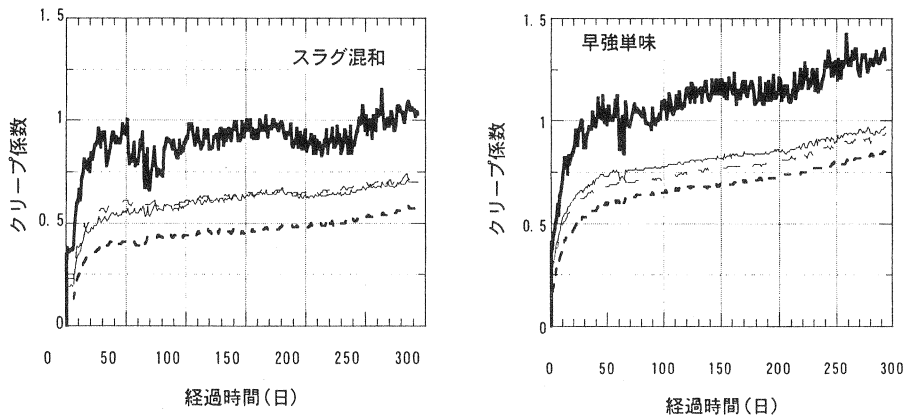


図-10 クリープ係数

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。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前までが $\phi=1.2$ 、その後を $\phi=1.8$ として設計することになっている^{3),4)}が、いずれもこの値より小さくなっている。またクリープひずみと同様に、300日を経過した現在でもまだクリープ係数はわずかに増加している。

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、乾燥収縮ひずみは早強単味のプレテンションPC桁の設計で用いられている乾燥収縮ひずみ 200×10^{-6} よりも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) 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、大きな膨張を示す時期があった。
- (3) 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、早強単味のプレテンション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。

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) 横室，依田他：「生コン工場で製造した高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートについて」，コンクリート工学年次論文報告集 vol21, No2, pp.67-72, 1999
- 3) 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
- 4) 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