

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—

石田 裕一*1・江崎 守*2・前田 悦孝*3・坂本 賢次*4・松下 博通*5

1. はじめに

近年、コンクリート構造物において厳しい海洋環境下における塩害、あるいは寒冷地における凍結融解や平成3年のスパイクタイヤ使用禁止後の凍結防止剤多用による劣化、およびアルカリ骨材反応による劣化など、さまざまな要因から予想よりも早い劣化・損傷が顕在化している。

このようなコンクリート劣化に対しては、高炉スラグ微粉末の有用性が一般的に知られている。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に優れており、耐久性向上を目的に使用されることも多い。しかしながら、これまで一般的に使用されてきた比表面積 $4000\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末は、硬化時間が遅く、早期に強度が必要となるプレストレストコンクリート構造物に適用されることはほとんどなかった。近年、高炉スラグ微粉末の高粉末度の製品が開発されるとともにJIS化され、早期の強度発現性が改善されるようになった。とくに、比表面積 $6000\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末は、工業的に安定供給が可能で、その使用が拡大している状況にある。

このような背景のもと、(株)安部工業所と新日鐵高炉セメント(株)は、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を目的に、共同で(社)日本材料学会へ研究委託を行った。その成果が、「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」¹⁾として報告され、比表面積 $6000\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いたプレストレストコンクリートの有効性が確認されている。

本文では、この比表面積 $6000\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末をプレテンション方式のPC道路橋に適用した事例としては、国内初となる俵山4号橋(写真-1)上部工工事について、その概要を報告するとともに、併せて本橋と同一規模の試験桁で実施した、コンクリートの性能試験結果についても報告する。

2. 計 画

2.1 計画概要

本橋は、熊本県熊本市と高森町を結ぶ、主要地方道熊本高森線の道路改築工事の一環として建設された、橋長15.0mのプレテンション方式単純中空床版橋である。架橋位置は、阿蘇郡久木野村河陰地内の俵山北側標高480mの高所で

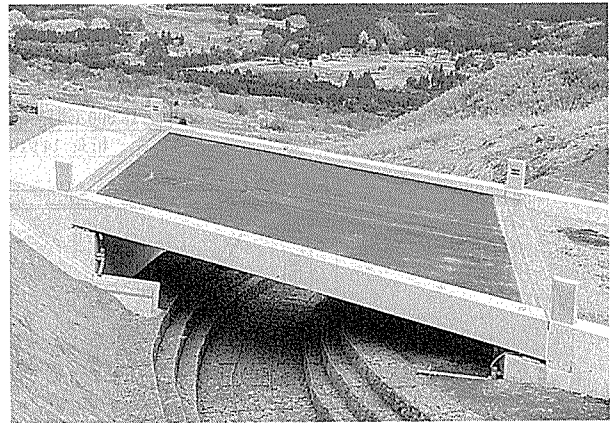


写真-1 俵山4号橋完成写真

あるため、冬季において凍結防止剤散布が行われる。

従来、プレテンション方式によるPC道路橋は、早強ポルトランドセメント(以下、早強セメント単味と記す)を用いて桁を製造するのが一般的であった。本橋は、早強セメント単味を比表面積 $6000\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末(以下、スラグ微粉末と記す)で50%置換した結合材を用いて、桁を製造することにより、凍結防止剤散布等によるコンクリートへの塩分浸透を表層部分で遮断し、内部への拡散を抑制する対策を図った。

なお、PC構造物の高耐久化を図るうえで、スラグ微粉末使用の有効性については、室内実験レベルでは確認されているが、実規模での乾燥収縮・クリープ性状を調査した例は少ない。本工事においては、事前に、使用する桁と同一規模の試験桁を製作し、従来の早強セメント単味を使用した場合と、スラグ微粉末を使用した場合との乾燥収縮・クリープ性状の相違について検討を行った。また、別途製作した角柱供試体(100mm×100mm×400mm)においても、乾燥収縮・クリープ測定を行い実規模桁との比較を行った。

2.2 工事概要

本橋の工事概要を以下に示す。また、上部工一般図を図-1に示す。

工事名：熊本高森線道路改築(俵山4号橋上部工)工事
 発注者：熊本県一の宮土木事務所
 工期：平成11年3月31日～平成11年12月27日
 橋種：プレストレストコンクリート道路橋
 形式：プレテンション方式単純中空床版橋
 橋格：B活荷重

*1 Yuichi ISHIDA：熊本県一の宮土木事務所 工務課

*2 Mamoru ESAKI：(株)安部工業所 工務部 設計課

*3 Yoshitaka MAEDA：新日鐵高炉セメント(株)技術開発センター

*4 Kenji SAKAMOTO：九州大学大学院 工学研究科 建設システム工学専攻

*5 Hiromichi MATSUSHITA：九州大学大学院 教授 工学研究科 建設システム工学専攻

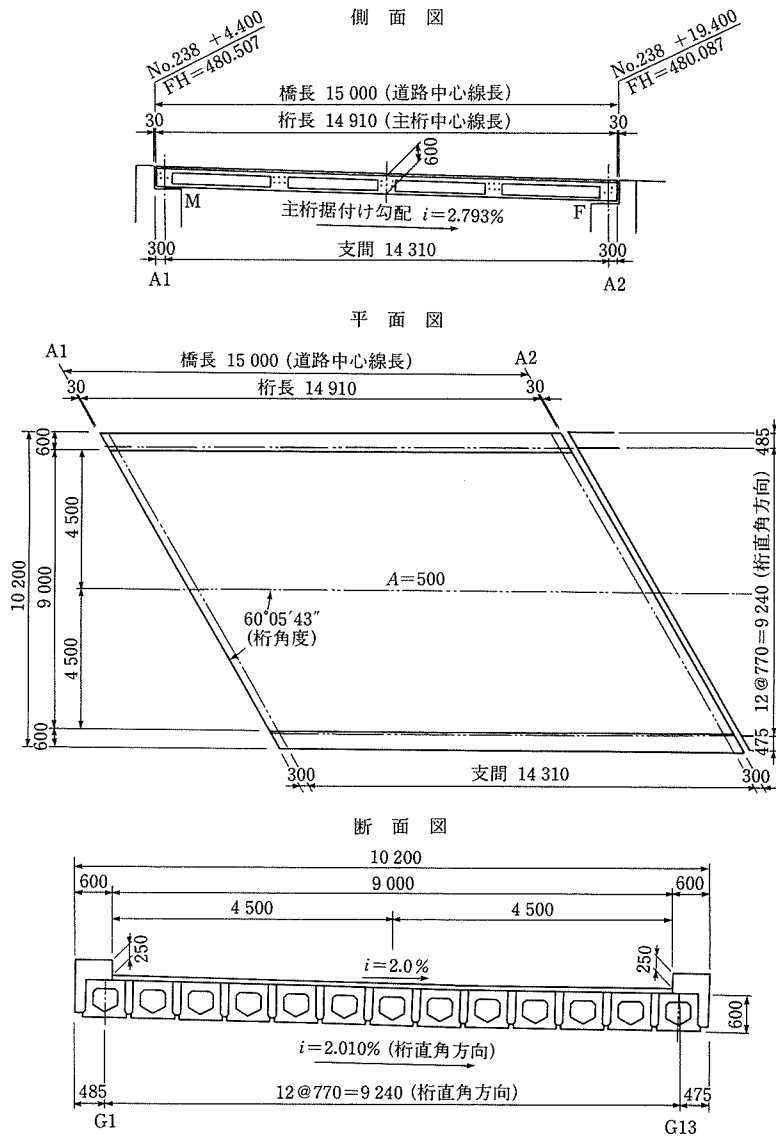


図 - 1 上部工一般図

橋 長 : 15.000 m
 桁 長 : 14.910 m
 支間長 : 14.310 m
 全幅員 : 10.200 m
 有 幅 : 9.000 m
 斜 角 : $60^{\circ} 05' 43''$

3. 施 工

3.1 使用材料

本橋に使用した材料は、セメントが早強ポルトランドセメント (密度 3.14 g/cm^3)、混和材が高炉スラグ微粉末 (密度 2.91 g/cm^3 , 比表面積 $6100 \text{ cm}^2/\text{g}$)、細骨材が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)、粗骨材が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)、混和剤がポリカルボン酸系高性能AE減水剤である。

3.2 コンクリート配合

コンクリートの配合条件を表-1に示す。
 スラグ微粉末を使用したPC構造物の施工例はまだ少な

表 - 1 配合条件

空 気 量	2.0%
スランプ	10 cm
スラグ微粉末置換率*	50%
設計基準強度	49.1 N/mm^2
プレストレス導入強度	34.3 N/mm^2

* セメント質量に対する置換率

く、試験練りによって配合を決定した。単位水量は 160 kg/m^3 一定とし、スランプは高性能AE減水剤により調整することとした。スラグ微粉末を50%置換した場合の水結合材比は、過去の実績²⁾を参考に35%を基準とした $\pm 5\%$ で試験練りを実施し、最適水結合材比を決定した。試験練り結果を表-2に示す。本橋では桁製作工場における、変動係数等を考慮した配合強度を満足する配合として、表-2に示す水結合材比35%の配合を採用した。

3.3 PC桁の製作

PC桁は、福岡県大牟田市の(株)安部工業所大牟田工場で作成した。PC桁の配筋状況を写真-2に示す。

表-2 水結合材比決定の試験練り結果

配合 No.	スラグ置換率 (%)	W/B* (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m ³)						コンクリートの性状				
				水 W	セメント C	高炉スラグ微粉末 BFS	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²) <平均>		
												材齢19h	材齢14日	材齢28日
①	50	40	43.5	160	200	200	763	1 165	2.00	11.0	1.7	40.1	54.4	56.4
②	50	35	43.0	160	229	228	733	1 144	2.29	8.0	2.4	48.7	63.1	64.6
③	50	30	42.5	160	267	266	697	1 110	2.93	12.0	1.6	57.9	67.4	68.8

* B = C + BFS

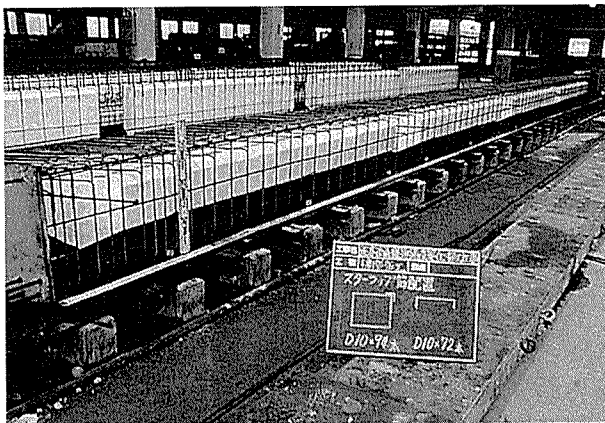


写真-2 PC桁の配筋状況

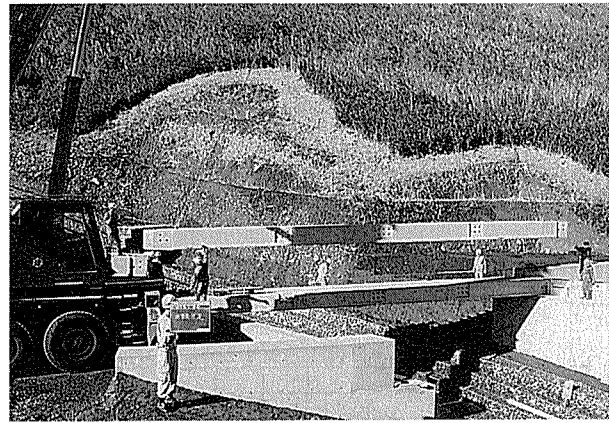


写真-3 PC桁の架設状況

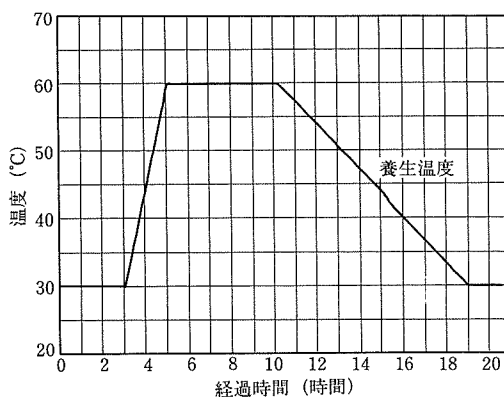


図-2 コンクリートの養生温度

3.4 養生

プレテンション桁は、コンクリートの打込み後、約20時間でプレストレスを導入するため、常圧蒸気養生を行い、コンクリートの強度発現の促進を図っている。

本橋におけるコンクリートの養生温度は、図-2に示す温度パターンとした。

3.5 PC桁の架設

桁の架設は、工場で作成された桁を架橋位置に運搬し、A2橋台側より油圧式80t吊りトラッククレーンにて行った。桁の架設状況を写真-3に示す。

なお、桁間の間詰めコンクリートは、従来と同様の施工を行い、所定の強度が得られたことを確認し横締め緊張を行った。

4. 実桁による性能試験

性能試験では、本橋に使用される桁と同一規模のPC桁を試験桁として、スラグ微粉末を使用した場合と従来の早強セメント単味を使用した場合のそれぞれについて、スラグ微粉末の混和による乾燥収縮およびクリープ性状を確認した。

表-3 試験桁の概要

桁の種類	長さ	スラグ微粉末の有無	プレストレスの有無
No.1 A桁	製品桁長 L=14.916m	有 (50%)	有 (導入)
No.2 A桁	製品桁長 L=14.916m	無 (0%)	有 (導入)
No.3 B桁	製品桁長 1/2 L= 7.458 m	有 (50%)	無 (未導入)
No.4 B桁	製品桁長 1/2 L= 7.458 m	無 (0%)	無 (未導入)

また、同一材料を用いて別途製作した角柱供試体 (100mm×100mm×400mm) についても、同様の試験を行い実桁との比較を行った。

4.1 試験桁の種類

試験桁の概要を表-3に示す。試験桁は、図-3に示すA桁 (PC桁) およびB桁 (RC桁) の2種類とした。

A桁は、製品桁と同一条件で作成し、プレストレスを導入した桁の軸方向ひずみの経時変化を測定した。なお、桁の支持方法は、実際に使用される条件と同一とした。

B桁は、乾燥収縮ひずみの測定を主目的とした。B桁の長さは製品桁の1/2とし、乾燥収縮のみによるひずみを測定するために、1.0m間隔に配置したローラーにて桁を支持した。

4.2 測定位置

コンクリートひずみおよびコンクリート温度は、試験桁の各部に埋込み型ひずみ計と熱電対を設置し、それにより計測を行った。

埋込み型ひずみ計設置位置を図-3に示す。埋込み型ひずみ計は、スターラップ鉄筋と別途用意した支持用鉄筋 (D10) に結束線で固定して所定の位置に設置した。

熱電対は、A桁・B桁ともに埋込み型ひずみ計と同じ位置に設置した。埋込み型ひずみ計設置状況を写真-4に示す。

4.3 使用材料と配合

使用材料については、3.1項と同一とした。試験桁のコンクリート配合を表-4に示す。配合①は、早強セメント単味

◆ 工事報告 ◆

使用のコンクリートで、通常使用されている設計基準強度 49.1 N/mm² を満足する配合である。配合②は、スラグ微粉末を用いた本橋と同一のものとした。

4.4 養生条件

試験桁および角柱供試体は、製品と同一養生条件とした。図-4に、試験桁および角柱供試体の養生温度と、養生時の試験桁コンクリート温度履歴を示す。

試験桁は、打設19時間後に脱型し、A桁についてはプレス

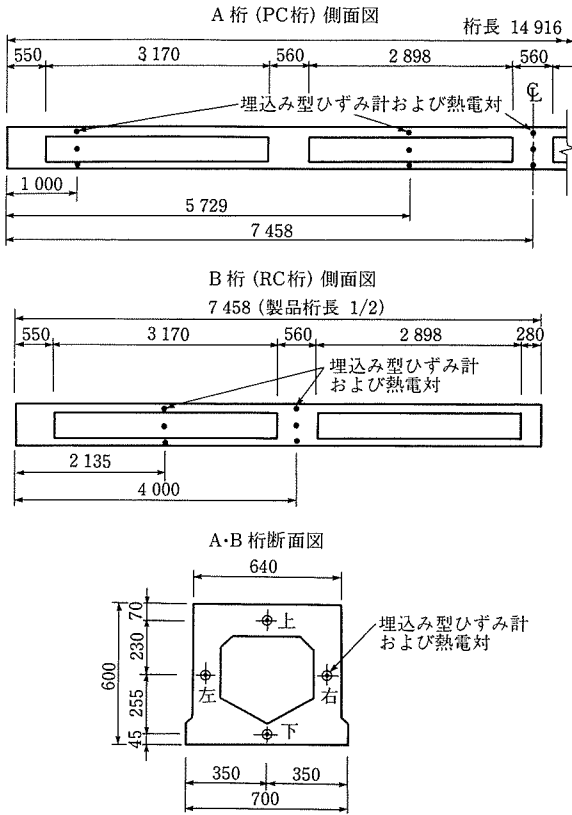


図-3 試験桁の形状寸法およびひずみ計・熱電対埋設位置図

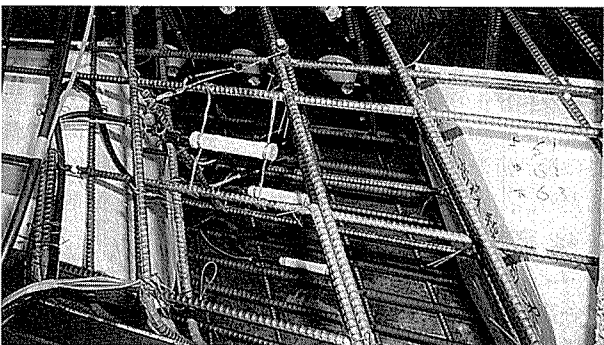


写真-4 埋込み型ひずみ計設置状況

表-4 試験桁のコンクリート配合

配合 No.	スラグ置換率 (%)	W/B* (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
				水 W	セメント C	高炉スラグ微粉末 BFS	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
①	0	40	43	160	400	—	759	1 184	3.20
②	50	35	43	160	229	228	733	1 144	2.29

* B = C + BFS

トレス導入を行った。脱型後、試験桁は製品ストックヤード(屋外)に保管した。また、角柱供試体については、20℃-RH60%の室内と屋外にて保管した。試験桁保管状況を写真-5に示す。

4.5 試験項目

試験桁および角柱供試体について、以下の5項目に関する試験を行った。

- ① フレッシュコンクリートの試験
 - a. スランプ試験 : JIS A 1101
 - b. 空気量試験 : JIS A 1128 (空気室圧力方法)
 - c. コンクリート温度 : 温度計
- ② 凝結試験
- ③ コンクリートの圧縮強度・静弾性係数試験
- ④ 乾燥収縮ひずみの測定
- ⑤ クリープひずみの測定

4.6 試験結果

各種試験結果を以下に示す。

(1) フレッシュコンクリートの試験

表-5にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。

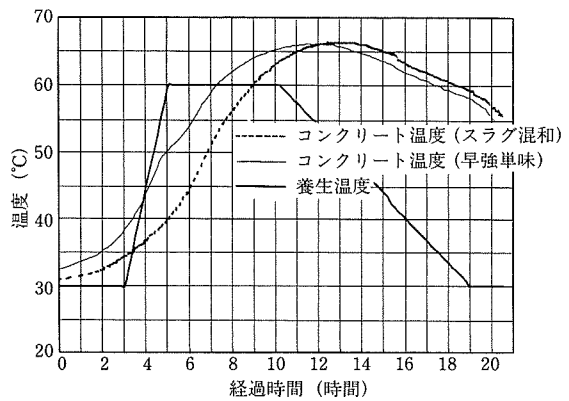


図-4 養生温度とコンクリート温度履歴

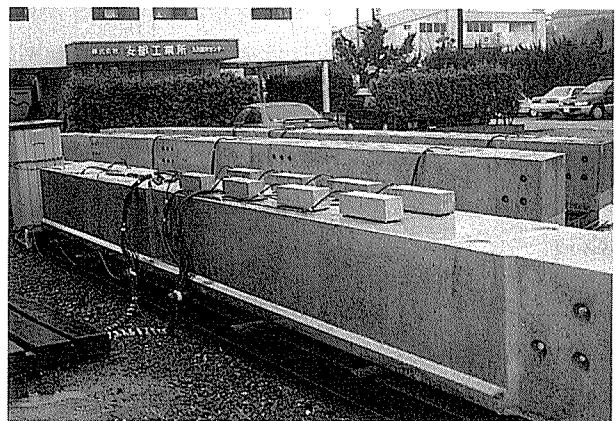


写真-5 試験桁保管状況

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

		A桁(PC桁) 製作時		B桁(RC桁) 製作時	
		配合① (早強単味)	配合② (スラグ混和)	配合① (早強単味)	配合② (スラグ混和)
スランプ	(cm)	8.0	9.0	8.5	10.0
空気量	(%)	2.2	1.9	2.1	2.8
コンクリート温度	(°C)	30.4	30.3	29.0	27.0

(2) 凝結試験

表-6に凝結試験の結果を示す。凝結試験は、プロクター貫入抵抗試験により行った。表より、スラグ微粉末混和の方が早強セメント単味に対して、始発・終結ともに短い時間となったが、桁は工場製作のため、コンクリートの打込みに際しては問題なく施工することができた。

(3) コンクリートの圧縮強度、静弾性係数試験

表-7にコンクリートの圧縮強度および静弾性係数試験結果を示す。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ことが分かる。

(4) 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、コンクリートの乾燥収縮・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。屋外に保管した角柱供試体の測定結果を見ると、実ひずみの日間変動は温度変化によるものが、乾燥によるものより卓越していた。そこで、屋外に保管した角柱供試体の1日のコンクリート温度とひずみの関係を、図-5のようにグラフに描き、その近似曲線の傾きを線膨張係数とした。この手順によって得られた1週間ごとの線膨張係数の平均を、そのコンクリートの線膨張係数として実ひずみの温度補正を行った。その結果、コンクリートの線膨張係数は、スラグ微粉末混和を $9.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、早強セメント単味を $8.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。ただし、恒温恒湿室内の角柱供試体については、コンクリートの温度変化はないため上記の線膨張係数による温度補正を行っていない。

また、桁および角柱供試体は、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もととした。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、クリープ試験用のA桁(PC桁)および角柱供試体のひずみは、載荷終了直後をもととした。

表-6 凝結試験結果

	A桁(PC桁)製作時		B桁(RC桁)製作時	
	配合① (早強単味)	配合② (スラグ混和)	配合① (早強単味)	配合② (スラグ混和)
始発 (hr-min)	3-20	2-30	4-10	3-20
終結 (hr-min)	4-10	3-30	5-30	4-40

(5) 乾燥収縮

図-6に、B桁(RC桁)の乾燥収縮ひずみの経時変化を、図-7に、角柱供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化および平成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によって求めた計算値を示す。ただし、B桁(RC桁)の乾燥収縮ひずみは、図-3に示す、主桁ウェブに取り付けた左右の位置にあるひずみ計より得られた値の平均である。なお、B桁(RC桁)においては、鉄筋の拘束による影響を無視した。

これらの結果から以下のように考察した。

- ① 屋外に曝露したB桁(RC桁)および角柱供試体は、スラグ微粉末の混和によらず、雨天時に膨張傾向を示す結果となったが、その膨張量はスラグ微粉末を混和した方がやや大きいことから、早強セメント単味と比較して湿度の影響を受けやすいと考えられる。
- ② 図-7より、室内の角柱供試体は、初期においてスラグ微粉末混和供試体の乾燥収縮ひずみが、早強セメント単味と比較して大きいのが、50日頃には同程度となり、その後は両配合ともほぼ同じ量の変化を示した。この初期にスラグ微粉末混和の方が、乾燥収縮ひずみが大きくなったことは、W/Bが早強セメント単味より小さかったためと考えられる。
- ③ 乾燥収縮は、配合の違いに関係なく、試験体のサイズおよび環境条件により異なった結果となった。室内の角柱供試体の乾燥収縮ひずみが最大で約 600×10^{-6} と大きいのが、屋外に曝露したB桁(RC桁)のひずみは、最大で 100×10^{-6} 以下となることから、実環境を想定したB桁(RC桁)のひずみを実桁コンクリートの乾燥収縮ひずみと考えれば、「道路橋示方書・同解説」³⁾に定められている乾燥収縮度 $\epsilon_{cs} = 200 \times 10^{-6}$ の値を、設計値として適用可能であると考えられる。

(6) クリープ

クリープひずみは、A桁(PC桁)のひずみから同材齢のB桁(RC桁)のひずみを除いたものであるが、今回はA桁(PC桁)よりB桁(RC桁)の打設日が1週間早いため、B桁(RC桁)の0点を移動させる必要がある。しかし、(5)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-6より、A桁(PC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(PC桁)のプレストレス導入時におけるB桁(RC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-7 コンクリートの圧縮強度および静弾性係数試験結果

		A桁(PC桁)製作時				B桁(RC桁)製作時			
		配合①(早強単味)		配合②(スラグ混和)		配合①(早強単味)		配合②(スラグ混和)	
		圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 $\times 10^4$ N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 $\times 10^4$ N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 $\times 10^4$ N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 $\times 10^4$ N/mm ²
蒸気→	脱型時	35.7	2.70	41.5	2.65	36.1	2.55	39.4	2.48
屋外	28日	55.6	3.12	64.1	3.19	57.5	3.18	61.5	3.23
蒸気→	脱型時	36.0	2.74	43.3	2.74	37.2	2.52	40.9	2.46
室内	28日	50.3	3.09	57.2	3.07	51.8	2.98	52.6	2.90
標準養生	28日	54.6	3.24	58.4	3.10	56.0	3.12	57.8	3.05

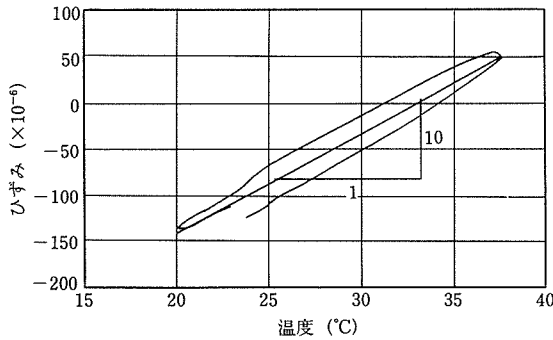


図-5 線膨張係数の求め方

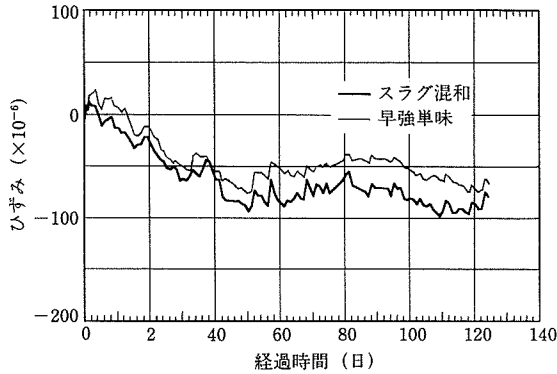


図-6 B桁 (RC桁) の乾燥収縮ひずみ

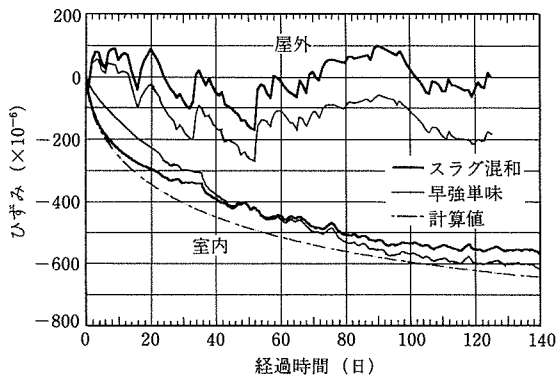


図-7 角柱供試体の乾燥収縮ひずみ

表-8 コンクリートの圧縮応力度および弾性ひずみ

		上	右	左	下	角柱
コンクリート圧縮 応力 (N/mm ²)	スラグ混和	4.5	9.8	9.8	15.4	13
	早強単味	4.7	9.8	9.8	15.5	13
弾性ひずみ (×10 ⁻⁶)	スラグ混和	176	383	407	623	941
	早強単味	173	424	449	741	994

表-8に、A桁 (PC桁) のプレストレス導入時および角柱供試体の荷重時弾性ひずみとコンクリートの圧縮応力度を示す。

図-8および図-9に、A桁 (PC桁) のスラグ微粉末混和および早強セメント単味のクリープ係数の経時変化をそれぞれに示す。また、図-10に、角柱供試体のクリープ係数の経時変化を示す。

これらの結果から以下のように考察した。

- ① 桁のクリープ係数は、同一断面の各位置 (上・中・下) で異なる結果となったが、どの断面位置において

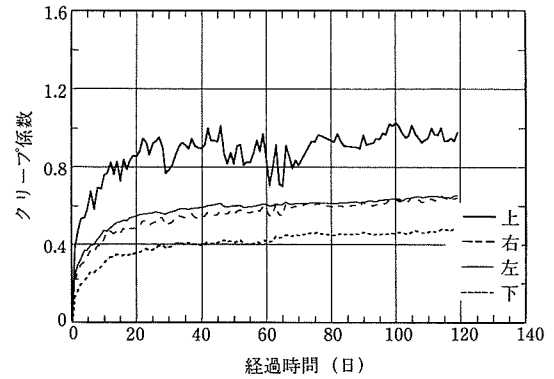


図-8 A桁 (PC桁) のクリープ係数 (スラグ微粉末混和)

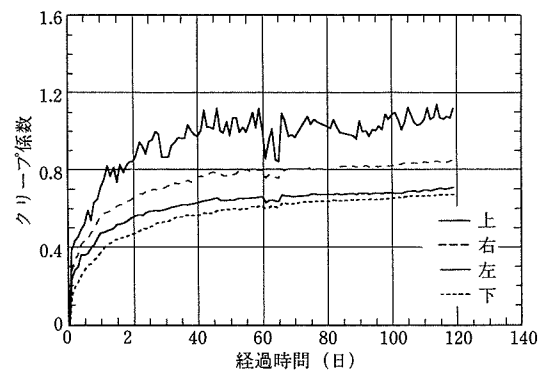


図-9 A桁 (PC桁) のクリープ係数 (早強セメント単味)

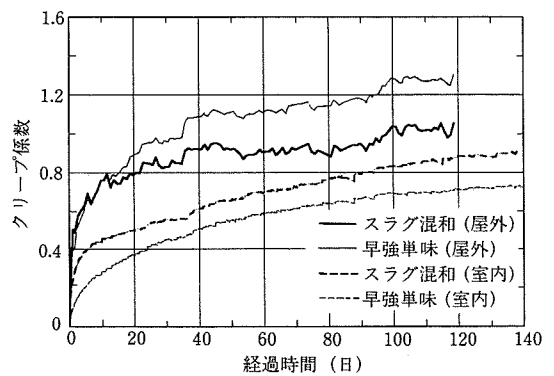


図-10 角柱供試体のクリープ係数

も、スラグ微粉末を混和した方が早強セメント単味と比較して小さい値となった。これはスラグ微粉末を混和した方が、湿度の影響を受けやすいことにより、湿度の変化によって膨張が生じたためと考えられる。

- ② 桁および角柱供試体ともに、計測材齢120日までのクリープ係数が1.2以下であることから、プレテンション方式PC桁のクリープ係数は、「土木構造物標準設計」⁴⁾に定められている、中理合成前を $\phi=1.2$ 、その後を $\phi=1.8$ とした値を適用することは安全側になると考えられる。

5. おわりに

本橋は、プレテンション方式PC道路橋の高耐久化を図るため、高炉スラグ微粉末 (比表面積6 000 cm²/g) を使用した国内で最初の施工となった。実規模レベルでの乾燥収縮・

クリープ性状の性能試験により、高炉スラグ微粉末を使用した場合においても、「道路橋示方書・同解説」および「土木構造物標準設計」に定められている、設計に関するコンクリートの諸数値を適用可能であることが検証された。

なお、今回性能試験を行ったPC桁については、今年度中に曲げ破壊試験の実施も予定している。

また、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの耐久性についても検証するため、10年計画で、本橋の追跡調査および供試体の曝露試験を実施することになっている。

高炉スラグ微粉末は、国内で多量に産出される副産物の一つである。その活用は、省資源や環境問題の改善に直接繋がるため、今の社会要請に適合したエコマーク商品の材料である。よって、今後この材料の特性を生かした各種プレストレストコンクリート構造物の開発に期待したい。

今回得られた知見が、今後の高耐久性PC構造物に高炉スラグ微粉末を用いる計画に際しての一助となれば幸いである。

最後に、本橋梁を施工するにあたり、計画から性能試験などまで、ご尽力いただいた方々に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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，pp.43～52，1998.3
- 2) 上津，田中，豊福：塩害に対応した高耐久性PC構造物の建設，コンクリート工学，Vol.37，No.3，pp.20～23，1999.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編，pp.37～44，1996.12
- 4) 全日本建設技術協会：土木構造物標準設計第18～20巻解説書，p.16，1996.3
- 5) 松川，松下，鶴田，江崎，前田，坂本：高炉スラグ微粉末を用いたPC桁の収縮・クリープ特性，土木学会西部支部，pp.782～783，2000.3

【2000年4月5日受付】

◀ 刊行物案内 ▶

プレストレストコンクリート橋脚の 耐震設計ガイドライン

(平成11年11月)

頒布価格：3 000円 (送料 500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会