

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有効プレストレス量の検証

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、軸方向ひずみの測定を約1年間行った。それらの PC 桁供試体を用いた静的曲げ破壊試験を行い、その結果より有効プレストレス量の検証及び高炉スラグ微粉末の混和による破壊性状の違いについて検討した。その結果、どちらの桁に関しても設計で与えられる有効プレストレス量を十分に満たし、また破壊性状についても大きな違いが認められないことがわかった。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, PC 桁, 乾燥収縮, クリープ, 有効プレストレス

1. はじめに

プレストレス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プレテンション式 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い。そこで、実際の橋梁に使用される桁と同一のプレテンション方式 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について約1年間乾燥収縮・クリープの測定を行った²⁾。

本研究ではそれらの試験体を用いて行った静的曲げ破壊試験の結果をもとに、有効プレストレス量の検証と破壊性状の違いについて比較・

検討を行った。

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

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 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 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)

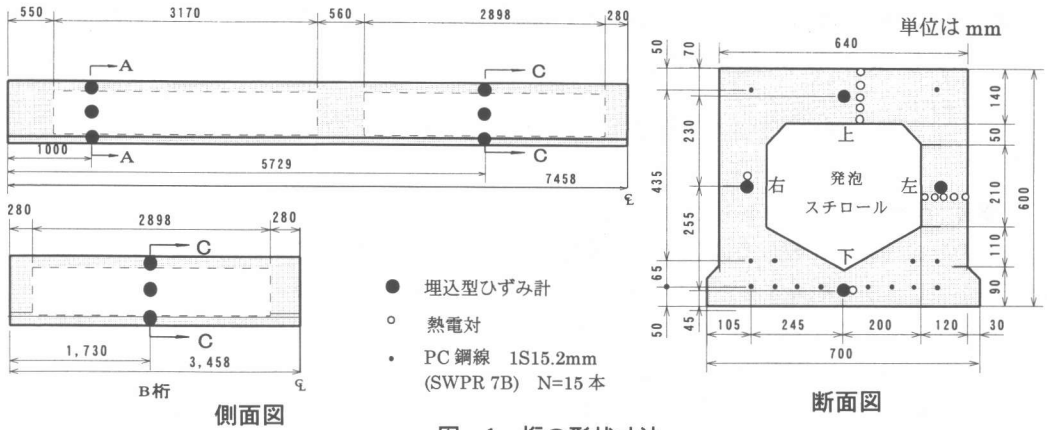


図-1 桁の形状寸法

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 34.3N/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り、スラグ置換率は耐塩害性や材料コストを考慮して定めたものである。

2.3 試験体

作製した供試体の種類を表-2 に、桁の形状寸法を図-1 に示す。中心部に発泡スチロールを配置した断面に埋込型ひずみ計を図-1 のように埋め込み、軸方向ひずみを測定した。また、同位置でのコンクリート温度を熱電対で測定した。養生及び保管の条件は以下の通りである。

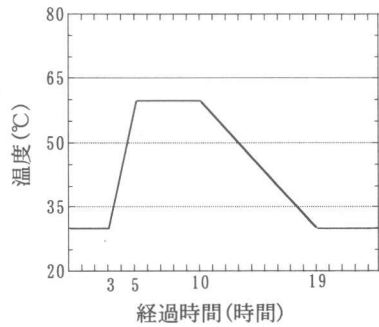


図-2 蒸気養生中の雰囲気温度

桁供試体、角柱供試体、円柱供試体とも、図-2 に示す条件で蒸気養生を行った。脱型は打設後 19 時間後に行い、脱型後は製品と同様雨ざらしで保管した。

2.4 静的曲げ破壊試験

図-3 に破壊試験載荷装置を示す。図のように支点間距離 14,316mm、等モーメントスパン 1,500mm の 2 点載荷で行った。なお、桁上面及び下面のひずみゲージは図-3 の桁中央部の図に示されるように桁幅中央部に貼付した。

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	プレストレス導入製品と同一の長さ
	②	
B桁 (RC桁)	①	プレストレス未導入製品の1/2の長さ
	②	

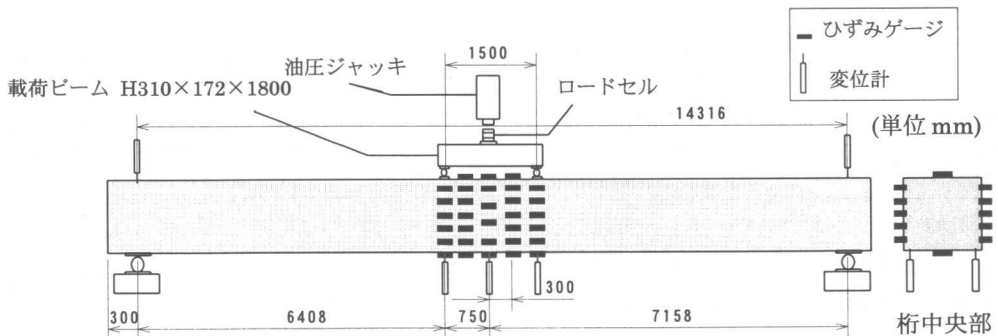


図-3 破壊試験載荷装置

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの強度及び静弾性係数

表-3 に円柱供試体で測定したコンクリートの圧縮強度、引張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。また、載荷試験時には高炉スラグ微粉末を混和したほうの圧縮強度が約 6N/mm^2 大きく、逆に引張強度は早強単味のほうが約 0.8N/mm^2 大きい。

表-3 コンクリートの強度及び静弾性係数

	配合	脱型時	28日	載荷試験時
圧縮強度 (N/mm^2)	①	41.5	64.1	65.7
	②	35.7	55.6	59.9
静弾性係数 (kN/mm^2)	①	26.5	31.9	34.9
	②	27.0	31.2	34.1
引張強度 (N/mm^2)	①	-	3.18	3.42
	②	-	3.26	4.17

3.2 乾燥収縮

図-4 に B 桁の収縮ひずみの経時変化を示す。このひずみは B 桁の中段(図-1 断面図の右・左部)の平均値である。収縮の原点はコンクリートの温度変化が外気温の変化のみに影響され始めた材齢約 3.5 日とした²⁾。また収縮ひずみは角柱供試体より算出した線膨張係数により温度補正をしており²⁾、温度以外の要因による収縮をすべて含む。以後これを桁の乾燥収縮ひずみとした。図のように材齢約 300 日前後で雨天の影響によりスラグ混和のほうが大きな膨張を示しているが、そのほかの時期に大きな違いはない

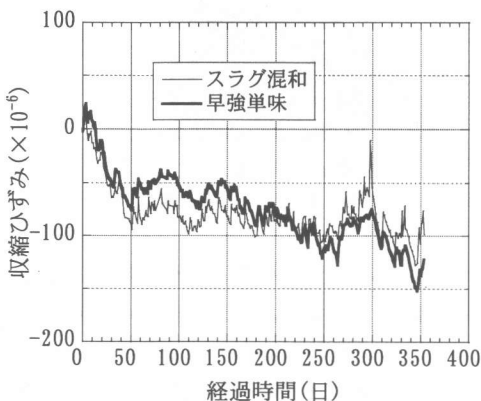


図-4 B 桁ひずみの経時変化

といえる。有効プレストレス算出の際の乾燥収縮ひずみとしては、収縮ひずみが最大となる経過時間約 350 日のスラグ混和で 126×10^{-6} 、早強で 152×10^{-6} とした。

3.3 クリープ

図-5 に桁下部のクリープひずみの経時変化を示す。クリープひずみは A 桁のひずみから温度によるひずみと B 桁の乾燥収縮ひずみを除いたものとした。なお、導入応力はスラグ混和で 13.0N/mm^2 、早強単味で 13.1N/mm^2 であった。高炉スラグ微粉末を混和した方のクリープひずみが早強単味の場合より小さいことがわかる。

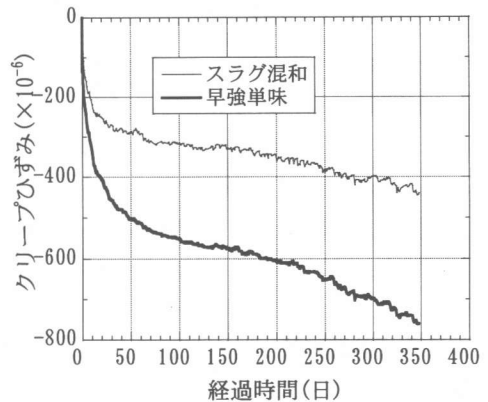


図-5 桁下部のクリープひずみの経時変化

図-6 には A 桁の弾性ひずみと材齢約 1 年後の温度以外の影響による収縮ひずみ及び円柱供試体で測定したコンクリートの静弾性係数を元に計算した弾性ひずみを示す。弾性変形時、材齢 1 年時とも平面保持は成り立っているといえ

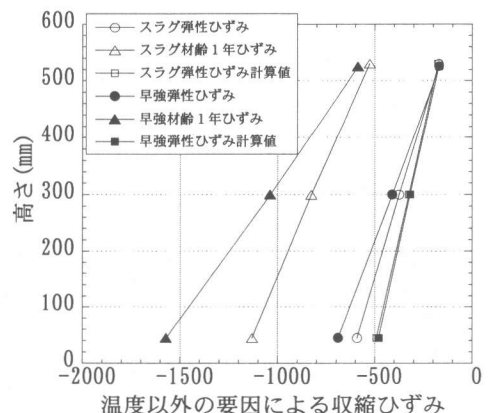


図-6 A 桁の温度以外の要因による収縮ひずみ

る。また、埋込型ひずみ計で測定した弾性ひずみの値がコンクリートの静弾性係数から求めた弾性ひずみ(計算値)より大きくなっており見かけ上静弾性係数が小さくなっている。測定した弾性ひずみは持続荷重載荷 20 分程度後に測定したもので、その間の遅れ弾性等の影響を受けているのではないかと考えられる。以後の検討では埋込型ひずみ計で測定したものを弾性ひずみとした。

表-4 クリープ係数

配合	上	中	下
スラグ混和	1.42	0.90	0.70
早強単味	1.66	1.19	1.07

表-4 に材齢 1 年におけるクリープ係数を示す。表中の上・中・下は図-1 における埋込型ひずみ計の位置を示す。表に示すように高さ位置によりクリープ係数が異っているが、どの位置においてもスラグを混入したほうが小さな値となった。

3.4 静的曲げ破壊試験

(1) 荷重と中央点変位量の関係

図-7 に荷重-中央点変位量曲線を、表-5 に各荷重の値とそのときの中央点変位量の関係を示す。どちらの桁とも破壊形式は曲げ圧縮破壊であった。高炉スラグ微粉末を混和したほうで破壊荷重がやや大きい。これは 3.1 に示したように圧縮強度が大きかったためと考えられる。

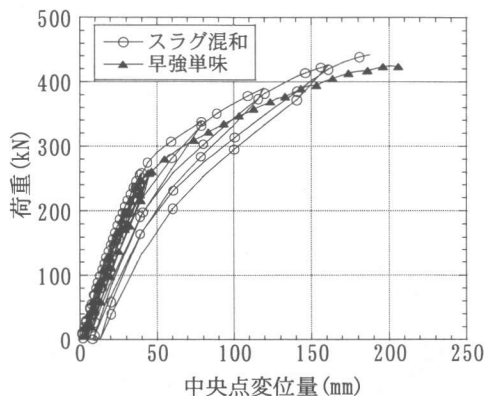


図-7 荷重-中央点変位量曲線

しかし、図のようにどちらの桁ともほぼ同様な軌跡を描いており、荷重載荷の際の挙動に差がないと言える。また、表-5 を見るとひび割れ荷重及び再びひび割れ荷重は、スラグを混入したもののほうが大きくなっている。これは、後述のようにスラグを混和した方が乾燥収縮及びクリープが小さく、載荷試験時の有効プレストレス量が大きかったためと考えられる。なお、本試験では繰り返し載荷を行っており、再びひび割れ荷重とは発生したひび割れが除荷により閉じ、再載荷により再び開口した時点の荷重を指す。

表-5 各荷重と中央点変位

		荷重[kN]	中央点変位[mm]
スラグ混和	ひび割れ時	211	31.2
	再びひび割れ時	137	20.8
	終局時	258	40.0
	破壊時	441	190.0
早強単味	ひび割れ時	186	29.0
	再びひび割れ時	108	17.2
	終局時	258	45.0
	破壊時	423	205.0

(2) エネルギー量及び曲率

エネルギー量は桁の中央における荷重-中央点変位量曲線から求めた。荷重-中央点変位量曲線の任意の点において垂線を降ろし、荷重-中央点変位量曲線、垂線、x 軸に囲まれた部分(図-8 の網掛け部)の面積をそのたわみ時におけるエネルギー量とした。

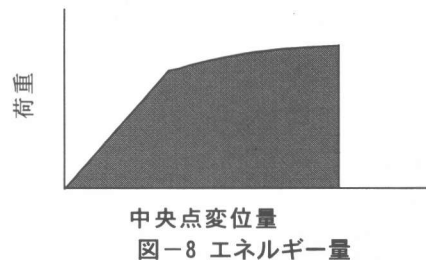


図-8 エネルギー量

そのエネルギー量と中央点変位の関係を示したものが図-9 である。図より同じ中央点の変位を与えるためには、高炉スラグ微粉末を混和したほうが必要エネルギー量がやや大きいことがわかる。

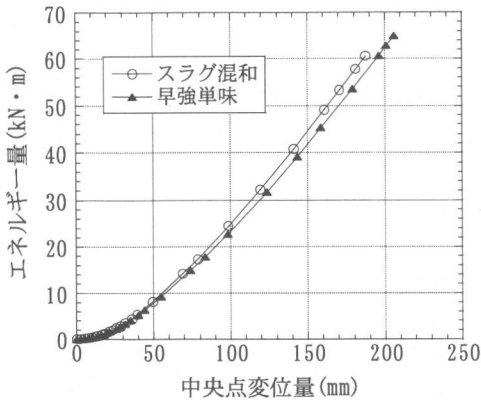


図-9 エネルギー量-中央点変位量曲線

図-10 にモーメント-曲率曲線を示す。図より同じモーメントにおける曲率はスラグを混入したものの方が小さいことがわかる。ひび割れ発生以降特にこの傾向が明らかである。これら2つの図より高炉スラグ微粉末を混和した方が桁の剛性が大きいと考えられる。

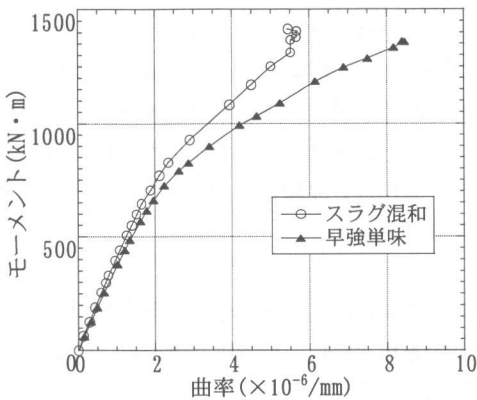


図-10 モーメント-曲率曲線

(3) 有効プレストレス量

まず有効プレストレス量を次の2つの方法で算出した。

A. 乾燥収縮等に設計値を用いて算出

B. 乾燥収縮等に実験値を用いて算出

荷重試験時のPC鋼材の有効引張力 (σ_{pe}) は導入直後のPC鋼材引張応力 (σ_{pt}) からPC鋼材のリラクセーションによる減少量 ($\Delta\sigma_{pr}$) とクリープ・乾燥収縮 ($\Delta\sigma_{p\phi}$) による減少量を除いた道路橋示方書の次式³⁾を用いた。

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pt} - \Delta\sigma_{pr} - \Delta\sigma_{p\phi}$$

次に静的曲げ破壊試験の結果より次の2つの方法で有効プレストレス量を求め、計算により求めた有効プレストレス量との比較を行った。

C. ひび割れ荷重より算出

D. 再びひび割れ荷重より算出

荷重によりひび割れが発生したとき、桁のコンクリート応力は下縁で曲げ強度 (引張強度の1.8倍と仮定) となっている。載荷荷重による応力分布と自重による応力分布は既知なので、これらより有効プレストレスの下縁応力度が計算できる。また再びひび割れが発生したときには下縁の応力が0となっているので同様に有効プレストレス量が求まる。

表-6 に有効プレストレス量の算出の際に用いた値の一覧を、表-7 に荷重試験時のPC鋼材の有効引張応力とプレストレス導入直後のPC鋼材の引張応力を示す。プレストレス導入中には3.3で述べたように遅れ弾性等の影響があるのではないかと考えられる。そこでコンクリートの弾性変形によるPC鋼材の引張応力の減少量は桁下部の見かけ上の静弾性係数を用いて求めた。またクリープ係数は桁下部の値を、乾燥収縮は図-4に示す桁中部の値を用いた。

表-6 有効プレストレス量の算出に用いた値

		設計値	スラグ	早強
静弾性係数 (kN/mm ²)	導入時	28.9	22.0	19.0
	荷重試験時	32.3	34.9	34.1
PC鋼線の静弾性係数 (kN/mm ²)		196.0	192.0	192.0
乾燥収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)		200	127	152
クリープ係数		3.00	0.70	1.07

表-7 PC鋼材の有効引張応力

	算出方法	有効引張応力 (N/mm ²)	
		スラグ混和	早強単味
プレストレス導入直後	A	1168	
	B	1162	1145
荷重試験時	A	878	
	B	1035	991
	C	1003	802
	D	1007	873

表-7より、静的曲げ破壊試験時のPC鋼材の有効引張力は、現在の設計方法で計算されているものと早強単味で同等、スラグ混和でそれを越える値を示すことがわかる。また、スラグを混和した桁と従来の早強単味の桁とを比較すると、静的曲げ破壊試験時の有効引張応力は、高炉スラグ微粉末を混和した桁のほうが大きな値を示した。これは乾燥収縮やクリープによる収縮量が早強単味よりスラグを混和したほうが小さくなっているためである。

(4) ひび割れ

図-11、図-12にひび割れ図を、表-8に等モーメント区間のひび割れ本数・平均ひび割れ間隔を、図-13にひび割れ幅とモーメントの関係を示す。ひび割れ図中の矢印は載荷点を示す。ひび割れ幅は等モーメント区間内にある4本の任意のひび割れの幅の測定値を平均したものである。なお、ひび割れ発生時を0mmとした。

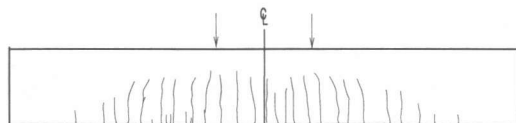


図-11 ひび割れ図 (スラグ混和)

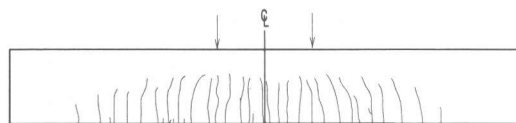


図-12 ひび割れ図 (早強単味)

表-8 ひび割れ本数・平均ひび割れ間隔

	スラグ混和	早強単味
ひび割れ本数(本)	8	10
平均ひび割れ間隔(cm)	18.8	15.0

ひび割れ図及び表-8より、早強単味のほうが多くひび割れが入り、ひび割れ間隔も狭いことが分かる。これらより早強単味の桁のほうがPC鋼材や鉄筋との付着が良いのではないかと考えられる。図-13を見ると、同じモーメントにおけるひび割れ幅は早強単味の方が小さく、1200kN・mにおけるひび割れ幅とひび割れ本数の積もほぼ等しくなった。

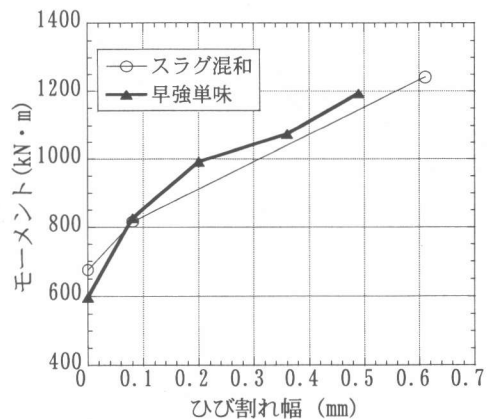


図-13 ひび割れ幅とモーメント

4. まとめ

以上の検討より以下の知見が得られた。

- ・乾燥収縮ひずみ及びクリープとも高炉スラグ微粉末を混和した桁のほうが小さい。
- ・スラグを混和したほうが圧縮強度が大きかったため破壊荷重は高炉スラグ微粉末を混和したものの方がやや大きくなった。
- ・静的曲げ破壊試験時における桁の挙動に高炉スラグ微粉末混和による悪影響はなかった。
- ・静的曲げ破壊試験時における有効プレストレス量は、収縮量が小さかったために、高炉スラグ微粉末を混和した桁のほうが大きいことが確認された。

謝辞：本実験は、本学大学院工学研究科修士課程の坂本賢次君にご協力頂きました。ここに記して謝意を示します。

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)松下博通他：高耐久性 PC 桁の収縮・クリープ性状，第10回プレレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.103-108，2000.10
- 3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編，pp.32-44，1994