

高炉スラグ微粉末を用いた PC 用コンクリートの強度特性

(社) プレストレスト・コンクリート建設業協会

正会員 ○谷口 秀明^{*1} 正会員 藤田 学^{*1}

(独) 土木研究所構造物マネジメント技術チーム

正会員 渡辺 博志^{*2} 正会員 田中良樹^{*2}

1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、コンクリートの品質に対する養生の影響が明確になっていないことや、初期強度が小さいことが作業効率を優先するこれまでの建設に適さないことなどにより、橋りょうの上部構造に使用された事例は極めて少ない。しかし、今後の建設において重要なコンクリート構造物の耐久性向上（塩分浸透抵抗性の付与、アルカリ骨材反応など）や環境負荷の軽減（CO₂ 排出量の抑制、産業副産物の有効利用など）に有効な材料の一つである。そこで、筆者らは、PC 橋の上部構造を想定し、高炉スラグ微粉末を混入した早強コンクリートの強度発現性状について検討を行った。

2. 実験方法

実験に供したコンクリートの使用材料、配合およびフレッシュ性状を、表-1 に示す。結合材として使用した早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 は、初期強度の確保と汎用性を考慮したものである。水結合材比は、現場打ち PC 橋で多用されるコンクリート（40-8-20H）を想定して 40%にした。単位水量、細骨材率および高性能 AE 減水剤の使用量を一定とし、高炉スラグ微粉末の置換率は 50%を基準に 0~70%の範囲で変えた。

圧縮強度は JIS A 1108 を準拠して測定を行った。φ100×200mm の円柱供試体を使用し、各配合のコンクリートに対して任意の材齢（1~365 日）と表-2 に示す 6 種類の養生を施した。なお、断熱養生は他の養生とは異なり、φ100mm でコア抜きを行った供試体であるほか、今回の実験では寒中コンクリートを想定して練り上がり温度を 5~10℃に調整し、外気温（試験体をブルーシートで覆った内部の温度、範囲-2~22℃、平均 5.9℃）の屋外に設置したものである。

3. 実験結果および考察

表-3 は、高炉スラグ微粉末の混入による影響に関し、各養生・材齢において置換率 0%の圧縮強度を基準とし、

キーワード：高炉スラグ微粉末、プレストレストコンクリート、圧縮強度、養生

*1 〒162-0821 東京都新宿区津久戸町 4-6 TEL.03-3260-2535,FAX.03-3260-2518

*2 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 TEL. 0298-79-6761,FAX.0298-79-6799

表-1 コンクリートの使用材料、配合およびフレッシュ性状

W/B (%)	s/a (%)	BF/B (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (B× Wt%)	AE (B× Wt%)	スラ ンプ (cm)	空 気 量 (%)	
			W	B		S					G
				C	BF						
40	40	0	173	433	0	678	1036	0.7	0.0045	10.5	4.1
		30		303	130	674	1028		0.0045	10.0	3.5
		50		217	216	671	1023		0.0055	12.0	3.8
		70		130	303	668	1020		0.0045	10.0	3.7

W:水道水, C:早強ポルトランドセメント(3.14), BF:高炉スラグ微粉末6000 (2.88), S:川砂(2.58)と砕砂(2.64)の同容積混合砂, G:硬質砂岩砕石2005 (2.65), SP:ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(消泡タイプ), AE:AE剤, W/B:水結合材比(B=C+BF), s/a:細骨材率, BF/B:高炉スラグ微粉末の置換率, ()の数値は密度(g/cm³)を表す。

表-2 コンクリートの養生方法

養生名	記号	養生方法
標準水中養生	CN	試験室において打込み翌日まで湿潤養生, 脱型後は養生槽内(20℃)
室内気中養生A	CA	試験室において湿潤養生3日, 以降は所定の材齢まで気中養生(20℃, 60%)
室内気中養生B	CB	試験室において湿潤養生5日, 以降は所定の材齢まで気中養生(20℃, 60%)
室内気中養生C	CC	試験室において湿潤養生なしで気中養生(20℃, 60%)
蒸気養生	CS	プレテンションPC桁の製造ラインで蒸気養生(前養生:凝結の始発時間程度, 昇温:15℃/h, 等温:50℃x5h, 降温:10℃/h), 以降は気中養生(20℃, 60%)
断熱養生	CI	500×500×400mmのコンクリートを発泡スチロール(厚さ200mm)によって断熱状態とした。供試体中心部の温度とコア強度(上下端100mmずつ切断, 中央部のみを使用)を測定した。

湿潤養生: 養生マットに散水後, 養生シートで被覆

表-3 各養生・材齢における高炉スラグ微粉末の置換率が圧縮強度に及ぼす影響

養生 置換率(%)	CN			CA	CB			CC	CS
	30	50	70	50	30	50	70	50	50
材 齢 (日)	1					0.66			0.89
	3	0.90	0.68	0.63		0.69		0.75	0.81
	7	1.06	0.87	0.91	0.82	1.00	0.81	0.85	0.74
	14	1.05	0.94	0.96			0.89		0.90
	28	1.15	1.04	1.06	0.84	1.06	0.89	0.91	0.94
	56	1.17	1.12	1.11	0.88		0.90		0.97
	91	1.15	1.11	1.13	0.95	1.04	0.90	0.96	0.95
	182	1.15	1.14	1.15	0.96		0.92		0.94
	365	1.14	1.15	1.13	0.93	1.04	0.95	0.96	0.91

数値は各養生、各材齢において置換率0%を基準とした圧縮強度の比を表す。空欄は試験を実施していない。

これに対する各置換率の圧縮強度との比を表したものである。いずれの養生においても、高炉スラグ微粉末の置換率の増大に伴って初期強度が低下する傾向がある。しかし、置換率を30%に抑えれば、養生CN、材齢3日で0.9、養生CB、材齢7日で1.0となり、現状の現場打ちPC工事のサイクルであっても十分に適用可能である。長期強度に関しては、養生CN下では、置換率に関

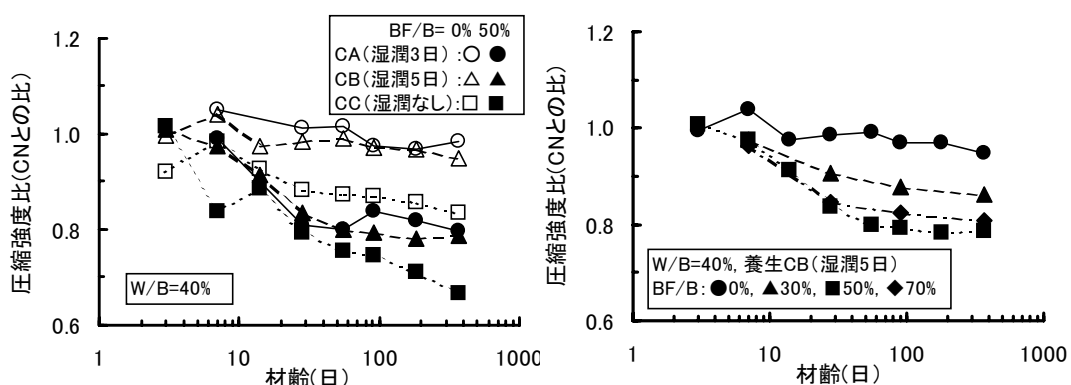


図-1 養生方法と高炉スラグ微粉末の置換率が圧縮強度に及ぼす影響

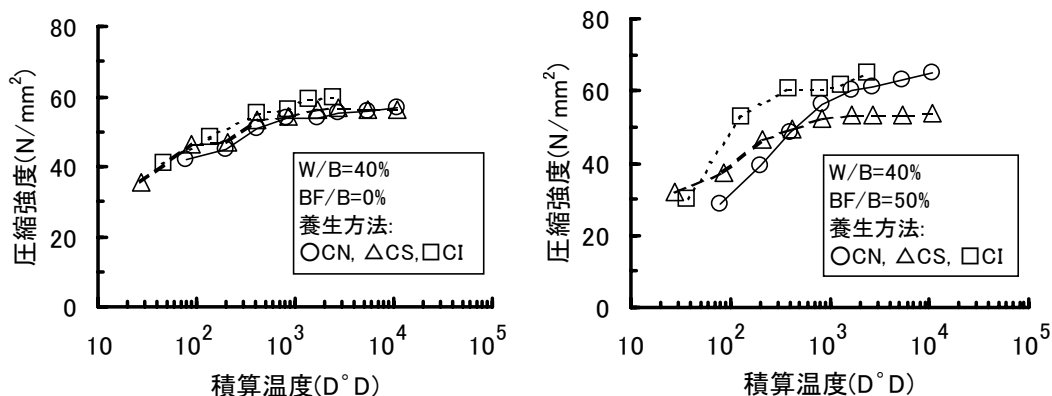


図-2 積算温度で評価した、初期の高温履歴が圧縮強度に及ぼす影響

わらず、高炉スラグ微粉末の混入によって大きくなる傾向があり、材齢56日以降では置換率0%に比べて15%前後の増加が見られる。しかし、養生CN以外の養生下において置換率50%以上では材齢1～365日まで1.0を下回っており、高炉スラグ微粉末の混入によって乾燥の影響を受けやすくなることがわかる。

図-1は、養生CNに対する各養生の圧縮強度比を表したものである。まず、養生CA, CBの圧縮強度比には差異が認められず、湿潤養生2日間の延長は強度増進に寄与しないと言える。置換率0%の圧縮強度比は材齢365日まで1.0前後であるのに対し、置換率の増加に伴って圧縮強度比は小さくなる傾向を示すが、置換率50%以上では相違が見られない。また、養生CCの圧縮強度比は、置換率に関わらず、材齢とともに低下しており、湿潤養生の必要性は明確である。これらの結果によれば、初期の湿潤養生は重要であるが、これのみで標準水中養生（養生CN）下の長期強度を期待するのは難しいと言える。

一方、初期に高温履歴を受ける養生CS, CIでは、積算温度と圧縮強度の関係で表した図-2に示すように高炉スラグ微粉末の水和反応における温度依存性が顕著である。すなわち、置換率50%では積算温度100 $^{\circ}$ D前後の圧縮強度が養生CNに比べて最も大きく、同一積算温度において10～20 N/mm^2 の差を生じている。このような性質を利用した養生CSでは、表-1に示したように材齢1日の圧縮強度比が養生CBの材齢14日と同値であるように、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現には蒸気養生は効果的である。

4. まとめ

本実験の結果から以下のことが言える。

- (1) 高炉スラグ微粉末の使用によって初期強度が低下するが、その置換率が30%の場合には置換率0%の圧縮強度に対し、材齢3日で約90%を確保し、材齢7日以降ではそれを上回る。
- (2) 高炉スラグ微粉末の有無に関わらず、圧縮強度を確保する上で湿潤養生は重要であるが、高炉スラグ微粉末を使用した場合には、初期の湿潤養生のみでは標準水中養生下の長期的な強度発現が期待できない。
- (3) 高炉スラグ微粉末を用いた場合の圧縮強度は、高温履歴によって20 $^{\circ}\text{C}$ 環境下よりも大きくなる傾向があり、高炉スラグ微粉末の水和反応における温度依存性が確認された。

なお、本研究は両所属団体が実施したPC部材の軽量・高耐久性化に関する共同研究の一環である。