

(18) 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性コンクリートの収縮・クリープ性状

九州大学大学院 正会員 松下博通
 同 上 正会員 ○鶴田浩章
 同 上 坂本賢次
 新日鐵高炉セメント(株) 前田悦孝

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性低下や高齢化が報道される中で、コンクリート構造物の高耐久化への検討も進められており、材料面での技術開発も目覚ましいものがある。その中で高炉スラグ微粉末もコンクリートの高耐久化にとって、非常に重要な材料である。従来一般に使用されていた比表面積 4000cm²/g 程度のスラグ微粉末は強度発現性が遅く、早期強度が必要である構造物にはほとんど適用されなかった。しかし、比表面積 6000 cm²/g 程度のスラグ微粉末が開発され、安定供給されるようになったことで、PC構造物の高耐久化のために、その適用が期待されることとなった。コンクリートの高耐久化に対する高炉スラグ微粉末の効果については、室内試験のレベルで既に日本材料学会等において確認されており^{1),2)}、実際の桁に適用した場合の収縮性状やクリープ性状を把握することが必要となる。そこで、著者らは高炉スラグ微粉末を適用したコンクリートの性状を供試体レベル、実桁レベルで把握し、実設計に必要なデータを取得することにした。本研究ではその供試体レベルでの検討について報告する。

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、スラグ混和と称す)、②は混和材を用いない従来の配合 (以降、早強単味と称す) 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/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。練混ぜは強制二軸ミキサ (容量 1.5m³) で行った。

表-1 コンクリートの配合

配合 No.	W/B (%)	s/a (%)	スラグ置換率 (%)	目標空気量 (%)	目標スランプ (cm)	単位量 (kg/m ³)					
						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	2±1	10±2.5	160	229	228	732	1143	2.29
②	40	43	0	2±1	10±2.5	160	400	-	768	1173	3.20

2.3 試験体

試験体として、実桁作製と同時に作製した 10×10×40cm の角柱供試体を使用した。角柱供試体は屋外曝露用と 20℃-RH60% の恒温恒湿室内用のものを作製し、ともに自己収縮、乾燥収縮及びクリープの測定を行った。

供試体本数は、各条件ごとに2本ずつとした。クリープ試験における載荷時刻は桁のプレストレス導入に合わせ、載荷荷重の大きさは桁下部のPC鋼線位置の応力に合わせた。角柱供試体では軸方向ひずみを埋込型ひずみ計(KM-100B)で、その位置でのコンクリート温度を熱電対(T型)で測定した。角柱供試体のクリープ試験の状況を写真-1、2に示す。写真-1では、時間経過に伴う持続荷重の減少に対して試験装置のナットを締めこむことで調整し、写真-2ではアキュムレータにより油圧で調整し、一定持続荷重を保持した。

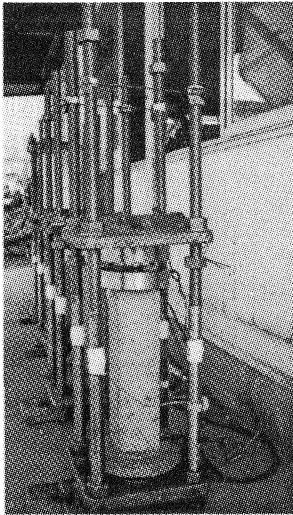


写真-1 クリープ試験(屋外)状況

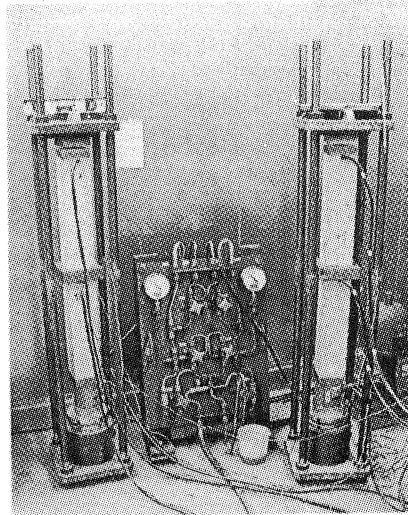


写真-2 クリープ試験(屋内)状況

また、圧縮強度、静弾性係数を測定するために、 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の円柱供試体を作製した。測定材齢は脱型時、3日、7日、28日、91日とし、屋外曝露供試体については材齢14日の分も追加し、それぞれ配合ごとに3本ずつとした。

供試体の養生及び保管の条件は以下の通りである。

・屋外曝露供試体

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-1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で保管した。

・20℃-RH60%下の供試体

養生条件は試験桁と同様で、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%の恒温恒湿室に静置し打設後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℃の水中養生を行った。

・自己収縮供試体

型枠には、試料の自由な変形が拘束されるのを防ぐために、(社)日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会提案の自己収縮試験方法(案)³⁾を参考にして、テフロンシート及びポリエステルフィルムを貼付したが、端部にはポリスチレンボードを設置しなかった。打設直後、供試体上面はポリエステルフィルムで覆い、型枠ごとポリ袋で密封した。脱型後は、アルミ箔粘着テープで2重にシールして20℃-RH60%の室内に保管

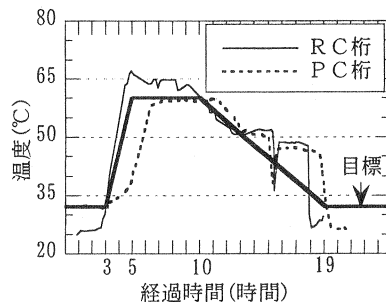


図-1 蒸気養生中の雰囲気温度

した。なお、自己収縮の検討にあたり、打設したコンクリートをウエットスクリーニングしたモルタルを用いて、プロクター貫入抵抗試験を行うことにより凝結の始発時間を把握した。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数

表-2 にコンクリートの圧縮強度及び静弾性係数の測定結果を示す。脱型時の圧縮強度がいずれも 35N/mm² を超えていることより、高炉スラグ微粉末を混入した場合でもこの配合で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わかる。

表-2 使用したコンクリートの圧縮強度及び静弾性係

	配合 No	屋外曝露			20℃-RH60%			標準養生	
		脱型時	28日	91日	脱型時	28日	91日	28日	
圧縮強度 (N/mm ²)	PC桁 作製時	①	41.5	64.1	56.5	43.3	57.2	59.9	58.4
		②	35.7	55.6	53.9	36.0	50.3	54.4	54.6
	RC桁 作製時	①	39.4	61.5	62.5	40.9	52.6	55.1	57.8
		②	36.1	57.5	57.3	37.2	51.8	54.1	56.0
静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	PC桁 作製時	①	2.65	3.19	3.37	2.74	3.07	2.94	3.10
		②	2.70	3.12	3.39	2.74	3.09	3.37	3.24
	RC桁 作製時	①	2.48	3.23	-	2.46	2.90	2.65	3.05
		②	2.55	3.18	-	2.52	2.98	2.96	3.12

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、この実ひずみはコンクリート温度の影響を大きく受けるため、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。したがって、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ことが必要となる。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、日間変動の補正に程度の違いが生じてくる。そこで、屋外に曝露している角柱供試体のコンクリート温度と実ひずみの1日の変化を材齢7日ごとに描き、その近似直線の傾きの平均を線膨張係数として補正を行った。今回使用した線膨張係数は、スラグ混和の場合 10.5×10⁻⁶/℃、早強単味の場合 8.3×10⁻⁶/℃である。

また、蒸気養生を行っているため、初期材齢において大きな温度降下が生じる。しかし、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供試体のひずみは、コンクリート温度の落ち着いた時点をもととした。そのため、恒温恒湿室内に保管した角柱供試体については、線膨張係数による温度補正を行っていない。各供試体のひずみの0点は、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時間時点とした。また、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、自己収縮用角柱供試体のひずみは凝結の始発時を0点とした。

3.3 自己収縮ひずみ

図-2 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。図に描いた線は、各配合における2本の供試体の平均ひずみである。早強単味では2本の供試体のひずみに若干のばらつきがあったが、スラグ混和の供試体にはばらつきはほとんど認められなかった。

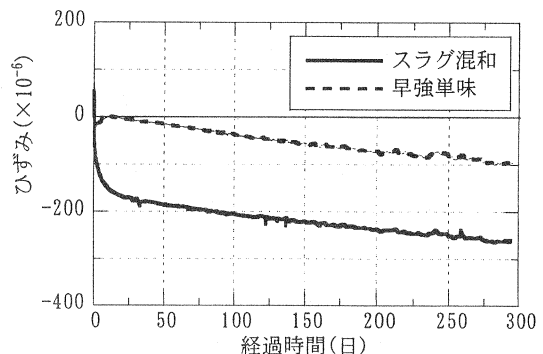


図-2 自己収縮ひずみの経時変化

また、2.3 節に述べたように型枠端部にポリスチレンボードを設置していないため、初期の変形が拘束されている可能性があるため、この結果は上記条件の下でのひずみ値ということになる。しかし、スラグ混和と早強単味の配合以外の条件は同一であるので、両者の比較を行うと水結合材比の違いにより 150×10^{-6} 程度のひずみ差が生じていることになる。

3.4 乾燥収縮ひずみ

図-3に角柱供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。ここで示した乾燥収縮ひずみは自己収縮と分離したひずみではなく、自己収縮も含んだひずみであり、各条件2本ずつの平均である。屋外に曝露している角柱供試体には膨張方向に変化している部分があるが、これは雨天時に相当する。屋外環境下では高炉スラグ微粉末を混和した場合がやや膨張量が大きいことが判る。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ことが推測できる。

20℃-RH60%の室内環境下では初期において、高炉スラグ微粉末を混和した方が明らかに大きな乾燥収縮ひずみを示しているが、40日経過時点辺りから同程度となり、その後はほぼ同じ程度かややスラグ混和の方が大きくなる傾向を示している。経過日数230日辺りからひずみが膨張側に推移しているが、これは恒温恒湿室の恒湿機能に不具合があり、湿度が高めに推移した影響である。

図中の太い一点鎖線は、土木学会コンクリート標準示方書(平成8年制定、設計編)の収縮ひずみ予測式にしたがって求めた計算値である。計算にあたっては、相対湿度60%、単位水量160kg、体積表面積比22.2mmとした。この予測式では体積表面積比が100~300mmを対象としており、本供試体のように小さいものは適用範囲外となっているが、室内における乾燥収縮ひずみの経時変化の傾向は実測値と非常によく合っている。

このタイプのプレテンション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ひずみを 200×10^{-6} として設計することになっている^{4),5)}。スラグ混和及び早強単味とも室内では 200×10^{-6} をはるかに超える乾燥収縮ひずみであるが、屋外の供試体の乾燥収縮ひずみが湿度の影響を受けて室内環境の乾燥収縮ひずみよりかなり小さくなっていることや実部材においては鉄筋等の拘束があることから、室内における供試体の乾燥収縮ひずみと実桁のひずみは大きく異なることが十分考えられる。

3.5 クリープひずみ

角柱供試体のクリープひずみは、持続応力導入後の全ひずみから載荷時の弾性ひずみと乾燥収縮ひずみを差し引いたものとして求めた。また、クリープ試験中に作用している持続応力でクリープひずみを除いたものを単位クリープひずみとした。導入した持続応力は、実桁の有効プレストレスによる部材下縁のコンクリート応力度 13.6N/mm^2 を考慮して、 13N/mm^2 を目標とした。本実験において、載荷応力強度比は室内環境で31~36%、屋外環境で30~36%であった。表-3は角柱供試体に持続荷重を載荷した直後の弾性ひずみの値を示したものである。

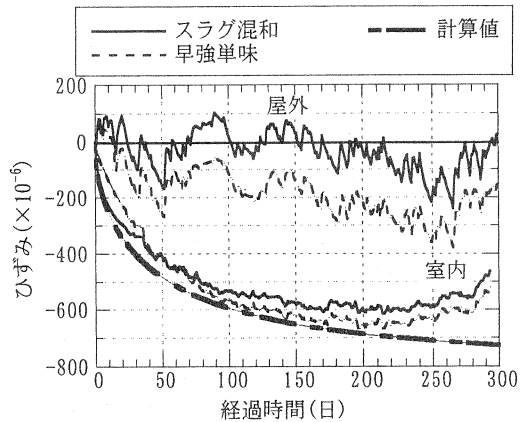


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

表-3 持続荷重載荷直後のコンクリートの弾性ひずみ($\times 10^{-6}$)

	測定環境	
	屋外曝露	20℃-RH60%室内
スラグ混和1	754	859
スラグ混和2	1128	825
早強単味1	1028	931
早強単味2	861	941

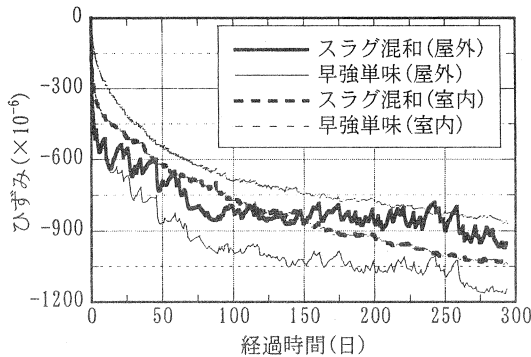


図-4 クリープひずみの経時変化

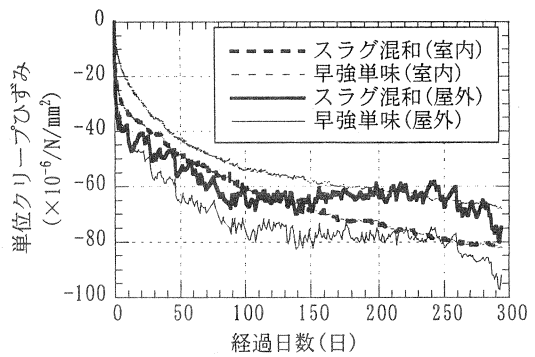


図-5 単位クリープひずみの経時変化

図-4は角柱供試体のクリープひずみの経時変化を示している。これらも各条件2本ずつの平均値である。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のクリープひずみを示しているが、その後は高炉スラグ微粉末混和の場合が小さいクリープひずみを示している。室内では高炉スラグ微粉末を混和した場合が初期からひずみが大きくなっている。このように、屋外で高炉スラグ微粉末を混和した方がクリープひずみが小さくなったのは、湿度による影響の受けやすさではないかと考えられる。図-5は、単位クリープの経時変化を示す。図-4の場合と同様に、屋外環境の方が室内環境よりも単位クリープひずみが大きくなっており、いずれのケースも単位クリープひずみの経時変化の傾向は非常に似通っている。また、クリープひずみも単位クリープひずみも経過日数が長くなると、測定環境の違いが小さくなっていることがわかる。

図-6はクリープ係数の経時変化を示したものである。クリープひずみや単位クリープひずみと同様に、クリープ係数においても屋外環境の方が大きなクリープ係数を示している。このタイプのプレテンションPC桁ではコンクリートのクリープ係数を中埋合成前までが $\phi=1.2$ 、その後を $\phi=1.8$ として設計することになっているが、いずれの環境においてもクリープ係数はそれらの値を下回っている。また、経過日数が長くなるにつれて測定環境の違いが小さくなっている。

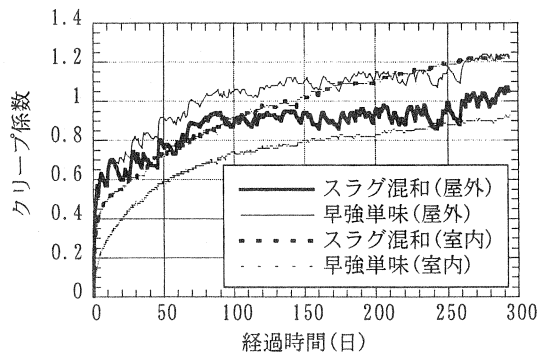


図-6 クリープ係数の経時変化

4. おわりに

高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性コンクリートの収縮・クリープ性状について、屋外環境と室内環境における供試体レベルの実験を行った結果、得られた知見を以下に示す。

- ①比表面積 $6100\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末をセメントとの置換率50%で適用したコンクリートは、蒸気養生条件のもとで、従来の早強セメントのみを用いた場合より水結合材比を5%程度小さくすることによりプレストレス導入時に必要な圧縮強度を満たすことが可能となり、強度発現性状からプレテンションPC桁に適用することが可能であることがわかった。
- ②自己収縮ひずみについては、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの場合、早強セメントのみの場合より 160×10^{-6} 程度大きく、 200×10^{-6} を超えるひずみであった。ただし、本実験の結果は初期に自己収縮が拘束された可能性がある。

- ③室内環境下での乾燥収縮ひずみは、収縮ひずみ予測式により得られる値とほぼ同一のひずみ値を示した。スラグ混和の有無の影響は、初期にスラグ混和の場合が大きな乾燥収縮ひずみを示したが、その後はほぼ同程度となり、高炉スラグ微粉末を混和することでの乾燥収縮への悪影響は認められなかった。また、屋外環境では、湿度の影響により室内環境の1/3程度の乾燥収縮ひずみとなり、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートが湿度の影響を受けやすいことがうかがえた。
- ④同じ形状寸法の角柱供試体であっても、クリープひずみ及び単位クリープひずみは20℃-RH60%よりも屋外環境の方が大きく、高炉スラグ微粉末を混和した場合は早強セメントのみの場合よりもクリープひずみ及び単位クリープひずみが小さくなった。
- ⑤角柱供試体のクリープ係数は、いずれの環境においても設計で用いられる値よりも小さい値となった。また、高炉スラグ微粉末の混和によるクリープ係数の影響は、屋外環境と20℃-RH60%で大小関係が逆になる傾向が見られた。

以上のように、蒸気養生を必要とするプレテンションPC桁の高耐久化をはかるために、高炉スラグ微粉末の適用の影響について角柱供試体を使用した検討を行ってきたが、高炉スラグ微粉末の混和による圧縮強度及び収縮・クリープ性状は従来の早強セメントのみを使用した場合と大差なく悪影響は認められず、実桁への適用が十分に期待できることがわかった。

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，(社)日本材料学会，1998.3
- 2) 横室 隆，依田彰彦，木村正尚，島崎信明：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，Vol.21，No.2，pp.67-72，1999
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.195-198，1996
- 4) 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
- 5) 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

謝辞

本実験を行うにあたっては、(株)安部工業所ならびに(株)安部工業所大牟田工場の方々、(株)東京測器研究所福岡営業所 相良氏にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。