

混和材を用いたコンクリートの収縮とクリープに関する実験的研究

(独)土木研究所 正会員 工修 ○中村 英佑
(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工修 鈴木 聡
(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工博 鈴木 雅博
(独)土木研究所 正会員 工博 渡辺 博志

Abstract : This paper presents test results on shrinkage and creep behaviors of concrete mixed with and without supplementary cementitious materials (SCMs). The concrete strains due to shrinkage and creep were measured until the age of six months. The use of SCMs was found to provide substantial effects on the shrinkage and creep behaviors of concrete. While SCMs contributed to reduce drying shrinkage, GGBF slag produced a large increase of autogenous shrinkage. Additionally, concrete fabricated with SCMs resulted in lower creep coefficients than that made only with high early strength Portland cement.

Key words : Supplementary cementitious material , GGBF slag , Fly ash , Shrinkage , Creep

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート構造物においても、環境負荷低減や耐久性向上の観点から、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を用いたコンクリートの普及に向けた検討が行われている。プレストレストコンクリート構造物に混和材を用いたコンクリートを適用するためには、プレストレストの減少量を算出する際に必要となる収縮およびクリープ特性を明らかにしておくことが不可欠である。しかしながら、早強ポルトランドセメントに混和材を混合したコンクリートの収縮およびクリープ特性は必ずしも明確にされていない。

本研究では、現場打ちのプレストレストコンクリート構造物に混和材を用いたコンクリートを適用することを念頭に、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを混合したコンクリートの収縮およびクリープ特性を明らかにすることを目的とした。このため、材齢3, 7, 28日でコンクリート供試体に圧縮力を負荷し、材齢182日までのクリープ試験の結果をもとに混和材を用いたコンクリートのクリープ係数について検討した。また、種々の材料試験を行い、自己収縮および乾燥収縮に起因するひずみの挙動を個別に明らかにすることを試みた。

2. 実験方法

2. 1 実験の内容

本研究では、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを混合したコンクリートの収縮およびクリープ特性を明らかにするため、(1)自己収縮と乾燥収縮に起因するひずみを個別に測定する材料試験と、(2)現場打ちのプレストレストコンクリート構造物で想定される養生条件と載荷開始材齢を模擬した供試体を用いたクリープ試験を行った。

材料試験の内容を表-1に示す。混和材を用いたコンクリートの収縮ひずみの特徴を明確にするため、(1)JCI「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」による自己収縮ひずみ(AU)、(2)JIS A 1129ダイヤルゲージ法による収縮ひずみ(LCD)、(3)前述(2)に用いた供試体と同条件で製作した供試体の自己収縮ひずみ(LCS)、計3種類のコンクリートひずみを測定した。また、乾燥収縮のみに起因するひずみの挙動を把握するため、「(2)収縮ひずみ(LCD)」から「(3)自己収縮ひずみ(LCS)」を差し引いた

表-1 材料試験の内容

測定項目	材料試験の内容
自己収縮ひずみ (AU)	<p>◆JCI「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」を参考として実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・□100×400mm 供試体(各2体)のコンクリートひずみを埋込型ひずみ計で測定 ・コンクリート打設直後から封かんした後、終結後に脱型し、20℃60%RHの恒温恒湿槽に静置
収縮ひずみ (LCD)	<p>◆JIS A 1129 ダイヤルゲージ法に準拠して実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・□100×400mm 供試体(両端面シール、各2体)の長さ変化と質量を測定 ・材齢7日まで20℃で水中養生した後、20℃60%RHの恒温恒湿槽に静置
自己収縮ひずみ (LCS)	<p>◆収縮ひずみ(LCD)に占める自己収縮ひずみ(LCS)を測定するために実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・□100×400mm 供試体(各2体)のコンクリートひずみを埋込型ひずみ計で測定 ・材齢7日まで20℃で水中養生した後、直ちに封かんし、20℃60%RHの恒温恒湿槽に静置

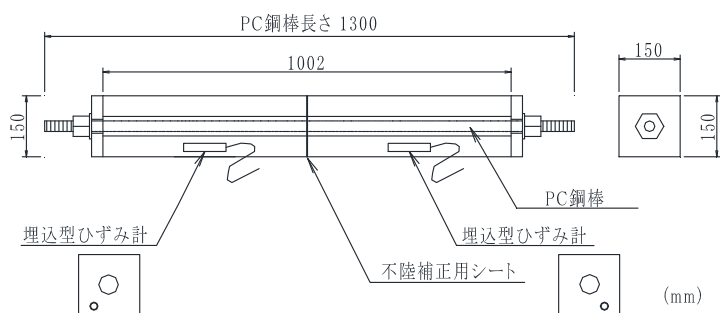


図-1 クリープ試験の供試体の概要

表-2 結合材の物性・化学成分

記号	結合材の種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分 (%)						
				ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
HPC	早強ポルトランドセメント	3.14	4,570	0.9	15.4	4.1	2.6	70.1	1.3	3.1
BS4	高炉スラグ微粉末 4000	2.89	4,460	0.1	32.8	13.9	0.3	42.2	6.1	2.2
BS6	高炉スラグ微粉末 6000	2.91	6,020	0.1	32.3	13.8	0.5	42.2	6.2	2.9
FA	フライアッシュⅡ種	2.30	4,280	2.7	56.0	28.9	4.3	2.2	0.9	0.4

表-3 コンクリート配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)						s/a (%)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S		G
			HPC	BS4	BS6	FA			
H40	40	165	413	—	—	—	758	968	45.0
H35B430	35		330	141 (30%)	—	—	700		43.0
H35B650			236	—	236 (50%)	—	695		42.9
H35F20			377	—	—	94 (20%)	682		42.4

※混和材の単位量の()内の値は各混和材の全結合材に占める分量の割合を表示

※細骨材: 密度 2.56g/cm³, 吸水率 2.23%, 粗骨材: 密度 2.67g/cm³, 吸水率 0.43%と 0.46%を均等混合, 最大寸法 25mm

※混和剤: 高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸エーテル系を全配合で使用し, 空気連行剤は高アルキルカルボン酸系を H35F20, 変性ロジン酸化合物系を H35F20 以外の配合で使用

「ひずみ差(LCD-LCS)」を乾燥収縮のみに起因するひずみと仮定した。

クリープ試験は、JIS A 1157を参考として行った。本実験では、断面中央にφ48mmの円形孔を有する□150×500mmの角柱供試体2体を貫通して連結したPC鋼棒を緊張することにより、所定の圧縮応力度を供試体に負荷した(図-1)。また、PC鋼棒を定期的に再緊張することにより、PC鋼棒の緊張力を目標値の±3%の範囲内で管理し、供試体に負荷された圧縮応力度が概ね一定となるようにした。圧縮応力度は、同時に製作した円柱供試体(φ100×200mm)の圧縮強度に基づき、材齢3日において圧縮強度の20%、材齢7、28日において30%とした。材齢7、28日から載荷を開始した供試体ではJIS A 1157を参考と

して概ね同程度の比率の圧縮応力度を負荷したが、材齢3日から载荷を開始した供試体では初期材齢での载荷により供試体に損傷が生じることを避けるため、これよりも小さい比率の圧縮応力度を負荷した。養生条件は、材齢3日までは20℃の室内で養生マットを用いた湿潤養生、その後は温度と湿度の管理のされていない実験室内で気中養生とした。材齢182日までの実験室の温度の平均値は16.2℃、湿度の平均値は44.3%RHであった。なお、本実験では各条件で2体ずつの供試体で測定を行ったが、以下ではこれらの平均値を示す。

2. 2 結合材の物性・化学成分とコンクリート配合

結合材の物性と化学成分を表-2、コンクリート配合を表-3に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。混和材を混合する配合では、早強ポルトランドセメント (HPC) の質量に対して、高炉スラグ微粉末 4000 (BS4) で 30% (H35B430)、高炉スラグ微粉末 6000 (BS6) で 50% (H35B650)、フライアッシュ II 種 (FA) で 20% (H35F20) の分量の混和材をそれぞれ置換した。水結合材比 (W/B) は、早強ポルトランドセメント単味の供試体 (H40) で 40%、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた供試体で 35% とした。これらの値は、一般的な現場打ちのプレストレストコンクリート構造物での養生条件とプレストレス力の導入材齢を踏まえて、材齢3日まで湿潤養生を行った直後に 30N/mm² 以上の圧縮強度を確保でき、配合間の W/B の差が過大とならないように、圧縮強度の発現を事前に確認して決定した。なお、混和材の使用がコンクリートの収縮およびクリープ特性に与える影響を検討することを主な目的としたため、全配合で単位水量 (165kg/m³) と単位粗骨材量 (968kg/m³) を同一とし、スランプ 12±2.5cm と空気量 4.5±1.0% の目標値を達成できるように混和剤の使用量を調整した。

3. 実験結果

3. 1 自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみ

自己収縮ひずみ (AU) の測定結果を図-2 に示す。横軸の基点は、同時に行った凝結試験による始発時間とした。いずれの供試体においても、始発直後に僅かに膨張が生じ、その後は約20日経過後までは急速に、これ以降は緩やかに収縮が生じた。始発から約180日経過後の自己収縮ひずみ (AU) は、早強ポルトランドセメント単味の H40 と比較すると、高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 で大きく、フライアッシュを用いた H35F20 で若干小さくなった。

収縮ひずみ (LCD) と自己収縮ひずみ (LCS) の測定結果を図-3、4 に、ひずみ差 (LCD-LCS) を図-5 に示

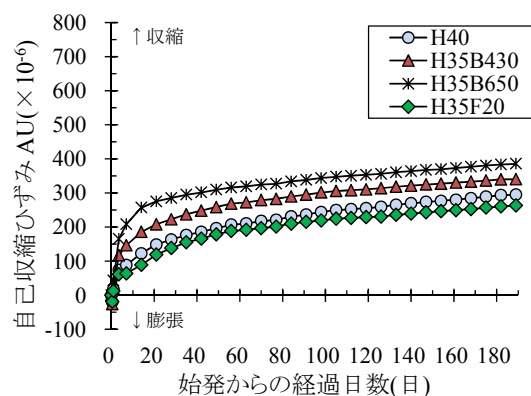


図-2 自己収縮ひずみ (AU)

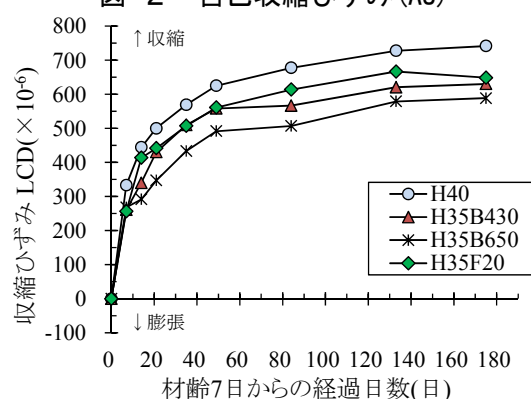


図-3 収縮ひずみ (LCD)

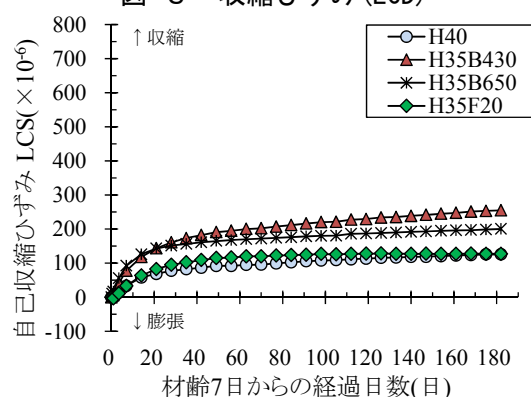


図-4 自己収縮ひずみ (LCS)

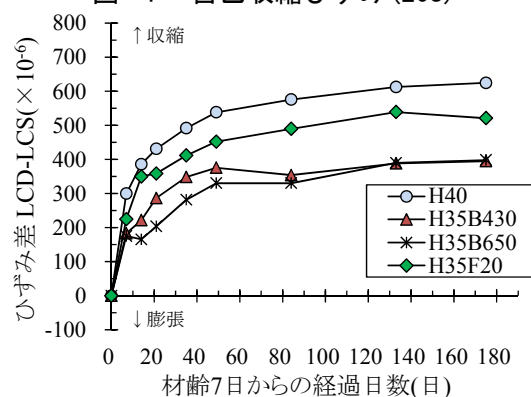


図-5 ひずみ差 (LCD-LCS)

す。各グラフの横軸の基点は水中養生を終えた材齢7日とした。収縮ひずみ(LCD)は自己収縮と乾燥収縮の両方に起因する全収縮ひずみであり、収縮ひずみ(LCS)を自己収縮起因分、ひずみ差(LCD-LCS)を乾燥収縮起因分のひずみとみなすことができる。この結果によると、早強ポルトランドセメント単味のH40よりも混和材を用いたH35B430、H35B650、H35F20で収縮ひずみ(LCD)とひずみ差(LCD-LCS)が小さくなった。特に高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650で、ひずみ差(LCD-LCS)が小さくなった。このため、混和材の使用は乾燥収縮に起因するひずみの減少に寄与し、この傾向は高炉スラグ微粉末を用いる場合に特に顕著に現れると考えられる。

一方、自己収縮ひずみ(LCS)は、図-2と概ね同様の傾向を示し、H40と比較して、高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650で大きく、フライアッシュを用いたH35F20で同程度となった。いずれの供試体においても自己収縮に起因するひずみの値は乾燥収縮に起因するひずみの値よりも小さくなったが、H35B430とH35B650では収縮ひずみ全体に占める自己収縮に起因するひずみの割合が比較的大きくなった。このように、混和材の使用により全収縮ひずみは減少する傾向にあったが、これに占める自己収縮あるいは乾燥収縮に起因するひずみの構成は結合材の種類によって異なると考えられる。

3. 2 乾燥収縮ひずみと質量減少率

乾燥収縮ひずみ(LCD)を測定した供試体の質量減少率を図-6に示す。質量減少率を乾燥による水分の逸散量を示す指標と仮定すると、H40と比較して、高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650では水分の逸散量が少なく、逆にフライアッシュを用いたH35F20では水分の逸散量が多くなった。H35F20の水分の逸散量は乾燥開始から約20日後までの初期材齢で多く、これ以降の水分の逸散量の増加程度はH40と概ね同等であった。

また、質量減少率とひずみ差(LCD-LCS)の関係を図-7に示す。いずれの供試体においても、質量減少率が大きくなるほどひずみ差(LCD-LCS)が大きくなる傾向にあったが、厳密には結合材の種類によって挙動が異なった。高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650では、他の供試体と比較して質量減少率が小さく、ひずみ差(LCD-LCS)も小さくなった。この原因は、高炉スラグ微粉末の使用により水和反応での自由水の消費量が多かったことや細孔構造が緻密になったことで水分の逸散量が減少し、結果として乾燥収縮ひずみが小さくなったためではないかと考えられる。一方、フライアッシュを用いたH35F20は、乾燥開始後初期ではH40と比較して質量減少量は大きくなったがひずみ差(LCD-LCS)は小さく、その後の両者の関係は概ね平行に推移した。この原因については必ずしも明確ではないが、H35F20では乾燥開始後初期に乾燥収縮に寄与しなかった水分の逸散量が多かったと推察される。すなわち、質量減少率とひずみ差(LCD-LCS)の関係は厳密には結合材の種類によって異なり、水分の逸散量と乾燥収縮ひずみの関係も結合材の種類ごとに異なると考えられる。

3. 3 圧縮強度とヤング係数

コンクリートの圧縮強度の試験結果を図-8、9に示す。ここでは、クリープ試験の角柱供試体と同時に製作して同様の養生を行った円柱供試体を用いて材齢3、7、28、91日(図-8)、標準養生を行った

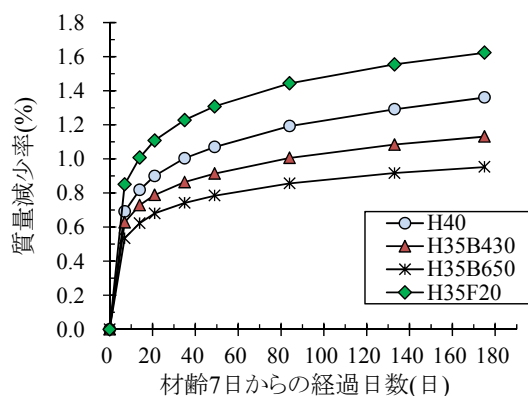


図-6 質量減少率

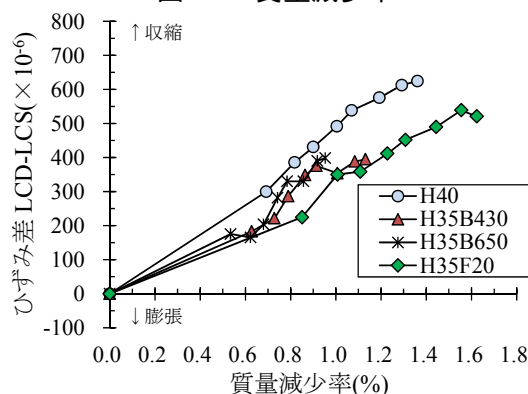


図-7 質量減少率とひずみ差(LCD-LCS)

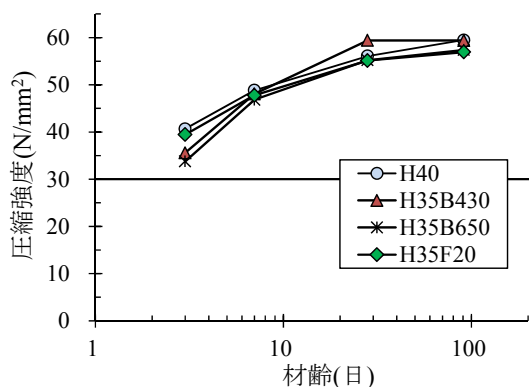


図-8 圧縮強度の推移

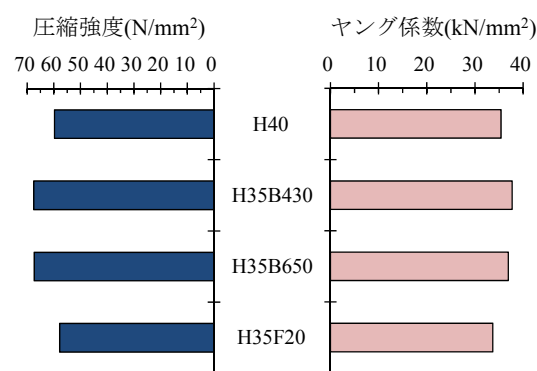


図-9 圧縮強度とヤング係数(標準養生・材齢28日)

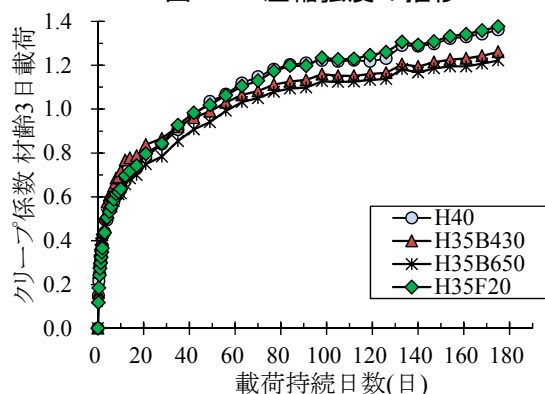


図-10 クリープ係数(材齢3日載荷)

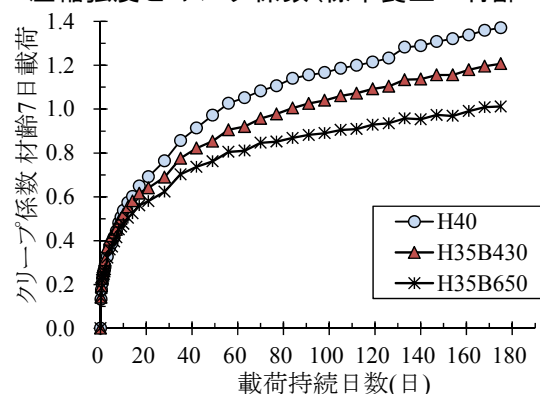


図-11 クリープ係数(材齢7日載荷)

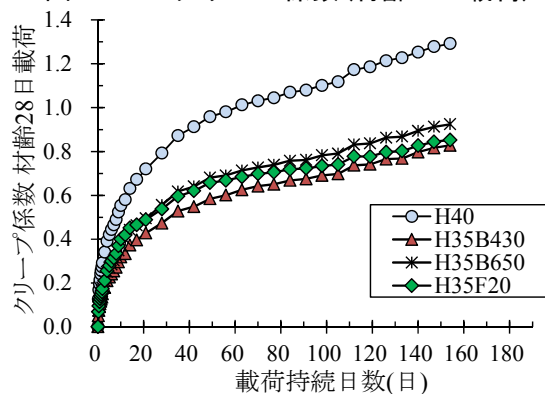


図-12 クリープ係数(材齢28日載荷)

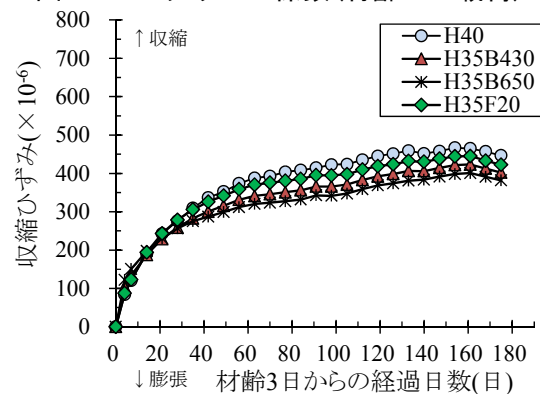


図-13 収縮ひずみ

円柱供試体を用いて材齢28日(図-9)に圧縮強度試験を行った。クリープ試験で角柱供試体に負荷した圧縮力の大きさは、図-8の結果をもとに決定した。なお、圧縮強度はJIS A 1108、ヤング係数はコンプレッションメータを用いてJIS A 1149に準拠して測定した。これらの結果によると、圧縮強度は、材齢3日ではH40とフライアッシュを用いたH35F20で高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650よりも若干大きくなったが、材齢7日以降では結合材の種類による差が小さくなった。また、材齢28日まで標準養生を行った場合、H35B430とH35B650の圧縮強度とヤング係数がH40とH35F20よりも大きくなった。

3. 4 クリープ係数と収縮ひずみ

式(1)を用いて算出したクリープ係数の推移を図-10～12、圧縮力を負荷していない供試体の収縮ひずみを図-13に示す。

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{sh} - \varepsilon_{ci}}{\sigma_c} E_c \quad (1)$$

ここで、 φ ：クリープ係数、 ε_{cc} ：圧縮力を負荷した供試体のひずみ、 ε_{sh} ：圧縮力を負荷していない供試

体のひずみ(図-13), ε_{ci} : 載荷時の弾性ひずみ, E_c : 標準養生した供試体の材齢28日のヤング係数(図-9), σ_c : 圧縮応力度である。ここでは同時に製作して圧縮力を負荷していない供試体で測定されたひずみを収縮に起因するひずみと仮定し, これを圧縮力を負荷した供試体で測定されたひずみから差し引いてクリープひずみとした。なお, 材齢7日から載荷を開始したH35F20は, 計測器の不良により試験継続が不能となったため記載していない。

材齢182日までの結果によると, 材齢3日から載荷を開始した供試体のクリープ係数は, H40とフライアッシュを用いたH35F20で同程度となり, 高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650ではこれらよりも若干小さくなった。前述したように, 圧縮強度は材齢3日の時点ではH35B430とH35B650で小さく, その後は結合材の種類による差が小さくなった。すなわち, H35B430とH35B650ではH40やH35F20よりも圧縮強度の長期的な増加量が大きく, 長期材齢においてクリープ係数が小さくなったのではないかと考えられる。一方, 材齢7, 28日から載荷を開始した供試体のクリープ係数は, H40と比較して混和材を用いたH35B430, H35B650, H35F20で小さくなり, この傾向は材齢28日に載荷した供試体で特に明確に現れた。圧縮強度は材齢7, 28, 91日では結合材の種類による差が小さくなったが, 混和材を用いた供試体では材齢の進行とともに細孔構造が緻密になりクリープによるひずみが生じにくくなったためではないかと推察される。すなわち, 混和材を用いたコンクリートのクリープ係数は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等か小さくなる傾向にあり, 載荷開始材齢が遅くなるほど混和材の使用の有無による差が明確になった。

一方, 圧縮力を負荷していない供試体の収縮ひずみの推移(図-13)に着目すると, 図-3と同様に, H40と比較して混和材を用いたH35B430, H35B650, H35F20で小さくなる傾向にあった。しかし, 図-3よりも図-13の収縮ひずみの値が小さくなり, 結合材の種類による差も小さくなった。この原因としては, 両供試体の養生条件や断面寸法, グラフの横軸の基点などが異なることが挙げられる。

なお, 本論文ではクリープ係数の推移のみに着目して検討を行ったが, 混和材を用いたコンクリートのクリープ挙動を明らかにするためには, 単位応力当たりのクリープひずみの挙動やヤング係数の長期的な推移も考慮することが必要である。これらの点については, 材齢182日の時点でもクリープひずみが増加傾向にあったため, 今後も実験を継続して検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究では, 混和材を用いたコンクリートの収縮およびクリープ特性について実験的に検討を行った。材齢182日までの実験結果から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 混和材を用いることにより全収縮ひずみは早強ポルトランドセメント単味の供試体よりも減少する傾向にあった。ただし, 乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの挙動は早強ポルトランドセメント単味の供試体との比較では傾向が異なり, 混和材を用いた供試体の乾燥収縮ひずみは減少したが, 高炉スラグ微粉末を用いた供試体の自己収縮ひずみは増加した。
- (2) 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係は, 結合材の種類により異なった。
- (3) 混和材を用いた供試体のクリープ係数は, 早強ポルトランドセメント単味の供試体と同等か小さくなる傾向にあり, 載荷開始材齢が遅くなるほど混和材の使用の有無による差が明確に現れた。

なお, 今後も実験を継続してクリープひずみと収縮ひずみの長期的な推移を把握し, 混和材を用いたコンクリートの収縮およびクリープ特性について検討する予定である。

本論文は, (独)土木研究所と(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会および国内7機関による共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の検討結果の一部をまとめたものである。また, BASFジャパン(株)の土谷正氏から混和剤についての助言を得た。記して謝意を表する。