

混和材を用いたコンクリートの クリープ・収縮に関する実験的研究

中村 英佑*1・石井 豪*2・鈴木 雅博*3・渡辺 博志*4

(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は、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたプレストレストコンクリート構造物の設計・施工方法を提案することを目的として共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」を設置し、この一環として早強ポルトランドセメントの一部を各混和材で置換したコンクリートのクリープ・収縮特性を明らかにするための実験を行っている。実験の結果、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程度かこれよりも小さくなる傾向にあることが分かった。また、乾燥収縮に起因するひずみは混和材を用いた供試体で小さくなったが、自己収縮に起因するひずみは高炉スラグ微粉末を用いた供試体で大きく、打込み後の水和発熱によるコンクリートの温度履歴の影響を受けやすいことなどが明らかとなった。

キーワード：環境負荷低減、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、クリープ、収縮

1. はじめに

近年、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活発に行われている¹⁾。(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でも共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究 (平成 23～27 年度)」を設置し、混和材を用いたプレストレストコンクリート構造物の設計・施工方法を提案することを目的としてさまざまな検討を行っている²⁾。

混和材を用いたコンクリートをプレストレストコンクリート構造物で積極利用していくためには、そのクリープ・収縮特性を適切に把握しておくことがきわめて重要である。たとえば、コンクリートの乾燥収縮度とクリープ係数はプレストレストの減少量を算定する際に不可欠な設計用値であり、使用するコンクリートの品質に応じて適切な数値を採用する必要がある。また、乾燥収縮あるいは自己収縮に起因するひずみについては、初期ひび割れ防止の観点から、その特性を十分に把握したうえで必要に応じて対策を講じることが望まれる。このため、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートのクリープ・収縮に着目した実験的検討が各方面で行われている^{3, 4)}。本共同研究では、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の一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートのクリープ・収縮特性を明らかにするための実験を行っている⁵⁾。

本稿では、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートのクリープ・収縮特性に関する検討結果を報告する。具体的には、材齢 3, 7, 28, 365 日でコンクリート供試体に圧縮力を負荷して実施している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特性について述べる。また、混和材を用いたコンクリートの収縮特性を検討するため、自己収縮および乾燥収縮に起因するひずみの挙動を把握するために行った実験と打込み後の水和発熱によるコンクリートの温度履歴が自己収縮ひずみに与える影響を明らかにするために行った実験の結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 コンクリート配合

コンクリート配合を表 - 1 に示す。セメントには早強ポルトランドセメント (HPC) を用いた。配合は、早強ポルトランドセメント単味の配合 (H40) と、3 種類の混和材を用いた配合の計 4 種類とした。混和材を用いた配合では、早強ポルトランドセメントの質量に対して、高炉スラグ微粉末 4 000 (BS4) が 30 % (H35B430)、高炉スラグ微粉末 6 000 (BS6) が 50 % (H35B650)、フライアッシュⅡ種 (FA) が 20 % (H35F20) の分量となるように各混和材を置換した。水結合材比 (W/B) は、早強ポルトランドセメント単味の配合で 40 %、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた配合で 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湿潤養生日数やプレストレスト力の導入材齢を踏まえて、材齢 3 日まで養生マットを用いて湿潤養生を行った直後に 30 N/mm² 以上の圧縮強度を確保でき、さらには配

*1 Eisuke NAKAMURA : (独) 土木研究所

*2 Tsuyoshi ISHII : (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会

*3 Masahiro SUZUKI : (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会

*4 Hiroshi WATANABE : (独) 土木研究所

表 - 1 コンクリート配合

No.	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					S	G
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA					
			HPC	BS4	BS6	FA		
H40	40	165	413 (100%)	-	-	-	758	968
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	-	-	700	
H35B650			236 (50%)	-	236 (50%)	-	695	
H35F20			377 (80%)	-	-	94 (20%)	682	

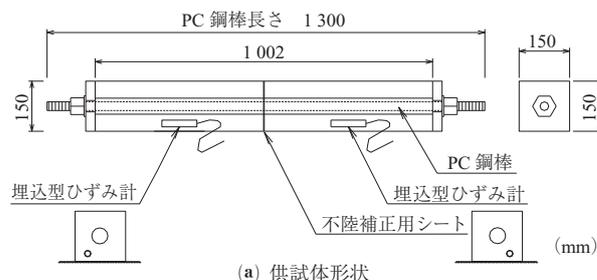
※ () 内の%値は各結合材の占める分量の割合を表示
 ※ HPC：早強ポルトランドセメント（密度 = 3.14 g/cm³，比表面積 = 4 570 cm²/g，4 580 cm²/g），BS4：高炉スラグ微粉末 4 000（密度 = 2.89 g/cm³，比表面積 = 4 460 cm²/g，4 410 cm²/g），BS6：高炉スラグ微粉末 6 000（密度 = 2.91 g/cm³，比表面積 = 6 020 cm²/g，6 170 cm²/g），FA：フライアッシュ II 種（密度 = 2.30 g/cm³，2.08 g/cm³，比表面積 = 4 280 cm²/g，3 810 cm²/g），密度と比表面積の値が 1 種類の場合は全試験で同一の値の材料を使用，2 種類の場合は前者をクリープ試験と収縮試験①，後者を収縮試験②で使用
 ※ 細骨材：静岡県掛川産陸砂（密度 2.56 g/cm³，吸水率 2.23%）
 ※ 粗骨材：茨城県笠間産砕石 5 号（密度 2.67 g/cm³，吸水率 0.43%）と砕石 6 号（密度 2.67 g/cm³，吸水率 0.46%）を均等に混合
 ※ 化学混和剤：高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）と空気連行剤をスランプ 12 ± 2.5 cm，空気量 4.5 ± 1.5% となるように使用量を調整

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。また，混和材の使用がコンクリートのクリープ・収縮特性に与える影響を検討することを目的としたため，全配合で単位水量（165 kg/m³）と単位粗骨材量（968 kg/m³）を同一とし，スランプ 12 ± 2.5 cm と空気量 4.5 ± 1.0% の目標値を達成できるように化学混和剤の使用量を調整した。

2.2 実験方法

(1) クリープ試験

クリープ試験は，JIS A 1157 を参考として行った。今回の実験では，断面中央にφ48 mm の円形孔を有する角柱供試体（150 × 150 × 500 mm）2 体を貫通して連結した PC 鋼棒を緊張し，所定の圧縮応力度を供試体に負荷した（図 - 1）。連結した 2 体の供試体は同一配合のものとし，各供試体の内部に設置した埋込型ひずみ計で測定したコンクリートひずみの平均値を用いて検討を行った。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おおむ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 × 200 mm）の圧縮強度に基づき，材齢 3 日に荷重を開始する供試体で圧縮強度の 20%，材齢 7，28，365 日に荷重を開始する供試体で圧縮強度の 30% とした。材齢 7，28，365 日から荷重を開始した供試体では圧縮強度に対して JIS A 1157 と同程度の比率の圧縮応力度を負荷したが，材齢 3 日から荷重を開始した供試体では初期材齢での荷重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。なお，圧縮力を負荷した供試体のコンクリートひずみの測定値からクリープひずみを抽出するため，これと同一形状の圧縮力を負荷しない供試体も製作して同様の方法でコンクリートひずみを測定した。



(a) 供試体形状

(b) 試験状況

図 - 1 クリープ試験の概要

円柱供試体の圧縮強度試験は，クリープ試験で角柱供試体に圧縮力を負荷した材齢 3，7，28，365 日に加えて，圧縮強度の発現を確認するために材齢 91，182 日でも行った。圧縮強度の測定は JIS A 1108，静弾性係数の測定は JIS A 1149 に準拠した。

これらの供試体の養生方法は，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，その後は温湿度の管理のされていない実験室内で気中養生とした。なお，本稿では材齢 490 日までのクリープ試験の実験結果を記載しており，この期間の実験室の温度の平均値は 18.8℃，湿度の平均値は 53.5% であった。

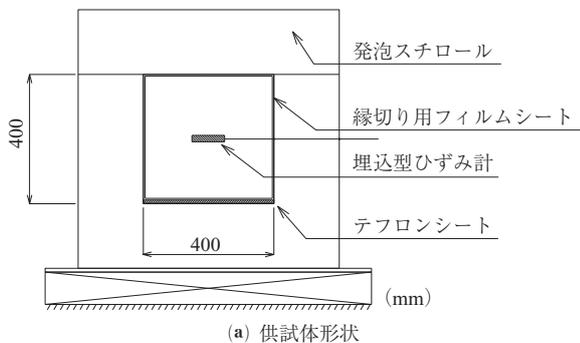
(2) 収縮試験①：乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみ

収縮試験①では，混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの特性を把握することを目的として，水中養生の終了直後から 2 種類の養生を行った角柱供試体（100 × 100 × 400 mm）のひずみを測定した。今回の実験では，一般的な乾燥収縮ひずみ測定用の供試体と同様に水中養生期間を材齢 7 日までとし，水中養生の終了直後から温度 20℃，湿度 60% の恒温恒湿槽内で乾燥させた供試体の収縮ひずみ（LCD）と，水中養生の終了直後にアルミテープで封緘して上記と同じ恒温恒湿槽に保管した供試体の自己収縮ひずみ（LCS）を測定した。前者の収縮ひずみ（LCD）は乾燥収縮と自己収縮の両方に起因する全ひずみであるが，後者の自己収縮ひずみ（LCS）は自己収縮のみに起因するひずみと考えることができる。本稿では，収縮ひずみ（LCD）から自己収縮ひずみ（LCS）を差し引いた「ひずみ差（LCD - LCS）」を乾燥収縮のみに起因するひずみと定義し，乾燥収縮あるいは自己収縮ひずみに起因するひずみの挙動を把握した。収縮ひずみ（LCD）は JIS A 1129 ダイヤルゲージ方法，自己収縮ひずみ（LCS）は供試体の中心部に水平配置した埋込型ひずみ計で測定を行い，各条件で 2 体ずつの供試体の平均値を用いて検討を行った。なお，各ひずみの測定は，水中養生の終了直後か

ら開始した。

(3) 収縮試験②：温度履歴の自己収縮ひずみへの影響

文献6)では、高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみは打込み後の水和発熱によるコンクリートの温度履歴の影響を受けやすいことが報告されている。このため、収縮試験②では、各混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみに打込み後の温度履歴を与える影響を把握することを目的として、「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法⁷⁾」を参考とした小型供試体(100×100×400 mm)と、発泡スチロール(厚さ200 mm, 発泡倍率90倍)で簡易断熱を行うことによりマスコンクリートを模擬したマスブロック供試体(400×400×400 mm, 図-2)の自己収縮ひずみを測定した。角柱供試体は温度20℃の実験室、マスブロック供試体は温湿度の管理のされていない実験室でコンクリート打込み直後から封緘状態にして保管し、各供試体の中心部に水平配置した埋込型ひずみ計で自己収縮ひずみを測定した。なお、ここでは各条件で1体ずつの供試体で測定を行った。



(b) 試験状況

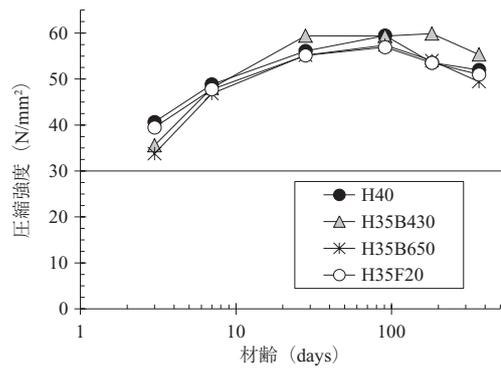
図-2 収縮試験②の概要

3. 実験結果と考察

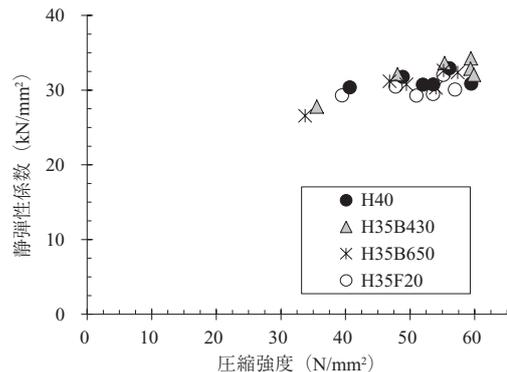
3.1 クリープ特性

(1) 圧縮強度と静弾性係数

圧縮強度試験の結果を図-3に示す。図-3(a)によると、圧縮強度は、いずれの配合においても、材齢3日で目標値の30 N/mm²を超えた。その後は、若干のばらつきがあるが、材齢91日まで増加し、材齢182日から材齢365日にかけて若干減少する傾向にあった。圧縮強度が若干減少した要因としては、長期材齢では圧縮強度の増加量自体が少ないことに加えて、供試体が実験室内で長期にわたって乾燥状態に置かれたことがあげられる。配合間の比較で



(a) 圧縮強度の推移



(b) 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-3 材齢3日まで湿潤養生した供試体の強度試験結果

は、高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650の圧縮強度が材齢3日で他の配合より小さくなったが、その後は同程度か若干大きくなった。また、図-3(b)によると、円柱供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係は、混和材の使用の有無にかかわらず、おおむね同様の関係にあったと考えられる。

次に、打込み翌日に脱型して材齢28日まで20℃で水中養生を行った供試体の圧縮強度と静弾性係数を図-4に示す。材齢28日まで水中養生を行った供試体の圧縮強度は、いずれの配合においても図-3(a)の材齢3日まで湿潤養生を行った供試体の値より大きくなった。また、材齢28日まで水中養生を行った供試体では配合間の差が明確になり、とくに高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650の圧縮強度が大きくなった。

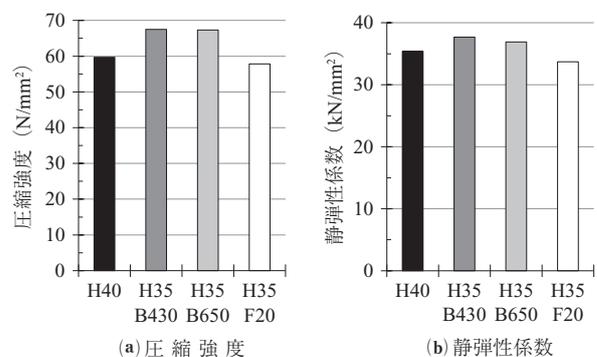


図-4 材齢28日まで水中養生した供試体の強度試験結果

(2) 単位応力あたりのクリープひずみ

材齢 3, 7, 28, 365 日から荷重を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみの推移を図 - 5 に示す。こ

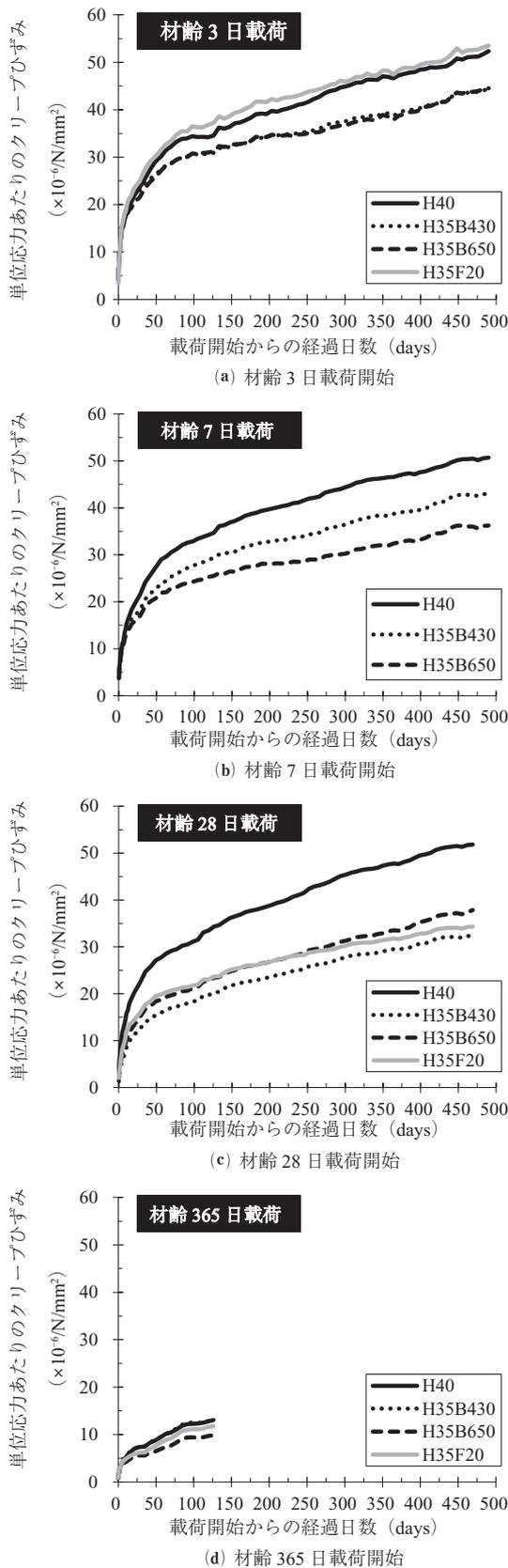


図 - 5 単位応力あたりのクリープひずみ

こでは、式(1)を用いて単位応力あたりのクリープひずみを計算した。クリープひずみ ϵ_{cc} は、圧縮力を負荷していない供試体のひずみ ϵ_{sh} (図 - 6) を収縮に起因するひずみと仮定し、この ϵ_{sh} と荷重時の弾性ひずみ ϵ_{ei} を圧縮力を負荷した供試体のひずみ ϵ から差し引いて求めた。なお、材齢 7 日から荷重を開始した 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。

$$\frac{\epsilon_{cc}(t-t_0)}{\sigma_c} = \frac{\epsilon(t-t_0) - \{\epsilon_{sh}(t) - \epsilon_{sh}(t_0)\} - \epsilon_{ei}(t_0)}{\sigma_c} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_{cc}/σ_c : 単位応力あたりのクリープひずみ、 ϵ_{cc} : クリープひずみ、 σ_c : 圧縮応力度、 ϵ : 圧縮力を負荷した供試体のひずみの測定値、 ϵ_{sh} : 圧縮力を負荷していない供試体のひずみの測定値 (図 - 6)、 ϵ_{ei} : 荷重時の弾性ひずみの測定値、 t : 測定時の材齢、 t_0 : 荷重開始時の材齢である。

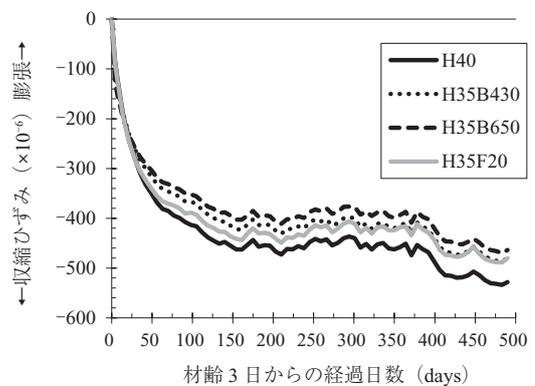


図 - 6 圧縮力を負荷していない供試体のひずみ

材齢 3 日から荷重を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、早強ポルトランドセメント単味の 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 ではこれよりも小さくなった。図 - 3 (a) によると、圧縮強度は材齢 3 日の時点では H35B430 と H35B650 で小さくなったが、その後の配合間の差は減少した。H35B430 と H35B650 では H40 や H35F20 よりも材齢 3 日以降の圧縮強度の増加量が大きく、その後の単位応力あたりのクリープひずみの増加量が小さくなったと考えられる。

また、材齢 7, 28 日から荷重を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、早強ポルトランドセメント単味の H40 と比べて混和材を用いた H35B430, H35B650, H35F20 で小さくなった。材齢 7 日以降の圧縮強度は配合間の差が減少したが、混和材を用いた供試体ではその後の強度発現とともに細孔構造が緻密になり単位応力あたりのクリープひずみが小さくなったと推察される。

一方、材齢 365 日から荷重を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、これ以前に荷重を開始した供試体よりも大幅に小さく、配合間の差も減少した。材齢 28 日までに荷重を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、荷重開始からの経過日数がおおむね 100 日前後までの期間に配合間の差が生じ、その後はこの差を

保った状態で徐々に増加した。また、図 - 3 (a) によると、材齢 365 日の圧縮強度は配合によらずおおむね同程度であった。材齢 365 日のような比較的長期の材齢で載荷を開始した供試体では、単位応力あたりのクリープひずみの増加量自体が小さく、載荷時の圧縮強度が同程度であれば、混和材の使用の有無が単位応力あたりのクリープひずみに与える影響も小さくなると考えられる。

(3) クリープ係数

材齢 490 日までの実験で得られたクリープ係数を図 - 7 に示す。ここでは、載荷開始からの経過日数をなるべく長期とした場合のクリープ係数を比較するため、載荷開始材齢の違いにかかわらず全供試体の比較が可能な載荷開始から 120 日経過時と、材齢 3, 7, 28 日に載荷を開始した供試体の比較が可能な載荷開始から 450 日経過時の 2 時点のクリープ係数を示す。クリープ係数の計算には式 (2) を用いた。

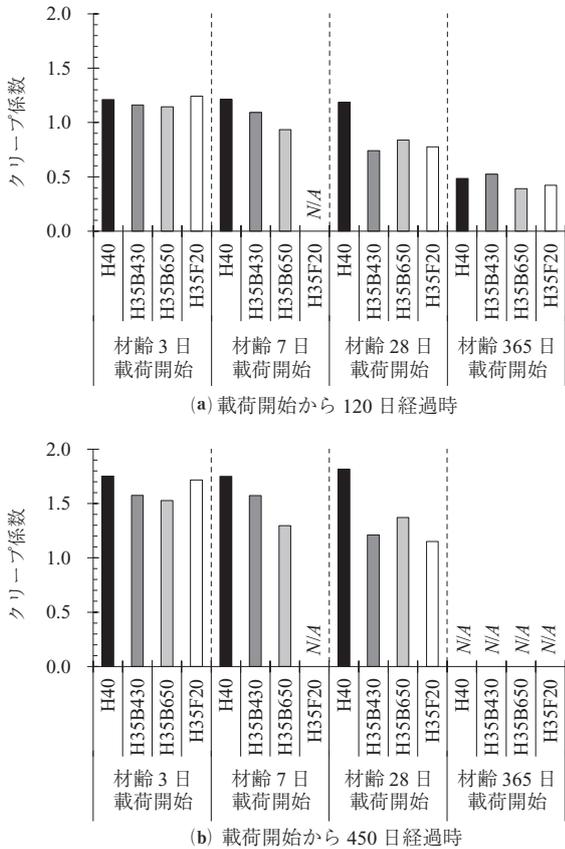


図 - 7 クリープ係数

$$\phi = \frac{\epsilon_{cc}(t-t_0)}{\sigma_c} E_c \quad (2)$$

ここで、 ϕ : クリープ係数、 E_c : 材齢 28 日まで水中養生した円柱供試体の静弾性係数 (図 - 4 (b)) である。

配合間のクリープ係数の大小を比較すると、載荷開始材齢にかかわらず、混和材を用いた H35B430, H35B650, H35F20 のクリープ係数は、早強ポルトランドセメント単味の H40 と同程度かこれよりも小さくなった。この傾向は、載荷開始から 120 日経過時と 450 日経過時の両時点のク

リープ係数において確認することができる。

次に、配合ごとに載荷開始材齢の影響を比較すると、材齢 28 日までに載荷を開始した供試体のクリープ係数は、H40 では載荷開始材齢にかかわらずおおむね同程度であったが、H35B430, H35B650, H35F20 では載荷開始材齢が遅くなるほど小さく、載荷開始材齢の影響が明確に現れた。載荷開始材齢を材齢 28 日までとした実験結果の範囲内では、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よりも載荷開始材齢の影響を受けやすいと考えられる。一方、材齢 365 日に載荷を開始した供試体のクリープ係数は、混和材の使用の有無による差が小さく、いずれの配合においても材齢 28 日までに載荷を開始した供試体よりも大幅に小さくなった。

なお、本稿では材齢 490 日までの実験結果を報告したが、その後もクリープ試験を継続しているため、今後も実験データを蓄積して長期材齢のクリープ特性について検討する予定である。

3.2 乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの推移

収縮ひずみ (LCD) の測定結果を図 - 8 に示す。同図では横軸の基点を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ひずみであり、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 で小さくなった。今回の実験では全配合で単位水量と単位粗骨材量を同一としたが、混和材の使用により全ひずみは減少する傾向にあったことが分かる。

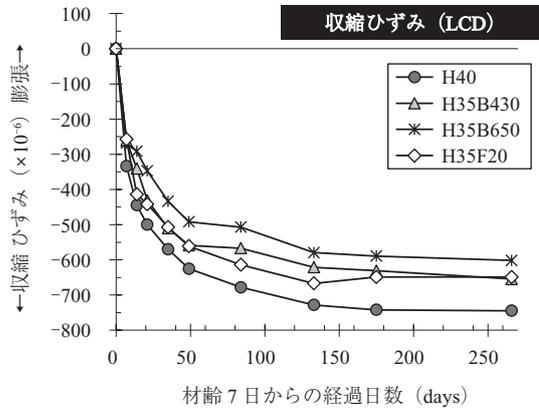


図 - 8 収縮ひずみ (LCD)

次に、自己収縮ひずみ (LCS) の測定結果を図 - 9 に示す。また、収縮ひずみ (LCD) (図 - 8) と自己収縮ひずみ (LCS) (図 - 9) の差であるひずみ差 (LCD-LCS) を図 - 10 に示す。ここでも横軸の基点は水中養生を終えた材齢 7 日とした。前述したように、本稿では、自己収縮ひずみ (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定義した。自己収縮ひずみ (LCS) は、早強ポルトランドセメント単味の H40 との比較では、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。一方、乾燥収縮起因分のひずみであるひずみ差

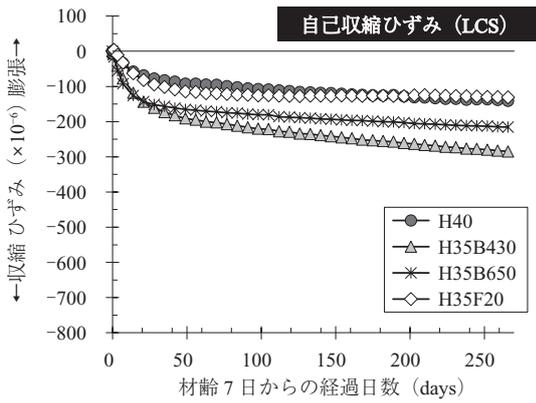


図 - 9 自己収縮ひずみ (LCS)

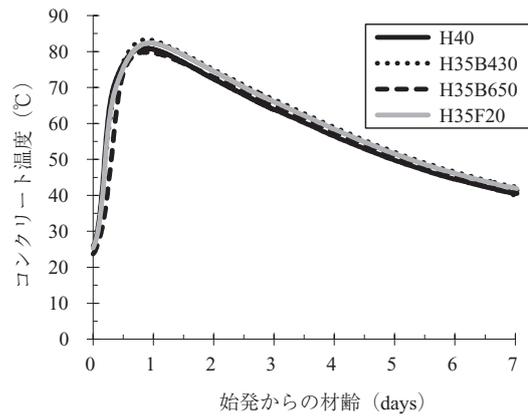


図 - 11 マスブロック供試体の中心部の温度

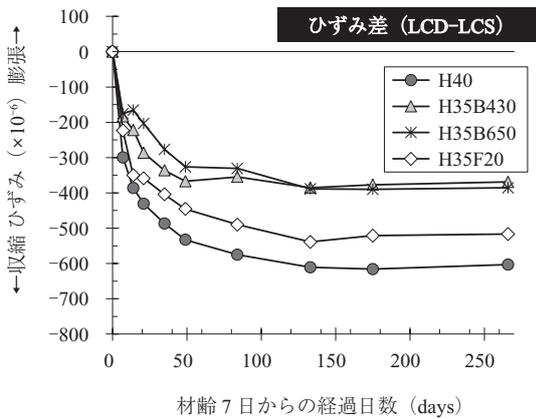


図 - 10 ひずみ差 (LCD-LCS)

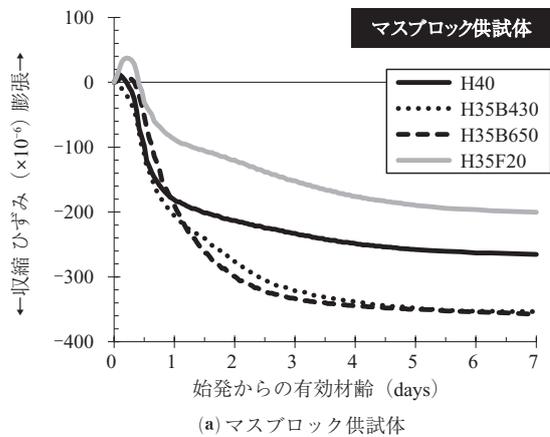
(LCD-LCS) は、H40 よりも H35B430、H35B650、H35F20 で小さく、とくに H35B430 と H35B650 で大幅に小さくなった。これらのことを踏まえると、混和材の使用は乾燥収縮に起因するひずみの減少に寄与し、この傾向は高炉スラグ微粉末を用いた供試体でとくに明確に現れたが、逆に高炉スラグ微粉末を用いた供試体では自己収縮に起因するひずみが増加したことが分かる。混和材の使用により全ひずみは減少する傾向にあったが、これに占める自己収縮あるいは乾燥収縮に起因するひずみの構成は用いる混和材の種類によって大幅に異なると考えられる。

3.3 温度履歴が自己収縮ひずみに与える影響

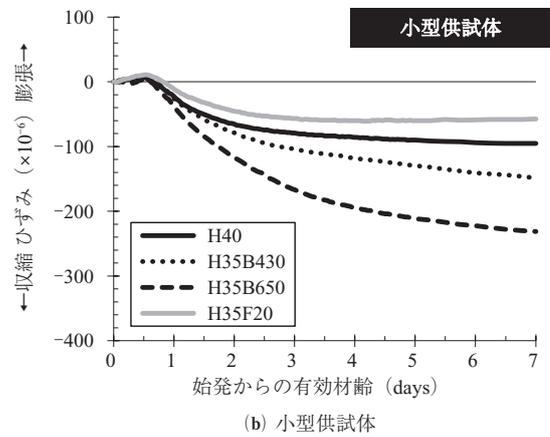
マスブロック供試体の中心部で測定したコンクリート温度を図 - 11 に示す。同図では横軸の基点を凝結試験で得られた始発時間とした。温度上昇曲線は、配合の違いにかかわらず、おおむね同一形状となり、供試体中心部のコンクリート温度は約 80℃ まで上昇した後に低下した。今回の実験では、材齢 3 日の圧縮強度を 30 N/mm² 以上とするために、W/B を早強ポルトランドセメント単味の H40 で 40%、混和材を用いた H35B430、H35B650、H35F20 で 35% とした。一般に混和材の使用は水和発熱の低減に寄与することが知られているが、今回の実験のように比較的初期の材齢の圧縮強度を確保するために混和材を用いた配合で W/B を低下させた場合には、混和材の使用による水和発熱の低減効果は必ずしも明確ではなかった。一方、小型供試

体の中心部のコンクリート温度は 25℃ 程度まで増加し、その後はおおむね 20℃ 前後で推移した。マスブロック供試体と小型供試体に用いたコンクリートの体積が異なるため厳密な比較は困難だが、簡易断熱の有無によって両供試体の温度履歴は大幅に異なった。

次に、マスブロック供試体と小型供試体の自己収縮ひずみの測定結果を図 - 12 に示す。各供試体の打込み後の温度履歴が大幅に異なったため、ここでは横軸を式 (3) で計算した有効材齢とした。また、自己収縮ひずみの増加がとくに若材齢で顕著であったため、同図では有効材齢で 7 日までの結果を示した。



(a) マスブロック供試体



(b) 小型供試体

図 - 12 自己収縮ひずみ

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (3)$$

ここで、 t_e ：有効材齢、 Δt_i ：ある一定のコンクリート温度が継続する期間、 $T(\Delta t_i)$ ： Δt_i の間継続するコンクリート温度、 T_0 ：1℃である。

自己収縮ひずみは、早強ポルトランドセメント単味のH40との比較では、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で小さくなった。この傾向は両供試体で共通した。しかしながら、有効材齢7日までの両供試体の自己収縮ひずみを比較すると、マスブロック供試体では自己収縮ひずみの収束値と進行速度が大きく、この傾向がとくに高炉スラグ微粉末を用いた供試体で顕著であったことが分かる。すなわち、式(3)で計算した有効材齢を用いた比較においても自己収縮ひずみの進行はコンクリートの受ける温度履歴によって傾向が異なり、雰囲気温度を20℃一定とした実験結果のみからでは高温時の任意材齢における自己収縮ひずみの推定が困難となる可能性が高い。マスコンクリートの初期ひび割れ発生リスクを評価する際には、使用するコンクリートの自己収縮ひずみの特性を適切に考慮することが重要と考えられる。

なお、実際のコンクリート構造物において初期ひび割れの発生リスクを適切に評価するためには、こうした高温条件下の自己収縮ひずみの特性に加えて、各混和材を使用した場合の断熱温度上昇量や強度発現、若材齢クリープによる応力緩和の影響などを適切に考慮することが必要と思われる。この点については今後検討を行う予定である。

4. おわりに

本稿では、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートのクリープ・収縮特性を明らかにするために行った実験結果について報告した。本稿の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 混和材を用いた供試体のクリープ係数は、荷重開始材齢の違いにかかわらず、早強ポルトランドセメント単味の供試体と同程度か小さくなる傾向にあった。
- 2) 単位応力あたりのクリープひずみとクリープ係数の両方において、荷重開始材齢を3、7、28日とした供試体では混和材の使用の有無による差が明確に現れたが、荷重開始材齢を365日とした供試体では混和材の使用の有無による差は小さくなった。
- 3) 混和材を用いた供試体の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

とは傾向が異なった。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。

- 4) 自己収縮ひずみは打込み後の温度履歴の影響が大きく、簡易断熱状態とした供試体では自己収縮ひずみの収束値とその進行速度が大幅に大きくなった。この傾向は高炉スラグ微粉末を用いた供試体で特に顕著であった。

なお、本共同研究では、本稿で報告したクリープ・収縮特性に関する検討だけでなく、暴露試験と促進試験による耐久性の評価、湿潤養生日数の設定方法、温度履歴が強度発現に与える影響、二酸化炭素排出削減効果の評価方法などの検討も併せて実施している。得られた知見をとりまとめて、混和材を用いたプレストレストコンクリート構造物の設計・施工方法の提案を行う予定である。

謝 辞

本稿は、(独)土木研究所、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、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」で得られた実験結果の一部に考察を加えたものである。鉄鋼スラグ協会から高炉スラグ微粉末、電源開発(株)からフライアッシュの提供を得た。また、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会の鈴木 聡氏に実験の作業協力、BASF ジャパン(株)の土谷 正氏に化学混和剤に関する助言を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会、p.184、2013。
- 2) Eisuke Nakamura, Satoshi Suzuki, Kazumasa Morihama, Hiroshi Watanabe: Collaborative Research Project on Effective Use of Low-Carbon Cements, ICCS13, First International Conference on Concrete Sustainability, pp.453-458, 2013.
- 3) 鶴田浩章, 松下博通, 吉富泰一, 前田悦孝: PC 桁に適用した高炉スラグ微粉末混和コンクリートの収縮・クリープ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.793-798, 2000.
- 4) 依 道和, 呉 承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.197-202, 2011.
- 5) 中村英佑, 鈴木 聡, 鈴木雅博, 渡辺博志: 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, 第22回プ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.503-508, 2013.
- 6) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2008, pp.93-114, 2008.
- 7) 日本コンクリート工学会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ), pp.209-210, 1994.

【2014年2月27日受付】