

混和材を用いたコンクリートの クリープおよび乾燥収縮特性

北野 勇一*¹・鈴木 聡*²・鈴木 雅博*³・中村 英佑*⁴

現場打ちプレストレストコンクリート橋に混和材を用いたコンクリートを適用することを想定し、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および乾燥収縮特性を明らかにするための試験を材齢 910 日まで実施した。測定されたひずみから求めた材齢 10 000 日までのクリープ係数および乾燥収縮ひずみの推定値は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートでは道路橋示方書の推定式より求めた設計値と概ね同程度となるのに対し、混和材を用いたコンクリートでは同程度かやや小さくなる傾向が認められた。

キーワード：混和材、プレストレストコンクリート橋、クリープ、乾燥収縮

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC と呼ぶ）橋の耐久性向上と環境負荷低減を目的として、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートの積極的な活用が望まれているが、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特性は十分には明確にされておらず、実用化を進める際の課題となっていた。そこで、筆者らの所属する（国研）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、「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究委員会（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橋の設計・施工マニュアル（案）」を発刊した¹⁾。

PC 橋の設計ではコンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響を考慮するため、混和材を用いたコンクリートを PC 部材に適用する際にはクリープおよび乾燥収縮特性を明らかにする必要がある。そのため、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および乾燥収縮試験を実施し、前報²⁾では材齢 490 日までの試験結果を報告した。本報では PC 橋のクリープおよび乾燥収縮に関する推定式を改めて整理し（2 章）、クリープおよび乾燥収縮試験を材齢 910 日まで継続して得られた測定値から材齢 10 000 日までのクリープ係数および乾燥収縮ひずみを推定し、設計値と比較した（3 章および 4 章）。

なお、本報では設計基準強度 40 N/mm² の現場打ち PC 橋に混和材を用いたコンクリートを適用することを想定し、一般的にプレストレスが導入される最短の材齢 3 日以下に生じるコンクリートのクリープ（ヤング係数の基準は材齢 28 日）および乾燥収縮（自己収縮を含む）を対象と

して検討を進めた。

2. クリープおよび乾燥収縮に関する推定式

2.1 クリープおよび乾燥収縮に関する推定式の変遷

クリープおよび乾燥収縮に関する規定は古くより各機関によって整備されてきた。PC 橋の設計に採用されてきたコンクリート標準示方書³⁾と道路橋示方書⁴⁾における規定の変遷を表 - 1 に示す。これらの設計基準に示されるクリープおよび乾燥収縮の推定式は、普通および早強ポルトランドセメントを対象としたもので、混和材を用いたコンクリートに関する推定式は明確となっていない。本章では、普通および早強ポルトランドセメントのクリープおよび乾燥収縮に関する推定式について整理した。

(1) コンクリート標準示方書³⁾

クリープおよび乾燥収縮に関する規定は、1955 年版と 1961 年版においては旧西ドイツの基準である DIN 4227 を参照するものであった。1978 年版ではヨーロッパ国際コンクリート委員会（CEB）と国際プレストレストコンクリート連合（FIP）により 1978 年に作成された CEB/FIP モデルコード（以下、MC78 と呼ぶ）を準用するように変更された。1996 年版ではクリープ係数および乾燥収縮ひずみの算定に際しコンクリート配合の影響を加味できる推定式（ただし、圧縮強度は 55 N/mm² 以下）が提案され、2002 年版では高強度式（圧縮強度 55～80 N/mm²）が追加され、2012 年版では強度によらず推定式が一本化された。

現行 2012 年版におけるクリープ係数および乾燥収縮ひずみの推定式には、以下の特徴がある。

クリープ係数：従前はクリープ係数の収束値が示されていたが、2012 年版では式(1)に示されるように載荷持続日数 ($t-t'$) に有効材齢 1 日を加えた日数の自然対数を取っ

*¹ Yuichi KITANO：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

*² Satoshi SUZUKI：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

*³ Masahiro SUZUKI：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

*⁴ Eisuke NAKAMURA：国立研究開発法人土木研究所

た値にクリープ係数が正比例し、クリープ係数の収束値が明示されないことになった。

$$\phi(t, t') = \frac{4W(1 - RH/100) + 350}{12 + f_c'(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \cdot E_{ct} \quad (1)$$

ここに、 $\phi(t, t')$ ：材齢 t' (日) に初荷重を行ったコンクリートの材齢 t (日) におけるクリープ係数、 W ：コンクリートの単位水量 (kg/m^3)、 RH ：相対湿度 (%), $f_c'(t')$ ：荷重時の有効材齢 t' (日) におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 E_{ct} ：荷重時の有効材齢 t' (日) におけるコンクリートのヤング係数 (N/mm^2) である。

乾燥収縮：近年の骨材事情を勘案し、式(2)に示されるように骨材品質の影響を骨材中に含まれる水分量をパラメータとして考慮できる式が提案されている。この式は、JIS A 1129 に定められる $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の供試体を水中養生 7 日後、温度 20°C 、相対湿度 60 % の環境下で、6 ヶ月間試験した収縮ひずみを想定したものである。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right) \quad (2)$$

ここに、 ε'_{sh} ：収縮の試験値の推定値 ($\times 10^{-6}$)、 C/W ：セメント水比、 α ：骨材の品質の影響を表す係数、 $\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量である。

一方、実部材の乾燥収縮ひずみの経時変化は、式(3)に示すように乾燥収縮ひずみの最終値と乾燥収縮ひずみの経時変化を表す 2 つの項からなる双曲線の式を提案している。この式では、収縮ひずみの最終値は部材寸法の影響を受けず周囲の相対湿度に比例すると仮定され、収縮ひずみの経時変化はコンクリート中の水分の移動が拡散理論に基づくものとして部材寸法の二乗に比例して遅くなると仮定されている。

$$\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = \frac{1 - RH/100}{1 - 60/100} \cdot \varepsilon'_{sh,inf} \cdot (t, t_0) \left(\frac{d}{100} \right)^2 \cdot \beta + (t, t_0) \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon'_{sh}(t, t_0)$ ：部材の収縮ひずみ、 RH ：構造物の置かれる環境の平均相対湿度 (%), d ：有効部材厚 (mm), t および t_0 ：コンクリートの材齢および乾燥開始時材齢 (日), $\varepsilon'_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値、 β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数である。

(2) 道路橋示方書⁴⁾

クリープおよび乾燥収縮に関する規定は、1968 年版においては当時のコンクリート標準示方書に準じるものであった。1978 年版ではコンクリート標準示方書と同様に MC78 を準用するように変更された。1996 年版では、規定の大枠の変更がないものの、乾燥収縮ひずみの差を求める場合の推定式に用いる数値が修正された。その後、現行 2012 年版に至るまでクリープおよび乾燥収縮に関する規定は変更されていない。

現行 2012 年版におけるクリープ係数および乾燥収縮ひずみの算出は以下の方法にて定めるものとしている。

クリープ：クリープひずみには、持続荷重を取り除くと時間の経過とともに回復するひずみ（遅れ弾性ひずみ）と回復しないひずみ（フローひずみ）があることが知られて

表 - 1 クリープおよび乾燥収縮に関する規定の変遷

西暦	コンクリート標準示方書 ³⁾		道路橋示方書 ⁴⁾	
	クリープ	乾燥収縮	クリープ	乾燥収縮
1955	DIN4227 参照			
	1.5 or 2.25 ^{*1}	90 × 10 ^{-6*1}	-	
1961	同上			
	2.0 ^{*1}	150 × 10 ^{-6*1}	-	
1968	-		コンクリート標準示方書準用 2.0 ^{*1} 150 × 10 ^{-6*1}	
1978	MC78 準用		MC78 準用	
	2.6 ^{*2}	200 × 10 ^{-6*2}	2.6 ^{*2}	200 × 10 ^{-6*2}
1996	推定式の提案		同上	
	2.7 ^{*2}	350 × 10 ^{-6*2}	MC78 準用 2.6 ^{*2}	一部改訂 200 × 10 ^{-6*2}
2002	高強度式の追加		同上	
2012	推定式の一本化		同上	
	3.1 ^{*3}	360 × 10 ^{-6*3}	2.6 ^{*2}	200 × 10 ^{-6*2}

*1 材齢 28 日の 85 % 強度でプレストレス導入した場合のクリープ係数およびポストテンション方式における乾燥収縮ひずみ（部材厚 20 ~ 75 cm で屋外の場合）の一般値を示す。

*2 材齢が 4 ~ 7 日でプレストレスを与えたときのクリープ係数および乾燥収縮ひずみ（屋外）の一般値を示す。

*3 材齢が 4 ~ 7 日でプレストレスを与えたときのクリープ係数および乾燥収縮ひずみの断面平均値を試算した値（設計耐用期間 T=100 年、降雨を含む実際の環境条件を考慮して、部材の上面および下面の相対湿度をそれぞれ RH=95 % および RH=65 % とした算定値の平均値）を示す。

おり、これを考慮できる式(4)が提示されている。

$$\phi(t, t') = \phi_{d0} \cdot \beta_d(t - t_0) + \phi_{f0} \{ \beta_f(t) - \beta_f(t') \} \quad (4)$$

ここに、 ϕ_{d0} ：遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数で一般に 0.4、 $\beta_d(t - t_0)$ ：持続荷重載荷後の経過日数に関する関数で 3 ヶ月を超える場合は 1、 ϕ_{f0} ：フローひずみに対するクリープ係数、 $\beta_f(t)$ ：コンクリートの材齢と部材の仮想厚さに関する関数で、部材寸法によって異なる最終値が与えられる。なお、この式では材齢 28 日のヤング係数に基づいたクリープ係数が算出される。

乾燥収縮：プレストレスの減少量を算出する場合の乾燥収縮ひずみは、構造物周辺の温度や相対湿度、部材断面の形状寸法、乾燥開始材齢を考慮した式(5)が提示されている。

$$\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{s0} \cdot \beta_s(t - t_0) \quad (5)$$

ここに、 ε_{s0} ：コンクリートの基本乾燥収縮ひずみ、 $\beta_s(t)$ ：コンクリートの材齢と部材の仮想厚さに関する関数で、部材寸法によって異なる最終値が与えられる。

2.2 現行の設計基準の比較

現在新たに建設される道路橋は道路橋示方書に従って設計され、一般的な早強ポルトランドセメントを用いた現場打ち PC 橋では材齢 4 ~ 7 日でプレストレスを与える場合には、クリープ係数 2.6、乾燥収縮ひずみ 200×10^{-6} が用いられている。

この値は、温度 20°C 、相対湿度 70 %、部材の仮想厚さ 400 mm 程度、材齢 10 000 日の場合を想定して定められている⁵⁾。部材厚さは、相対湿度 70 % の場合、道路橋示方書の仮想厚さ 400 mm の部材を乾燥面が 2 面の矩形断面と仮定すると、式(6)および式(7)により、266 mm と算出さ

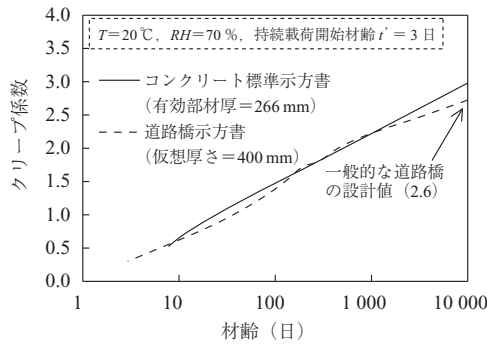


図 - 1 クリープ係数の経時変化

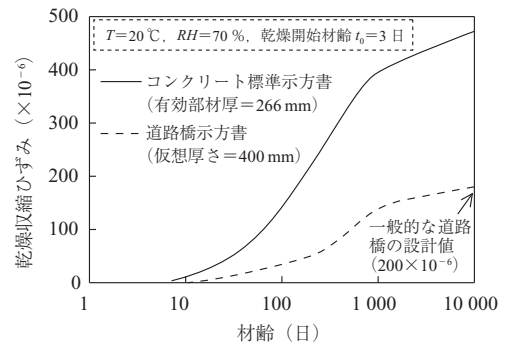


図 - 3 乾燥収縮ひずみの経時変化

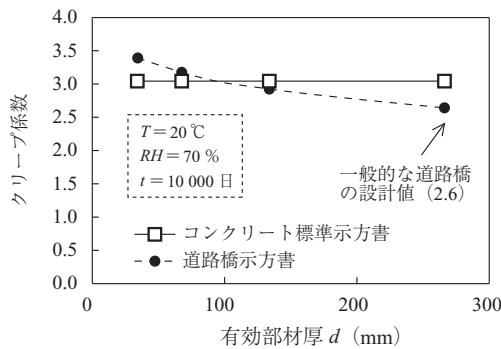


図 - 2 クリープ係数に与える部材寸法の影響

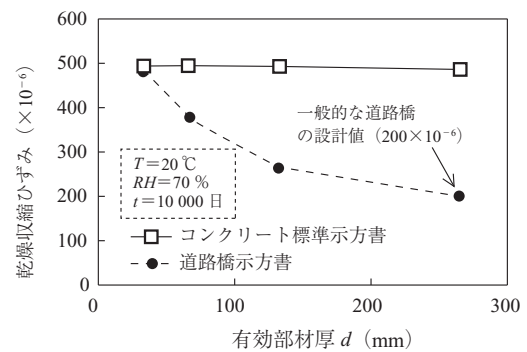


図 - 4 乾燥収縮ひずみに与える部材寸法の影響

れる。コンクリート標準示方書の有効部材厚は、算出した部材厚さより 266 mm と仮定したものである。

$$h_{th} = 400 = 3 \times \frac{A_c}{u} = \frac{3B \times d}{2} = \frac{3}{2} d \quad (6)$$

$$d = \frac{2}{3} \times 400 = 266 \text{ mm} \quad (7)$$

ここに、 h_{th} ：仮想厚さ、 A_c ：コンクリートの断面積、 u ：外気に触れる周長（乾燥面を部材幅方向の 2 面とした）、 d ：部材厚さ（有効部材厚）、 B ：部材幅である。

クリープ係数および乾燥収縮ひずみの推定式より算出した設計値（以下、クリープ係数の設計値および乾燥収縮ひずみの設計値と呼ぶ）に与える材齢と部材寸法の影響をコンクリート標準示方書および道路橋示方書に従って算出した結果を図 - 1 ～ 4 に示す。ここで、コンクリート標準示方書による設計値の算出にあたっては、次章表 - 2 中の H40 の配合条件とコンクリート標準示方書に示される設計基準強度 40 N/mm²（材齢 28 日）のヤング係数 31×10^3 N/mm² を用いた。

クリープ係数：クリープ係数の経時変化は、材齢 10 000 日までであれば、コンクリート標準示方書と道路橋示方書でおおむね一致する（図 - 1）。また、現行のコンクリート標準示方書では部材寸法によりクリープ係数が変化しない推定式が採用されているが、有効部材厚 266 mm 以下の範囲であれば道路橋示方書との差は ±15 % 以内となっている（図 - 2）。

乾燥収縮ひずみ：PC 橋の設計で想定されている有効部材厚 266 mm で算定すると、コンクリート標準示方書と道路橋示方書の乾燥収縮ひずみの設計値は、乾燥開始直後よ

り乖離する結果となった。材齢 10 000 日時点では道路橋示方書の 200×10^{-6} に対し、コンクリート標準示方書では 481×10^{-6} と 2 倍強の差が現れた（図 - 3）。また、コンクリート標準示方書と道路橋示方書が与える乾燥収縮ひずみの設計値の差は、部材寸法が大きいくほど顕著となった（図 - 4）。なお、既往の調査⁶⁻⁸⁾などによると、実橋における乾燥収縮ひずみの測定結果は、現行の道路橋示方書による設計値から大きく逸脱するものとはなっていない。

3. 混和材を用いたコンクリートのクリープ特性

3.1 試験方法

コンクリート配合を表 - 2 に示す。各配合の水結合材比は、設計基準強度 40 N/mm² と材齢 3 日における圧縮強度 30 N/mm² が得られるように、早強ポルトランドセメント単味のコンクリート（H40）で 40 %、混和材を用いたコンクリートで 35 % とした。混和材を用いたコンクリートは、早強ポルトランドセメントの 30 % を高炉スラグ微粉末 4 000 で置換したコンクリート（H35B430）、50 % を高炉スラグ微粉末 6 000 で置換したコンクリート（H35B650）、20 % をフライアッシュ II 種で置換したコンクリート（H35F20）の 3 配合である。これらの配合では、単位水量を $W = 165 \text{ kg/m}^3$ 、単位粗骨材量を $G = 968 \text{ kg/m}^3$ に統一した。また、スランプ $12 \pm 2.5 \text{ cm}$ と空気量 $4.5 \pm 1.5 \%$ のフレッシュ性状を確保するため化学混和剤の使用量を調整した。

クリープ試験の概要を図 - 5 に示す。供試体は $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}$ の角柱供試体である。供試体の養生は材齢 3

表 - 2 コンクリート配合

配合名	W/B (%)	置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					材齢 3 日 圧縮強度 (N/mm ²)		
			W	B=H+B4+B6+F					S	G
				H	B4	B6	F			
H40	40	0	413	-	-	-	758	40.7		
H35B430		30	330	141	-	-	700	35.6		
H35B650	35	50	236	-	236	-	695	33.8		
H35F20		20	377	-	-	94	682	39.5		

H: 早強ポルトランドセメント (密度 3.14 g/cm³), B4: 高炉スラグ微粉末 4 000 (密度 2.89 g/cm³), B6: 高炉スラグ微粉末 6 000 (密度 2.91 g/cm³), F: フライアッシュ II 種 (密度 2.30 g/cm³), S: 細骨材 (表乾密度 2.56 g/cm³, 吸水率 2.23%), G: 粗骨材 (表乾密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.43% の砕石 5 号と表乾密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.46% の砕石 6 号を質量比 1:1 で混合使用)。

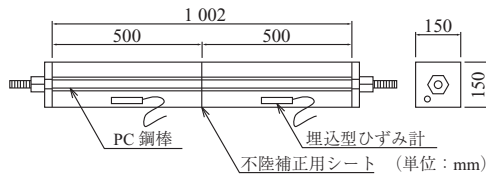


図 - 5 クリープ試験の概要

日まで湿潤養生とし、その後、150×500 mm の 4 面を気中乾燥させた。クリープ試験は、2 体の供試体を貫通して連結した PC 鋼棒を緊張することによって所定のプレストレス力を材齢 3, 7, 28 および 365 日に角柱供試体に導入し、材齢 910 日までコンクリートひずみを測定した。試験中は、コンクリートの応力がプレストレスを導入するときの圧縮強度の 30±3% (材齢 3 日は 20±3%) となるように PC 鋼棒を定期的に再緊張した。プレストレス力を導入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、同一形状でプレストレス力を導入しない供試体を別途製作し、材齢 3 日以降の乾燥収縮ひずみを測定した。クリープひずみは、プレストレス力を導入した供試体のコンクリートひずみからプレストレス力を導入しない供試体のコンクリートひずみを差し引くことによって求めた。試験室の温度は平均 18.5℃, 相対湿度は平均 55.8% であった。

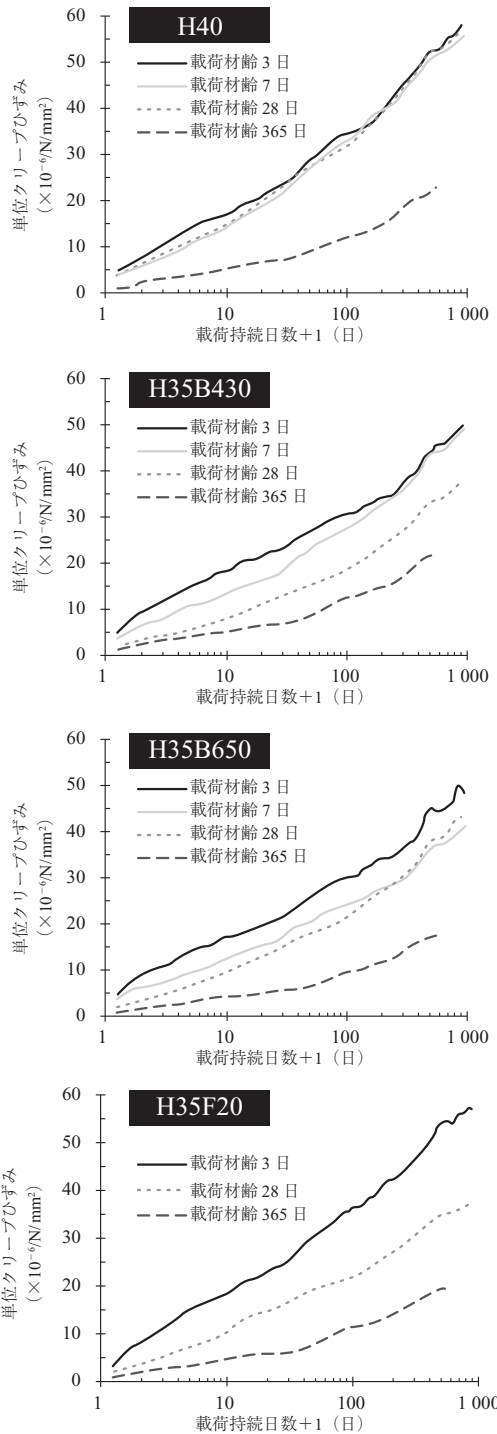
3.2 試験結果

材齢 910 日までの単位クリープひずみを図 - 6 に示す。前報²⁾ に示した材齢 490 日までの試験結果と同様に、材齢 910 日まで試験を継続しても、混和材を用いたコンクリート (H35B430, H35B650 および H35F20) の単位クリープひずみは、荷重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コンクリート (H40) と比較して同程度か小さくなる傾向が認められた。また、荷重材齢を遅くするほど単位クリープひずみは小さくなる傾向が認められた。

次に、式 (8) を用いてクリープ試験で得られたクリープひずみの測定値からクリープ係数を求め、式 (9) によって回帰することでクリープ曲線式の定数を推定した。

$$\phi_t = \frac{\epsilon_{ct}}{\sigma} \cdot E_{c28} \quad (8)$$

$$\phi_t = A \cdot \log_e (t - t' + 1) + B \quad (9)$$



※ H35F20 の荷重材齢 7 日の結果については計測の不良により試験継続が困難となったため記載していない。

図 - 6 単位クリープひずみ

ここに、 ϕ_t : クリープ係数, ϵ_{ct} : クリープひずみの測定値, σ : 荷重応力度 (N/mm²), E_{c28} : 材齢 28 日まで標準養生した円柱供試体のヤング係数, t : クリープひずみ測定時の材齢 (日), t' : 荷重材齢 (日), A, B : 試験結果の回帰より得られた定数である。ただし、クリープ係数の推定値と比較する場合のコンクリート標準示方書によるクリープ係数の設計値は、荷重時のヤング係数を用いて算出

表 - 3 クリープ曲線式の定数および材齢 10 000 日の
クリープ係数の推定値

配合名	載荷 材齢	ヤング係 数 E_{c28} (N/mm ²)*	載荷時のヤ ング係数 (N/mm ²)**	クリープ 曲線式***		材齢10 000日 のクリープ 係数推定値
				定数 A	定数 B	
H40	3 日	35.4×10^3	30.4×10^3	0.299	-0.068	2.69
	7 日		31.8×10^3	0.306	-0.144	2.67
	28 日		32.9×10^3	0.315	-0.171	2.73
	365 日		30.7×10^3	0.135	-0.113	1.13
H35B430	3 日	37.7×10^3	27.8×10^3	0.250	-0.077	2.38
	7 日		32.1×10^3	0.273	-0.103	2.41
	28 日		34.2×10^3	0.226	-0.205	1.88
	365 日		33.6×10^3	0.133	-0.086	1.14
H35B650	3 日	36.9×10^3	26.6×10^3	0.248	-0.048	2.33
	7 日		31.2×10^3	0.218	-0.035	1.97
	28 日		32.6×10^3	0.254	-0.221	2.12
	365 日		30.8×10^3	0.108	-0.086	0.91
H35F20	3 日	33.7×10^3	29.3×10^3	0.283	-0.020	2.58
	28 日		32.1×10^3	0.195	-0.079	1.72
	365 日		29.3×10^3	0.110	-0.079	0.93

* 材齢 28 日まで標準養生した円柱供試体を用いて測定した。
 ** クリープ試験の供試体と同一養生（湿潤養生 3 日、その後、気中乾燥）
 の円柱供試体を用いて測定した。
 *** 相関係数 R は最小 0.959、最大 0.994 であった。

した。

クリープ曲線式の定数の推定結果を表 - 3 に示す。また、
 クリープ曲線式によって求められる材齢 10 000 日のク
 リープ係数の推定値とコンクリート標準示方書および道
 路橋示方書によるクリープ係数の設計値の関係を図 - 7
 に示す。クリープ係数の推定値は、混和材の種類の変
 わりにかかわらず、コンクリート標準示方書および道
 路橋示方書によるクリープ係数の設計値と比較して同
 程度小さくなることが認められた。載荷材齢 365 日
 の供試体より求めたクリープ係数の推定値は、道
 路橋示方書によるクリープ係数の設計値との差は 50
 % 以内であったが、コンクリート標準示方書による
 クリープ係数の設計値との差は 50 % 以上であった。

なお、道路橋示方書に示される道路橋の供用年数は
 一般に 100 年とされており、材齢 100 年におけるク
 リープ係数の推定値を試算すると材齢 10 000 日のク
 リープ係数よりも 14 ~ 16 % 大きくなった。

4. 混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮特 性

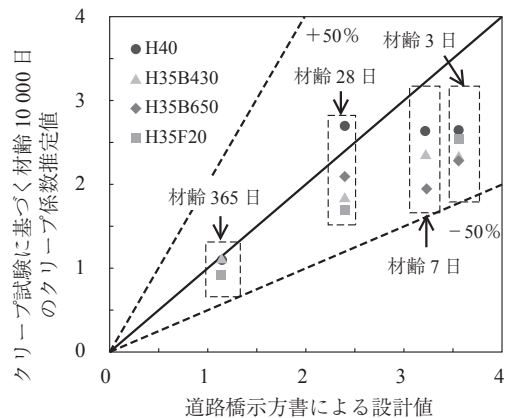
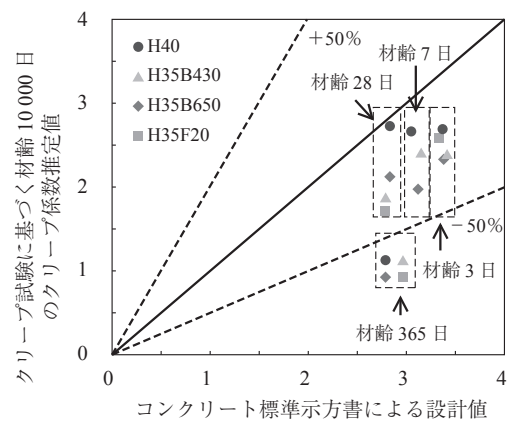
4.1 試験方法

乾燥収縮ひずみに関する試験は、100 × 100 × 400 mm
 の供試体を材齢 7 日から気中乾燥（温度は平均 20 °C、
 相対湿度は平均 60 %）する JIS A 1129 に準拠した試
 験と、150 × 150 × 500 mm の供試体を材齢 3 日
 から気中乾燥（温度は平均 18.5 °C、相対湿度は平均
 55.8 %）として材齢 910 日まで実施した乾燥収縮
 試験の 2 つの方法で行った。コンクリート配合は、
 クリープ試験と同様に表 - 2 に示す 4 配合である。

4.2 試験結果

(1) JIS A 1129 による乾燥収縮ひずみ

JIS A 1129 による気中乾燥 6 ヶ月後の収縮ひずみは、
 H40 において 742×10^{-6} 、H35B430 において 649×10^{-6} 、
 H35B650



※図中の材齢は載荷開始時の材齢であり、乾燥開始材齢は 3 日
 である。

図 - 7 クリープ試験結果と設計値の関係

において 631×10^{-6} 、H35F20 において 589×10^{-6} であった。
 H35B430、H35B650 および H35F20 の乾燥収縮ひずみは、
 H40 と比較して同程度小さくなることが認められた。

(2) 乾燥収縮試験による乾燥収縮ひずみ

150 × 150 × 500 mm 供試体の乾燥収縮試験によって得
 られた材齢 910 日までの乾燥収縮ひずみを図 - 8 に示す。
 この結果、H35B430、H35B650 および H35F20 の乾燥収縮
 ひずみは、H40 と比較して同程度小さくなることが認め
 られた。なお、6 ヶ月乾燥後の収縮ひずみは H40 で 476×10^{-6} 、
 H35B430 で 429×10^{-6} 、H35B650 で 409×10^{-6} 、
 H35F20 で 444×10^{-6} であり、JIS A 1129 による乾燥収縮
 ひずみの 64 ~ 75 % に低下した。

次に、150 × 150 × 500 mm 供試体の乾燥収縮試験で得
 られた乾燥収縮ひずみの測定値を式 (10) によって回帰した。

$$\epsilon'_{sh}(t,3) = \frac{\epsilon'_{sh,inf}(t-3)}{\beta + (t-3)} \quad (10)$$

ここに、 $\epsilon'_{sh,inf}$: 乾燥収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)、 β :
 乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数である。

乾燥収縮曲線式の回帰結果を表 - 4 に示す。また、乾燥
 収縮曲線式によって求められる材齢 10 000 日の乾燥収縮
 ひずみの推定値とコンクリート標準示方書および道路橋
 示方書による乾燥収縮ひずみの設計値の関係を図 - 9 に示
 す。図 - 9 の乾燥収縮ひずみの推定値については、乾燥

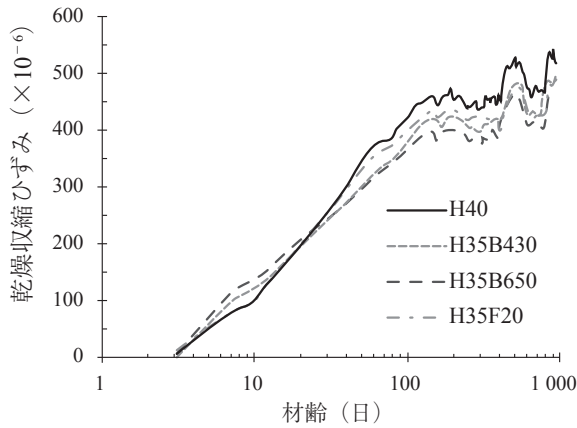


図 - 8 乾燥収縮試験によって得られた乾燥収縮ひずみ

表 - 4 乾燥収縮曲線式の算定結果および材齢 10 000 日の乾燥収縮ひずみの推定値

配合名	乾燥開始材齢	係数 β		材齢 10 000 日の乾燥収縮ひずみの推定値 ($\times 10^{-6}$)
		設計値*	試験結果回帰**	
H40	3 日	31	24.3	521
H35B430		25	17.5	491
H35B650			15.0	465
H35F20			17.6	483

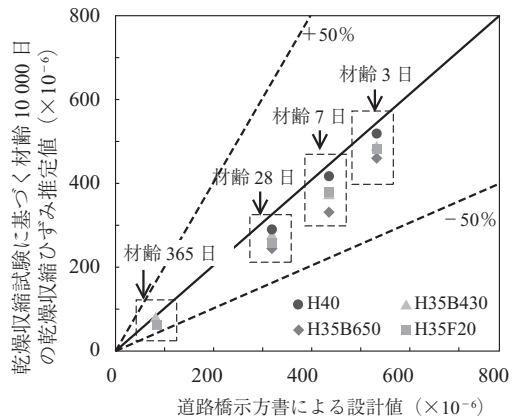
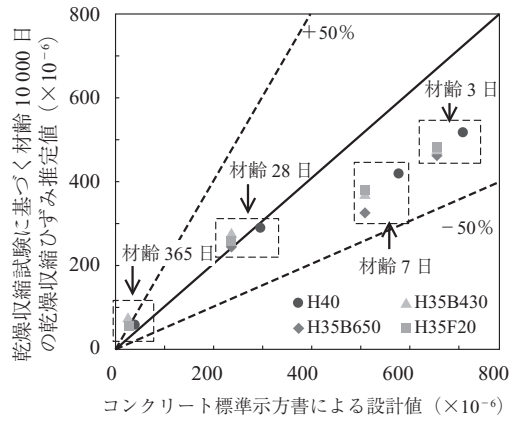
*有効部材厚 $d = 100 \text{ mm}$ の場合。 **相関係数 R は、最小 0.928、最大 0.957 であった。

収縮試験では乾燥開始材齢を 3 日としたため、乾燥開始材齢 3 日の供試体の試験結果から材齢 10 000 日の乾燥収縮ひずみを推定し、材齢 7、28 および 365 日以降の乾燥収縮ひずみの増分を各材齢で乾燥開始した場合の乾燥収縮ひずみとみなした。一方、各設計基準の設計値については、乾燥収縮ひずみの推定式に乾燥開始材齢を入力することで算出できるが、上述した推定値との比較のため、乾燥開始材齢 3 日として材齢 10 000 日までの乾燥収縮ひずみを求め、材齢 7、28 および 365 日以降の乾燥収縮ひずみの増分を各材齢で乾燥開始した場合の乾燥収縮ひずみとみなした。また、コンクリートの乾燥収縮ひずみの乾燥面を 4 面とした場合の有効部材厚の取り方がコンクリート標準示方書には示されていないため、ここでは部材厚の 1/2 を有効部材厚とみなして材齢 3 日の乾燥収縮ひずみを求めた。

早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定値は、道路橋示方書による設計値とおおむね一致することが認められた。また、混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定値は、混和材の種類にかかわらず、道路橋示方書の設計値よりやや小さくなる傾向が認められた。

5. おわりに

水結合材比を 35% とし、早強ポルトランドセメントの 30% を高炉スラグ微粉末 4 000 で、50% を高炉スラグ微粉末 6 000 で、20% をフライアッシュ II 種で置換したコンクリートのクリープおよび乾燥収縮特性を把握するための試験を材齢 910 日まで実施し、得られた知見を以下にまと



※図中の材齢は乾燥開始材齢であり、乾燥収縮ひずみの推定値と設計値は乾燥開始材齢 3 日の乾燥収縮ひずみより推定した値である。

図 - 9 乾燥収縮試験結果と設計値の関係

める。

- 1) 混和材を用いたコンクリートの単位クリープひずみは、初期材齢の圧縮強度が同程度の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して同程度か小さくなる傾向が認められた。また、クリープ試験より得られた単位クリープひずみから求めた材齢 10 000 日までのクリープ係数の推定値は、混和材の種類や載荷材齢の違いにかかわらず、道路橋示方書の推定式より求めたクリープ係数の設計値と比較して同程度かやや小さくなる傾向が認められた。
- 2) 混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、初期材齢の圧縮強度が同程度の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して同程度か小さくなる傾向が認められた。また、乾燥収縮試験より得られた乾燥収縮ひずみから求めた材齢 10 000 日までの乾燥収縮ひずみの推定値は、混和材の種類にかかわらず、道路橋示方書の推定式より求めた設計値と比較してやや小さくなる傾向が認められた。

なお、本研究で検討したのは無筋コンクリートにおけるクリープ係数および乾燥収縮ひずみであり、鉄筋量を増した PC 構造を採用する場合には鉄筋拘束の影響を別途適切に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 鈴木雅博, 國富康志, 天谷公彦, 中村英佑: 混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル(案)の概要, プレストレストコンクリート Vol.58, No.3, pp.25-30, 2016.5
- 2) 中村英佑, 石井豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 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, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.3, p54-60, 2014.3
- 3) 土木学会: プレストレストコンクリート設計施工指針(1955, 1961), プレストレストコンクリート標準示方書(1978), コンクリート標準示方書(1986, 1990, 1996, 2002, 2007, 2012)
- 4) 日本道路協会: プレストレストコンクリート道路橋示方書解説(1968), 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編(1978, 1990, 1994, 1996, 2002, 2012)
- 5) 土木学会: S53年制定プレストレストコンクリート標準示方書解説資料, 1979
- 6) 建部恒彦, 高瀬徹: カールソンひずみ計によるPC桁のクリープおよび乾燥収縮度の測定, プレストレストコンクリート Vol.5, No.6, pp.18-22, 1963.11
- 7) 栗原利栄, 八尋勇次: 天草PC橋のクリープおよび乾燥収縮の測定について(中間報告), プレストレストコンクリート Vol.11, No.1, pp.1-4, 1969.3
- 8) 河中涼一, 小林仁, 宮腰一也, 宮川豊章: PC上部工の実物大供試体と実橋における乾燥収縮ひずみの測定, プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集, pp.363-366, 2012.10

【2016年6月29日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

コンクリート構造設計施工規準 —性能創造型設計—

定 価 4,104 円/送料 300 円

会員特価 3,400 円/送料 300 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版



図書案内

PC 技術規準シリーズ

PC 構造物高耐久化ガイドライン 2015年4月

定 価 4,860 円/送料 300 円

会員特価 4,000 円/送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会 編
技報堂出版