

コンクリートの強度発現を考慮した クリープひずみの算定式および設計用値

渡辺 健* 中村 麻美*

Concrete Creep Strain Estimation Formula and Design Values of Concrete
by Considering the Strength Development

Ken WATANABE Mami NAKAMURA

Based on a literature survey on creep of mixed cements, this paper presents an estimation of creep coefficients in order to investigate design values of creep coefficients for different types of cement. An compressive strength estimation formula during loading used to calculate the creep strain used in estimating the creep strain coefficient was formulated based on the existing compressive strength estimation formula. First, the design values of creep coefficients for effective prestress calculations are presented. The values were calculated assuming cement types and standard conditions for prestressed concrete (PC) bridges. Then the authors confirm the effect of the creep coefficients on the verification of simple PC girder.

キーワード：コンクリート，プレストレス力，クリープ係数，設計用値

1. はじめに

近年，良質な骨材の入手が困難になることの懸念や，コンクリートに混和材を混入することで構造物の耐久性確保に対処しようとする事例が増加している。特に，比較的高い設計圧縮強度を確保しようとする PC 構造物では，低水セメント比のコンクリートが用いられる。その結果，アルカリ総量も増加するため，フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートへの対応といった，使用材料に関する要望も挙げられている。

2004（平成 16）年制定の鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）（以下，H16 年制定鉄道標準¹⁾）や，2017 年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕（以下，2017 年制定土木学会示方書²⁾）では，単位応力あたりのクリープひずみの算定式が記載されている。この式は，主に普通ポルトランドセメントを対象として定式化されたものであり，混合セメントに対する適用性は明らかにされていない。

本稿は，セメント種類を考慮したクリープ係数の算定式および設計用値について報告する。クリープ係数の試算では，既往の圧縮強度推定式をもとに，クリープひずみの算定に用いる載荷時の圧縮強度推定式を定式化した。そして，セメント種類や PC 橋りょうの標準的な条件を想定して算出した，有効プレストレス算定のためのクリープ係数の設計用値を示した。最後に，設計用値の増減が，単純 PC 桁の照査に対する影響について確認した。

2. クリープひずみ算定式に関する検討

2.1 混合セメントコンクリートに対するクリープひずみ算定式の適用について

H16 年制定鉄道標準¹⁾ や 2017 年制定土木学会示方書²⁾ における，クリープひずみの算定式を式 (1) に示す。

$$\varepsilon'_{cc}(t, t')/\sigma'_{cp} = \frac{4W(1-RH/100)+350}{12+f'_c(t')} \cdot \log_e(t-t'+1) \quad (1)$$

ここに， $\varepsilon'_{cc}(t, t')/\sigma'_{cp}$ ：材齢 t' （日）に初載荷を行ったコンクリートの材齢 t （日）における単位応力あたりのクリープひずみ（ $\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$ ）， W ：コンクリートの単位水量（ kg/m^3 ）， RH ：相対湿度（%）， t' および t ：載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢（日）， $f'_c(t')$ ：載荷時の有効材齢 t' （日）におけるコンクリートの圧縮強度（ N/mm^2 ），である。

式 (1) は，主に普通ポルトランドセメント（以下，N）を対象としており，早強ポルトランドセメント（以下，H）に対しても準用されてきた。そこで，既往の報告^{3) 4)} を基に，高炉セメント（B 種）（以下，BB），フライアッシュセメント（B 種）（以下，FB）といった，セメント種類によるクリープ特性の違いを把握した。図 1 に，単位クリープひずみの実験値を示す⁵⁾。なお，図中の値は，載荷時の圧縮強度 $f'_c(t')$ とヤング係数が試験体間で異なることに配慮して，式 (1) を参考に，文献中のグラフから読み取った単位クリープひずみの実験値を $f'_c(t')$ の関数で正規化したものである。単位水量 W は $175\text{kg}/\text{m}^3$ ，相

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

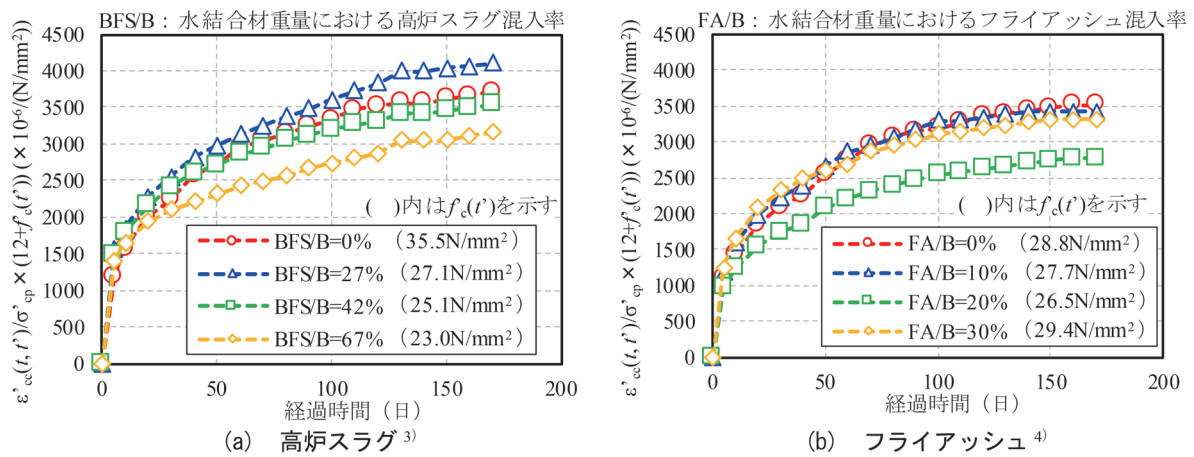


図1 単位クリープひずみに対する混和材の混入率の影響⁵⁾

表1 式(2)に用いる係数⁵⁾

セメント種類	a	b	$d(28)$	$f'_c(28)$
普通ポルトランドセメント (N)	4.5	0.95	1.11	-20+30(C/W)
早強ポルトランドセメント (H)	1.7	0.98	1.04	-15+30(C/W)
高炉セメント B種 (BB)	6.2	0.93	1.15	-10+25(C/W)
フライアッシュセメント B種 (FB)	6.2	0.93	1.15	-25+30(C/W)

対湿度 RH は 60% である。試験ケースによるばらつきは見られたものの、混和材の置換率による明確な傾向は確認できなかったことから、 $f'_c(t)$ を適切に考慮することで、式(1)は混合セメントに対しても適用可能と考えられる。

2.2 荷重時の圧縮強度推定式

N, H, BB および FB を用いたコンクリートの、材齢 t 日における圧縮強度 $f'_c(t)$ の推定式について、2007 年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕(以下、2007 年制定土木学会示方書⁶⁾) の温度ひび割れに対する照査に用いる圧縮強度推定式を参考に、式(2)により表すこととした。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} d(28)f'_c(28) \quad (2)$$

ここに、 a, b : 定数、 $d(28)$: 材齢 28 日に対する材齢 91 日の圧縮強度の増加率、 $f'_c(28)$: 材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、である。

2017 年制定土木学会示方書「6 編温度ひび割れに対する照査」の圧縮強度推定式^{2), 7)} と同程度の精度で表現できるように、式(2)の定数 $a, b, d(28)$ の値を検討した。表 1 に、最小二乗法の結果や、2007 年制定土木学会示方書⁶⁾ の推定式を参考に決定した定数 $a, b, d(28)$ の値を示す。また、図 2 に、式(2)による算定値を示す。セメント種ごとの強度発現の差異を確認できる。図 3 に、

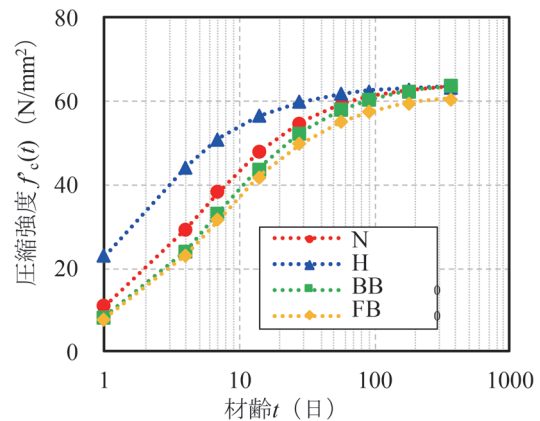


図2 式(2)により算定したコンクリートの強度発現

この算定値と既往の実験データ^{7)~11)} の比較を示す。なお、図 3 は、材齢 1 日～91 日間の複数の材齢で計測された圧縮強度の実験データを示しており、FB は N にフライアッシュを 15%～22% 程度置換した実験データであるが、計算値は実強度を概ね評価している⁵⁾。FB の $W/B=40\% \sim 50\%$ および BB の $W/B=30\% \sim 40\%$ の実験データにおいて、計算値が実強度を上回り、差がやや大きいデータもあるが、図 3(a) に示す既往の圧縮強度推定式の N に対する予測精度のばらつきと同程度であった。

2.3 クリープひずみ、クリープ係数に対する影響

図 4 に、 W/B および荷重開始材齢を同一のもと、単位応力あたりのクリープひずみを示す。単位クリープひず

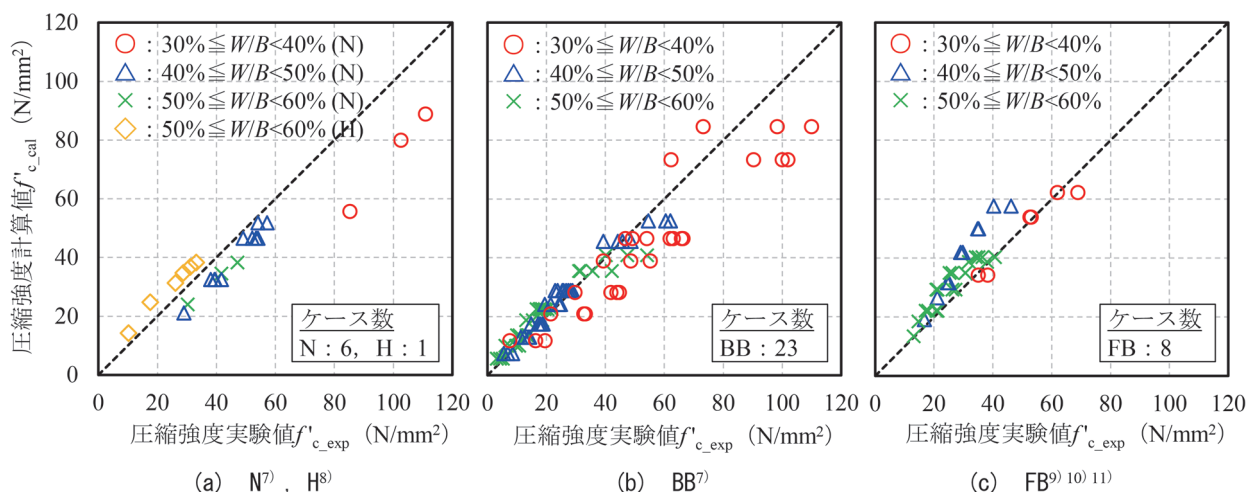


図3 既往の文献の実験データとの比較⁵⁾

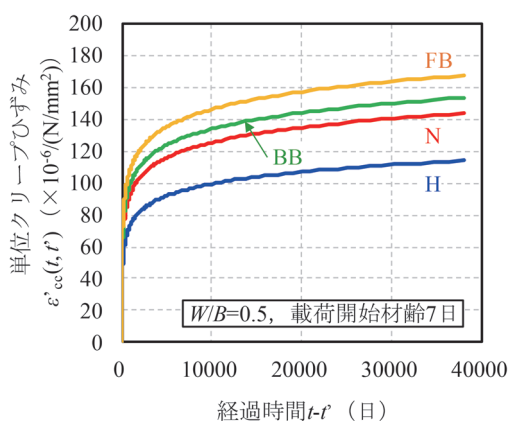


図4 単位クリープひずみとセメント種類

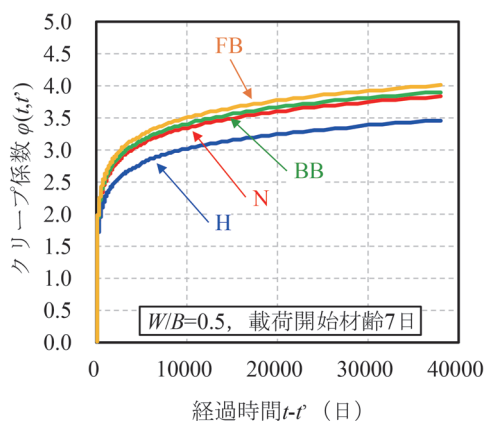


図5 クリープ係数とセメント種類

みの増加傾向は、セメント種類に依存した傾向を示す。図5に、式(1)、式(2)から算出されるクリープ係数を示す。ここで、クリープ係数は、荷重時の圧縮強度から、圧縮強度とヤング係数の関係をもとに、荷重時のヤング係数 E_{ct} を求め、式(3)により求めた。

$$\varphi(t, t') = (\varepsilon'_{cc}(t, t') / \sigma_{cp}) \cdot E_{ct} \quad (3)$$

ここに、 $\varphi(t, t')$: 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、 $\varepsilon'_{cc}(t, t') / \sigma_{cp}$: 材齢 t' (日) に初荷重を行ったコンクリートの材齢 t (日) における単位応力あたりのクリープひずみ ($\times 10^{-6} / (\text{N}/\text{mm}^2)$)、 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。

セメント種類による同一材齢でのクリープ係数の差異は、図2に示した強度発現の差異に起因するものである。荷重時の圧縮強度が小さいほど単位応力あたりのクリープひずみは大きくなるが、荷重時のヤング係数は小さくなるため、早強セメントを除くと、セメントの種類

がクリープ係数に及ぼす影響は比較的小さい。PC 構造物の実施工では、一般にプレストレス導入時の圧縮強度を管理しており、プレストレス導入時の圧縮強度が同じであれば、セメント種類によらずクリープ係数は概ね同程度となると考えられる。

3. クリープ係数の設計用値に関する検討

3.1 プレストレス力算定のための設計用値の見直し

式(2)の見直しに併せて、クリープ係数の設計用値を見直した。設計用値は、標準的な条件下のプレストレスコンクリート構造を想定して定めた。PC 桁の長期たわみの計算では、桁上面と桁下面の相対湿度を適切に考慮する必要があるために、相対湿度は、部材の上面(乾湿繰り返し)および下面(常時乾燥)として算出した。ただし、桁のプレストレス力の変動など、クリープの影響を力でモデル化する場合、上面と下面のクリープ係数の差異に起因した影響は小さい。そこで、プレストレス力算定に用いられるクリープ係数の設計用値として、断

表2 有効プレストレス算定のためのコンクリートのクリープ係数の設計用値

出典・検討方法	セメント種類	プレストレス導入時，荷重時のコンクリートの材齢						
		4日	7日	4~7日	14日	28日	3ヶ月	1年
H16年制定鉄道標準	—	—	—	2.7	1.7	1.5	1.3	1.1
式(1)~式(4)による検討*	N	—	3.1	—	2.5	2.2	1.8	1.4
	H	2.9	2.5	—	2.3	2.0	1.7	1.3

※N：普通ポルトランドセメント（高炉セメントB種，フライアッシュセメントB種も準用可），H：早強ポルトランドセメント

表3 試設計条件

設計条件	PC			PRC	
	T桁	箱桁	下路桁	T桁	箱桁
線数	1	2	1	2	2
橋長	24m	31.3m	31m	38m	34m
種別	新幹線	在来線	在来線	在来線	新幹線
設計速度	260km/h	90km/h	110km/h	160km/h	260km/h

面の平均値として算出した。

クリープ係数の設計用値については，以下の通り検討した。式(1)は，コンクリート供試体のクリープ試験結果に基づいて構築されている。式の構成では，荷重開始材齢 t を任意に設定して，クリープ係数を算定可能である。しかしながら，クリープ試験は一般に初期荷重材齢を28日あるいは3か月に設定しておらず，荷重材齢が大きくなった場合の予測式の精度については検討の余地があると考えられる。また，式(1)，式(2)において，例えば荷重材齢 $t=28$ 日として算定すると $\varphi=2.7$ となる。表2に示す通り，H16年制定鉄道標準の材齢28日の設計用値は $\varphi=1.5$ であることから，約1.8倍の値になることになる。

これまでH16年制定鉄道標準の設計用値を用いてPC桁やPRC桁の建設が行われているが，少なくとも，プレストレスの減少量を算定する点では問題は報告されていない。そこで，予測式という観点ではなく，設計用値という観点でH16年制定鉄道標準との整合を取ることとした。つまり，クリープ係数のみならず，プレストレスの減少量の算定式と併せて，設計用値の精度を検討する必要がある。

そこで，クリープ係数の設計用値は，2017年制定土木学会示方書の検討¹²⁾を参考に，式(1)~式(3)に基づき，一般に良く使われているWhitney則に基づいて式(4)により算出した。これは，プレストレスを与えたときのクリープに対する各荷重時から設計耐用期間までの残クリープを，各荷重時材齢におけるクリープの設計用値として算出するものである。

$$\varphi(t, t_i) = \varphi(t, t_1) - \varphi(t_i, t_1) \quad (4)$$

ここに， $\varphi(t, t_i)$ ：材齢 t_i (日) に初荷重したコンクリートの材齢 t (日) におけるクリープ係数であり， t_1 は7

日 (N, BB, FB) あるいは4日 (H)，である。 t は，供用期間100年を確保するため，供用開始までの期間も考慮してやや大きい値として $t=38000$ (日) とした。

表2に示す通り，早強セメントのクリープ係数は，比較的早い材齢で荷重する場合，普通セメントの場合と比較してやや小さい(図4)。一方，高炉セメントB種およびフライアッシュセメントB種を用いた場合のクリープ係数は，普通セメントの場合とほぼ同一であったことから(図4)，設計用値としては，普通セメントの値を準用してよいと考えられる。その結果，クリープ係数は0.3~0.8の範囲で増加するが，クリープ曲線がH16年制定鉄道標準から大きく変わることはない。

3.2 設計用値が単純PC・PRC桁の照査に及ぼす影響

収縮ひずみ ϵ'_{cs} とクリープ係数 φ が，PC桁やPRC桁の各性能項目の照査結果に及ぼす影響について検討した。表3に試設計を行った桁の主な試設計条件を示す。PC-T桁，PRC-T桁，PC-箱桁，PRC-箱桁，PC-下路桁を1例ずつ選定した。 $\epsilon'_{cs}=200 \times 10^{-6}$ ， $\varphi=2.7$ [H16年制定鉄道標準 5.3.1.9, 5.3.1.10]を基本とし，これらの ϵ'_{cs} と φ に対し，0.5倍，2.0倍に増減した場合の照査結果を確認した。コンクリートの設計基準強度は 40N/mm^2 (導入時 34N/mm^2)，最大水セメント比50%である。

図6に計算結果を示す。ここでは，設計の決定要因となる安全性(破壊)，復旧性(損傷)，「適用の要件」について示す。なお，「適用の要件」では，コンクリートと鋼材の応力度を検討し，永久作用によるコンクリート緑圧縮応力度 σ'_c がコンクリートの設計圧縮強度 f'_{cd} の40%以下，かつ変動作用によるPC鋼材の引張応力度 σ_p が設計引張強度 f_{pud} の70%以下であることを確認した。

桁種に関わらず，収縮ひずみ量 ϵ'_{cs} とクリープ係数 φ が照査結果に与える影響が小さいことがわかる。特に桁において，設計の決定要因となる安全性(破壊)では，

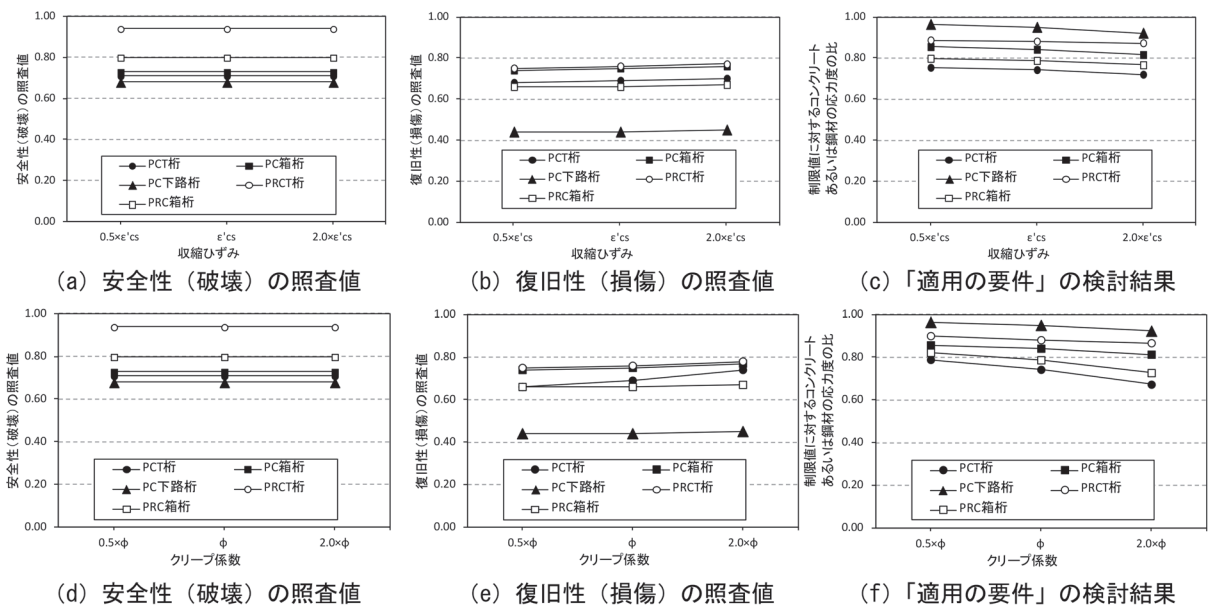


図6 各種PC桁およびPRC桁における試設計の結果
(上段：収縮ひずみ量を変更した場合，下段：クリープ係数を変更した場合)

ϵ'_{cs} と ϕ の感度はみられない。また、鋼材応力度を用いて照査する「適用の要件」では、照査結果が多少変動したものの、決定要因となる程度の照査値の増加はなかった。これより、単純PC桁の設計では、収縮ひずみ ϵ'_{cs} とクリープ係数 ϕ の増減が、照査結果に及ぼす影響は小さい。すなわち、表2に示す通り、クリープ係数の設計用値はH16年制定鉄道標準から増加したが、こうした桁の照査値に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

- (1) 単位クリープひずみに及ぼすセメント種類の影響は比較的小さかった既往の実験結果から、H16年制定鉄道標準のクリープひずみ算定式に、コンクリートの圧縮強度発現の違いを考慮することで、混合セメントコンクリートのクリープを概ね表現可能であると考えられる。
- (2) 既往の圧縮強度推定式をもとに、クリープひずみの算定に用いる載荷時の圧縮強度推定式を定式化した。そして、セメント種類を考慮した有効プレストレス算定のためのクリープ係数を示した。
- (3) 単純PC桁、PRC桁の試設計では、収縮ひずみ ϵ'_{cs} とクリープ係数 ϕ の増減が、照査結果に及ぼす影響を確認した。本報告では、クリープ係数の設計用値が増加したが、これらの桁の照査結果に及ぼす影響は小さいことを確認した。

文献

- 1) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，2004
- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，丸善，2018
- 3) 大谷俊浩，濱永康仁，上田賢司，佐藤嘉昭：鉄筋埋設拘束試験による混和材混入コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.221-226，2011
- 4) 大谷俊浩，将海燕，伊藤七恵，佐藤嘉昭：鉄筋埋設拘束試験によるフライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.136-141，2012
- 5) 中村麻美，渡辺健：セメント種類を考慮したコンクリートのクリープ係数の設計値に関する検討，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，Vol.30，pp.515-518，2021
- 6) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，丸善，2008
- 7) 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，日本コンクリート工学会，2008.11
- 8) 大井孝和，森野奎二，内藤幸雄：養生温度条件とコンクリートの強度発現，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.1，No.1，pp.5-8，1979
- 9) 國府勝郎，上野敦，平野将司：フライアッシュの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.79-84，2000

- 10) 呉富栄, 榊田佳寛, 中村成春, 新沼大史: フライアッシュを使用したコンクリートの強度発現に及ぼす養生変化の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.569-574, 2003
- 11) 深川正浩, 中村成春, 榊田佳寛, 阿部道彦: 分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性及び耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.205-210, 1997
- 12) 土木学会: コンクリートライブラリー138 2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料—基本原則編・設計編・施工編一, 丸善, 2013