

論文 初期高温履歴を受けるコンクリートの鉄筋拘束応力およびクリープに関する一考察

小川 由布子*1・佐藤 良一*2・河合 研至*3・藤山 堯大*4

要旨：外部拘束を受けるマスコンクリート構造物の温度応力と異なり，水和熱を想定した高温履歴下で収縮の鉄筋拘束により引張応力を受けた後，引張応力が減少する応力履歴を受ける場合の有効ヤング係数およびクリープ係数を検討した。コンクリートは高炉セメント B 種を用い W/C=40%，廃瓦細骨材（PCFA）置換の有無の 2 種類とした。この結果，クリープによるヤング係数の低減係数はマスコンクリートひび割れ制御指針のそれと同等以下で，クリープ係数は PCFA 無置換の場合，昇温時に 2.0 程度，降温時に 3.7 程度，PCFA 置換の場合ともに 1.0 であり，PCFA の内部養生によりクリープ係数は小さくなった。

キーワード：初期高温履歴，鉄筋拘束応力，有効ヤング係数，クリープ係数

1. はじめに

マスコンクリート構造物は，セメントの水和熱により初期材齢において高温履歴を受ける。外部拘束を受けるコンクリート構造物の場合，コンクリートは圧縮応力を受けた後，これが低減し，引張応力が増進していく。日本コンクリート工学会発刊のマスコンクリートひび割れ制御指針¹⁾（以下，JCI マスコン指針）では，ヤング係数に低減係数を乗じることにより減じた有効ヤング係数を用いることにより高温履歴中のクリープの影響を考慮している。この低減係数，すなわち有効ヤング係数とヤング係数の比は，最高温度に達する有効材齢までは 0.42，最高温度に達する有効材齢+1 日（有効材齢）以降は 0.65，この間は直線補完する値が提案されている。また，有効ヤング係数に関する実験的検討における低減係数は，0 から 1.7 までの間の値を示すと報告されている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

一方，鉄筋拘束が卓越する場合は応力履歴が異なり，表面付近では引張応力が主体的に発生すると考えられる。そこで，本研究では，内部拘束型で鉄筋による拘束が卓越する場合を想定し，高温履歴を受けるコンクリートの応力履歴を検討するとともに，この応力履歴の違いが有効ヤング係数およびクリープ係数に与える影響を検討する。なお，本検討では廃瓦細骨材を内部養生材として用いた場合のコンクリートの自己収縮ならびに有効ヤング係数に対する影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは，密度 3.04g/cm³，比表面積 3,840g/cm² の高炉スラグセメント B 種を用いた。細骨材および粗骨材に

は，石英斑岩砕砂および砕石を使用した。内部養生材として，寸法 1mm から 5mm の廃瓦細骨材を用いた。骨材の物理的特性を表-1 に示す。廃瓦細骨材は，7 日間以上浸水させ，表乾状態に調整して使用した。高性能 AE 減水剤および AE 剤は，それぞれポリカルボン酸系化合物および特殊アニオン界面活性剤を用いた。

表-1 骨材の物理的特性

使用材料	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	記号
細骨材	石英斑岩砕砂	2.60	2.28	S
	廃瓦細骨材	2.26	8.92	PCFA
粗骨材	石英斑岩砕石	2.64	0.76	G

2.2 配合

配合は表-2 に示すように，水セメント比（W/C）を 40%とし，細骨材率を 45.0%の一定とした。廃瓦細骨材は，細骨材容積に対して 15%置換して使用した。スランブおよび空気量は，12cm±2.5cm および 4.5±1.0%を目標値として前述の混和剤により調整した。フレッシュコンクリートの試験結果は表-3 に示すとおり目標値を満足した。

表-2 配合

凡例	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	PCFA	G
BB40	40	45.0	165	413	766	0	952
BB40PCFA			165	413	651	100	952

表-3 フレッシュ試験結果

	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
目標値	12±2.5	4.5±1.0	-
BB40	13.5	4.0	14.0
BB40PCFA	10.0	4.5	14.0

*1 広島大学 大学院研究院社会環境空間部門助教 博士（工）（正会員）

*2 広島大学 大学院工学研究院名誉教授 工博（正会員）

*3 広島大学 大学院研究院社会環境空間部門教授 工博（正会員）

*4 広島大学 工学研究科社会基盤環境工学専攻（学生会員）

2.2 試験項目および供試体作製

(1) コンクリートの力学特性試験

コンクリートの力学特性試験では、圧縮強度およびヤング係数を測定した。圧縮強度は JIS A 1108 に、ヤング係数は、JIS A 1149 に従い、φ100 x 200mm の円柱供試体を用いて、材齢 1, 3, 7, 28, および 91 日に測定した。

(2) 鉄筋拘束試験

図-2 に示すとおり、100 x 100 x 1200 mm のコンクリートの中心に D19 の異形鋼棒を 1 本配置した供試体を 1 体作製した。型枠によるコンクリートの拘束を防ぐため、型枠の両端部内側に厚さ 3 mm のポリスチレンボードを設置し、側面および底面には厚さ 0.1 mm のポリエチレンフィルムを設置した。ポリスチレンボードおよびポリエチレンフィルムと型枠の間には、シリコングリスプレーを吹きかけた。

鉄筋の中央部は、長手方向 40mm の区間の節を取り 5 mm の自己温度補償ひずみゲージを上下に 2 枚貼付し、衝撃吸収および防水加工を施した。その後、貼付したひずみゲージに対し、コンクリートの打込み前に 10℃ から 70℃ へ昇温し 10℃ へ降温する熱養生を 3 度行った。

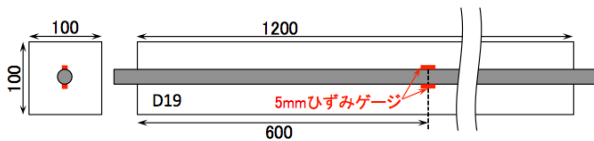


図-2 鉄筋拘束供試体 (単位: mm)

(3) 無拘束試験

コンクリートの自由変形を測定するため、100 x 100 x 400mm の角柱供試体を 1 体作製し、中央に埋込み型ひずみゲージを設置し打込み直後から自由ひずみを測定した。

2.3 初期温度履歴条件

すべての供試体は、温度湿度制御槽内にて打ち込み、打込み面をアルミ粘着テープで封緘した。材齢 7 日まで、図-1 に示した高温履歴を与え、その後、20℃ の恒温室へ移動し静置した。なお、高温履歴は、最高温度約 68℃ であり、マスコンクリート中の温度上昇を模擬したものである。図-1 に、鉄筋拘束試験体中の温度を付記した。両配合とも与えた高温履歴と同様の温度変化を示した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度およびヤング係数

圧縮強度およびヤング係数の試験結果を図-3 および図-4 それぞれ示す。横軸は、式(1)で示めされる有効材齢としている。また、それぞれの結果は、JCI マスコン指針に記載されている式(2)および式(3)で回帰し、図中には線で示した。ここで、式(1)における硬化原点に対応

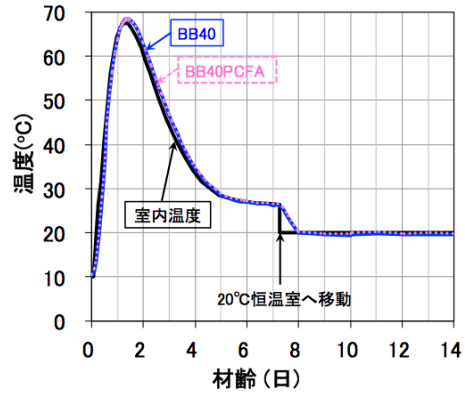


図-1 室内およびコンクリート中の温度履歴

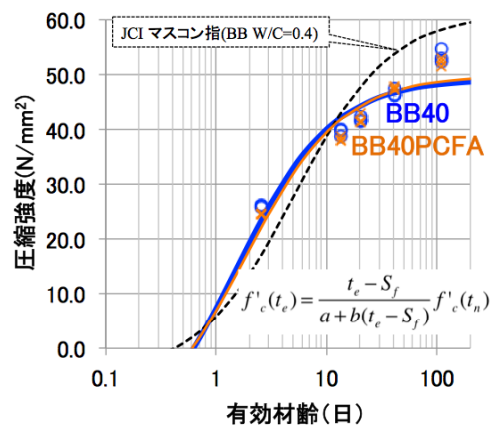


図-3 コンクリートの圧縮強度

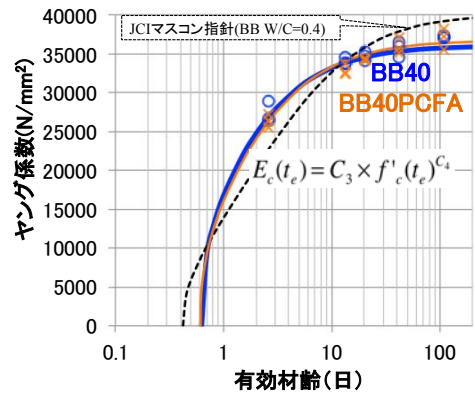


図-4 コンクリートのヤング係数

する有効材齢 (S_p) は、図-5 および図-6 に示す自己収縮ひずみの急変点とした。これは、鉄筋拘束供試体における鉄筋弾性ひずみが圧縮側へ急増する時点と一致した。各係数および回帰式の決定係数を表-3 にまとめた。図中の破線は、JCI マスコン指針に記載されている予測式で得られた結果を示している。

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

ここで、 t_e : 有効材齢 (日)、 $T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続する

コンクリート温度 (°C), $T_0: 1^\circ\text{C}$

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad (2)$$

ここで, t_n : 20°C水中で養生したコンクリートの管理材齢 (日), a および b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数, S_f : セメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢 (日)

$$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4} \quad (3)$$

ここで, $E_c(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるヤング係数 (N/mm²), C_3 および C_4 : 係数

表-3 回帰式の係数および決定係数の一覧

	圧縮強度				ヤング係数			
	S_f	a	b	$f'_c(28)$	R^2	C_3	C_4	R^2
JCI マスコン指針	0.42	4.75	0.83	50.6	-	6300	0.45	-
BB40	0.63	2.66	0.905	46.0	0.920	7618	0.40	0.95
BB40PCFA	0.61	2.98	0.894	45.6	0.945	7156	0.42	0.95

図-3 に示すとおり, JCI マスコン指針の推定値と比較すると, BB40 であっても有効材齢 10 日以降の強度発現が小さく, 有効材齢 110 日 (材齢 91 日) では約 10% 低くなる傾向にあった。また, 廃瓦細骨材混入による差はほとんど無い。ヤング係数についても, 図-4 に示すとおり, 有効材齢約 10 日までは JCI マスコン指針よりも若干大きい, その後は BB40 であっても低く, 有効材齢 110 日 (材齢 91 日) では, 5% 程度低くなった。また, 圧縮強度と同様に, 廃瓦細骨材の混入による違いはほとんど無かった。

3.2 コンクリートの自由ひずみ

無拘束試験によって得られた自由ひずみおよび鉄筋拘束試験供試体の鉄筋弾性ひずみを配合ごとに図-5 および図-6 に示す。コンクリートの熱膨張係数 (図中, TEC) は, 熱電対を埋込み同じ養生を行った材齢 182 日以降の $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ を用いて, 20°C から 40°C の範囲で温度を変化させコンタクトストレインゲージを用いてひずみを測定することにより求め, BB40 および BB40PCFA でそれぞれ, $11.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $10.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ となった。これを用いて温度ひずみを差し引き, 鉄筋弾性ひずみが圧縮側へ急増した時点 (S_f と同時) のひずみを 0 として整理したコンクリートの自己収縮ひずみ, ならびに JCI マスコン指針に従って推定した自己収縮ひずみを同図に示した。なお, 緑線は供試体中の温度を示している。

自由ひずみが材齢 7 日までの間, 温度履歴と同様の変化をしていることから, 温度ひずみの割合が大きいことがわかる。また, 材齢 7 日以降の恒温の状態においても収縮が進行しており自己収縮が進行していることがわかる。有効材齢約 200 日において, BB40 の自己収縮ひず

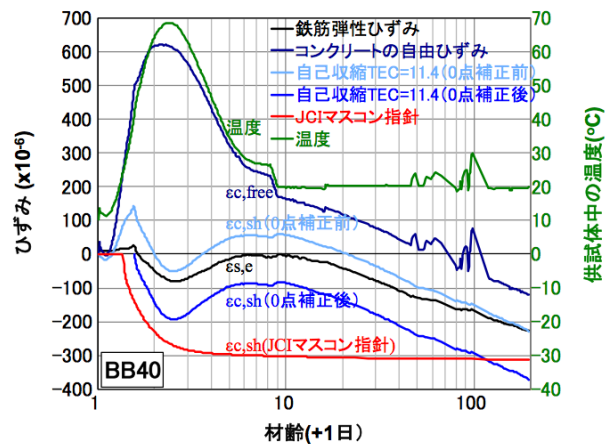


図-5 無拘束供試体のコンクリートのひずみおよび鉄筋拘束供試体の鉄筋弾性ひずみ (BB40)

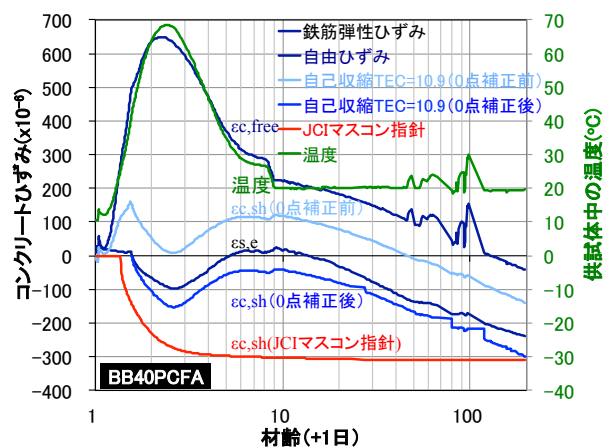


図-6 無拘束供試体のコンクリートのひずみおよび鉄筋拘束供試体の鉄筋弾性ひずみ (BB40PCFA)

みが約 370×10^{-6} であるのに対し, BB40PCFA の自己収縮ひずみは約 300×10^{-6} であり, 廃瓦細骨材の混入による内部養生の効果が確認できた。

3. 考察

3.1 有効ヤング係数

(1) 算出方法と各ひずみの変化

JCI マスコン指針においては, 有効ヤング係数を用いることにより初期材齢におけるクリープの影響を考慮している。これを参考にして, 本研究では以下の手順で有効ヤング係数を試算する。

拘束試験供試体中のコンクリートのひずみ (ϵ_c) は式(3)に示すとおり, 弾性ひずみ ($\epsilon_{c,e}$), クリープひずみ (ϵ_{cr}), 収縮ひずみ (ϵ_{sh}) および温度ひずみ ($\epsilon_{c,\Delta T}$) で構成され, 鉄筋ひずみ (ϵ_s) は式(4)に示すとおり, 弾性ひずみ ($\epsilon_{s,e}$), および温度ひずみ ($\epsilon_{s,\Delta T}$) で構成される。

$$\epsilon_c = \epsilon_{c,e} + \epsilon_{cr} + \epsilon_{sh} + \epsilon_{c,\Delta T} \quad (3)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_{s,e} + \epsilon_{s,\Delta T} \quad (4)$$

ひずみの適合条件より, 鉄筋の拘束によるひずみ (拘束ひずみ), すなわちコンクリートの弾性ひずみとクリー

ひずみの和は、式(5)のとおり示される。これは、拘束試験体中の鉄筋の弾性ひずみと温度ひずみの和から、無拘束試験におけるコンクリートの自由ひずみを引くことを意味している。コンクリートの熱膨張係数を求めるのは困難であるため、本検討においては、収縮ひずみ (ϵ_{sh}) および温度ひずみ ($\epsilon_{c,\Delta T}$) は分けず、測定したこれらの和、すなわち自由ひずみを用いることとする。一方、鉄筋の温度ひずみは、熱膨張係数を $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として試算した。

$$\epsilon_{c,e} + \epsilon_{cr} = \epsilon_{s,e} + \epsilon_{s,\Delta T} - (\epsilon_{sh} + \epsilon_{c,\Delta T}) \quad (5)$$

一方、コンクリート応力は、有効ヤング係数 (E_e) を用いて式(6)のとおり示すことができる。式(6)は、実測した鉄筋の弾性ひずみによりコンクリート応力が算出できることを示している。

$$\begin{aligned} \sigma_c &= E_e (\epsilon_c - \epsilon_{sh} - \epsilon_{c,\Delta T}) \\ &= -p\gamma_c E_s (\epsilon_s - \epsilon_{s,\Delta T}) \\ &= -p\gamma_c E_s \epsilon_{s,e} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 p : 鉄筋比 ($= A_s / A_c$)、 γ_c : 断面係数 ($= 1 + \frac{(d-c_g)^2}{I_c/A_c}$)

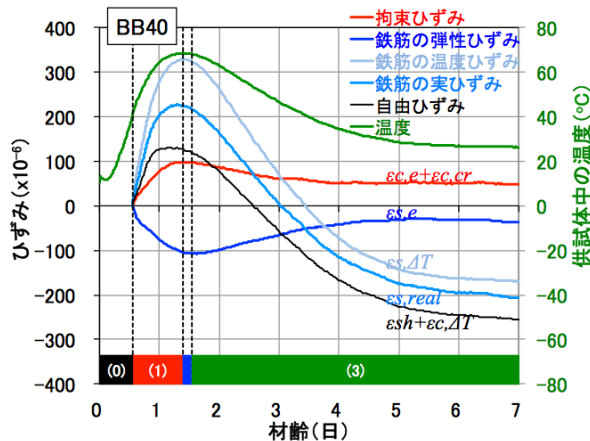


図-7 コンクリートおよび鉄筋のひずみ (BB40)

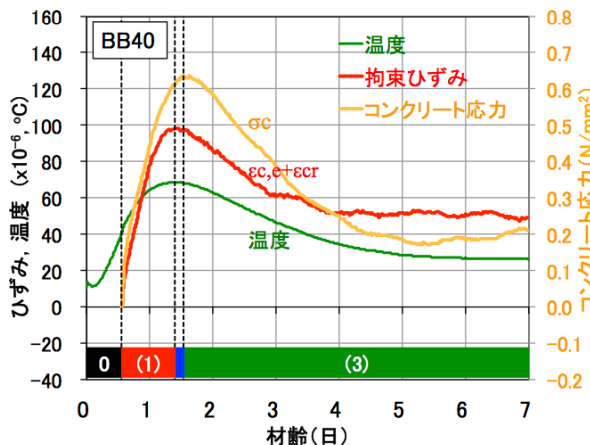


図-9 コンクリートの応力および拘束ひずみ (BB40)

(本検討は 1)), d : 有効高さ (mm), A_s および A_c : 鉄筋およびコンクリートの断面積 (mm^2), ここで、 c_g : 上縁から図心までの距離 (mm), I_c : 断面二次モーメント (mm^4)

式(5)および式(6)より、有効ヤング係数は、式(7)で示される。

$$E_e = -\frac{p\gamma_c E_s \epsilon_{s,e}}{\epsilon_{c,e} + \epsilon_{cr}} = -\frac{\sigma_c}{\epsilon_{c,e} + \epsilon_{cr}} \quad (7)$$

図-7 および図-8 に材齢 7 日までの各ひずみの変化を、図-9 および図-10 に式(5)により算出した拘束ひずみと式(6)により算出したコンクリート応力の変化を示す。各図中には、材齢 7 日までを (1) 鉄筋の弾性ひずみが急変する時点まで、(2) 最高温度時点まで、(3) 最高温度時点から有効材齢 1 日まで、(4) 材齢 7 日まで、の段階分けを示している。

図-7 および図-8 に示すとおり、鉄筋の弾性ひずみは高温履歴の温度上昇とともに大きくなり、降温とともに 0 に近づく、その後、材齢とともに増加した。コンクリート応力は、図-9 および図-10 に示すとおり、昇温

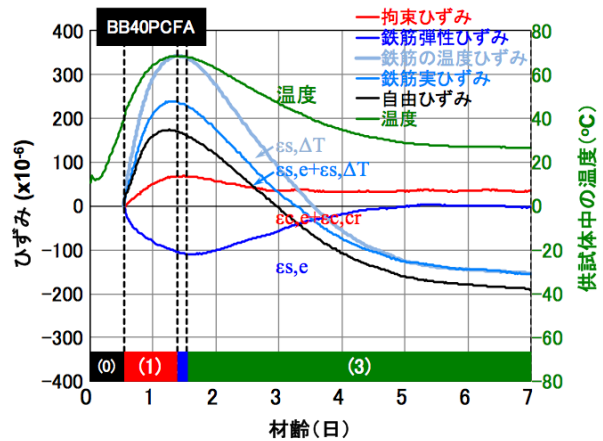


図-8 コンクリートおよび鉄筋のひずみ (BB40PCFA)

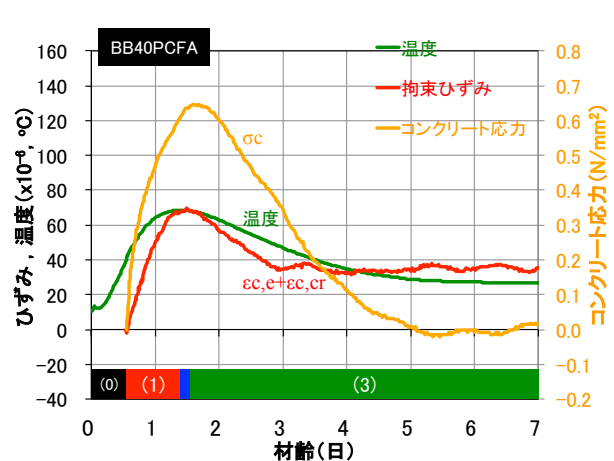


図-10 コンクリートの応力および拘束ひずみ (BB40PCFA)

とともに増大し、最高温度時に BB40 の場合に 0.61 N/mm²、BB40PCFA では 0.62 N/mm² と圧縮応力の変曲点をとり、降温とともに応力は低下した。

(2) 有効ヤング係数

図-11 に、例として BB40 のコンクリート応力と拘束ひずみの関係を示す。有効ヤング係数は、式(7)に示すとおり、コンクリート応力と拘束ひずみの関係についての近似直線の傾きから求めた。

上述のとおり試算した有効ヤング係数、実測値を式(2)および(3)で近似したヤング係数、およびヤング係数の低減係数 $\alpha (=E_e/E_c)$ を図-12 および図-13 に配合ごとに示す。それぞれの図には、JCI マスコン指針に示されている低減係数および有効ヤング係数も付記した。

JCI マスコン指針では、対象区間において一定の低減係数を定め、有効ヤング係数を求めるのに対し、本検討では対象区間において有効ヤング係数を求め、低減係数を求めているという違いがある。図-12 および図-13 に示すとおり、BB40 では JCI マスコン指針より小さく、結果、BB40PCFA では JCI マスコン指針と同等か若干小さくなり、廃瓦細骨材の内部養生によるクリープの低減が示唆された。

3.2 クリープ係数

(1) 試算方法

式(5)および式(6)より、拘束ひずみは式(7)のとおり示される。

$$\varepsilon_{c,e} + \varepsilon_{cr} = \frac{-p\gamma_c E_s \varepsilon_{s,e}}{E_e} = -n_e p\gamma_c \varepsilon_{s,e} \quad (7)$$

ここで、 n_e : 有効ヤング係数比

有効ヤング係数が式(8)のとおりクリープの影響を考慮していることから、クリープ係数は、式(9)のとおり求めることができる。また、鉄筋比に依存しないこともわかる。

$$n_e = n(1 + \chi\varphi) \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{1}{\chi} \left\{ -1 + \frac{1}{n p \gamma_c} \left(-1 + \frac{\varepsilon_{sh} + \varepsilon_{c,\Delta T} - \varepsilon_{s,\Delta T}}{\varepsilon_{s,e}} \right) \right\} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{\chi} \left(-1 + \frac{E_c}{E_e} \right)$$

ここで、 χ : 材齢係数

各ステップ j におけるクリープ係数の増分は式(10)のとおりとなる。

$$\Delta\varphi_j = \frac{1}{\chi} \left\{ -1 + \frac{1}{n_j p \gamma_c} \left(-1 + \frac{\Delta\varepsilon_{sh,j} + \Delta\varepsilon_{c,\Delta T,j} - \Delta\varepsilon_{s,\Delta T,j}}{\Delta\varepsilon_{s,e,j}} \right) \right\} \quad (10)$$

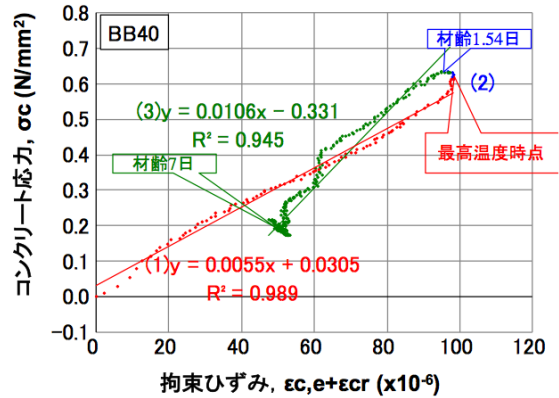


図-11 BB40 のコンクリート応力と拘束ひずみの関係

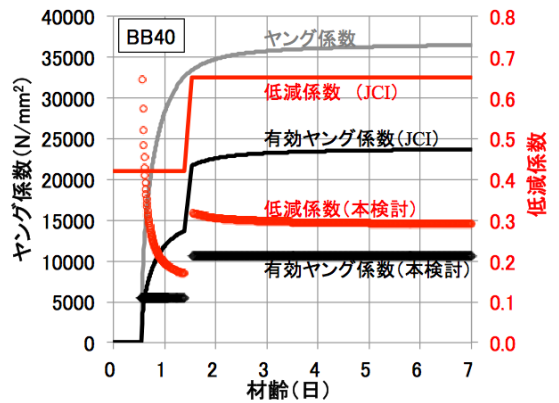


図-12 BB40 の有効ヤング係数と低減係数

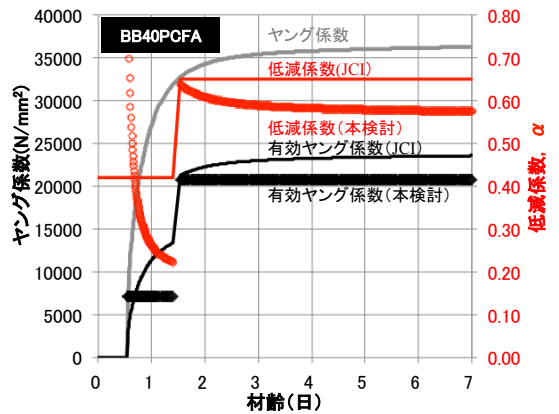


図-13 BB40PCFA の有効ヤング係数と低減係数

(2) クリープ係数の試算結果

式(10)によって求めた各クリープ係数と試算に用いた値を表-4 および表-5 に示す。試算したクリープ係数は、昇温時において BB40 で 2.0、BB40PCFA で 1.0 となった。また、降温時のクリープ係数は BB40 および BB40PCFA の場合、それぞれ 3.6 および 0.9 となり、廃瓦細骨材の内部養生によりクリープ係数が小さくなったことがうかがえる。材齢 7 日以降では BB40 は 0.9 となったが、BB40PCFA では、材齢 7 日から 50 日の範囲で

表-4 クリープ係数の試算結果 (BB40)

BB40		ヤング係数比, n Es/averageEc	コンクリートの自由ひずみ $\epsilon_{c,free,j+1} - \epsilon_{c,free,j}$	Δ 鉄筋の温度ひずみ $\epsilon_{s,\Delta T,j+1} - \epsilon_{s,\Delta T,j}$	Δ 鉄筋弾性ひずみ $\epsilon_{se,j+1} - \epsilon_{se,j}$	各クリープ係数 $\chi \phi$ ($\chi=0.8$) ϕ	
昇温初期	(0)材齢0日~0.55日	-	-	-	-	-	-
昇温期	(1)材齢0.55日~1.4日	12.3	127	329	-104	1.6	2.0
最高温度時+有効材齢1日	(2)材齢1.4日~1.54日	6.1	-8	-6	-4	-3.4	-4.2
降温期	(3)材齢1.54日~7日	5.7	-375	-494	72	2.9	3.7
材齢7日以降	(4)材齢7日~197.5日	5.4	-355	-77	-219	0.7	0.9
材齢約50日以降	(4')材齢50日~197.5日	5.3	-176	-6	-129	1.1	1.3

表-5 クリープ係数の試算結果 (BB40PCFA)

BB40PCFA		ヤング係数比, n Es/averageEc	コンクリートの自由ひずみ $\epsilon_{c,free,j+1} - \epsilon_{c,free,j}$	Δ 鉄筋の温度ひずみ $\epsilon_{s,\Delta T,j+1} - \epsilon_{s,\Delta T,j}$	Δ 鉄筋弾性ひずみ $\epsilon_{se,j+1} - \epsilon_{se,j}$	各クリープ係数 $\chi \phi$ ($\chi=0.8$) ϕ	
昇温初期	(0)材齢0日~0.55日	-	-	-	-	-	-
昇温期	(1)材齢0.55日~1.4日	12.6	169	342	-105	0.8	1.0
最高温度時+有効材齢1日	(2)材齢1.4日~1.54日	6.2	-8	-5	-4	-2.3	-2.9
降温期	(3)材齢1.54日~7日	5.8	-351	-490	106	0.8	1.0
材齢7日以降	(4)材齢7日~197.5日	5.4	-329	-83	-250	-1.1	-1.4
材齢約50日以降	(4')材齢50日~197.5日	5.3	-135	-5.9	-103	0.6	0.8

コンクリート応力が増大している一方で拘束ひずみが収縮方向へ進む傾向が確認され負の値を示した。この範囲を除いて、材齢 50 日以降で両配合について検討すると BB40 および BB40PCFA のクリープ係数は、それぞれ 1.3 および 0.8 となり、廃瓦を混入した場合に小さくなった。

4. まとめ

水和熱を想定した高温履歴下で、収縮が鉄筋に拘束された場合のコンクリート応力履歴の有効ヤング係数およびクリープ係数に対する影響を検討した。この結果を以下にまとめる。

- (1) 初期高温履歴を受けた BB40 の自己収縮ひずみは、材齢約 370×10^{-6} であるのに対し、BB40PCFA の場合、約 300×10^{-6} であり、廃瓦細骨材の混入による内部養生の効果が確認できた。
- (2) 高温履歴下で、収縮が鉄筋に拘束された場合、収縮の鉄筋拘束により引張応力を受けた後、引張応力が減少する。
- (3) 圧縮強度およびヤング係数は、JCI マスコン指針における推定値よりも小さくなった。ヤング係数の低減係数は、BB40 において JCI マスコン指針よりもかなり小さい値に、BB40PCFA において同等もしくは若干小さい値をとった。
- (4) 鉄筋拘束が卓越する場所の温度応力を評価する際は、従来の外部拘束が卓越する場合と応力履歴が異なるため、別途有効ヤング係数を検討する必要があると考えられる。
- (5) クリープ係数は BB40PCFA の場合、昇温時および降

温時ともに 1.0 程度、BB40 の場合それぞれ 2.0, 3.7 であり、廃瓦細骨材の内部養生により自己収縮が低減されクリープも小さくなったと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 24246077 (代表: 佐藤良一) の助成を受けたものです。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008
- 2) 江渡正満, 丸山久一, 野添秀昭：マスコンクリートの温度応力推定に用いる有効ヤング係数の評価に関する検討, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.27-34, 1999
- 3) 徳永法夫, 鈴木威, 江渡正満, 安本礼持：開削トンネルマスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する実験および解析的検討, コンクリート工学論文集, No.13, No.2, 2002
- 4) 谷田貝敦, 宮澤伸吾, 廣島明男, 大友健：マスコンクリートの拘束応力に及ぼすセメント種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.675-680, 2007
- 5) 白井達哉, 宮原茂禎, 丸屋剛, 大友健：異なる養生温度条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.1, pp.92-103, 2014