

高収縮骨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

広島大学大学院	学生会員	○三谷	昂大
広島大学大学院	学生会員	太田	光貴
広島大学	非会員	横山	美穂
太平洋セメント株式会社	正会員	兵頭	彦次
広島大学大学院	フェロー会員	佐藤	良一

1. はじめに

実構造物におけるひび割れ発生事例において、コンクリートの乾燥収縮に対する関心が高まっている。コンクリートの乾燥収縮の要因のひとつとして、骨材の物性の影響が知られている。後藤ら¹⁾は、多数の骨材物性とコンクリートの乾燥収縮との関連性を評価し、骨材自身の収縮が影響を与えることを指摘した。そこで本研究では、コンクリートの乾燥収縮が比較的大きくなる骨材を用いて 100×100×400mm の無拘束供試体を作製し、そのコンクリートの自己収縮および材齢 7 日で乾燥後の収縮特性を検討する。さらに、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」(以下、JCI 指針)に示される自己収縮予測式²⁾および、土木学会 2007 年制定コンクリート標準示方書「設計編」³⁾(以下、示方書)の乾燥収縮ひずみ予測式の適用性についても検証を行う。また、step-by-step に基づくクリープ解析⁴⁾により鉄筋ひずみの予測を行い、無拘束供試体と同様のコンクリートで作製した鉄筋拘束供試体により測定した実測鉄筋ひずみとの比較検討を行う。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

本研究で用いた使用材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 に示す。本研究で用いた骨材は、比較的小さいコンクリートの乾燥収縮が大きくなる骨材を用いており、コンクリートの収縮を増大するために粗骨材、細骨材いずれにも用いた。

表-1 使用材料

材料名	記号	種類 / 特性
セメント	C	普通ポルトランドセメント / 密度: 3.16g/cm ³
細骨材	S	砂岩砕砂 / 表乾密度: 2.65g/cm ³ , 吸水率 1.86%
粗骨材	G	砂岩砕岩 / 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率 0.89%
混和剤	AD	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)
	AE	AE 剤

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	AD	AE
HAS	0.5	170	340	832	977	2.38	0.0153

2. 2 供試体概要

日本コンクリート工学協会「自己収縮研究委員会報告書」⁵⁾に記載される試験方法を参考に、100×100×400mm の無拘束供試体(図-1)および 100×100×1200mm で鉄筋比を 0.72%, 2.03%, 4.03% (以下 RC0.72, RC2.03, RC4.03) とした鉄筋拘束供試体(図-2)を作製した。打ち込み後は、ラップフィルムと養生マットで覆い封緘養生を保った。その後、材齢 7 日で脱型し屋内で気中養生を行った。気中養生期間の相対湿度の平均値はおおよそ 60%であった。なお、乾燥条件が長手方向で変化しないよう、両端部はアルミ粘着テープを貼り付けた。

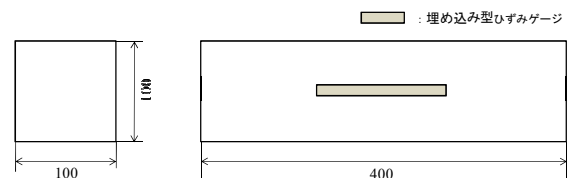


図-1 無拘束供試体概要 (単位: mm)

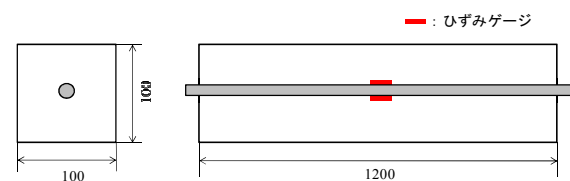


図-2 鉄筋拘束供試体概要 (単位: mm)

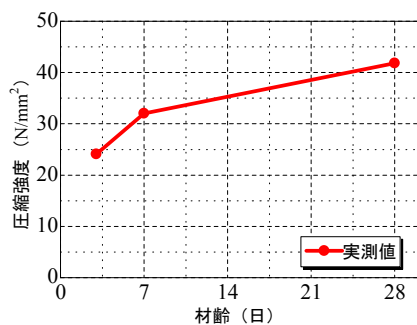


図-3 材齢－圧縮強度

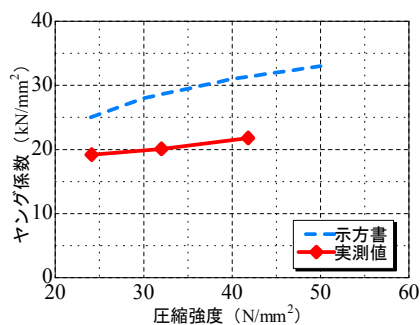


図-4 ヤング係数－圧縮強度

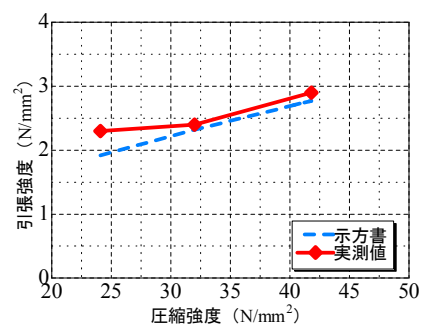


図-5 圧縮強度－引張強度

2. 3 計測項目

コンクリートの収縮ひずみは、無拘束供試体中央部に設置した埋込み型ひずみゲージ（標点距離：100mm，弾性係数：約 40N/mm²）により計測した。鉄筋拘束供試体の鉄筋ひずみは、供試体長手方向中心位置でひずみゲージ（ゲージ長 5mm）により計測した。

3. 実験結果

3. 1 材料の力学特性

図-3にコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を、図-4にヤング係数と圧縮強度の関係を示す。なお、図-4には示方書に示される設計式をともに示す。本研究で用いたコンクリートにおけるヤング係数は、示方書の設計式より 24～30%程度小さかった。また、図-5に引張強度と圧縮強度の関係を示す。引張強度と圧縮強度の関係は、示方書の設計式とほぼ一致した。

3. 2 収縮特性

図-6に、無拘束供試体の収縮ひずみの経時変化を示す。また、封緘養生期間は JCI 指針に示される自己収縮予測式（図中 JCI）を、気中養生期間には示方書に示される収縮予測式（図中 JSCE）をともに示す。無拘束供試体の自己収縮は、乾燥開始時点で 100×10^{-6} 程度であり、JCI 指針による予測値とほぼ一致した。一方、乾燥期間の収縮ひずみは、示方書による予測値を大幅に上回る結果となった。しかし、予測値を 1.5 倍することで実測値とほぼ一致した。

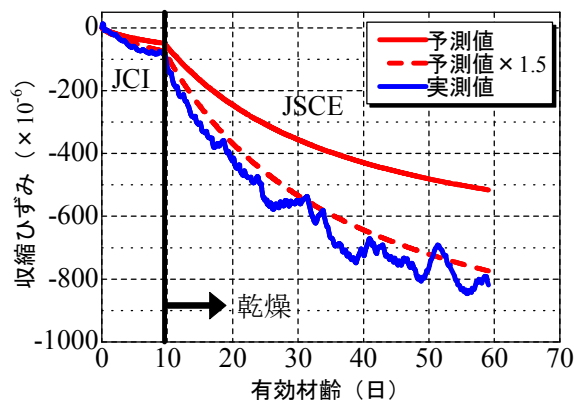


図-6 収縮ひずみの経時変化（無拘束供試体）

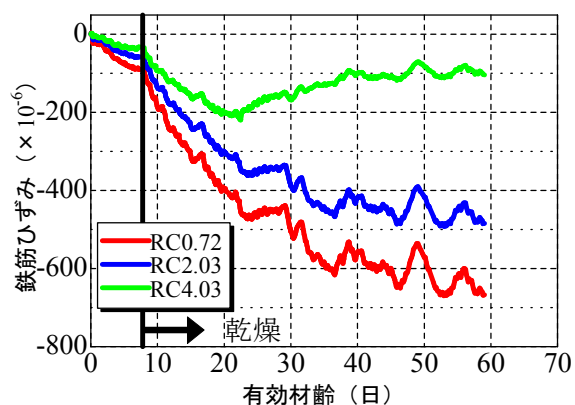


図-7 鉄筋ひずみの経時変化（鉄筋拘束供試体）

3. 3 鉄筋拘束ひずみ

図-7に、鉄筋拘束供試体の鉄筋ひずみの経時変化を示す。鉄筋拘束供試体の鉄筋ひずみは、鉄筋比が大きくなるとともに小さくなった。また、RC4.03の場合には有効材齢 20 日あたりから急激な鉄筋ひずみの減少が認められた。これは、微細ひび割れが生じたために鉄筋の圧縮ひずみが解放されたためだと考えられる。

4. クリープ解析

以下に示す増分線形クリープ解析により、気中養生時の鉄筋ひずみを求めた。作用応力とコンクリートの収縮により生じる全ひずみは、タイムインターバル t_i における増分ひずみと増分応力の関係で表される；

$$\Delta \varepsilon_{c,i} = J_{j,i+1/2} \cdot \Delta \sigma_{c,i} + \varepsilon_{cr,i-1} + \Delta \varepsilon_{sh,i} \quad (1)$$

ここで、

$$J_{j,i+1/2} = \frac{1 + \phi_{j,i+1/2}}{E_{c,j}} : \text{クリープコンプライアンス}$$

$$\varepsilon_{cr,i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta \phi_{j,i}}{E_{c,j}} \cdot \Delta \sigma_{c,j} : \text{区間 } i \text{ における増分クリープひずみ}$$

$\phi_{j,i+1/2}$: 有効材齢 t_j に載荷されたときの有効材齢 $t_{i+1/2}$ における

クリープ係数

$E_{c,j}$: 有効材齢 t_j におけるヤング係数

完全付着領域においては、鉄筋と鉄筋位置のコンクリートのひずみ増分は等しいとする適合条件より、

$$\Delta \varepsilon_{s,i} = \Delta \varepsilon_{c,i} = \frac{\Delta \sigma_{s,i}}{E_s} \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_{c,i} = -p\gamma_c \Delta \sigma_{s,i} \quad (3)$$

ここで、

$$p = \frac{A_s}{A_c} \quad (A_s, A_c : \text{鉄筋, コンクリートの断面積})$$

$$\gamma_c = \left\{ 1 + (d - C_g)^2 / (I_c / A_c) \right\}$$

C_g : 図心

I_c : コンクリート純断面の断面 2 次モーメント

式(2), (3)を式(1)に代入すると、増分鉄筋ひずみ、増分コンクリート応力が次のように得られる；

$$\Delta \sigma_{s,i} = \frac{\varepsilon_{cr,i-1} + \Delta \varepsilon_{sh,i}}{1 + n_e p \gamma_c} E_s$$

$$\Delta \sigma_{c,i} = -\frac{p \gamma_c}{1 + n_e p \gamma_c} E_s \{ \varepsilon_{cr,i-1} + \Delta \varepsilon_{sh,i} \} = -p \gamma_c \Delta \sigma_{s,i}$$

ここで

$$n_e = \frac{E_s}{E_{e,j,i+1/2}} = E_s J_{j,i+1/2}$$

なお、クリープ係数は示方書に示されているクリープの予測式により求め、各載荷時材齢(乾燥開始後の材齢：0, 1, 3, 7, 28, 56 日)のヤング係数は材齢 28 日までの実測値から最小二乗法により求めた回帰曲線より求め、材齢 28 日以降は一定であると仮定した。図-8 に、計算

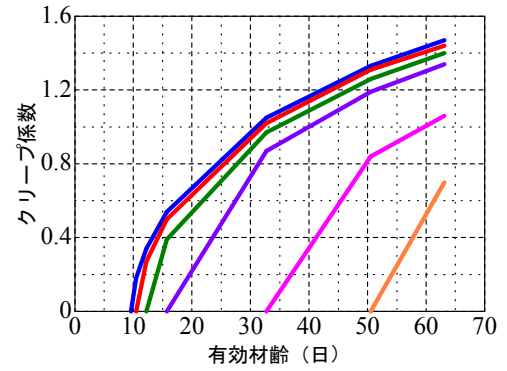
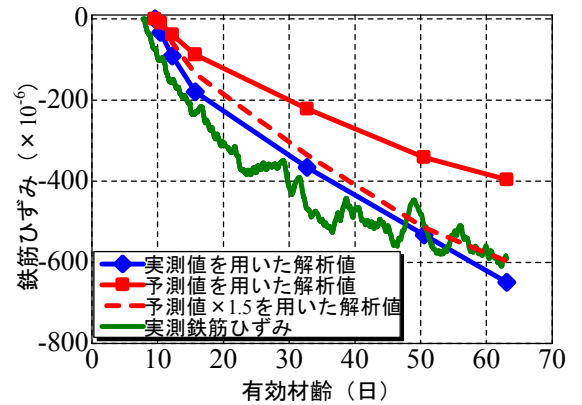
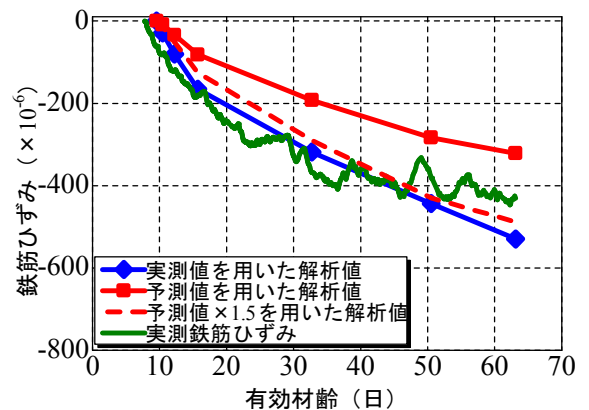


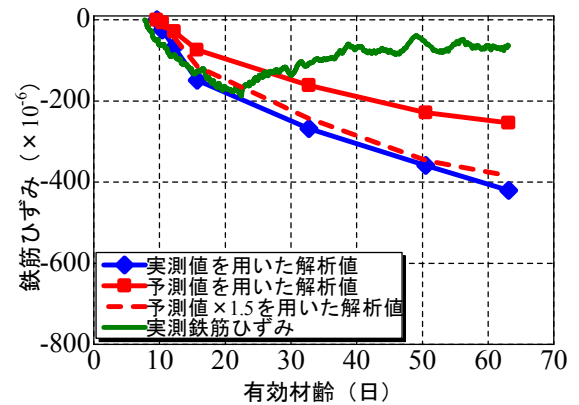
図-8 クリープ係数



(a) RC0.72



(b) RC2.03



(c) RC4.03

図-9 実験値と解析値の比較(鉄筋拘束供試体)

に用いたクリープ係数の経時変化を示す。示方書の予測式から求めた収縮ひずみを用いた解析値と、実測の収縮ひずみを用いた解析値とでは、実測の収縮ひずみを用いたほうが鉄筋ひずみの実測値に一致することが分かる。これは、実測の乾燥収縮ひずみが示方書の予測式による乾燥収縮ひずみより大きいことが理由と考えられる。しかし、図-6 に示した予測値を 1.5 倍した収縮ひずみを用いて解析を行うことで、実測値を良く再現できることが分かる。

5. 結論

- (1) 自己収縮は、乾燥開始時点で 100×10^{-6} 程度であり、JCI 指針による予測値とほぼ一致した。
- (2) 乾燥期間（乾燥後材齢 60 日）の収縮ひずみは示方書による予測値よりも大きくなったが、予測値を 1.5 倍することでほぼ一致した。
- (3) 鉄筋比が 4.03% では微細ひび割れによると思われる鉄筋ひずみの減少が見られた。
- (4) 鉄筋ひずみは、実測の収縮ひずみあるいは示方書による予測値の 1.5 倍の収縮ひずみを用いてクリープ解析することで精度良く再現できた。

【参考文献】

- 1) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文集, 286 号, 1989.6, pp.125-137
- 2) 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
- 3) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 設計編, 2007
- 4) H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura and R. Sato: Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.2, pp.155-174, 2004.6
- 5) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996.11