

論文 高収縮コンクリートの収縮特性と寸法依存性について

太田 光貴*1・中山 紘紀*1・兵頭 彦次*2・佐藤 良一*3

要旨: 通常用いられる範囲の水セメント比 0.35 程度で、収縮の大きなコンクリートの収縮、収縮応力特性およびそれらの寸法依存性を実験的に検討した。供試体の断面は、100×100mm, 300×305mm, 300×580mm, 300×1130mm の 4 種類であり、無拘束および鉄筋を配置した拘束供試体を用意した。材齢 70 日時点までの実験では、寸法に応じて収縮ひずみが $950\sim300\times 10^{-6}$ の範囲で変化し、寸法依存性は、従来の収縮予測式に比べてやや大きい傾向であった。鉄筋ひずみは $800\sim150\times 10^{-6}$ の範囲にあり、クリープ解析結果は、鉄筋比が大きくなるほど、部材寸法が小さくなるほど実測値をやや過大に見積もる傾向であった。

キーワード: 高収縮コンクリート, 収縮, 収縮応力, 寸法効果, クリープ解析

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮が一因とされる構造物の損傷問題¹⁾を契機として、コンクリートの乾燥収縮に対する関心が高まっている。土木学会「2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」²⁾ (以下、示方書と略記する)では、コンクリートの収縮の取扱いを大幅に見直し、照査に用いる収縮率を試験値あるいは実績をもとに定めることを原則とし、これらが無い場合には、便宜上の措置として、従来の収縮予測式の値を 1.5 倍した値を用いることとされた。

コンクリートの乾燥収縮は、主たる要因がセメントペーストの収縮である一方で、それを拘束する骨材の種類や性質にも大きく影響を受けることが再認識されてきている。後藤ら³⁾は骨材のヤング係数に加え、それ自体が収縮することがコンクリートの収縮にも影響することを指摘した。本検討では、コンクリートの乾燥収縮が大きくなる骨材をあらかじめ選定し、示方書で想定する最大の収縮量に相当するコンクリートを試験に用いた。

コンクリートの収縮特性は JIS A 1129 に準じた試験によって評価することが多い。しかしながら、実際に使用される構造物は、寸法の影響や、鉄筋などの拘束を受ける。乾燥収縮量の大きいコンクリートが、このような諸条件でどのような挙動を示すかを確認し、さらには、既存の予測式とどのような関係性あるかを評価することは重要であると考えられる。

既報⁴⁾では、水セメント比 50%の普通コンクリートを対象に検討を行ったが、本稿では、比較的高強度域 W/C=0.35 のコンクリートを対象とし、供試体断面積すなわち寸法依存性あるいは体積表面積比 (V/S)、拘束鉄筋の鉄筋比、拘束鉄筋の偏心の有無を主たる要因として、収縮および鉄筋拘束応力を検討した。これらにおいては、

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」⁵⁾(以下、JCI 指針と略記する)に示される自己収縮予測式および、示方書の乾燥収縮ひずみ予測式の適用性についても寸法依存性の観点から検証するとともに、step-by-step に基づくクリープ解析⁶⁾による鉄筋ひずみの予測を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

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。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。細・粗骨材には、硬質砂岩系の砕砂・碎石

表-1 使用材料

材料	記号	種類/特性
水	W	工業用水
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 2.65 g/cm ³ , 吸水率 1.86%
粗骨材	G	砂岩碎石, 表乾密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 0.89%
混和剤	AD	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
	AE	AE 剤

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	AD	AE
35	41	170	486	686	1001	3.888	0.0292

*1 広島大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究院教授 工博 (正会員)

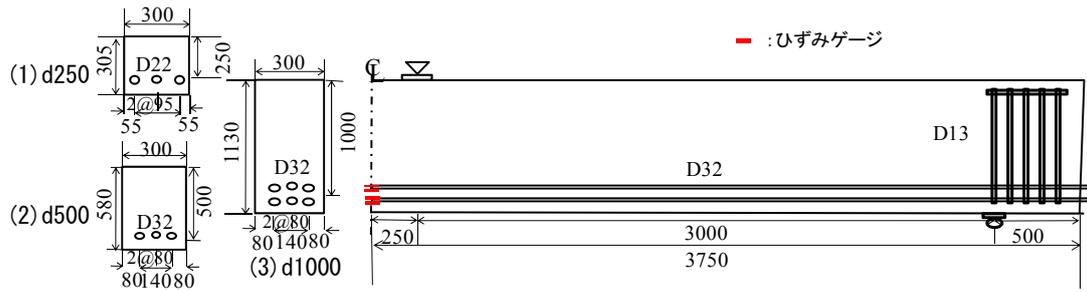


図-1 供試体概要 (単位 : mm)

を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。W/C は 35% とし、単位水量を 170kg/m^3 とした。スランプおよび空気量はそれぞれ、 $15 \pm 2.5\text{cm}$ および $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲となるよう、混和剤および AE 剤を用いて調整した。

拘束供試体に用いた鋼材は、後述の偏心軸力供試体の場合 D32 および D22 の PC 鋼棒 C 種 1 号 (記号 : SBPD1080/1230) を、中心軸力拘束供試体には、呼び名 D10, D16, D22 の異形棒鋼 (種類の記号 : SD295A) である。

2.2 偏心軸力拘束供試体

(1) 供試体概要

寸法の異なる 3 種類の偏心軸力拘束供試体を用意した。図-1 に、各供試体の断面図および寸法が最も大きい供試体の側面図を示す。断面の幅は供試体によらず 300mm 一定とした。断面高さは、寸法が小さいものから 305mm, 580mm, 1130mm とし、供試体の長さは 2300mm, 4500mm, 7500mm とした。また、供試体上縁から PC 鋼材図心位置までの距離 (有効高さ) を、それぞれ 250mm, 500mm, 1000mm とした (以下、供試体名を寸法の小さいほうから d250, d500, d1000 とする)。PC 鋼材は、d250 に D22 を 3 本, d500 に D32 を 3 本, d1000 に D32 を 6 本配置した。コンクリート純全断面に対する鉄筋比は、d250 が 1.29%, d500 が 1.39%, d1000 が 1.43% となる。

また、図-2 に示す上記と同一断面で長さが 1000mm の無拘束供試体を寸法毎に各 1 体作製した。

(2) 供試体作製方法

供試体作製時、型枠の側面と底面にはポリエチレンフィルム (厚さ 0.1mm) を二重に貼り付け、その間にグリスプレーを吹き付けることにより型枠とコンクリートの拘束を極力低減した。打ち込み終了後は、直ちに打ち込み面をラップフィルムと養生マットで覆い、材齢 7 日まで封緘養生を保った。その後、脱型し乾燥条件が長手方向で変化しないよう、両端部アルミ粘着テープを貼り付け、屋内で気中暴露を行った。気中暴露期間の相対湿度の平均値はおおよそ 44.1% であった。養生期間中の供試体保管方法は、自重による曲げモーメントが極力生じ

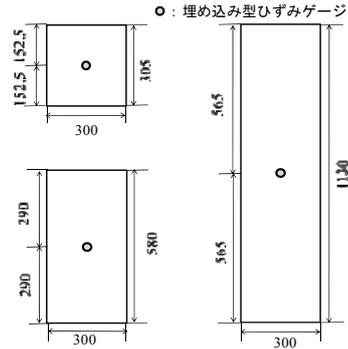


図-2 供試体概要 (単位 : mm)

ないように (供試体下縁応力で最大 0.015N/mm^2) 支点位置を調整した。

(3) 計測項目

収縮による鉄筋ひずみを、図-1 に示す供試体の支間中央の位置でひずみゲージ (ゲージ長 5mm) により計測した。また、無拘束供試体のひずみを、図-2 に示す断面図心位置で、低弾性型の埋め込み型ひずみゲージ (標点距離 : 100mm, 弾性係数 : 約 40N/mm^2) により計測した。

2.3 中心軸鉄筋拘束供試体

(1) 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」⁷⁾で提案されている自己収縮応力試験方法を参考に、鉄筋比の異なる 3 種類の中心軸拘束供試体を作製した。供試体寸法は、断面を $100 \times 100\text{mm}$ 、供試体長さを 1200mm とし、断面中心位置に D10, D16, D22 の異形鋼棒を各 1 本ずつ配置した。全断面に対する鉄筋比はそれぞれ 0.72%, 2.03%, 4.03% (以下、供試体名として RC0.72, RC2.03, RC4.03 とする) とした。

比較として、同一断面の無拘束供試体を作製した。寸法は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とした (図-4)。養生条件は前記偏心軸力供試体と同様に、材齢 7 日まで封緘養生、その後、屋内気中暴露とした。

(2) 計測項目

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。無拘束供試体のひずみは、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。

3. 実験結果

3.1 材料の力学特性

図-5 に、各収縮測定用供試体と同様の養生を行ったコンクリートの圧縮強度（φ100mm×200mm）と材齢の関係を、図-6 にヤング係数と圧縮強度の関係を示す。また、示方書に示される設計式を併記する。ヤング係数を同一圧縮強度で比較すると、設計式よりも実測値は30%程度小さかった。一方、割裂引張強度と圧縮強度（φ150mm×200mm）の関係は、図-7 に示すとおりであり、示方書の設計式とほぼ同程度の関係を示した。

3.2 収縮特性

図-8 および図-9 に、無拘束供試体の収縮ひずみの経時変化を示す。なお、収縮ひずみは熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として実ひずみから温度ひずみ分を差し引いて求めた。同図には、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）による計算値を、気中暴露期間は示方書に示される収縮予測式（図中JSCE）を併記する。

偏心軸力供試体と同断面の無拘束供試体の乾燥開始時点での自己収縮ひずみはおよそ 150×10^{-6} であり、JCI指針の予測値（ 230×10^{-6} 程度）よりもやや小さくなった。自己収縮は、後述の鉄筋ひずみと同様、また予測値と異なり、増大した後減少するという挙動を示した。この現象は図-9 に示す100×100×400mmの小型供試体では認められない。これから、温度上昇による水和促進と自己乾燥、その後の毛細管張力の緩和などが考えられるが、熱膨張係数の経時変化などさらに検討する必要がある。一方、乾燥期間の収縮ひずみは、寸法が大きくなるとともに収縮発現が遅くなり、同一有効材齢における収縮ひずみが小さくなった。示方書式による予測値と比較すると、乾燥収縮が大きいとされるコンクリートであっても、実測収縮ひずみの進行は予測値よりも小さく、寸法依存性も大きい。

中心軸拘束供試体と同断面の無拘束供試体（図-9）の自己収縮は、乾燥開始時点で 150×10^{-6} 程度であり、予測値と概ね一致した。一方、乾燥期間の収縮ひずみは、示方書による予測値を上回る結果であり、断面寸法が大きい（図-8）と傾向が異なった。すなわち、実測の無拘束ひずみは、断面が100×100mmから250×300mm以上に増加することで、大幅に収縮ひずみが小さくなり、寸法の影響が予測式よりも大きい。この図に示されているように示方書の寸法依存性は、材齢70日までの範囲では、ここで対象としたコンクリートに対しては鈍いと言える。

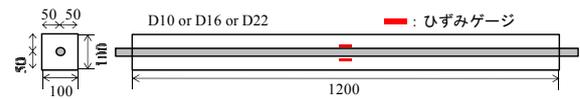


図-3 鉄筋拘束供試体（単位：mm）



図-4 無拘束供試体概要（単位：mm）

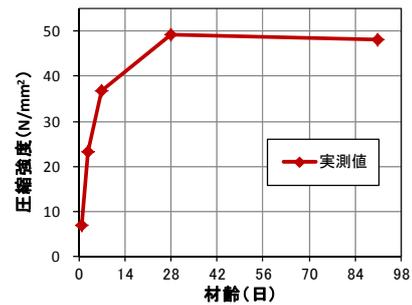


図-5 材齢－圧縮強度

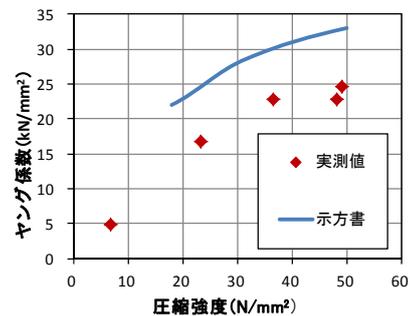


図-6 ヤング係数－圧縮強度

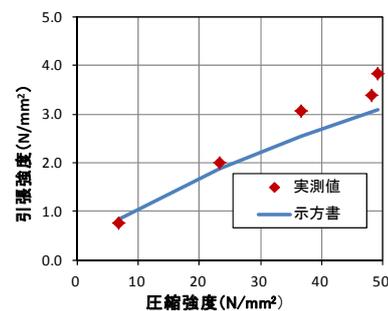


図-7 圧縮強度－引張強度

3.3 鉄筋拘束ひずみ

(1) 鉄筋拘束ひずみの特性

図-10 に、偏心軸力拘束供試体の、図-11 に中心軸拘束供試体の鉄筋ひずみの経時変化を示す。偏心軸力供試体の自己収縮による鉄筋ひずみは、断面の大小にかかわ

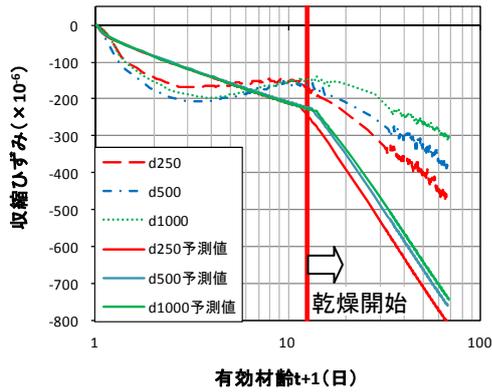


図-8 無拘束供試体の収縮ひずみの経時変化 (d250, d500, d1000)

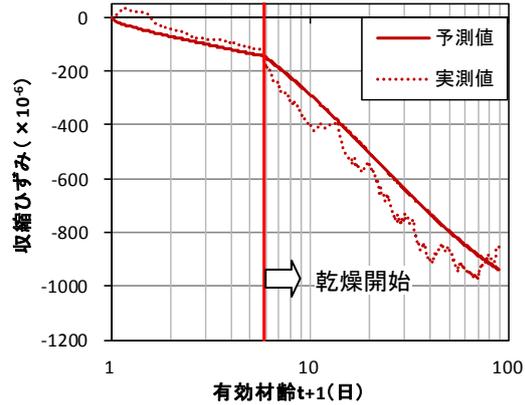


図-9 無拘束供試体の収縮ひずみの経時変化 (寸法 100×100×400mm)

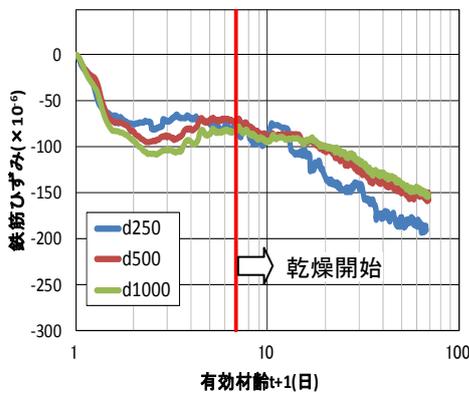


図-10 鉄筋ひずみの経時変化 (偏心軸力拘束供試体)

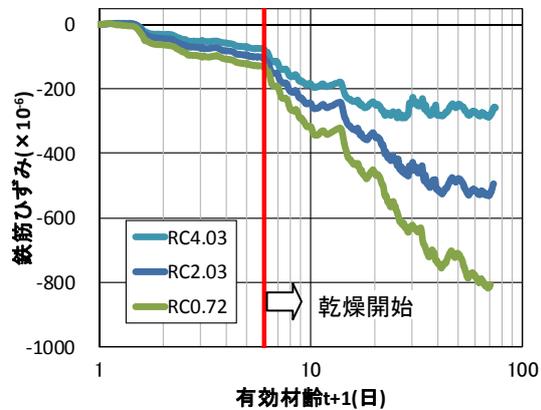


図-11 鉄筋ひずみの経時変化 (中心軸鉄筋拘束供試体)

らずほぼ同程度であった。一方、乾燥後の鉄筋ひずみの増加は、有効材齢 70 日の時点で、d250 が 190×10^{-6} 程度、d500, d1000 はほぼ同等で 150×10^{-6} 程度であった。中心軸拘束供試体の鉄筋ひずみは、自己収縮および乾燥開始後の収縮ひずみのいずれも鉄筋比が大きくなるとともに小さくなった。

(2) クリープ解析

気中養生時の鉄筋ひずみを以下に示す増分形の線形クリープ解析により求めた。

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は次式で表される；

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

ここで、

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

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

$\phi_{j,i+1/2}$: 有効材齢 t_j に荷重されたときの、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、

$p = A_s / A_c$, A_s , A_c : 鉄筋, コンクリートの断面積, $\gamma_c = \{1 + (d - c_g)^2 / (I_c / A_c)\}$, 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, である。

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；

表-3 鉄筋比, 拘束条件, 寸法が
鉄筋ひずみに及ぼす影響 (材齢 76 日)

鉄筋拘束条件		偏心軸拘束			中心軸拘束		
供試体種類		d250	d500	d1000	100×100×400		
V/S (mm)		76	99	119	25	25	25
全断面に対する鉄筋比 (%)		1.29	1.39	1.43	0.72	2.03	4.03
γ_c		2.26	2.63	2.85	1		
$1+n_p\gamma_c$		1.27	1.34	1.38	1.08	1.21	1.43
$1/(1+n_p\gamma_c)$		0.79	0.75	0.73	0.93	0.82	0.70
		1	0.95	0.92	1	0.89	0.75
JSCEの収縮ひずみに基づく計算値(μ)	乾燥収縮	-578	-535	-509	-967		
	鉄筋ひずみ	-430	-376	-347	-702	-594	-479
		1	0.87	0.81	1	0.85	0.81
実測収縮ひずみに基づく計算値(μ)	乾燥収縮	-311	-225	-163	-761		
	鉄筋ひずみ	-234	-160	-113	-682	-574	-460
		1	0.68	0.48	1	0.84	0.67
実測乾燥収縮ひずみ/JSCE乾燥収縮ひずみ		0.54	0.42	0.32	0.79		

※塗りつぶしは比率を表す

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

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

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

なお, クリープ係数は, 示方書に示されるクリープの予測式および拘束試験体と同様の養生をした場合の材齢 28 日のヤング係数を用いて求めている。また, クリープ解析に用いた各載荷時材齢 (乾燥開始後の材齢: 0, 3, 7, 28, 56, 84 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-12 に, 計算に用いた d1000 の場合のクリープ係数の経時変化の一例を示す。

(3) 実験値と解析値の比較

図-13 に, 偏心軸力拘束供試体の鉄筋ひずみおよびクリープ解析による解析値を併記する。解析値は, 実測の無拘束収縮ひずみを用いた場合と, 示方書の収縮予測式を用いて計算した場合 (図中 JSCE) について示した。また表-3 に, 有効材齢 60 日における解析値, 実測値および供試体毎の寸法・拘束条件を示す。

実測の無拘束収縮ひずみを用いた解析値は, いずれの供試体に対しても実測鉄筋ひずみを過大評価したが, 供試体寸法が大きくなるにつれよく一致する傾向が認められた。これに対し, 示方書による収縮ひずみを用いた解析値は表-3 に示すように, 断面寸法によらず鉄筋の偏心量の影響が大きく変わらないことを考慮すると, クリープの寸法依存性の可能性もあると思われるものの, 収縮の寸法効果を過小評価するため, いずれの寸法の場合も鉄筋ひずみを過大評価したと考えられる。この過大評

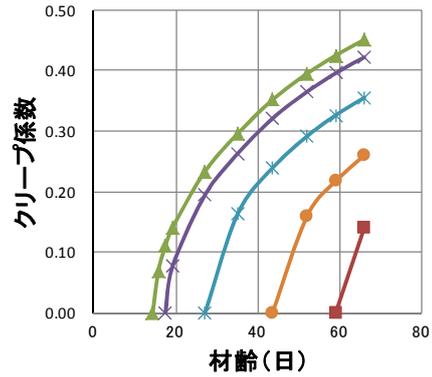
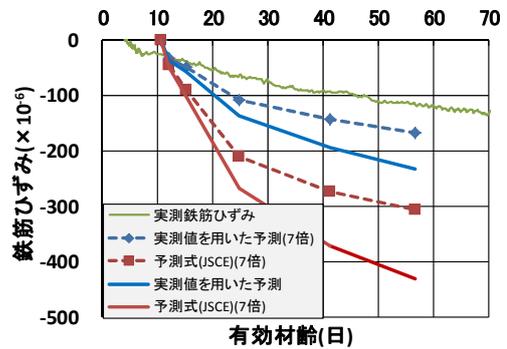
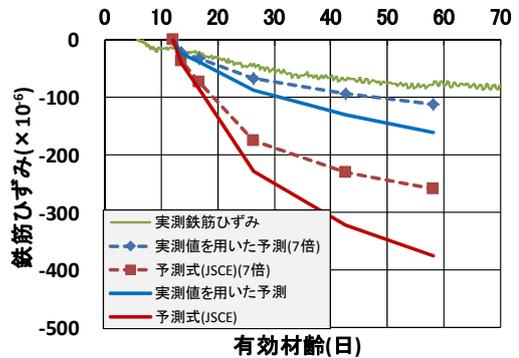


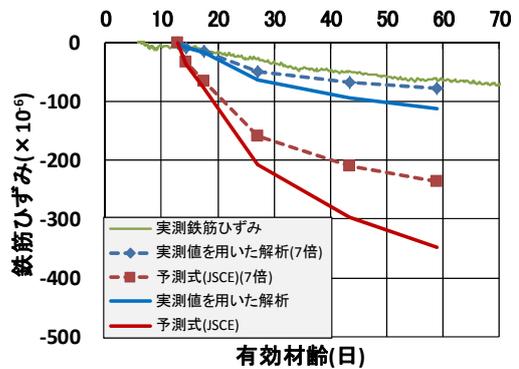
図-12 クリープ係数の一例 (d1000)



(A) d250

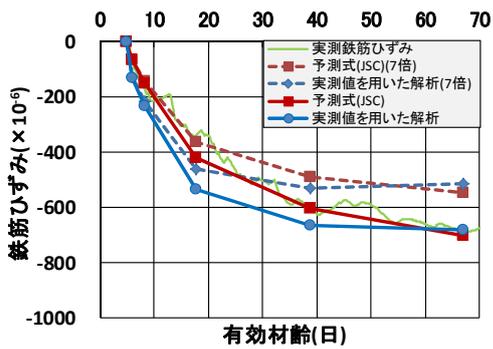


(B) d500

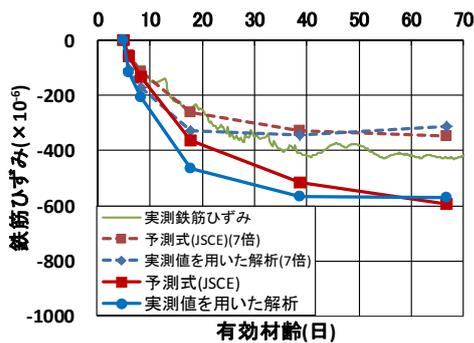


(C) d1000

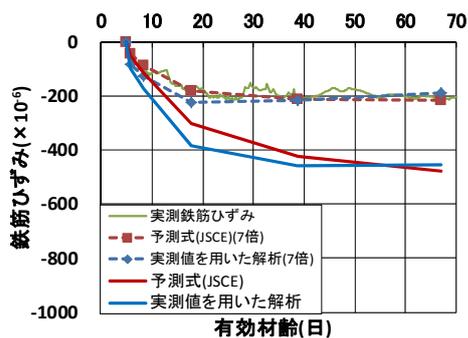
図-13 実測値と解析値との比較
(偏心軸力拘束供試体)



(A) RC0.72



(B) RC2.03



(C) RC4.03

図-14 実験値と解析値の比較(中心軸鉄筋拘束供試体)

値の傾向は、見かけ上、示方書よりも実際のクリープ係数の方が大きい可能性も意味していると思われる。そこで、鉄筋ひずみの解析結果と実測値が比較的良好に一致するように、クリープ係数を変化させると、7倍した場合であった。解析結果を図-13に併記する。しかしながら、一般にクリープ係数が7倍という値は考えにくく、実際には鉄筋周辺に微細ひび割れ等が生じている可能性も考えられる。これについては今後の検討課題としたい。

図-14は中心軸拘束供試体について同様の検討を行った結果を示したものである。これらの解析値は、鉄筋比が増大するといずれも大きく評価する側に乖離した。偏心拘束供試体の場合と同様に、クリープ係数を7倍した場合の解析結果は、鉄筋比が増大するほど実測値と一致する傾向が認められ、鉄筋周辺に内部ひび割れが生じたことが理由のひとつとして考えられる。

4.まとめ

本研究の範囲で以下の結論が得られた。

- (1)100×100×400mm 供試体の場合、材齢7日の自己収縮ひずみは、 150×10^{-6} 程度であり、JCI 指針の予測値とほぼ一致した。
- (2)無拘束供試体の乾燥収縮の寸法依存性は、実測値のほうが予測値よりも大きい傾向であった。
- (3)偏心軸拘束を受ける場合の乾燥開始後の鉄筋ひずみは、無拘束供試体と同様に寸法依存性が認められた。
- (4)クリープ解析による拘束供試体の鉄筋ひずみの計算結果は、鉄筋比が大きくなるほど、部材寸法が小さくなるほど実測値を過大に見積もった。
- (5)示方書のクリープ係数を7倍することで、鉄筋ひずみの計算値と実測値の適合性が向上した。このクリープ係数は通常のコンクリートでは考えにくく、収縮にともなって鉄筋周辺に内部ひび割れが発生した可能性が考えられた。

以上の結論は、いずれも1体の供試体から得られたものであり、今後供試体を増やし、その信頼性を高める必要がある。

謝辞

本研究は、科学研究費(基盤研究(A)、課題番号:21246071、代表:佐藤良一)の補助を受けて実施したものであり、紙面を借りて厚くお礼申しあげたい。

参考文献

- 1) 土木学会:垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書, 2008.3
- 2) 土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2008
- 3) 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, Vol.286, pp.125-137, 1989.6
- 4) 太田光貴, 三谷昂大, 兵頭彦次, 佐藤良一:早期材齢における高収縮コンクリートの収縮と収縮応力および寸法依存特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp479-484, 2010.7
- 5) 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, 2008.11
- 6) 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
- 7) 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