論文　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

太田　光貴[*1]・三谷　昂大[*2]・兵頭　彦次[*3]・佐藤　良一[*4]

要旨：コンクリートの乾燥収縮が大きくなる粗骨材，細骨材を用いたコンクリートの自己収縮，および材齢 7 日の乾燥後の収縮を，断面 100×100mm，300×305mm，300×580mm，300×1130mm に変えて測定した。また，同断面の対全断面鉄筋比およそ 0.9%の RC 供試体の鉄筋ひずみを測定し，収縮，拘束ひずみに及ぼす寸法依存性を検討した。その結果，自己収縮ひずみは，W/C=0.5 であっても 220×10^{-6}～270×10^{-6} に達し，鉄筋ひずみもおよそ 70×10^{-6} 生じた。また乾燥後材齢 60 日における無拘束ひずみおよび鉄筋ひずみは，寸法が大きくなるにつれ小さくなり，寸法依存性が確認された。

キーワード：高収縮コンクリート，乾燥収縮，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。コンクリートの乾燥収縮は様々な要因に影響されるが，そのひとつとして骨材の物性の影響が知られている。骨材は，乾燥収縮の主要因であるセメントペーストの体積変化を拘束する役割を果たすが，産地や物性が異なると拘束程度が異なり，乾燥収縮量に変化をもたらす。後藤ら[2)]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。

一方，コンクリートの乾燥収縮の評価は，通常 JIS A 1129-3:2001 に準じて行われ，一般に 100×100×400mm の角柱供試体を用いることが多い。実構造物への乾燥収縮の影響を考慮する場合，土木学会では体積/表面積比を要因として寸法の影響を取り入れ，実測に基づかない場合は，従来の最大値の 1.5 倍することを規定しているが，今後さらに検討することも期待されている。

そこで，本研究では，比較的コンクリートの乾燥収縮が大きくなる骨材を用いて，そのコンクリートの自己収縮，材齢 7 日での乾燥後の収縮を，断面 100×100mm，300×305mm，300×580mm，300×1130mm の供試体を用いて，寸法依存性に着目し検討する。合わせて同断面の全断面に対する鉄筋比が 0.85%～0.95%の RC 供試体の鉄筋ひずみを測定し，収縮，拘束ひずみに及ぼす寸法依存性を検討する。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」（以下，JCI 指針と略記する）に示される自己収縮予測式[3)]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」[4)]（以下，示方書と略記する）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[5)]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。本検討で用いた骨材は，比較的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

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	砂岩砕石，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
50	46.4	170	340	832	977	2.38	0.0153

*1 広島大学　工学部第四類　(正会員)
*2 広島大学大学院　工学研究科　(正会員)
*3 太平洋セメント（株）　中央研究所　技術企画部　ＴＢＣチーム　(正会員)
*4 広島大学大学院　工学研究科教授　工博　(正会員)

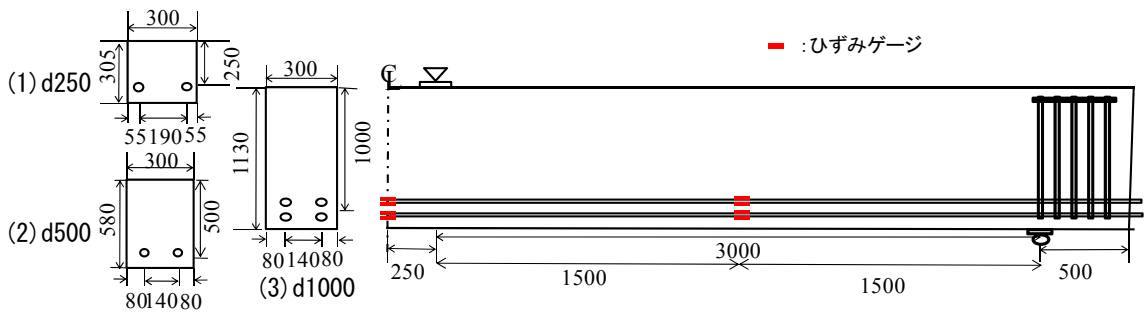


図-1　供試体概要（単位：mm）

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。この骨材のヤング係数は 58.5kN/mm^2 であり，φ32×64mm コアの 3 本の平均である。乾燥収縮は，粗骨材自体にひずみゲージ貼り付けて測定したもので，4 個の平均実測値は 454×10^{-6} であった。この場合の試験条件は，20℃-7 日水中，その後 20℃，60R.H.%で 12 日間乾燥した結果である。安定性試験は，JIS A 1122:2005 にしたがって行い，その値は JIS の規格値の最大値に近い，11.5%であった。

2.2 偏心軸力拘束供試体

(1) 供試体概要

偏心軸力拘束供試体は，コンクリート全断面に対する鉄筋比が 0.85%~0.95%，幅 300mm，上縁から鉄筋図心までの距離が，250，500，1000mm（以下，それぞれ d250，d500，d1000 と称す）のものをそれぞれ 2 体ずつ，計 6 体作製した。それぞれの供試体の断面図と d1000 の側面図を**図-1** に示す。

また，上記と同一断面の無拘束供試体を断面毎に各 1 体ずつ作製した（長さ 1000mm）。

(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。

(3) 計測項目

偏心軸力供試体の鉄筋ひずみを，供試体の支間中央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** に示す位置で計測した。ひずみの計測には，埋め込み型ひずみゲージを用いた。なお，計測の開始は打ち込み完了時とした。

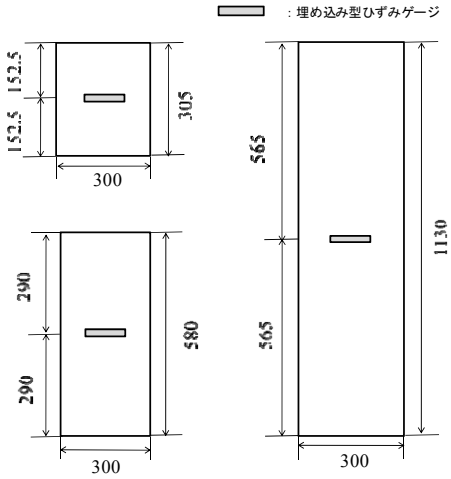


図-2　供試体概要（単位：mm）

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」[6]に記載される試験方法を参考に，断面 100×100mm の中心に異形鉄筋を配置した鉄筋拘束供試体および無拘束供試体を作製した。鉄筋拘束供試体の寸法は 100×100×1200mm とし，鉄筋比は 0.72%，2.03%，4.03%（以下 RC0.72，RC2.03，RC4.03 と称す）とした（**図-3**）。また，無拘束供試体の寸法は 100×100×400mm 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，屋内気中養生とした。

(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/mm^2）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と材齢の関係を示す。また同一

W/C で，異なる産地の骨材（粗骨材：硬質砂岩砕石，細骨材：石英砕砂 60%＋石灰砕砂 40%）を用いた場合(比較コンクリート）の結果を併記する。本検討で使用した骨材を用いた場合，比較コンクリートと比べ強度発現性がやや小さくなる傾向が認められた。

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，示方書の設計式および比較コンクリートよりも本検討で用いたコンクリートは25～30%程度小さかった。

図-7 に引張強度と圧縮強度の関係を示す。同一圧縮強度で引張強度を比較すると，比較コンクリートより小さいが，示方書の設計式とほぼ同程度であった。

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，収縮ひずみはいずれも熱膨張係数を 10×10^{-6}/℃として温度ひずみ分を差し引いて求めた。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 200～250×10^{-6} であり，断面寸法の大小と自己収縮の大小には一定の関係性は認められなかった。予測式と比べると，いずれの寸法の供試体も実測の自己収縮ひずみが大きくなる結果であった。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。予測値と比較すると，実測値は予測値よりも収縮発現が遅く収縮ひずみが小さくなる結果となった。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 100×10^{-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大幅に上回る結果であり，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くなることである。これについては，断面が大きい場合，断面内の収縮ひずみ分布によって内部拘束作用が生じ，表面に微細なひび割れが生じた可能性や，打込み後の温度履歴が断面が小さい場合と異なることが影響した可能性があるが，現状では原因は不明である。

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

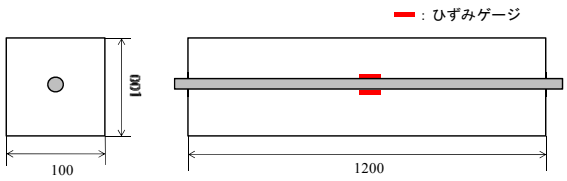


図-3　鉄筋拘束供試体（単位：mm）

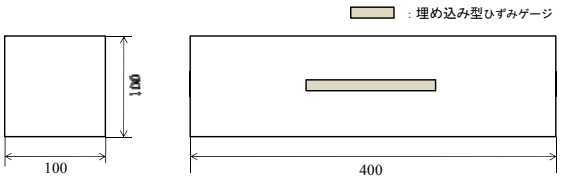


図-4　無拘束供試体概要（単位：mm）

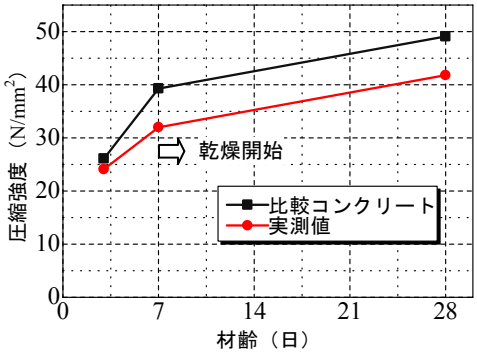


図-5　材齢－圧縮強度

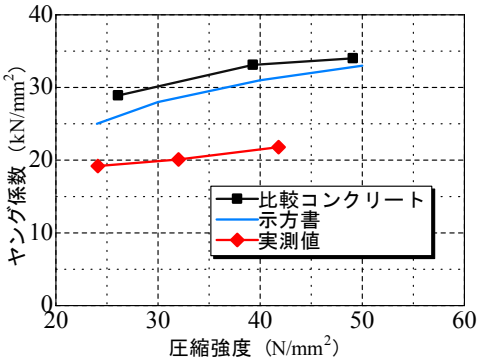


図-6　ヤング係数－圧縮強度

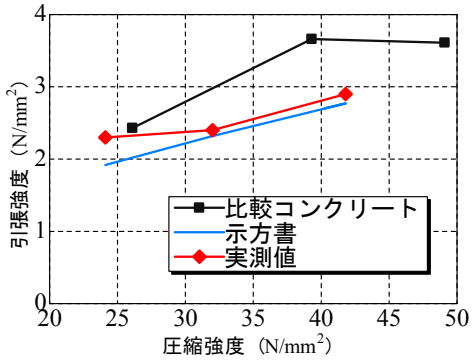


図-7　圧縮強度－引張強度

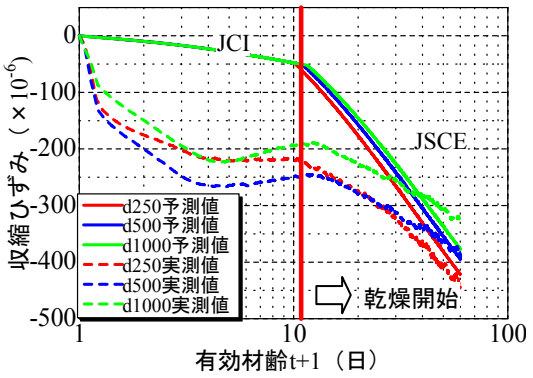


図-8　無拘束供試体の収縮ひずみの経時変化
（d250，d500，d1000）

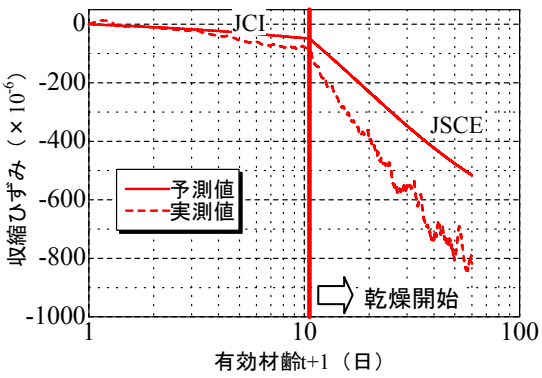


図-9　無拘束供試体の収縮ひずみの経時変化
（寸法 100×100×400mm）

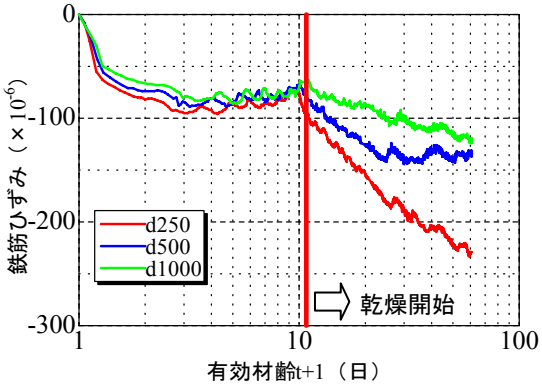


図-10　鉄筋ひずみの経時変化
（偏心軸力拘束供試体）

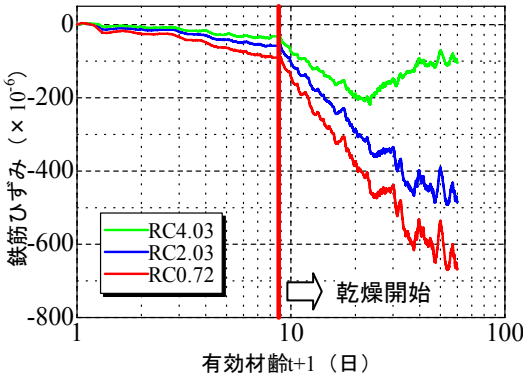


図-11　鉄筋ひずみの経時変化
（中心軸鉄筋拘束供試体）

の大小にかかわらずほぼ同程度であり乾燥開始材齢時点でおよそ 70×10^{-6} であった。一方，乾燥後の鉄筋ひずみ増加は，d250，d500，d1000 の順に小さくなり，有効材齢 60 日時点でそれぞれ 180×10^{-6}，90×10^{-6}，50×10^{-6} と寸法が大きくなるほど小さくなった。これらは，無拘束供試体の挙動と概ね一致した。

中心軸拘束供試体の鉄筋ひずみは，養生条件にかかわらず，鉄筋比が大きくなるとともに小さくなった。RC4.03 の場合には，有効材齢約 20 日あたりで急激な鉄筋ひずみの減少が認められ，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。

(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；

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

ここで，

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

$\varepsilon_{cr,i-1} = \sum_{j=1}^{i-1}\dfrac{\Delta\phi_{j,i}}{E_{c,j}}\cdot\Delta\sigma_{c,j}$:区間i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，

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

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

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（有効材齢 60 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(%)		0.85	0.92	0.95	0.72	2.03	4.03
γ_c		2.25	2.61	2.83	1		
$1+n_e p\gamma_c$		1.19	1.23	1.26	1.1	1.21	1.43
$1/(1+n_e p\gamma_c)$		0.84	0.81	0.79	0.91	0.83	0.7
		1	0.96	0.94	1	0.91	0.77
JSCEの収縮ひずみに基づく計算値(μ)	乾燥収縮	-321	-290	-281	-466		
		1	0.90	0.88			
	鉄筋ひずみ	-282	-277	-241	-396	-321	-254
		1	0.98	0.85	1	0.81	0.79
実測収縮ひずみに基づく計算値(μ)	乾燥収縮	-204	-122	-125	-745		
		1	0.60	0.61			
	鉄筋ひずみ	-157	-91	-89	-649	-530	-420
		1	0.58	0.57	1	0.82	0.65
実測乾燥収縮ひずみ/JSCE乾燥収縮ひずみ		0.64	0.42	0.44	1.60		

※塗りつぶしは比率を表す

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

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

ただし，

$$n_e = \frac{\mathrm{E}_s}{\mathrm{E}_{e,j,i+1/2}} = \mathrm{E}_s \cdot J_{j,i+1/2}$$

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：0，1，3，7，28，56 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。

(3)実験値と解析値の比較

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。

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・拘束条件をまとめる。実測鉄筋ひずみと示方書の予測式を用いた解析値を比較すると，乾燥初期の挙動については概ね良く再現しているが，長期になると乖離が認められ，予測値が実測鉄筋ひずみより大きくなった。一方，実測無拘束ひずみを用いた解析値は，長期の鉄筋ひずみと概ね一致した。d1000 の場合，乾燥期間を通じてよく解析値と実測鉄筋ひずみが一致したが，d250，d500 の場合，初期に乖離が生じていた。2 つの解析値を比較すると，いずれの寸法の場合も示方書により求めた無拘束収縮ひずみが実測値より大きいこと（図-8）に対応して，鉄筋ひずみのクリープ解析値も示方書式を

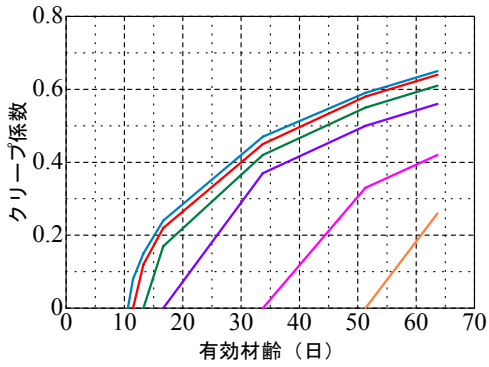
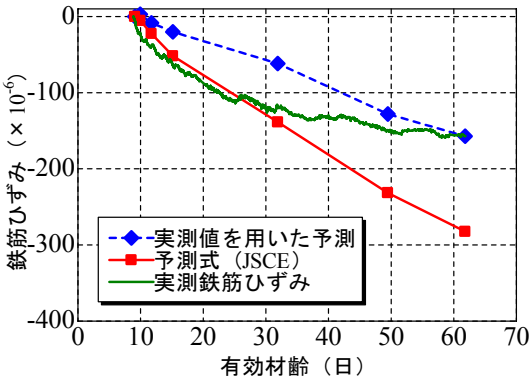
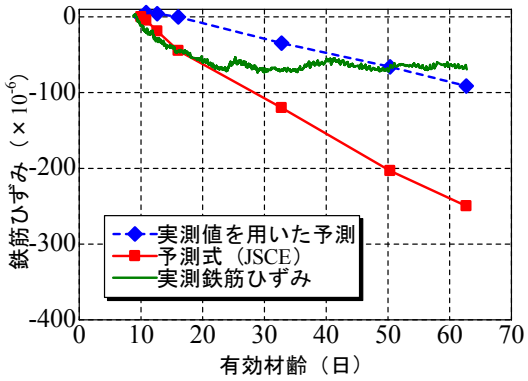


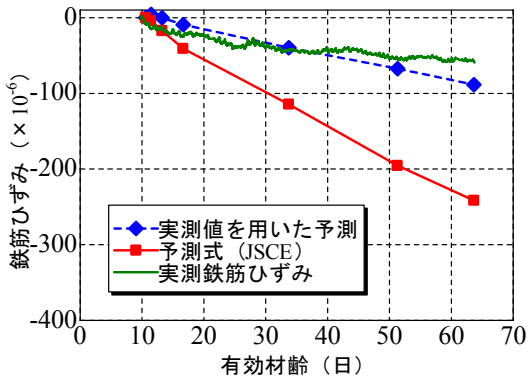
図-12　クリープ係数の一例（d1000）



(A) d250

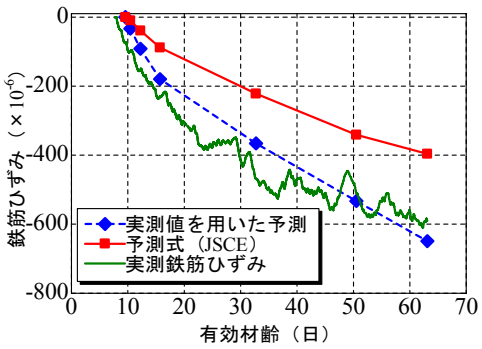


(B) d500

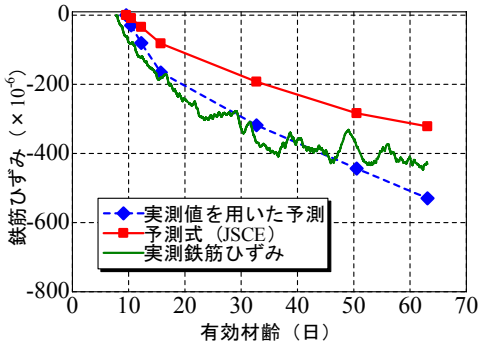


(C) d1000

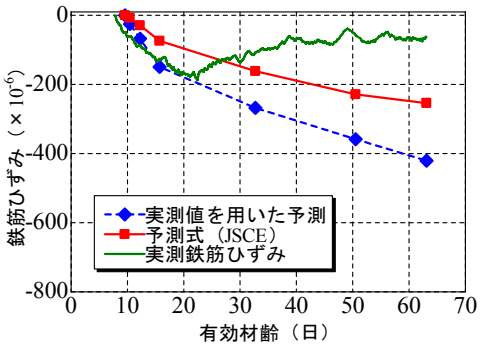
図-13 実測値と解析値との比較
（偏心軸力拘束供試体）



(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）

用いた場合の方が大きい。また，示方書による収縮ひずみを用いた解析値は，寸法の増大につれて小さくなる傾向があるが，**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ため，収縮ひずみの寸法依存性が卓越した結果が現れたものと考えられる。これに対し，実測収縮ひずみを用いた解析値は，寸法の小さい d250 の場合，d500，d1000 に比べ大きい。これは実測乾燥収縮の差によるものだと考えられる。**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。JSCE 式の解析と実測値を用いた解析との傾向が**図-13** と異なり，実測の収縮ひずみを用いたほうが鉄筋ひずみの実測値を良く再現できていることが分かる。これは，**表-3** に示すように，偏心軸力拘束供試体の場合と異なり，実測乾燥収縮ひずみが示方書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。

4.まとめ

本研究の範囲で以下の結論が得られた。

(1)材齢 7 日の自己収縮ひずみは，断面が 100×100mm の場合，100×10^{-6} 程度と既存の予測式とほぼ一致した。一方，断面 300×305mm 以上の場合，200～250×10^{-6} 達しており，既存の予測式よりも大きなひずみを生じた。

(2)乾燥後材齢 60 日までの無拘束供試体の収縮は，幅 300mm，全高 305～1130mm の範囲では、既存の予測式よりも小さくなったが，断面が 100×100mm の場合，予測式よりも大きくなった。

(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。また，中心軸拘束を受ける供試体では，鉄筋ひずみは鉄筋比の影響を受け，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)クリープ解析値は，中心軸拘束供試体（断面 100×100mm）の場合，実測の無拘束ひずみを用いることで鉄筋ひずみを良く再現できた。偏心軸拘束供試体（幅 300mm，高さ 305～1130mm）の場合，乾燥初期では示方書の予測値を用いたほうが実測値と近い結果を示したが，長期では実測無拘束ひずみを用いたほうが実測値と整合する傾向であった。

5.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) 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
3) 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
4) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書　設計編，2007
5) 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
6) 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