

論文 高強度コンクリートの収縮ひずみに及ぼす相対湿度および供試体寸法の影響

宮澤 伸吾^{*1}・黒井登起雄^{*1}・松村 仁夫^{*2}

要旨: 水セメント比が 20~60% の 5 種類のコンクリートについて、自己収縮ひずみの測定を行うとともに、材齢 7 日から相対湿度 40, 60, 80 および 90% の条件下に暴露し、収縮ひずみの測定を材齢約 3 年まで行った。相対湿度 60% の場合には乾燥開始材齢を 1~28 日の範囲で変化させた。また、供試体寸法が高強度コンクリートの収縮ひずみに及ぼす影響についても検討した。得られた実測データに基づいて、著者らが提案した収縮ひずみの予測式の適用性について検討した。

キーワード: 高強度コンクリート, 収縮, 自己収縮, 乾燥収縮, 予測式

1. はじめに

コンクリート構造物の初期応力, 変形, ひび割れ幅, プレストレスカの経時変化等を精度よく予測するためにはコンクリートの収縮ひずみを予測することが必要である。一般の構造物では収縮ひずみの予測として土木学会¹⁾や CEB-FIP²⁾の式が用いられている。しかし、これらの予測式は圧縮強度が 60~80N/mm² 程度以下のコンクリートを適用範囲としているため、より強度の高いコンクリートに対してはそのまま適用できない。本研究では、高強度コンクリートの収縮ひずみに及ぼす相対湿度, 乾燥開

始材齢, 供試体寸法の影響について材齢約 3 年までの実測データをもとに検討するとともに、既往の収縮ひずみ予測式の適合性について検討する。

2. 実験概要

普通ポルトランドセメントを用い、表-1 に示す配合でコンクリートを製造した。混和剤にはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(W/C=20%, 30%, 40%)およびリグニンスルホン酸塩系 AE 剤(W/C=50%, 60%)を用いた。供試体寸法は 100×100×400mm を基本とし、W/C=20% の場

表-1 コンクリートの配合

No	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 C×%	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G			
1	20	30	160	800	439	998	2.3	20.0 55×55*	3.0
2	20	37	175	875	466	809	2.5	55×55*	2.6
3	30	33	160	533	539	1066	0.8	21.5 53×44*	3.2
4	40	34	160	400	611	1104	0.8	21.5	4.4
5	50	37	162	324	667	1106	0.04	16.0	2.3
6	60	39	163	272	719	1095	0.036	5.0	6.9

*:スランプフロー, No.2 は供試体寸法の影響の検討用

*1 足利工業大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

*2 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科(正会員)

表-2 式(2)における係数 a および b

W/C	a	b
0.20	1.2	0.4
0.23	1.5	0.4
0.30	0.6	0.5
0.40	0.1	0.7
0.50 以上	0.03	0.8

合のみ、50×100×400mm(小型)、150×300×900mm(中型)、250×500×1500mm(大型)の供試体も作製した。供試体は所定の材齢(1日、3日、7日、28日)までシール養生した後、シールを剥がし(100×100×400mm は全面乾燥、小・中・大型は2面乾燥)、相対湿度40%、60%、80%、90%の室内に静置した。自己収縮ひずみの測定はJCI自己収縮研究委員会の方法³⁾に従い、凝結の始発時を原点として測定した。実験方法の詳細は参考文献に記載されている⁴⁾⁵⁾。

3. 結果および考察

3.1 自己収縮ひずみの予測式

著者らは、凝結の始発時から長期にわたる自己収縮ひずみの予測式として式(1)を既に提案している⁶⁾。本報告でも、自己収縮ひずみの実測値と式(1)による予測値の比較を行った。

$$\varepsilon_a(t) = \gamma \varepsilon_{ao}(W/B) \beta_a(t) \quad (1)$$

ここに、

$\varepsilon_a(t)$: 材齢 t 日における自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 $\beta_a(t)$: 自己収縮ひずみの進行速度を表す関数で次式により求める。

表-3 式(6),(7)における係数 RH_0, c, d, e

W/C	RH_0	c	d	e
0.20	74.9	0.135	0.56	2200
0.30	84.7	0.100	0.65	1800
0.40	90.0	0.080	0.75	1600
0.50	95.0	0.035	0.90	2000
0.60	97.0	0.025	0.95	2000

$$\beta_a(t) = 1 - \exp\{-a(t-t_0)^b\} \quad (2)$$

$\varepsilon_{ao}(W/B)$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)
で次式により求める。

$$\varepsilon_{ao}(W/B) = 3070 \exp(-7.2(W/B)) \quad (3)$$

γ : セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数(普通セメントの場合 $\gamma=1.0$)、 W/B : 水結合材比(混和材を含まない場合は水セメント比)、 a, b : 定数(表-2 参照)、 t_0 : 凝結の始発(日)、 t : 材齢(日)

t および t_0 はコンクリートの温度によって次式で補正する。

t および $t_0 =$

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (4)$$

Δt_i は温度が $T^\circ\text{C}$ である期間の日数(日)、

$T(\Delta t_i)$ は期間 Δt_i における温度($^\circ\text{C}$)、 $T_0=1^\circ\text{C}$

この予測式の適用範囲は、水結合材比20~60%程度の一般的な単位骨材容積を有するコンクリートで、コンクリート温度は20~60°C程度である。図-1は、材齢約3年までの自己収縮ひずみの実測値と式(1)により求めた計算値を比較したものであるが、両者は概ね一致している。

3.2 乾燥収縮ひずみの予測式

本研究ではコンクリートの収縮ひずみは自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの和であるとした。またシールの有無により自己収縮ひずみの大きさは変わらないと仮定し、収縮ひずみからシール供試体の自己収縮ひずみを差し引いて求めたひずみを乾燥収縮ひずみとした。乾燥収縮ひずみの予測式として式(5)を提案した⁷⁾。

$$\varepsilon_d(t, t_d) = \varepsilon_{do}(RH) \beta_d(t) \quad (5)$$

ここに、

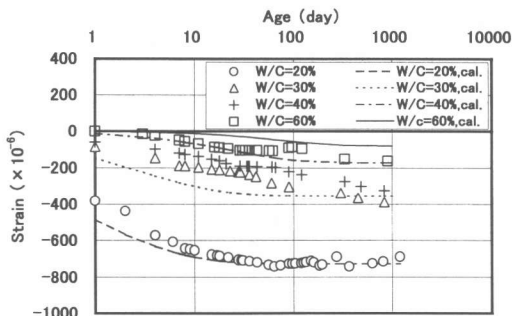


図-1 自己収縮ひずみの実測値と計算値

$\varepsilon_d(t, t_d)$: 材齢 t_d から t までの乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$), $\beta_d(t)$: 乾燥収縮ひずみの進行速度を表す関数で次式で求める。

$$\beta_d(t) = 1 - \exp\{-c(t-t_d)^d\} \quad (6)$$

$\varepsilon_{do}(RH)$: 乾燥収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$) で次式で求める。

$$\varepsilon_{do}(RH) = e[1 - \exp\{(RH - RH_0)/100\}] \quad (7)$$

t_d : 乾燥開始材齢(日), RH: 相対湿度(%), RH_0 : 暴露により体積変化を生じない相対湿度(%)(表-3 参照), c, d, e : 係数(表-3 参照)

式(7)における RH_0 は, 乾燥収縮が内部湿度と環境湿度の大小関係により収縮または膨張となることを表現するために導入したものである。これは, RILEM French Chapter により提案されたものと同様の考え方である⁸⁾。

また土木学会クリープ・乾燥収縮小委員会(308 委員会)が提案した次式についても検討した⁹⁾。この予測式は高強度コンクリートにも適用でき, また自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを分離して収縮ひずみを予測するものである。

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (8)$$

ここに,

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0}$$

$$\varepsilon'_{ds\infty} = \frac{\varepsilon_{dsp}}{1 + \eta \cdot t_0}$$

$$\varepsilon_{dsp} = \frac{\alpha(1 - RH/100)W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}}$$

$$\eta = 10^{-4} \{5 \exp(0.007f'_c(28)) + 0.25W\}$$

$\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$: コンクリートの材齢 t_0 から t までの乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$), W : 単位水量 (kg/m^3) ($130 \text{kg}/\text{m}^3 \leq W \leq 230 \text{kg}/\text{m}^3$), V/S : 体積表面積比(mm), S : 外気に接する表面積(mm^2), RH: 相対湿度(%)($40\% \leq RH \leq 90\%$), V : 体積(mm^3), $f'_c(28)$: 材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度, α : セメントの種類の影響を表す係数($\alpha=11$), t_0 および t : 乾燥開始時お

よび乾燥中のコンクリートの有効材齢(日)であり, 式(4)により補正する。(ただし, 1 日 $\leq t_0 \leq 98$ 日, $t_0 > 98$ 日の場合は $t_0=98$ 日)

図-2 は, 乾燥収縮ひずみの実測値と式(5)および式(8)により算出した計算値を示している。 W/C が 40%以上の場合はいずれの相対湿度(40~90%)においても収縮ひずみとなっている。これに対して, W/C が 20%および 30%の場合は, 高湿度域で膨張ひずみとなっている。式(5)による予測値は実測値の傾向と概ね一致しているが, 式(8)による予測値は高湿度における高強度コンクリートについても収縮ひずみとなっており, 実験結果と異なる傾向を示している。

3.3 収縮ひずみの予測式

収縮ひずみは自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの和であるとし, 式(9)を提案した⁷⁾。この予測式の適用範囲は, 普通ポルトランドセメントを用い水結合材比 20~60%の一般的な単位骨材容積を有するコンクリートで, 部材寸法が $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$, コンクリート温度が 20°C 程度, 相対湿度が 40~90%程度である。

$$\varepsilon(t, t_d) = \varepsilon_a(t) + \varepsilon_d(t, t_d) \quad (9)$$

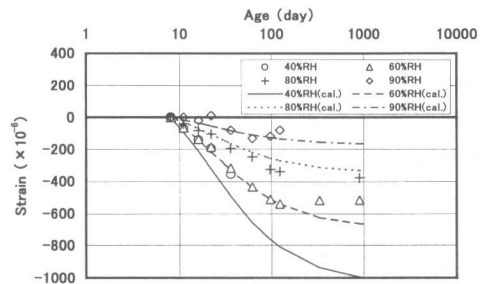
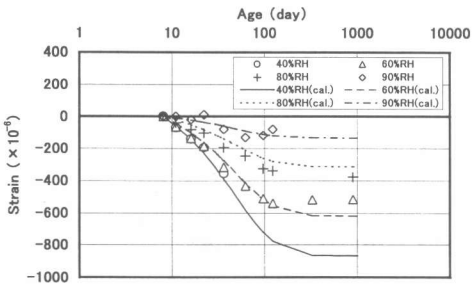
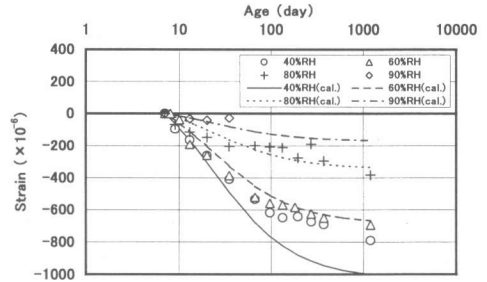
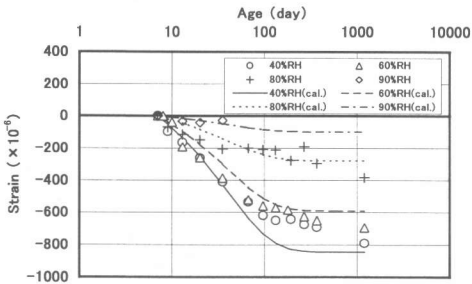
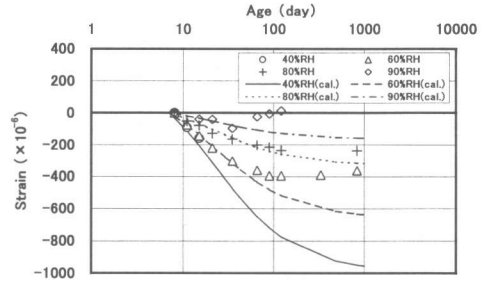
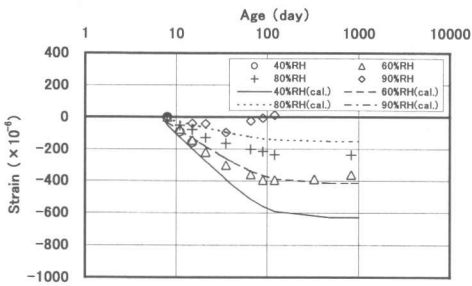
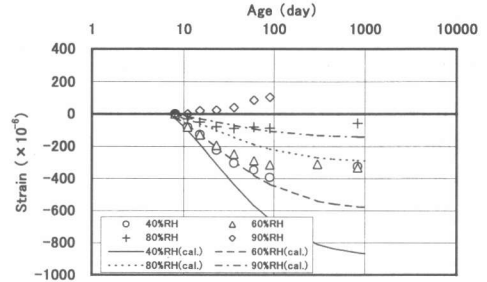
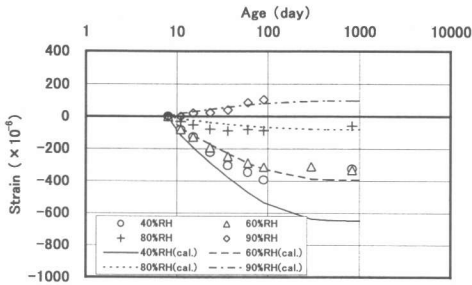
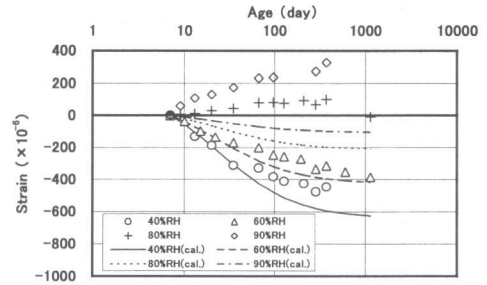
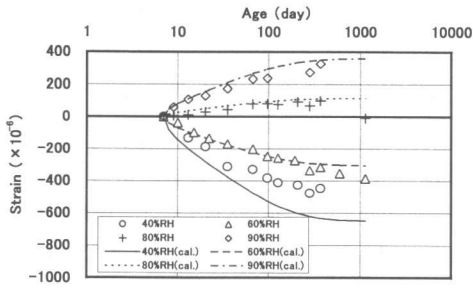
ここに,

$\varepsilon(t, t_d)$: 凝結始発時から材齢 t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$), $\varepsilon_a(t)$: 凝結始発時から材齢 t までの自己収縮ひずみで, 式(1)により求める。 $\varepsilon_d(t, t_d)$: 材齢 t_d から t までの乾燥収縮ひずみで, 式(5)により求める。

図-3 は, 式(9)により求めた収縮ひずみの予測値と実測値の比較を示したものである。両者は概ね一致しており, 乾燥開始前に生じる自己収縮および乾燥開始後に生じる収縮ひずみ(自己収縮ひずみ+乾燥収縮ひずみ)を本方法により概ね予測できると考えられる。

3.4 供試体寸法の影響

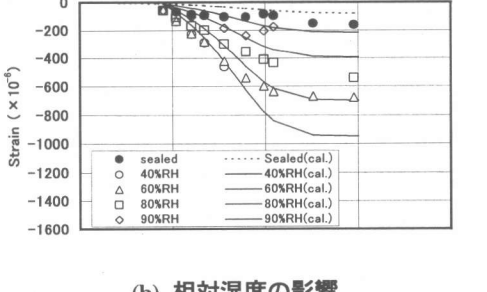
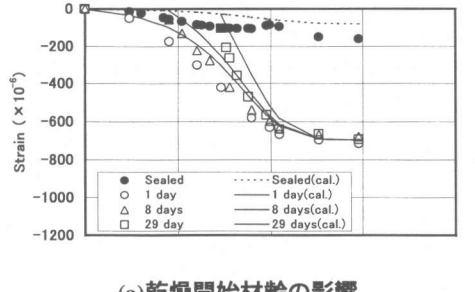
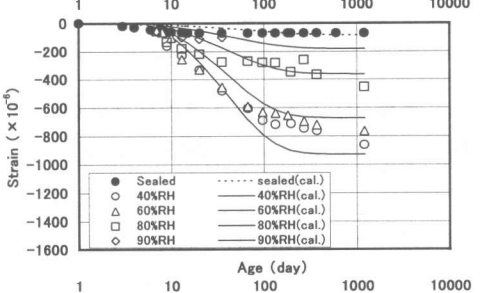
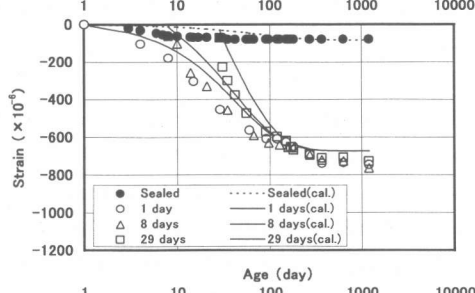
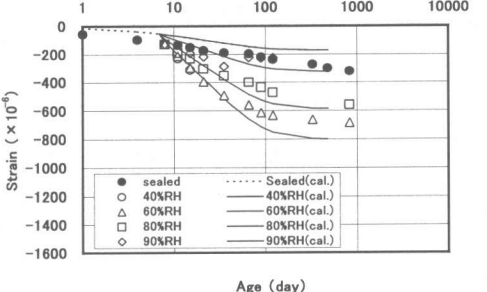
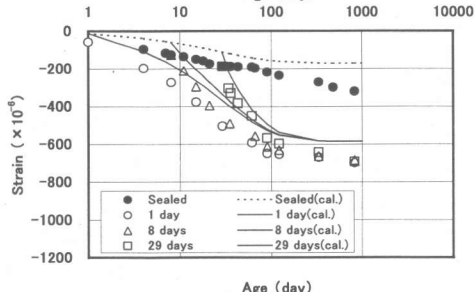
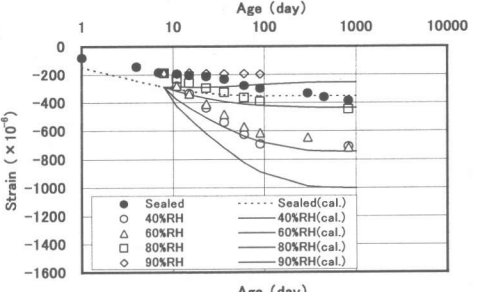
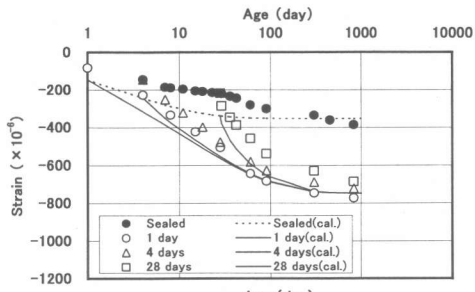
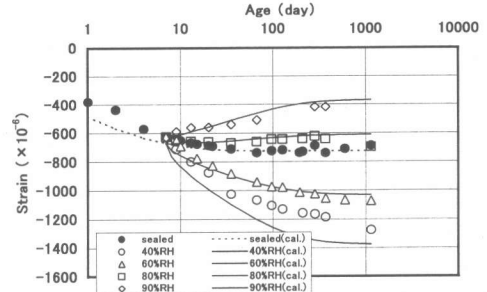
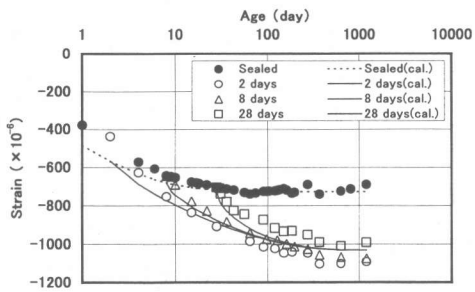
図-4 は, 寸法の異なる供試体の収縮ひずみの実測値と計算値を示したものである。自己収縮ひずみは式(1)により, 乾燥収縮ひずみは式(8)



(a) 計算値は式(5)による

(b) 計算値は式(8)による

図-2 乾燥収縮ひずみに及ぼす相対湿度の影響(上から順に W/C=20, 30, 40, 50, 60%)



(a) 乾燥開始材齢の影響

(b) 相対湿度の影響

図-3 収縮ひずみに及ぼす相対湿度および乾燥開始材齢の影響(上から順に W/C=20, 30, 40, 50, 60%)

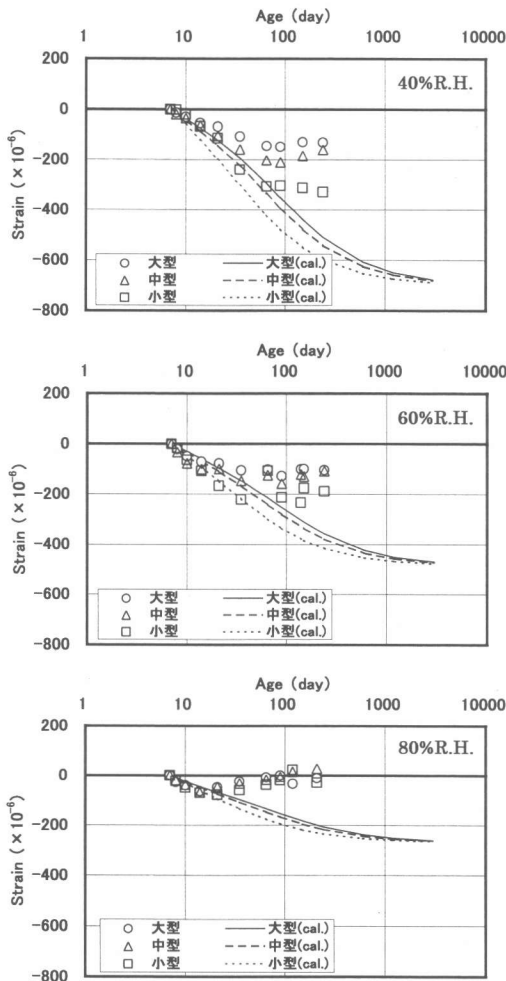


図-4 収縮ひずみに及ぼす供試体寸法の影響(W/C=20%, 60% R.H., 乾燥開始 7日)

により求め、それらの和として収縮ひずみを算出したものである。ここで式(8)を用いたのは、式(8)は供試体寸法の影響を考慮できる予測式であり、式(5)は寸法の影響を考慮できないためである。同図より、材齢1ヶ月程度までは予測値は実測値と概ね一致しているが、長期材齢においては収縮ひずみを過大評価していることが認められる。

4. まとめ

本研究では、高強度コンクリートにも適用で

きる収縮ひずみの予測式を構築することを目的とし、広範囲の水セメント比のコンクリートについて、種々の乾燥条件下で収縮ひずみを測定した。自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを個別に予測し、両者を足し合わせて収縮ひずみを求める予測式の精度について検討した。今後、収縮ひずみに及ぼす部材寸法の影響についてさらに検討する必要がある。また、自己収縮と乾燥収縮に対して重ね合せを適用すると収縮ひずみの予測誤差が大きくなると指摘する研究報告もあるので今後の研究が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書(平成8年制定)設計編, 1996
- 2) CEB-FIP: CEB-FIP Model Code, 1990
- 3) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, pp.195-198, 1996
- 4) 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 北田悦子, 高強度コンクリートの収縮性状に及ぼす乾燥の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.679-684, 1999.7
- 5) 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 松村仁夫: 高強度コンクリートの収縮に及ぼす供試体寸法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.613-618, 2000.6
- 6) 田澤栄一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.211-219, 1997
- 7) Miyazawa, S. and Tazawa, E.: Influence of specimen size and relative humidity on shrinkage of high-strength concrete, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, 2000
- 8) Le Roy, R., de Larrard, F. and Pons, G.: The AFREM code type model for creep and shrinkage of high-performance concrete, Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance Concrete, pp.387-396, 1996
- 9) 土木学会クリープ・収縮小委員会: コンクリートのクリープおよび乾燥収縮II, コンクリート技術シリーズ39, pp.1-11, 2000.11