

論文 高強度コンクリートの収縮性状に及ぼす乾燥の影響

宮澤 伸吾^{*1} · 黒井 登起雄^{*1} · 北田 悅子^{*2}

要旨: 本研究では、高強度コンクリートの収縮ひずみの予測式を構築するための基礎資料を得ることを目的とし、水セメント比20~60%のコンクリートの収縮ひずみに及ぼす乾燥開始材齢および相対湿度の影響について実験により明らかにし、得られた実測値と既往の予測式から求めた計算値を比較検討した。高強度コンクリートは若材齢で自己収縮を生じた後、高湿度環境下では膨張ひずみに転じる場合があること、また、普通コンクリート用の収縮ひずみの予測式をそのまま高強度コンクリートに用いると、乾燥開始後の収縮ひずみを精度良く予測できないことが明らかとなった。

キーワード: 高強度コンクリート、自己収縮、乾燥収縮、相対湿度、乾燥開始材齢

1. はじめに

普通コンクリートが乾燥を受ける場合、乾燥開始前に生じる収縮ひずみは一般に無視されることが多い。これは、全収縮に占める乾燥収縮の割合が大きく、自己収縮の割合が小さいためである。しかし、高強度コンクリートの場合は若材齢における自己収縮が極めて大きいため、乾燥開始後の収縮ばかりでなく養生中の収縮をも合わせて考慮する必要がある。

コンクリートの収縮ひずみの予測法に関しては古くから数多くの研究が行なわれており、いくつかの予測式が提案されている。例えば、水セメント比が40~65%程度で圧縮強度が70N/mm²程度以

下のコンクリートについては、土木学会の予測式¹⁾がある。また、圧縮強度80N/mm²程度までのコンクリートに適用可能な予測式としては、CEB-FIP Model Code1990²⁾がある。しかし、これらの予測式は低水セメント比ほど大きくなる自己収縮の影響を評価できないため、高強度コンクリートについては新たな予測式が必要になると考えられる。

そこで、本研究では高強度コンクリートの収縮ひずみの予測式を確立するための基礎資料を得るために、高強度コンクリートの自己収縮ひずみを測定するとともに、乾燥を受ける場合の収縮ひずみに及ぼす乾燥開始材齢および相対湿度の影響について実験により明らかにした。さらに、既往の

表-1 コンクリートの配合

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			
20	30	160	800	439	998	2.3	20.0 55×55*	3.0
30	33	160	533	539	1066	0.8	21.5 53×44*	3.2
40	34	160	400	611	1104	0.8	21.5	4.4
50	37	162	324	667	1106	0.04	16.0	2.3
60	39	163	272	719	1095	0.036	5.0	6.9

*:スランプフロー

*1 足利工業大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

*2 足利工業大学大学院 土木工学専攻

収縮ひずみの予測式の高強度コンクリートへの適用性について検討した。

2. 実験概要

コンクリートの配合は、表-1に示すように、水セメント比20%, 30%, 40%, 50%および60%の5種類とした。セメントには普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)、細骨材および粗骨材には、それぞれ鬼怒川産川砂(比重2.63、吸水率1.39%、粗粒率2.68)および鬼怒川産川砂利(最大寸法25mm、比重2.59、吸水率1.84%、粗粒率6.78)を用いた。混和剤にはポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤(W/C=20%, 30%, 40%)およびリグニンスルフォン酸塩系AE剤(W/C=50%, 60%)を用い、配合によっては空気量調整のために消泡剤を適宜使用した。

コンクリートの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、10×10×40cm供試体を用い、凝結試験を行って求めた凝結の始発時を原点として測定を開始した。乾燥条件下での長さ変化の測定はコンタクトゲージ法により行った。

養生条件は表-2に示す通りである。乾燥開始前はシール養生および水中養生とした。材齢1日で脱型し、シール養生の場合はアルミ箔粘着テープで供試体を2重にシールし温度20°Cの養生室に静置した。水中養生の場合は、材齢1日で脱型し、20°Cで水中養生を行った。所定の乾燥開始材齢(1, 3, 7, 28日)で、温度20°C、相対湿度60%の室内に静置した。また、相対湿度の影響を検討するため、乾燥開始材齢を7日とし、相対湿度40, 60, 80および90%の各雰囲気中に供試体を静置した。

材齢28日圧縮強度は表-3に示す通りであった。

3. 結果及び考察

3.1 自己収縮

図-1は、材齢7日および材齢28日における自己収縮ひずみの実測値と予測値の比較を示したものである。ここでは、著者らが既に提案している自己収縮ひずみの予測式(式(1))を使用した⁴⁾。

$$\varepsilon_c(t) = \gamma \varepsilon_{c0}(W/B) \beta(t) \quad (1)$$

表-2 養生条件

乾燥前の養生	相対湿度 (%)	乾燥開始材齢(日)			
		1	3	7	28
シール	40			○	
	60	○	○	○	○
	80			○	
	90			○	
水中	60		○	○	○

表-3 材齢28日の圧縮強度 (N/mm²)

養生方法	水セメント比(%)				
	20	30	40	50	60
シール	94.2	71.4	56.5	24.0	16.9
水中	89.6	70.8	57.9	27.7	17.8

表-4 式(2)における定数 a および b

水セメント比(%)	a	b
20	1.2	0.4
23	1.5	0.4
30	0.6	0.5
40	0.1	0.7
50以上	0.03	0.8

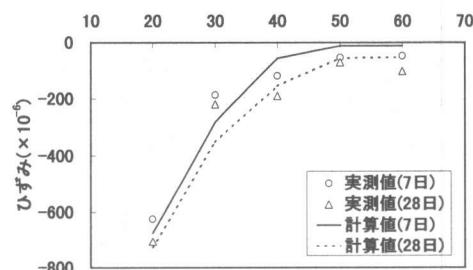


図-1 自己収縮ひずみ

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

$$\varepsilon_{c0}(W/B) = 3070 \exp(-7.2(W/B)) \quad (3)$$

ここに、

$\varepsilon_c(t)$: 材齢t日における自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

$\beta(t)$: 自己収縮ひずみの進行速度を表す関数

γ : セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数(普通ポルトランドセメントの場合 $\gamma=1.0$)

$\varepsilon_{c0}(W/B)$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

W/B : 水結合材比

t_0 : 凝結の始発(日)

a, b : 定数(表-4参照)

図-1より、自己収縮ひずみの実測値は式(1)により求めた予測値と概ね一致した。

3.2 乾燥開始材齢の影響

図-2および図-3はシール養生後に乾燥を受けた場合の収縮ひずみに及ぼす乾燥開始材齢の影響について示したものである。水セメント比20%の場合、乾燥開始以前の自己収縮ひずみは水セメント比50%の場合に比べて大きく、材齢1日で約 400×10^{-6} 程度になった。また、収縮ひずみは乾燥開始材齢が早いほど若干大きくなつたが、その差は小さい。水セメント比50%では、乾燥開始以前の自己収縮ひずみに比べて乾燥開始後の収縮ひずみが大きくなつた。また、長期材齢における収縮ひずみに及ぼす乾燥開始材齢の影響はほとんど認められなかつた。

図-4および図-5は水中養生後に乾燥を受けた場合の収縮ひずみに及ぼす乾燥開始材齢の影響を示したものである。水セメント比20%の場合は、水中養生を開始した材齢1日以降、収縮ひずみの増加が停止し、さらに水中養生を継続すると若干の膨張が認められた。そのため、水中養生供試体の収縮ひずみは自己収縮ひずみ(図-2のシール養生供試体)と比べると小さくなつた。しかし水中養生後に乾燥を受けると、シール養生後に乾燥を受けた場合と比べて収縮が大きくなるため、全収縮ひずみは乾燥前の養生方法の影響をあまり受けないと言える。水セメント比50%の場合は、水中養生中に初期材齢から若干膨張する傾向がみられた。また、乾燥開始後の収縮に関してはシール養生後に乾燥を受けた場合とほぼ同様であるが、乾燥材齢が早いほど収縮ひずみが若干大きくなつた。

3.3 相対湿度の影響

図-6および図-7に材齢7日までシール養生した後に、異なる相対湿度で乾燥させた場合の収縮ひずみの経時変化を示す。水セメント比20%および50%のいずれの場合も、相対湿度が低いほど

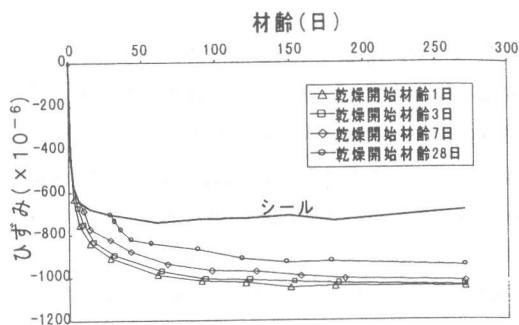


図-2 シール養生後の収縮ひずみ
(W/C=20%, 60% R.H.)

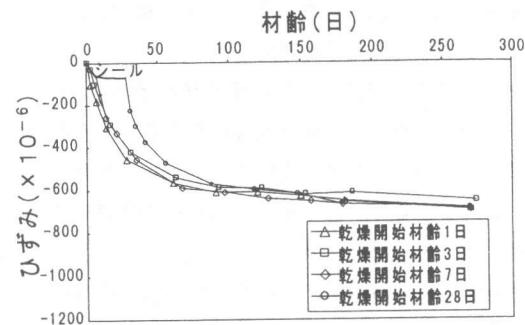


図-3 シール養生後の収縮ひずみ
(W/C=50%, 60% R.H.)

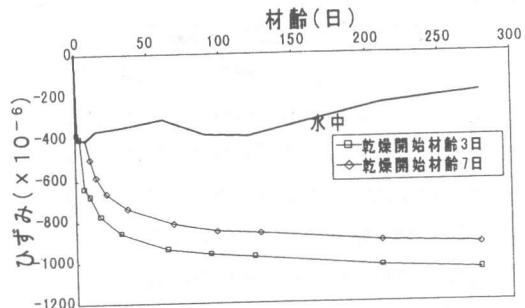


図-4 水中養生後の収縮ひずみ
(W/C=20%, 60% R.H.)

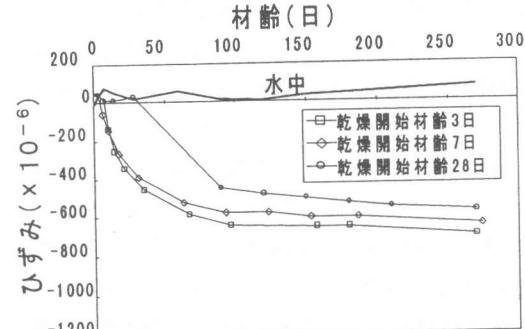


図-5 水中養生後の収縮ひずみ
(W/C=50%, 60% R.H.)

収縮ひずみが大きくなつた。水セメント比20%の場合は相対湿度80%および90%で、水セメント比30%の場合は相対湿度90%で、いずれもシール養生を継続した供試体と比べて膨張傾向を示した。これに対し、水セメント比40%, 50%および60%の場合は、いずれの相対湿度の場合もシール養生を継続した場合と比べて収縮ひずみが大きくなつた。このように、水セメント比が小さい場合に高湿度域でかなり大きな膨張がみられたのは、セメントの水和反応に伴ないセメント硬化体が自己乾燥状態(Self-desiccation)となるため、供試体が空気中の水分を吸収したためと考えられる。

図-8および図-9に乾燥開始材齢7日までシール養生した後に、相対湿度の異なる養生室に静置した場合の質量変化率について示す。水セメント比50%の場合、質量減少率は相対湿度が小さいほど大きくなつた。水セメント比20%の場合は、相対湿度80%および90%に置かれた供試体は質量増加が認められた。前述したような、高湿度域で膨張ひずみが生じたことと対応しているものと考えられる。

3.4 収縮ひずみの予測式による検討

前述したように、自己収縮ひずみに関してはほぼ満足のできる精度で予測が可能である。そこで、ここでは乾燥開始以後の収縮ひずみに関して実測値と既往の予測式による計算値を比較し、それらの予測式の適用限界について検討した。

(1) RILEM French Chapterの予測式

高強度コンクリートの収縮ひずみの予測式としてはRILEM French Chapterの提案式がある⁵⁾。これは、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを別々に算出し、合計して求めるものである。ここでも、自己収縮と乾燥収縮に重ね合わせが成り立つと考え、以下のように収縮ひずみの算出をした。

自己収縮ひずみについてはRILEM式の予測精度があまり良くないため⁴⁾、著者らの予測式(式(1))を用い、乾燥収縮ひずみについては以下に示すRILEM式(式(5))⁵⁾を用いた。式(5)はコンクリート内部の相対湿度と部材が置かれる環境の相対湿度との差により乾燥収縮が定まるとするものである。

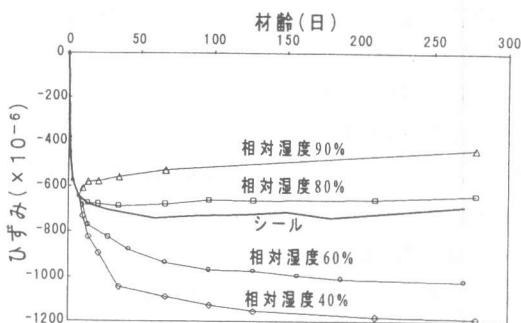


図-6 シール養生後の収縮ひずみ
(W/C=20%, 乾燥開始材齢7日.)

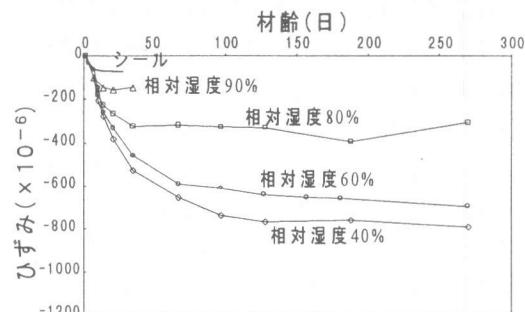


図-7 シール養生後の収縮ひずみ
(W/C=50%, 乾燥開始材齢7日.)

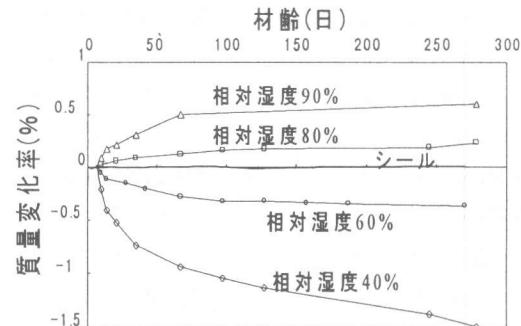


図-8 シール養生後の質量変化率
(W/C=20%, 乾燥開始材齢7日.)

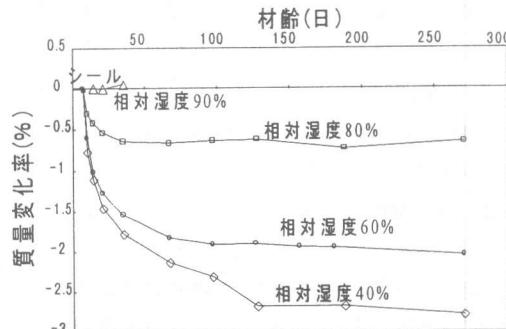


図-9 シール養生後の質量変化率
(W/C=50%, 乾燥開始材齢7日.)

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_c(t) + \varepsilon_{ds}(t, t_0, f_{c28}, h_0, \rho_h) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ds}(t, t_0, f_{c28}, h_0, \rho_h) =$$

$$\frac{K(f_{c28}) [72\exp(-0.046f_{c28})+75-\rho_h]}{t-t_0+\beta_{ds}h_0^2} (t-t_0) \quad (5)$$

ここに、

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ ：コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ($\times 10^{-5}$)

$\varepsilon_c(t)$ ：材齢 t 日における自己収縮ひずみ(式(1)より求める)($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{ds}(t, t_0, f_{c28}, h_0, \rho_h)$ ：乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

t : 材齢(日)

t_0 : 乾燥開始材齢(日)

f_{c28} : 材齢28日の圧縮強度(MPa)

h_0 : 断面寸法(mm)

ρ_h : 相対湿度(%)

$$K(f_{c28})=18 \quad (f_{c28} \leq 57 \text{ MPa})$$

$$K(f_{c28})=30-0.21f_{c28} \quad (f_{c28} \geq 57 \text{ MPa})$$

$$\beta_{ds}=0.021$$

図-10は、乾燥開始材齢である材齢7日以降の収縮ひずみ(自己収縮+乾燥収縮)の実測値と式(4)により求めた計算値との比較を示したものである。いずれの配合についても、相対湿度の影響を式(4)により精度よく評価することは困難であると考えられる。特に、低湿度域における収縮ひずみを過小評価する傾向がある。

(2) 土木学会の予測式

図-11～図-13に、土木学会コンクリート標準示方書の予測式(式(6))¹⁾から算出した収縮ひずみの計算値と実測値の比較を示す。ここでは、乾燥開始材齢である材齢7日以降の収縮ひずみ(自己収縮+乾燥収縮)で比較した。水セメント比40%、50%および60%の配合はこの予測式の適用範囲に入っているが、参考のために水セメント比20%および30%の場合についても合わせて検討した。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp(-0.108(t - t_0)^{0.56})] \varepsilon'_{sh} \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = -50 + 78 [1 - \exp(RH/100)] +$$

$$38 \log_e W - 5 [\log_e(V/S)/10]^2 \quad (7)$$

ここに、

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ ：コンクリートの材齢 t_0 から t まで

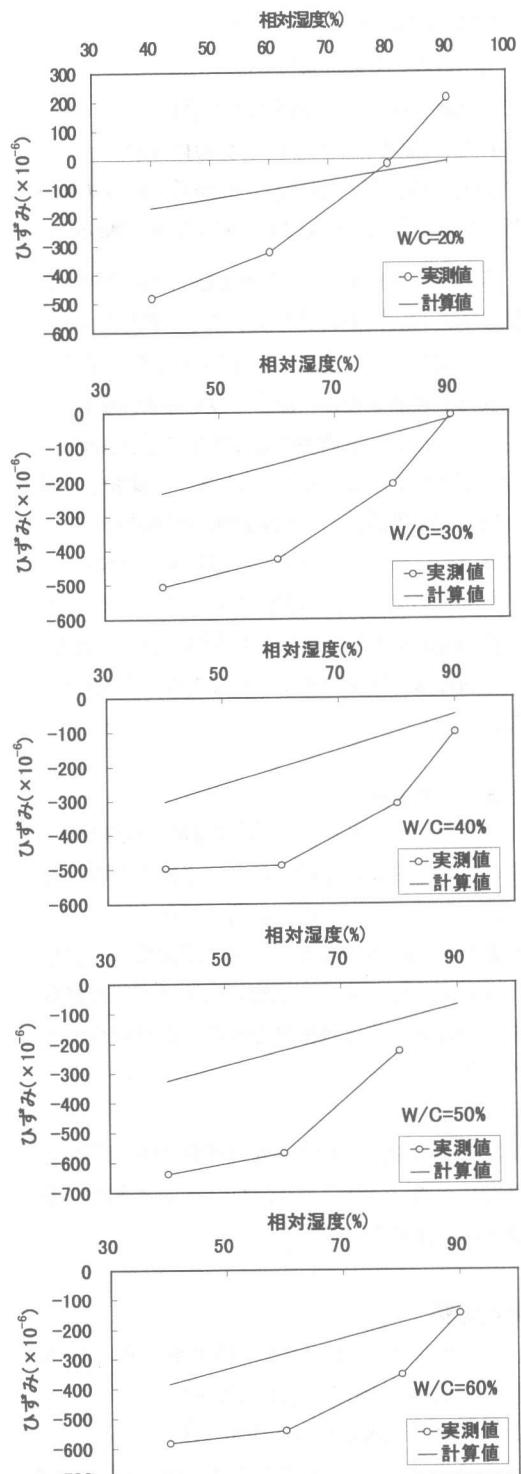


図-10 収縮ひずみの実測値と予測値(式(4))
(乾燥開始以後の収縮ひずみ、材齢90日)

の収縮ひずみ($\times 10^{-5}$)

ϵ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値($\times 10^{-5}$)

t : 材齢(日), t_0 : 乾燥開始材齢(日)

RH: 相対湿度 (%) (45% \leq RH \leq 80%)

V/S: 体積表面積比 (mm) (100mm \leq V/S \leq 200mm)

W: 単位水量(kg/m³) (130kg/m³ \leq W \leq 230kg/m³)

水セメント比40%, 50%および60%の場合は収縮ひずみの実測値と計算値がほぼ一致している。これに対し、水セメント比30%および20%では予測式は乾燥開始後の収縮ひずみを過大評価しており、水セメント比が小さくなるほど実測値との差が大きくなる。また、水セメント比20%の場合は、高湿度域において実測値では膨張ひずみであるのに対し、予測値は収縮ひずみとなっている。このように、高強度コンクリートの場合に高湿度域において生じる湿潤膨張をも考慮できる新たな予測モデルが必要であると考えられる。

4. まとめ

高強度コンクリートでは若材齢で自己収縮を生じた後、高湿度環境下において膨張に転じる場合があること、また、普通コンクリート用の収縮ひずみの予測式をそのまま高強度コンクリートに用いて、乾燥開始後の収縮ひずみを精度良く予測することは困難であることが明らかとなった。

本研究は文部省科学研究費補助金(基盤研究C、研究代表者:宮澤)により行われたことを記し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編)
平成8年版制定, pp.25-27, 1996
- 2) CEB-FIP Model Code 1990, 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, 1996
- 4) 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

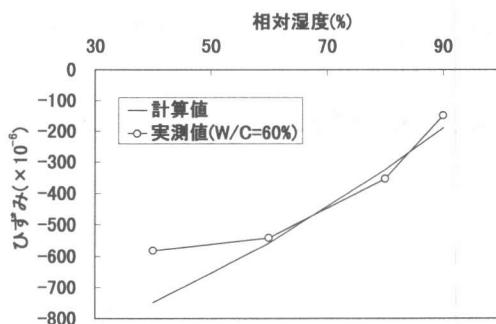


図-11 相対湿度と収縮ひずみの関係(式(6))
(乾燥開始以後の収縮ひずみ, 材齢90日)

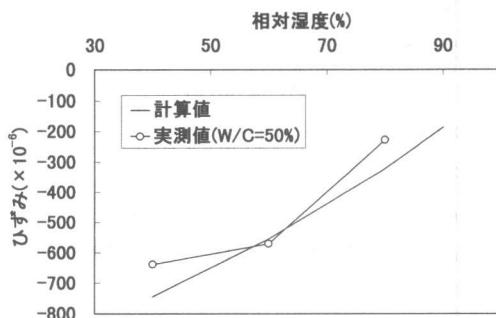


図-12 相対湿度と収縮ひずみの関係(式(6))
(乾燥開始以後の収縮ひずみ, 材齢90日)

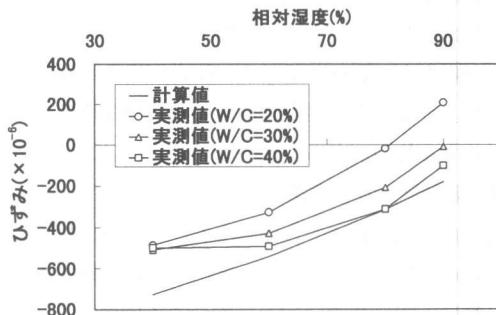


図-13 相対湿度と収縮ひずみの関係(式(6))
(乾燥開始以後の収縮ひずみ, 材齢90日)

文集, No.571/V-36, pp.211-219, 1997

- 5) Leroy, R., de Larrard, F. and G., Pons: 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.387-389, Paris, 1996