

高強度コンクリートにおける収縮ひずみの予測に関する研究

河野 政典* 上西 隆**

1. まえがき

高強度コンクリートでは、主に水結合材比を小さくしたり微粉末混和材を使用して高強度化を図っており、通常のコンクリートと比べるとセメント量や粉体量が多くなり、自己収縮ひずみが大きくなる¹⁾。高強度コンクリートを用いた構造部材においては、水和反応による温度上昇も大きいので温度ひずみも大きく、初期材齢から自己収縮ひずみと温度ひずみの拘束による複合応力が発生し、構造部材にひび割れが発生すると報告もある²⁾。

高品質な躯体を得るためにはひび割れの発生を抑制しなければならない。抑制策を検討する上では、初期材齢からの発生応力の予測が必要であり、そのためには水和熱による温度ひずみや、水和直後からの自己収縮ひずみの予測が必要である。水和熱による温度ひずみについては解析可能な状況であるが、後者については近年になり研究され始めている³⁾ものの、特性については不明な点が多く、そのため予測方法についても確立されていない。本研究では、自己収縮ひずみの予測式を確立するために必要な基礎資料を得る目的で、48~100N/mm²級高強度コンクリートを対象として、水セメント比、結合材種類、養生条件等を要因とした自己収縮ひずみに関する実験を実施し、その結果をもとに、既往の自己収縮ひずみ予測式の適用性を検討し、自己収縮ひずみの予測式を提案した。以下に、その概要を報告する。

2. 実験計画

自己収縮ひずみの測定要因と測定ケースを表-1に、コンクリートの使用材料を表-2に示す。水結合材比は19~40%の範囲とし、水結合材比22%では単位水量を要因とした測定を計画した。結合材種類は水結合材比に応じて実際に使用が考えられる組み合わせで選定した。自己収縮ひずみと乾燥による収縮ひずみの影響を把握するため、試験体の養生条件は封かん養生と気中養生とした。また、自己収縮ひずみの養生温度の依存性について検討するため、養生温度を要因とした測定を計画した。

コンクリートの自己収縮ひずみは、JCI 超流動コンクリート研究委員会報告書II「(仮称)高流動コンクリート

の自己収縮試験方法」に準拠し、100×100×400mmの角柱試験体を用いて埋込み型ひずみ計で測定した。試験体はコンクリート打設直後から、水分の逸散や吸水がないように封かん状態で養生し、材齢1日で脱型した。封かん養生の試験体はアルミ箔粘着テープで養生した状態で、気中養生の試験体はそのままの状態、温度20±2℃、相対湿度60±5%の環境で静置した。養生温度40℃と60℃の試験体は、封かん状態で打設後3時間20℃養生し、その後所定の温度で28日間養生した。

凝結時間はウェットスクリーニングモルタルを上記と同じ温度条件下で、プロクタ貫入抵抗試験機により測定した。ひずみの初期値は凝結の始発時間とした。

表-1 測定要因と測定ケース

要 因 記号*1	水結 合材 比 (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	結合材種類		養 生 条 件	養 生 温 度 (℃)	対 象 F _c (N/mm ²)					
			セ メ ン ト	混 和 材								
19LHSF160A	19	160	高比・ 低熱セメント	シリカフェ ム 内割10%	封 かん	20	100					
22LHSF145A		145										
22LHSF160A	22	160										
22LHSF180A		180										
25LHSF160A	25	160										
22LH160A	22	160		ナシ	封 かん	20	100					
28LH160A	28	160										
19LHSF160D	19	160										
22LHSF145D		145										
22LHSF160D	22	160										
22LHSF180D		180	ナシ	気 中	20	100						
25LHSF160D	25	160										
28LH160D	28	160										
280P160A	28	160										
340P170A	34	170										
400P170A	40	170	普通・ セラト セメント	ナシ	封 かん	20	100					
280P160D	28	160										
340P170D	34	170										
22LHSF160A40	22	160						高比・ 低熱セメント	シリカフェ ム 内割10%	封 かん	40	100
22LHSF160A60												
28LH160A60	28	160										
280P160A60	28	160										
340P170A60	34	170										

注)*1:記号の意味は次のとおり

22 LHSF 160 A 40

↑ 養生温度(20℃の場合は無記号)

↑ 養生条件(A:封かん,D:気中)

↑ 単位水量

↑ 結合材種類(LHSF:低熱+シリカフェム,LH:低熱,OP:普通*)

↑ 水結合材比

*2:設計規準強度

*建築研究室 **本社建築部

3. 自己収縮ひずみの既往の予測式

自己収縮ひずみの予測式としては、式(1)に示す田澤宮澤式¹⁾が提案されている。

$$a \cdot \epsilon = \gamma \cdot a \cdot \epsilon_{\infty} \{1 - \exp(-a \cdot t^b)\} \quad (1)$$

$$a \cdot \epsilon_{\infty} = 3070 \exp(-7.2(W/B)) \quad (1.1)$$

ここに、 γ : 結合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 $\gamma=1.0$)

$a \cdot \epsilon$: 自己収縮ひずみ
 $a \cdot \epsilon_{\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値
 W/B : 水結合材比
 t : 凝結始発後からの材齢(日)
 a, b : 定数

定数 a, b を表-3に、 γ を表-4に示す。式(1)では、式(1.1)の水結合材比を変数として求められる自己収縮ひずみの終局値を用いて、定数 a, b で自己収縮ひずみの発生過程を表している。また、結合材の種類による影響は係数 γ で表し、普通ポルトランドセメントの終局ひずみを1とし、それ以外の結合材は普通ポルトランドセメントに対しての比で表している。

4. 自己収縮ひずみの測定結果

自己収縮ひずみの測定結果の一例を図-1(1)、(2)に示す。図-1(1)に示すように、水結合材比が小さいほど自己収縮ひずみは大きく、高ビーライト系低熱セメントを用いた場合の自己収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも小さい。しかし、図-1(2)に示すように、高ビーライト系低熱セメントにシリカフュームを混和すると混和しない場合より自己収縮ひずみは大きくなる。また、同一水結合材比においては、単位水量が多いほど、すなわち、単位結合材量が多いほど終局ひずみは大きい傾向にあった。

5. 収縮ひずみの予測式の検討

5.1 使用材料・調合の影響

a. 自己収縮ひずみの終局値

図-2に終局ひずみと単位結合材量の逆数(以下、単位結合材比と称す)との関係を示す。式(1.1)では終局ひずみを水結合材比の関数として表しているが、今回の実験結果では、同一水結合材比において単位結合材量の影響がみられることから、終局ひずみを単位結合材量との関係で示した。終局ひずみの値は、ひずみ(ϵ)と単位時間あたりのひずみ増分($\Delta \epsilon / \Delta t$)との関係から、ひずみ増分が0となる点の値とした。

図-2から単位結合材量が多いほど終局ひずみも大きいことがわかるが、単位結合材量が同じでも、結合材の種類により終局ひずみの値も異なっている。そのため終局ひずみの値は結合材の種類別に求める必要がある。

表-2 コンクリートの使用材料

セメント	高ビーライト系低熱セメント 密度:3.20, ブレーン値:4120cm ² /g
	普通ポルトランドセメント 密度:3.16, ブレーン値:3460cm ² /g
細骨材	鬼怒川産川砂 表乾密度:2.58, 吸水率:2.64%
粗骨材	岩瀬産硬質砂岩砕石(最大骨材寸法20mm) 表乾密度:2.64, 吸水率:0.734%, 実積率:63.5%
シリカフューム	スリータイトのシリカフューム 濃度:50%, 密度:1.39 スリータイト中のシリカフューム成分 密度:2.20, ブレーン値:18.5m ² /g, SiO ₂ :93.4%
混和剤	ボリカルボキシル系高性能AE減水剤 密度:1.045

表-3 定数 a, b の値

W/B(%)	a	b
20	1.2	0.4
23	1.5	0.4
30	0.6	0.5
40	0.1	0.7
50	0.01	1.0

表-4 係数 γ の値

W/B (%)	セメント種類		
	普通	中庸熱	高ビーライト系
23	1.0	0.84	0.61
30	1.0	0.37	0.30

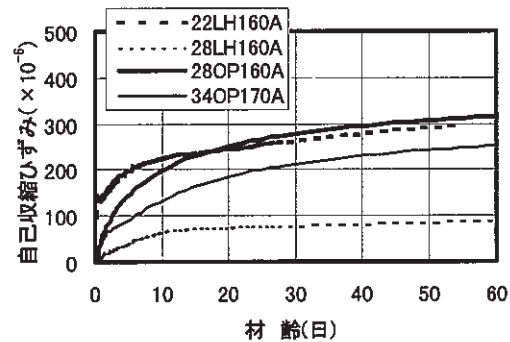


図-1(1) 終局ひずみと水結合材比の関係

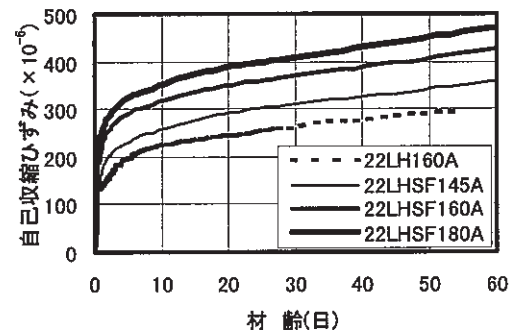


図-1(2) 終局ひずみと単位結合材比の関係

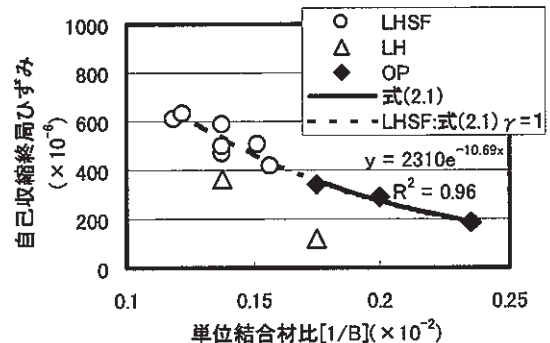


図-2 終局ひずみと単位結合材比の関係

普通ポルトランドセメントの実験データから単位結合材量を変数とした終局ひずみの回帰式(式(2.1))を求めた。図-2中に式(2.1)を実線で示す。回帰式は式(1.1)と同様に指数関数で表し、結合材の種類の影響を表す係数 γ は終局ひずみ ${}_a \varepsilon_\infty$ に含めた。そのため、式(1)の自己収縮ひずみの予測式を式(2)に修正した。

$${}_a \varepsilon = {}_a \varepsilon_\infty \{1 - \exp(-a \cdot t^b)\} \quad (2)$$

$${}_a \varepsilon_\infty = \gamma 2310 \exp(-1069/B) \quad (2.1)$$

ここに、 γ : 結合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 $\gamma=1.0$)
 B : 単位結合材量(kg/m^3)

図-2の高ビーライト系低熱セメントにシリカフュームを用いた終局ひずみのデータ上に、 $\gamma=1$ を代入した式(2.1)を破線で示す。高ビーライト系低熱セメントにシリカフュームを混合した場合の単位結合材比と終局ひずみの関係は、普通ポルトランドセメントでの両者の関係式でほぼ表すことができると考えられる。高ビーライト系低熱セメントにシリカフュームを混合した場合、 γ は1とすればよい。

高ビーライト系低熱セメントのみを用いた場合は、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも終局ひずみは小さい。実験の結果、表-5に示すように、水結合材比28%においては高ビーライト系低熱セメントの終局ひずみは普通ポルトランドセメントの0.34倍であり、水結合材比22%においては0.62倍であった。表-5以外の単位結合材比に対しての γ は特定できないが、線形補間により推定値が得られると考えられる。

表-5 高ビーライト系低熱セメントを使用した場合の γ

W/B(%)	1/B	γ
22	0.1375×10^{-2}	0.62
28	0.175×10^{-2}	0.34

b. 定数 a と b

式(1)の定数 a 、 b は表-3に示すように水結合材比に応じて数値が示されているものの、水結合材比との関係式では表されていない。本実験で得られた自己収縮ひずみデータを式(2)で最も良く近似するよう、定数 a 、 b を各実験データ毎に求めた。定数 a 、 b の算出結果を、定数 a は単位結合材比との関係で、定数 b は単位結合材量との関係で、図-3、4に示す。これらの図から、定数 a 、 b は結合材量との関係で表すことができると考えられ、それぞれ式(3)、(4)に示す結合材量を変数とした指数関数で表した。なお、定数 a 、 b には結合材の種類による影響はあまりみられない。

$$a = 1.42 \exp(-934/(1/B)) \quad (3)$$

$$b = 1.53 \exp(-0.0021 \cdot B) \quad (4)$$

c. 予測式の適合性

自己収縮ひずみの実験結果と、式(2)~(4)による予測値の比較例を図-5(1)、(2)中の細線と太線で示す。予測値はおおよそ実験データを表していると考えられる

ものの、ごく初期材齢におけるひずみの発生過程は実験値とやや異なる。ごく初期材齢の自己収縮ひずみの応力を検討する場合は、ごく初期材齢においても実験値と適合することが望ましい。ごく初期材齢では、ある時間が経過する間でひずみの進行が小さいことから、式(5)によりその過程を表すこととした。

$${}_a \varepsilon = {}_a \varepsilon_\infty \{1 - \exp(-a \cdot (t-t_0)^b)\} \quad (5)$$

ここに、 t_0 : 実験定数

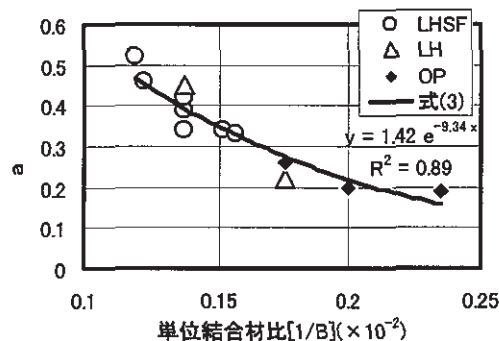


図-3 定数 a と単位結合材量比の関係

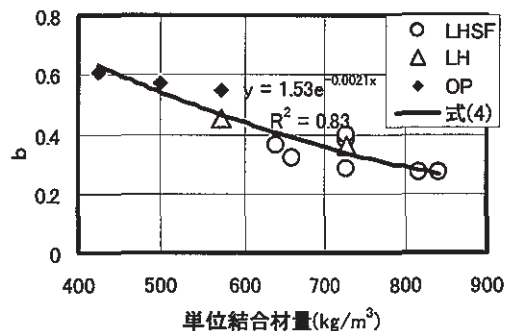


図-4 定数 b と単位結合材量との関係

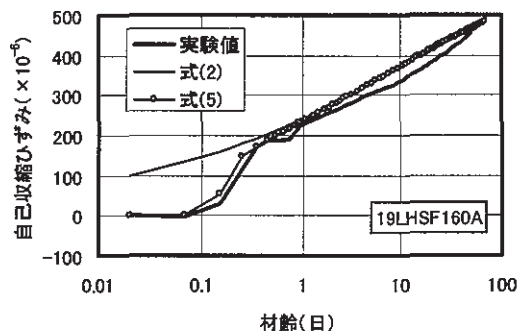


図-5(1) 自己収縮ひずみの測定結果と予測ひず

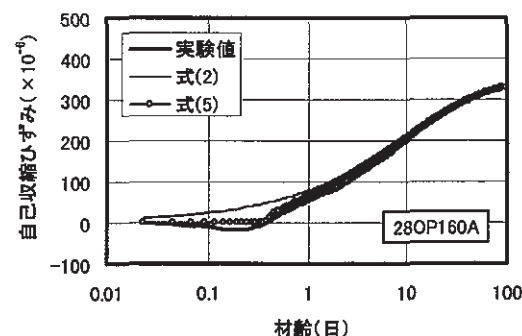


図-5 (2) 自己収縮ひずみの測定結果と予測ひずみ

式(5)で求めた予測値と実験値との比較例を図-5 (1)、(2)中に示す。式(5)によって初期材齢からのひずみの発生過程の適合性を向上することができる。各実験データにおける t_0 の算出結果を、単位結合材比との関係で図-6に示す。単位結合材比が大きいほど t_0 も大きくなる傾向がみられる。ここでは、 t_0 を単位結合材比との関係で式(6)で近似した。

$$t_0 = 323/B - 0.315 \quad (6)$$

5.2 乾燥の影響

a. 乾燥収縮と自己収縮の関係

封かん養生と気中養生における収縮ひずみの比較例を図-7に示す。気中養生では乾燥の影響を受けるため、封かん養生よりも収縮ひずみが大きい。

気中養生における収縮ひずみ（以下気中収縮ひずみと称す）の終局値と水結合材比との関係を図-8に、結合材および単位水量別に示す。水結合材比 19~34%の範囲では、水結合材比が大きいほど気中収縮ひずみはやや小さくなる傾向がある。

気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合と、水結合材比の関係を図-9に、自己収縮ひずみの終局値との関係を図-10に示す。気中養生における収縮ひずみは、自己収縮と乾燥収縮により生じていると考えられるが、気中養生の収縮ひずみに含まれる自己収縮ひずみと、封かん養生の自己収縮ひずみが同一であるかについては明らかでない。ここでは気中養生と封かん養生の自己収縮ひずみは同じと仮定し、気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合は、同一調査の封かん養生の自己収縮ひずみを気中養生における収縮ひずみで除し求めた。

図-9に示すように、気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合は、水結合材比が小さいほど大きい。低水結合材比においては、コンクリート中の水分の多くはセメントとの水和反応に消費され、そのため自己収縮ひずみが大きく、またコンクリートが緻密であるため水分の逸散が少ないことが考えられる。水結合材比 17%程度で収縮ひずみのほとんどが自己収縮ひずみであるとの報告もある¹⁾。

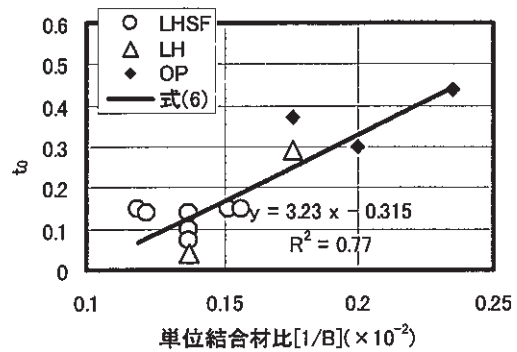


図-6 t_0 と単位結合材比の関係

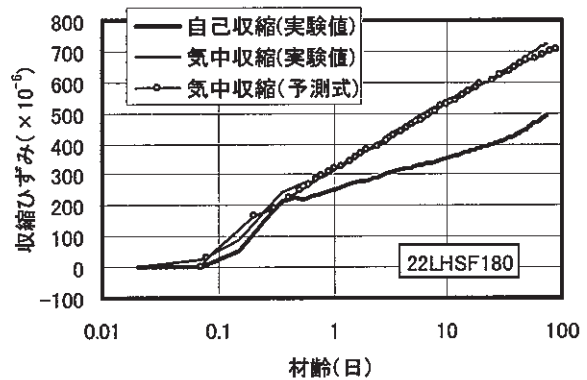


図-7 封かん養生と気中養生の収縮ひずみの比較例

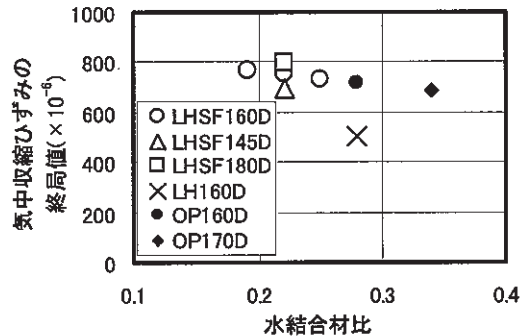


図-8 水結合材比と気中収縮ひずみの終局値との関係

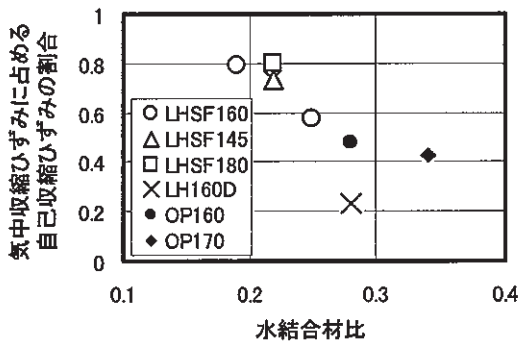


図-9 気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合と水結合材比との関係

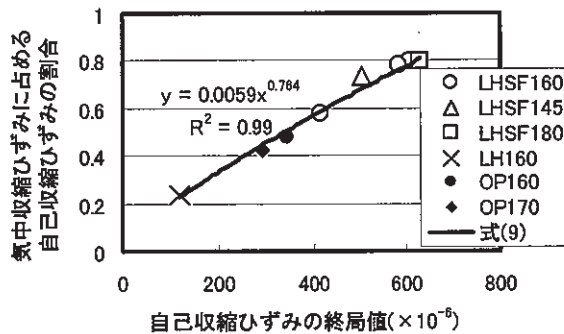


図-10 気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合と自己収縮ひずみの終局値との関係

また、図-10 に示すように、自己収縮ひずみが大きいほど気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合も大きい。

b. 収縮ひずみの予測

終局ひずみは自己収縮と乾燥収縮の重ね合わせが成り立つと仮定し、乾燥を考慮した収縮ひずみの予測には、式(5)に基づいた式(7)を用いた。

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} \{1 - \exp(-a \cdot (t-t_0)^b)\} \quad (7)$$

$$\epsilon_{\infty} = {}_a\epsilon_{\infty} + {}_d\epsilon_{\infty}$$

ここに、 ${}_a\epsilon_{\infty}$: 自己収縮によるひずみ
 ${}_d\epsilon_{\infty}$: 乾燥による収縮ひずみ

乾燥による収縮ひずみは、図-10 に示す自己収縮ひずみの終局値と気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合の関係から、式(8)および式(9)より求めた。

$${}_d\epsilon_{\infty} = {}_a\epsilon_{\infty} (1/R_f - 1) \quad (8)$$

$$R_f = 0.0059 \cdot {}_a\epsilon_{\infty}^{0.764} \quad (9)$$

ここに、 R_f : 気中収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合

自己収縮ひずみの予測に用いた定数 a 、 b を、乾燥を考慮した収縮ひずみの予測に適用した場合、その予測ひずみの発生傾向は実験値と異なった。そのため、気中ひずみのデータから定数 a' 、 b' を新たに求めた。自己収縮ひずみの予測に用いた定数 a 、 b と気中収縮ひずみのデータから求めた定数 a' 、 b' との関係を図-11、12 にそれぞれ示す。定数 a' 、 b' の値は、それぞれ定数 a 、 b の値よりやや大きく、式(10)、(11)に示す関係で表した。

$$a' = a + 0.1 \quad (10)$$

$$b' = b + 0.05 \quad (11)$$

ここに、 a' 、 b' : 乾燥を考慮した場合の定数
 a 、 b : 自己収縮条件での定数

c. 実験値と予測値の比較

式(7)~(11)により求めた収縮ひずみの予測値の一例を図-7中に示す。予測値は実験値をおおよそ表していると考えられる。本実験では、乾燥開始材齢1日について収縮ひずみの測定を行い、それに基づき収縮ひずみの予測を行っている。そのため、予測適用条件としては、乾燥開始材齢は1日である。

5.3 養生温度の影響

養生温度を要因とした自己収縮ひずみの測定結果の一例を図-13(1)~(2)に示す。養生温度の違いについて検討するため、材齢は、CEB-FIP MC90 の式(12)¹⁾を用いて有効材齢で表した。

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (12)$$

ここに、 t : 有効材齢(日)
 Δt_i : 温度が $T(^{\circ}\text{C})$ である期間の日数
 T : 温度($^{\circ}\text{C}$)
 $T_0 = 1^{\circ}\text{C}$

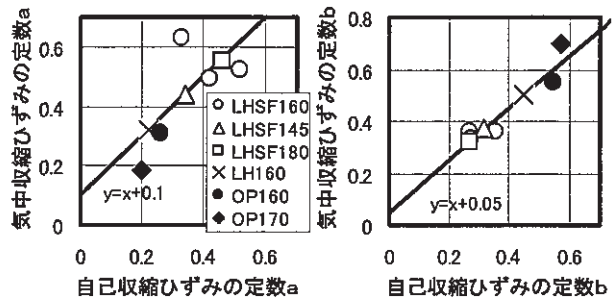


図-11 自己と気中収縮ひずみにおける定数 a の関係 図-12 自己と気中収縮ひずみにおける定数 b の関係

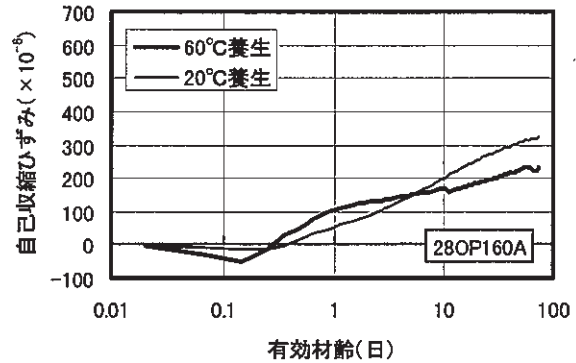


図-13(1) 養生温度を要因とした自己収縮ひずみの測定結果

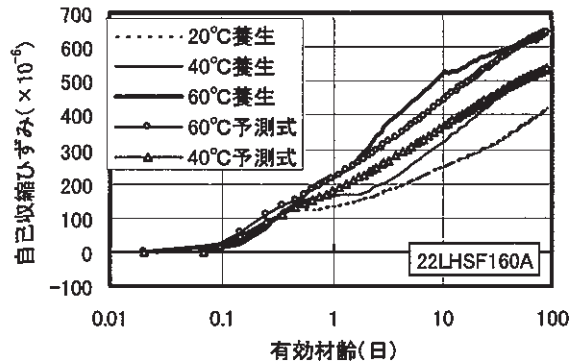


図-13(2) 養生温度を要因とした自己収縮ひずみの測定結果

普通ポルトランドセメントを使用した場合、水結合材比 28%における 60°C養生の自己収縮ひずみは、同一材齢においては 20°C養生のひずみより大きいですが、図-13(1)に示すように同一有効材齢においては、20°C養生のひずみとおおむね同じであると考えられる。水結合材比 34%の 60°C養生の自己収縮ひずみにおいても、水結合材比 28%と同様に有効材齢に対しては 20°C養生のひずみの発生傾向とおおむね同じであった。普通ポルトランドセメントを使用した場合、養生温度が変化しても、有効材齢を用いて 20°C養生の予測式で、自己収縮ひずみを求めることが可能であると考えられる。

高ビーライト系低熱セメントを使用した場合、図-13(2)に示すように、水結合材比 22%においては同一有効材齢でも、養生温度が高いほど終局ひずみは大きい。20℃養生の終局ひずみは 470×10^{-6} 、60℃養生の終局ひずみは 714×10^{-6} で、1℃あたり約 6.1×10^{-6} の増分であった。水結合材比 28%においては、22%よりも養生温度の影響は小さく、20℃養生の終局ひずみは 118×10^{-6} 、60℃養生の終局ひずみは 242×10^{-6} で、1℃あたり約 3.1×10^{-6} の増分であった。

高ビーライト系低熱セメントを使用した場合、養生温度が変化した場合の自己収縮ひずみの終局値は、式(13)に示すように、20℃養生における終局ひずみに養生温度に応じた終局ひずみの増分を累加して求めることとした。養生温度に応じた増分ひずみは、式(13.1)に示すように、1℃あたりの増分ひずみに 20℃からの上昇温度を乗じ求めた。1℃あたりの増分ひずみは、水結合材比 22%と 28%の 1℃あたりの増分ひずみを線形補間し、単位結合材量を変数として式(13.2)で表した。

$${}_a \varepsilon_{\infty}' = {}_a \varepsilon_{\infty} + {}_a \varepsilon_T \quad (13)$$

$${}_a \varepsilon_T = {}_a \varepsilon_T' (T - 20) \quad (13.1)$$

$${}_a \varepsilon_T' = 0.0192 * B - 7.9 \quad (13.2)$$

ここに、 ${}_a \varepsilon_{\infty}'$: 養生温度を考慮した自己収縮ひずみの終局値

${}_a \varepsilon_T$: 養生温度に応じた増分ひずみ

${}_a \varepsilon_T'$: 1℃あたりの増分ひずみ

T : 養生温度(℃)

式(13)を用いた水結合材比 22%の養生温度 40℃と 60℃の自己収縮ひずみの予測値を図-13(2)に示す。この予測式で実験値をおおよそ表すことができると考えられる。

6. まとめ

本実験で得られた自己収縮ひずみの特性と収縮ひずみの予測について以下にまとめる。

- i. 自己収縮ひずみは結合材量が多いほど大きい
- ii. 高ビーライト系低熱セメントを用いた方が普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも自己収縮ひずみは小さいが、シリカフュームを混和すると自己収縮ひずみは大きくなる
- iii. 乾燥条件下の収縮ひずみにおける自己収縮ひずみの割合は、水結合材比が小さいほど大きい
- iv. 高ビーライト系低熱セメントを用いた水結合材比 28%以下におけるコンクリートの自己収縮ひずみは、養生温度に依存し、養生温度が高いほど自己収縮ひずみは大きい
- v. 実験結果に基づき収縮ひずみの予測式を提案した予測式

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \{ 1 - \exp(-a \cdot (t - t_0)^b) \}$$

$$\varepsilon_{\infty} = ({}_a \varepsilon_{\infty} + {}_a \varepsilon_T) + {}_d \varepsilon_{\infty}$$

ここに、 ${}_a \varepsilon_{\infty}$: 結合材に応じた自己収縮ひずみの終局値、式(2.1)

式(2.1)における γ

普通ポルトランドセメントの場合 $\gamma = 1$

高ビーライト系低熱セメントとシリカフューム

場合 $\gamma = 1$

高ビーライト系低熱セメントの場合表-5

${}_a \varepsilon_T$: 養生温度に応じた増分ひずみ、

水結合材比 28%以下の場合式(13.1)

それ以外 ${}_a \varepsilon_T = 0$

${}_d \varepsilon_{\infty}$: 乾燥による収縮ひずみ、式(7)

t : 有効材齢(日)

a, b, t_0 : 実験定数

a, b : 自己収縮を対象とする場合式(3)、(4)

乾燥収縮を考慮する場合式(10)、(11)

t_0 : 式(6)

適用条件 : 水結合材比、19~34%

結合材種類、19~28%高ビーライト系低熱セメントと

シリカフューム

28~34%普通ポルトランドセメント

乾燥条件、相対湿度 60%程度

乾燥開始材齢 1日

養生温度、20~60℃程度

7. あとがき

本報では、48~100N/mm²級高強度コンクリートの収縮ひずみの特性について実験的検討を行い、収縮ひずみの予測式を提案した。収縮応力を予測するためには収縮ひずみの予測の他、コンクリートの物性として若材齢からのクリープひずみや、ヤング係数の予測も必要である。これらについても実験的検討を行っており、その結果や実験結果に基づいた収縮応力の予測方法については次の機会に報告したい。

本研究の遂行にあたっては、宇都宮大学の榎田佳寛教授、中村成春助手にご指導をいただいた。また、同大学の萩原伸治氏にはご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 「自己収縮研究委員会報告書」、日本コンクリート工学協会、1996
- 2) 今本啓一他、「超高強度鉄筋コンクリート架橋試験体に生じたひび割れに関する一検討」、日本建築学会構造系論文集、No. 495、pp. 1~8、1997.5