

# 論文 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する研究

泉田 裕介<sup>\*1</sup>・榊田 佳寛<sup>\*2</sup>・杉山 央<sup>\*3</sup>・石 東昇<sup>\*4</sup>

**要旨：**高炉スラグ細骨材の利用範囲の拡大のために、吸水率の異なる高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性に関する実験を行い、日本建築学会の指針式に基づいて細骨材の乾燥収縮に及ぼす影響係数を定量化した。その結果、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、川砂を使用した場合に比べて乾燥収縮ひずみは、0.85~0.86 倍程度に減少することが示され、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、川砂を用いたコンクリートに比べて、乾燥収縮ひずみが小さくなることが確認できた。

**キーワード：**乾燥収縮, 高炉スラグ細骨材, 単位水量, 静弾性係数, 予測式

## 1. はじめに

環境保全や副産物の有効利用の観点から、高炉スラグ細骨材については古くから実用化のための調査・研究が行われ、1981年にJIS A 5012「コンクリート用高炉スラグ細骨材」が制定され、1997年にJIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材—第1部:高炉スラグ骨材」に改正され、今日に至っている。日本建築学会では「高炉スラグ細骨材を用いるコンクリート施工指針・同解説(1983)」<sup>1)</sup>が制定され、通常強度のコンクリートには使用できるようになっているが、高強度コンクリートには使用が制限されている。また、社内規格で高炉スラグ細骨材を標準化しているレディーミクストコンクリート工場は少なく、十分に利用されているとは言い難い。高炉スラグ細骨材の利用範囲を拡大するためには、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートについて高強度領域まで含めて再検証することが必要と考えられる。

一方、鉄筋コンクリート造建築物に生じるひび割れの主な原因にコンクリートの乾燥収縮がある。日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説(2006)」には、収縮ひずみの予測式(以下、指針式)<sup>2)</sup>が示されており、その他に土木学会コンクリート標準示方書の算定式<sup>3)</sup>、CEB-FIP(1990)の収縮ひずみ予測式<sup>4)</sup>などもある。これらの予測式は、材料・調合、相対湿度、部材の大きさなどが考慮されている。

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、長期強度の増進と、乾燥収縮の減少が期待されるが、定量的な評価が重要である。本研究は、高炉スラグ細骨材の利用範囲を拡大するための研究の一環として、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートについて、指針式に基づいて細骨材と調合要因とが乾燥収縮の予測値に及ぼす影響について定量的に検証を行ったものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

高炉スラグ細骨材は、製造方法によって性質に差がある。本研究では、吸水率が比較的小さいもの(H社製)と大きいもの(R社製)を選定した。また、比較のための川砂も、吸水率の大小で大井川産および鬼怒川産を選定した。粗骨材は、青梅産硬質砂岩砕石を用いた。骨材の性質を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを、混和剤はリグニンスルホン酸系 AE 減水剤および空気量調整剤を、また、練混ぜ水は、上水道水を用いた。

### 2.2 調合

調合は、水セメント比を 40 および 60%とし、60%については、単位水量を 185kg/m<sup>3</sup>を基準とし、175 および 195 kg/m<sup>3</sup>も計画した。目標スランプは 18±1.5cm、目標空気量は 3.0±1.5%とした。コンクリートの調合およびフレッシュ性状を表-2に示す。

### 2.3 供試体の寸法および養生方法

乾燥収縮による長さ変化測定用の供試体は 100×100×400mm の角柱とし、調合条件ごとに 3 体ずつとした。コンクリート練り上がり後速やかに供試体を成形し、20±2.0℃の室内に静置し、水分の蒸発を防ぐようビニールシートで覆って養生を行った。成形 24 時間後に脱型し、材齢 7 日まで標準養生を行った。

### 2.4 圧縮強度および静弾性係数試験方法

圧縮強度は、JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」によって、静弾性係数は、コンプレッソメータ(標点距離 100mm)を用いて JIS A1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」によって試験した。供試体の数は、調合要因および養生条件ごとに 2 体とし、試験材齢は 7, 14, 28, 91, 182 日とし、材齢 7 日まで標準養生(水中, 20℃)した後、試験開始まで標準養生および

\*1 宇都宮大学大学院工学研究科 博士前期課程 (学生会員)

\*2 宇都宮大学大学院工学研究科 教授・工博 (正会員)

\*3 宇都宮大学大学院工学研究科 教授・博士(工学) (正会員)

\*4 内モン工業大学土木工務学院建築学科 助教授・博士(工学) (非会員)

20±2.0℃, 相対湿度 60±3.0%RH の室内で気中養生を行った。

### 2.5 乾燥収縮試験方法および環境条件

乾燥収縮による長さ変化の測定は, JIS A1129-3:2001 「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法—第3部:ダイヤルゲージ方法」によって行った。標点距離は約 420mm とし, 標準養生後の材齢 7 日の供試体の測定値を基長とした。測定は, 基長時を乾燥日数の基点と定め, 乾燥日数 1, 3, 7, 14, 21, 28, 49, 56, 70, 77, 91, 182 日で行った。また, 恒温恒湿チャンバーは, 温度 20±2.0℃, 相対湿度 60±3.0%RH で, 風速は 0.5m/sec 以下のほぼ無風条件で, 風速による影響はないものとした。

表-1 骨材の物性値

記号	種類	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	
SH	高炉スラグ	H社	2.68	0.73	2.73
SR		R社	2.56	2.56	2.52
KO	川砂	大井川産	2.51	1.79	2.75
KK		鬼怒川産	2.50	2.24	3.03
G	硬質砂岩砕石	青梅産	2.64	0.57	6.83

表-2 コンクリートの調合とフレッシュ性状

調合	W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )				Ad Cx (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G			
SH-40	40	45	185	463	775	936	0.57	20.5	2.6
SR-40	40	45	185	463	755	936	0.57	19.5	4.2
KO-40	40	44	185	463	735	936	0.57	20.0	1.6
KK-40	40	44	185	463	735	936	0.57	20.0	2.0
SH-60-175	60	45	175	292	819	1019	0.25	18.5	3.7
KO-60-175	60	43	175	292	776	1019	0.25	21.0	1.5
KK-60-175	60	43	175	292	776	1019	0.25	19.0	0.9
SH-60-185	60	45	185	308	811	986	0.25	18.0	0.7
SR-60-185	60	45	185	308	790	986	0.25	20.0	3.2
KO-60-185	60	44	185	308	769	986	0.25	16.5	4.5
KK-60-185	60	44	185	308	769	986	0.25	20.0	1.2
SH-60-195	60	46	195	325	804	953	0.25	16.5	6.2
KO-60-195	60	44	195	325	762	953	0.25	18.5	2.3
KK-60-195	60	44	195	325	762	953	0.25	17.0	2.5

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度および静弾性係数の試験結果を表-3 に示す。また, 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説(2010)」<sup>5)</sup>の計算式(NEW RC式)を用いて, 静弾性係数を計算した結果を図-1 に示す。KO を基準とした静弾性係数の比は, KK が 1.02, SH が 1.12, SR が 1.03 となり, 高炉スラグ細骨材を使用した場合は川砂を使用した場合よりも大きくなる傾向にあることがわかる。また, 単位水量の違いによる静弾性係数の差はあまりみられない。表-3 から, 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は, 川砂を使用したコンクリートよりやや小さくなる傾向にあることが認められる。

#### 3.2 細骨材の違いによる乾燥収縮ひずみの結果

乾燥収縮ひずみおよび質量変化率の結果を図-2 に示す。調合ごとに KO の 182 日を基準とした場合の乾燥収縮ひずみの差は KK が  $-14 \times 10^{-6}$  ~  $+172 \times 10^{-6}$ , SH が  $-41 \times 10^{-6}$  ~  $-111 \times 10^{-6}$ , SR が  $-55 \times 10^{-6}$  ~  $-60 \times 10^{-6}$  であり, 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは, 川砂を用いた場合よりも乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向に

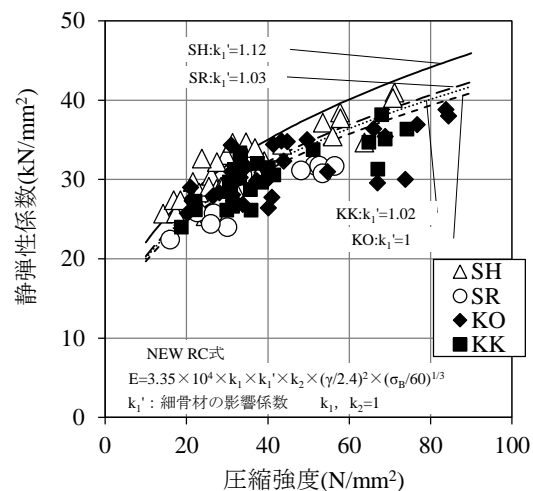


図-1 圧縮強度と静弾性係数の関係

表-3 圧縮強度および静弾性係数試験結果

調合	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )								静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )							
	標準養生				気中養生				標準養生				気中養生			
	7日	28日	91日	182日	14日	28日	91日	182日	7日	28日	91日	182日	14日	28日	91日	182日
SH-40	43.5	57.8	71.2	70.8	53.5	57.8	63.8	55.9	34.3	38.5	40.9	40.3	37.1	37.7	34.7	35.4
SR-40	33.8	51.5	-	-	48.2	52.7	56.4	53.4	30.5	31.8	-	-	31.1	31.7	31.7	30.8
KO-40	54.7	68.9	83.8	84.4	66.0	73.8	76.8	67.0	31.0	35.4	38.8	38.0	36.4	30.0	36.9	29.6
KK-40	51.2	68.0	-	-	64.9	68.9	74.2	67.0	33.7	38.2	-	-	34.7	35.1	36.4	31.3
SH-60-175	14.3	21.6	29.7	31.3	18.5	23.0	25.8	24.7	25.7	29.7	33.1	34.6	27.4	28.3	25.9	25.4
KO-60-175	21.4	31.0	41.4	44.0	28.1	32.9	37.3	31.7	27.3	34.3	34.4	32.3	28.3	31.1	29.8	27.4
KK-60-175	18.8	31.8	-	-	30.9	33.0	38.5	31.4	24.0	31.2	-	-	28.9	30.2	29.6	26.6
SH-60-185	16.8	26.1	34.6	39.1	23.7	27.4	33.0	30.6	27.4	30.4	34.7	32.3	32.6	28.8	30.6	29.0
SR-60-185	16.0	25.3	-	-	22.6	26.7	30.1	26.0	22.4	25.3	-	-	25.8	25.7	24.0	24.4
KO-60-185	21.0	33.2	44.8	49.7	31.1	39.6	41.0	31.3	29.0	30.2	34.8	35.0	31.0	29.9	27.8	28.1
KK-60-185	22.2	33.3	-	-	30.5	37.4	41.5	33.2	26.2	33.0	-	-	29.7	32.0	30.6	31.6
SH-60-195	17.4	27.5	36.8	37.6	25.5	28.5	32.1	28.8	25.7	32.2	33.9	30.5	29.1	29.1	28.7	29.0
KO-60-195	20.2	34.6	43.4	40.5	26.5	31.0	40.1	33.9	25.7	31.6	34.9	30.4	27.9	27.9	26.4	26.9
KK-60-195	22.1	33.2	-	-	29.9	35.9	40.1	35.8	27.2	33.4	-	-	26.1	26.1	31.5	28.7

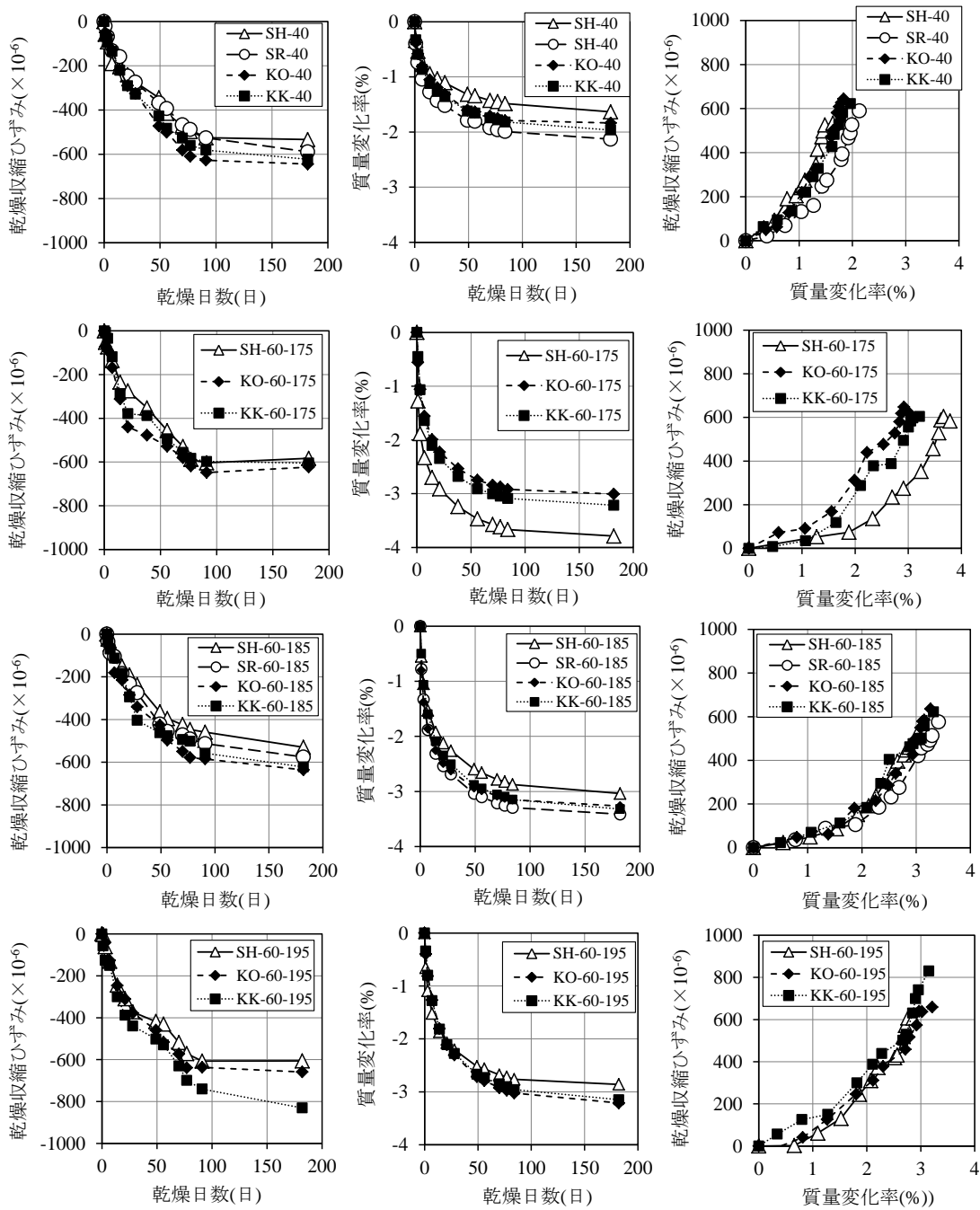


図-2 乾燥収縮ひずみおよび質量変化率の結果

ある。

質量変化率の差はKKが $-0.1\% \sim +0.2\%$ 、SHが $-0.4\% \sim +0.8\%$ 、SRが $+0.1\% \sim +0.3\%$ である。細骨材の吸水率が高いほど骨材中の含水量が増し、その分コンクリートの含水量が増して質量変化率が大きくなると考えられる。しかし、質量変化率に対する乾燥収縮ひずみは必ずしも同一ではなく、細骨材の吸水率が乾燥収縮を支配するわけではないという結果が得られた。

### 3.3 水セメント比が乾燥収縮および質量変化に及ぼす影響

乾燥収縮ひずみおよび質量変化率に及ぼす水セメント比の影響を図-3に示す。水セメント比が異なることで

乾燥収縮ひずみに及ぼす影響はあまりみられなかった。

一方、質量変化率は水セメント比が大きい程大きくなる傾向がみられ、質量変化に対する乾燥収縮ひずみの関係は、同量の水が失われたときには水セメント比が小さい方が乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向を示している。

### 3.4 単位水量が乾燥収縮および質量変化に及ぼす影響

乾燥収縮および質量変化率に及ぼす単位水量の影響を図-4に示す。単位水量別の比較では、各細骨材別に $185\text{kg/m}^3$ を基準とした場合、差は小さく、単位水量が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響はあまりみられなかった。

質量変化率も同様に、単位水量による影響はあまりみられなかった。

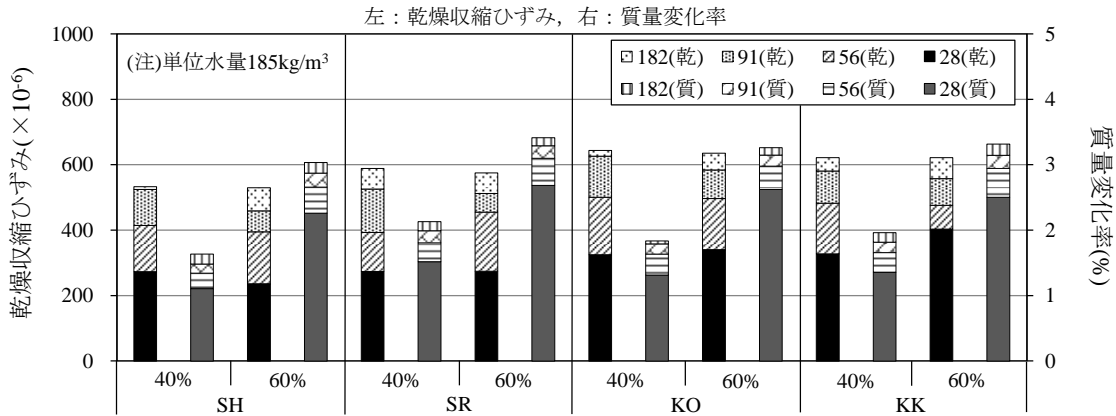


図-3 乾燥収縮ひずみおよび質量変化率に及ぼす水セメント比の影響

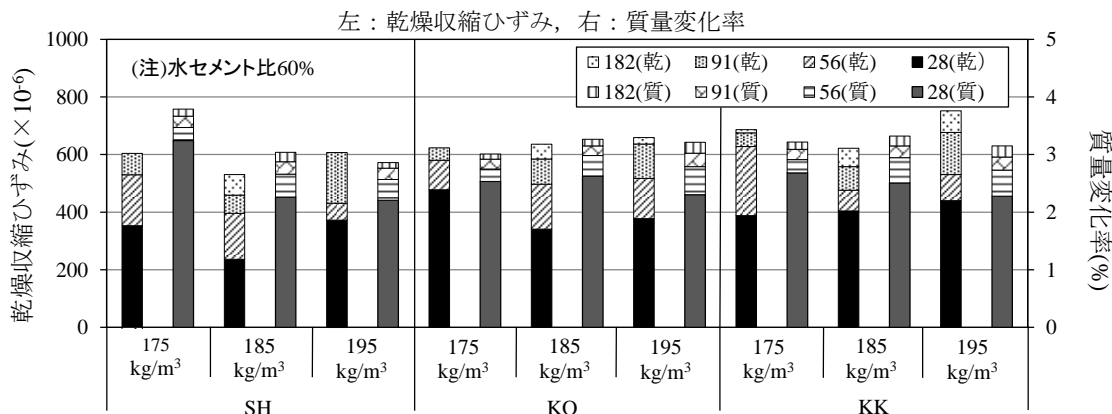


図-4 乾燥収縮ひずみおよび質量変化率に及ぼす単位水量の影響

4. 調合要因および細骨材の影響に関する考察

4.1 検討方針

細骨材の影響を抽出するために、指針式に基づき、乾燥収縮速度、単位水量および調合の影響、細骨材の影響の順に検討することとする。

指針式<sup>1)</sup>は、次式(1)~(7)で示される。

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{sh\infty} \cdot \left(\frac{t}{\alpha+t}\right)^\beta \quad (1)$$

$$\epsilon_{sh\infty} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (2)$$

$$K_1 = (7.4 \cdot W - 0.7 \cdot C - 0.55 \cdot G + 270) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (3)$$

$$K_2 = 1.17 \cdot t_0^{-0.08} \quad (4)$$

$$K_3 = 1.28 \cdot \{1 - (h/100)^3\} \quad (40\% \leq h < 99\%) \quad (5)$$

$$\alpha = 0.16 \cdot (V/S)^{1.8} \quad (6)$$

$$\beta = 1.4 \cdot (V/S)^{-0.18} \quad (7)$$

ここに、 $\epsilon_{sh}(t)$  : 乾燥日数  $t$  日の収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )

$\epsilon_{sh\infty}$  : 最終乾燥収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )

$t_0$  : 乾燥開始材齢(日)

$K_1$  : コンクリートの調合に関する係数

$K_2$  : 乾燥開始材齢に関する係数

$K_3$  : 相対湿度に関する係数

$W$  : 単位水量( $kg/m^3$ )

$C$  : 単位セメント量( $kg/m^3$ )

$G$  : 単位粗骨材量( $kg/m^3$ )

$\gamma_1$  : 骨材の種類の影響を表す修正係数

$\gamma_2$  : セメントの種類の影響を表す修正係数

$\gamma_3$  : 混和材の種類の影響を表す修正係数

$\alpha, \beta$  : 乾燥の進行度を表す係数

$V/S$  : 体積表面積比( $mm$ )で体積  $V(m^3)$  と表面積  $S(m^2)$  の比を表す

最終乾燥収縮ひずみ  $\epsilon_{sh\infty}$  は、コンクリートの材料の調合に関する係数  $K_1$ 、乾燥開始材齢に関する係数  $K_2$ 、相対湿度に関する係数  $K_3$  のパラメータで表されるが、本実験では、乾燥開始材齢が  $t_0=7$  であるので  $K_2=1.0$ 、相対湿度が  $h=60\%RH$  であるので  $K_3=1.0$ 、セメントの種類の影響については、普通ポルトランドセメントを使用しているため  $\gamma_2=1.0$ 、混和材は使用していないので  $\gamma_3=1.0$  となる。

4.2 乾燥収縮速度に関する検討

式(1)において  $f(t)=\{t/(t+\alpha)\}^\beta$  とおくと、 $V/S=22.2$  であるので、各乾燥日数に対して、 $f(t)$  が求まる。なお、乾燥速度は、必ずしも各乾燥日数において式(1)のような分数関数式で表せるとは限らないが、今回は指針式を適用し、各乾燥日数で実測値と推定値が適合するか否かを検討した。

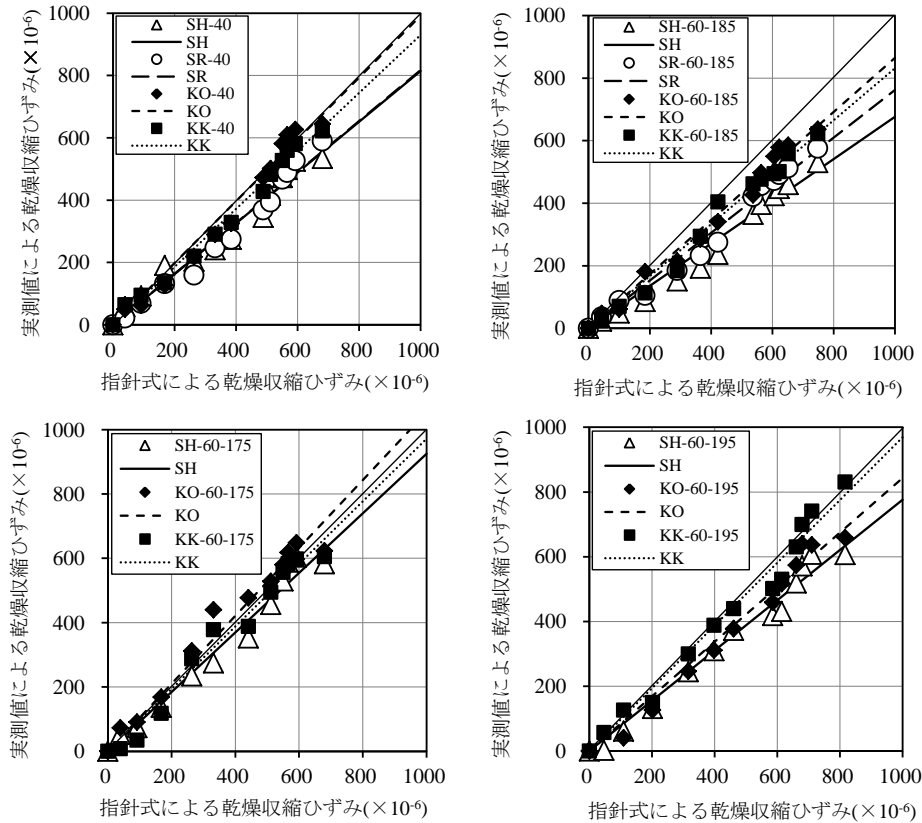


図-5 乾燥収縮ひずみの実測値と指針式による予測値の関係

図-5 に実測値による乾燥収縮ひずみと指針式による乾燥収縮ひずみの予測値の関係を示す。

ここで、細骨材の違いによる最終乾燥収縮ひずみ  $\epsilon_{sh\infty}$  を実測値から推定するため、式(8)を用いて、実測値  $\epsilon_{sh}(t)$ 、 $\epsilon_{sh\infty}$  および  $f(t)$  から最小二乗法により係数  $a$  の値を求めた。

$$\epsilon_{sh}(t) = a \cdot \epsilon_{sh\infty} \cdot f(t) \quad (8)$$

表-4 に式(8)によって求めた  $a$  の値とその標準偏差の値を示す。各乾燥日数における標準偏差はいずれも  $50 \times 10^{-6}$  以下であり、乾燥収縮速度については、指針式のような分数関数式を用いても誤差は小さく、今回は指針式によることとし、 $\alpha=42.5$  および  $\beta=0.80$  を用いることとする。

#### 4.3 単位水量および調合の影響に関する検討

単位水量、単位セメント量などの調合要因による影響を  $\gamma_0$  と表し、細骨材の影響を  $\gamma_1$  とおくと、粗骨材は砕石を使用しているため  $\gamma_1=1.0$  であり、乾燥日数  $t$  において  $\epsilon_{sh}(t) = \gamma_0 \cdot \gamma_1 \cdot f(t)$  と表される。

指針式においては、 $\gamma_0 = 7.4 \cdot W - 0.7 \cdot C - 0.55 \cdot G + 270$  としているが、このとき各調合要因をみてみると、単位水量が  $175 \sim 195 \text{kg/m}^3$  に変化し、単位セメント量が  $292 \sim 463 \text{kg/m}^3$  に変化しているため  $\gamma_0$  は  $800 \sim 961 \times 10^{-6}$  の範囲にあり平均が  $861 \times 10^{-6}$ 、標準偏差が  $77 \times 10^{-6}$  となる。一方、実測値から逆算した  $\gamma_0$  は、 $776 \sim 819 \times 10^{-6}$  の範囲

表-4 係数  $a$  の値と標準偏差の値

調合	$a$	標準偏差 ( $\times 10^{-6}$ )
SH-40	0.81	33
SR-40	0.82	30
KO-40	0.99	35
KK-40	0.93	23
SH-60-175	0.93	37
KO-60-175	1.05	43
KK-60-175	0.97	39
SH-60-185	0.68	31
SR-60-185	0.76	27
KO-60-185	0.87	26
KK-60-185	0.83	28
SH-60-195	0.78	31
KO-60-195	0.84	36
KK-60-195	0.97	38

にあり、平均が  $803 \times 10^{-6}$ 、標準偏差が  $20 \times 10^{-6}$  である。よって、調合要因による影響  $\gamma_0$  は、指針式による予測値が実測値より大きく、ばらつきも大きい。

細骨材の影響を表す係数  $\gamma_1$  も予測値に影響をしていると考えられるので、式(8)によって求めた  $a$  の値を用いて、 $\gamma_1 = a$  とし、 $\gamma_0 = p \cdot W + q \cdot C + r$  を  $\epsilon_{sh\infty}$ 、 $W$  および  $C$  で重回帰し、 $p$ 、 $q$ 、 $r$  を求めると式(9)のように表せる。

$$\gamma_0 = 2.62 \cdot W - 0.32 \cdot C + 378 \quad (9)$$

単位水量の影響は、 $W=175 \sim 195 \text{kg/m}^3$  (単位水量の差  $d$ )

$W=20\text{kg/m}^3$  の範囲における乾燥収縮ひずみの差が、指針式では  $148 \times 10^{-6}$ 、本補正式では  $52 \times 10^{-6}$  であり、単位水量が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は、補正式の方が指針式より小さくなり、実験結果によく合ってくる。

この結果を既往の結果と比較すると、JASS 5 の解説図<sup>6)</sup>に示される乾燥収縮ひずみと単位水量の関係は、単位水量  $175 \sim 195\text{kg/m}^3$  の範囲で傾向として  $100 \sim 150 \times 10^{-6}$  程度の差があるが、今回の実験結果では  $52 \times 10^{-6}$  である。JASS 5 の解説図の単位水量は必ずしも同一条件のものとは限らないが、同一条件で行った既往の研究<sup>7), 8)</sup>と比較すると、本実験結果と概ね一致する。

以上より、 $K_1$  の調合要因のうち、単位水量、単位セメント量および水セメント比が、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は小さいといえる。

#### 4.4 細骨材の影響に関する検討

式(9)を用いると、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの終局値は  $\epsilon_{sh,0} = \gamma_0 \cdot \gamma_1'$  と表され、 $\epsilon_{sh}(t) = \gamma_0 \cdot \gamma_1' \cdot f(t)$  において実測値を近似して  $\gamma_1'$  を求めた。このとき  $\gamma_1'$  の値の比は、細骨材に KO を用いた場合を  $\gamma_1' = 1$  とすると、KK が  $\gamma_1' = 0.92 \sim 1.15$  (平均 0.99)、SH が  $\gamma_1' = 0.78 \sim 0.92$  (平均 0.85)、SR が  $\gamma_1' = 0.83 \sim 0.88$  (平均 0.86) となり、コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす細骨材の影響を表す修正係数  $\gamma_1'$  が求まる。このようにして求めた  $\gamma_1'$  より、高炉スラグ細骨材を用いた場合の乾燥収縮ひずみは川砂を用いた場合よりも小さくなるのがわかる。

図-6 に調合要因の影響を表す  $\gamma_0$  および細骨材の種類の影響を表す修正係数  $\gamma_1'$  によって指針式の修正を行った予測値と実測値の関係を示す。図-6 より、従来の指針式を用いた図-5 に示した場合に比べ、実測値との相関が非常に高くなり、細骨材の種類によって  $\gamma_1'$  の値に違いが生じたことが認められる。

#### 5. まとめ

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- (1)コンクリートの静弾性係数は、 $KO < KK < SR < SH$  の順に高くなり、乾燥収縮ひずみが小さい順になっている。
- (2)単位水量が、乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は小さい。
- (3)水セメント比が、乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は小さいが、質量変化率に及ぼす影響は大きい。水セメント比が大きいほど、若材齢時の質量減少が大きく、材齢が経つに従って質量減少の差は小さくなっていく。
- (4)本実験に基づく、調合要因が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響  $\gamma_0$  は、次式で表すことができる。

$$\gamma_0 = 2.62 \cdot W - 0.32 \cdot C + 378$$

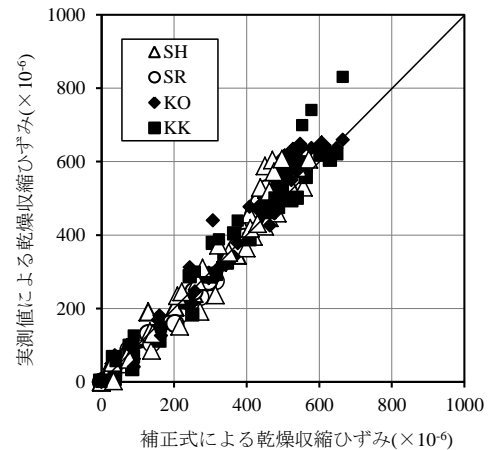


図-6 実測値と補正式による予測値の関係

- (5)コンクリートの乾燥収縮ひずみは、川砂を用いた場合よりも、高炉スラグ細骨材を用いた場合の方が小さくなる傾向にあり、川砂 KO を基準にしたときの比は、同じ川砂では KK が  $0.92 \sim 1.15$  (平均 0.99)、であるが、吸水率の小さい高炉スラグ細骨材 SH が  $0.78 \sim 0.92$  (平均 0.85)、吸水率の大きい高炉スラグ細骨材 SR が  $0.83 \sim 0.88$  (平均 0.86) となり、同じ岩種内における吸水率の違いによる差は小さい。

#### 謝辞

本研究は、日本建築学会の高炉スラグ細骨材指針改定小委員会の活動の一環として行ったものであり、関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本建築学会：高炉スラグ細骨材を用いるコンクリート施工指針・同解説，1983
- 2) 社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針(案)・同解説，pp.53-60，2006
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002
- 4) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON: CEB-FIP Model Code 90, Thomas Telford, 1990
- 5) 社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.50-52，2010
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説(JASS5) 鉄筋コンクリート工事，p.18，pp.232-236，2009
- 7) 塩見伊津夫，榊田佳寛，阿部道彦，安田正雪：高強度コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす諸要因の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.14, No.1, pp487-492，1992
- 8) 大野吉昭，榊田佳寛，鹿毛忠継：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす粗骨材および調合の影響，日本建築学会構造系論文集，No.668，pp.1729-1735，2011，10