

## 論文 コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材混入量の影響

宮澤伸吾\*1・北田悦子\*2・井田教師\*3

**要旨:**セメントペーストおよび骨材混入量の異なるコンクリートについて凝結の始発から長期材齢にわたり自己収縮ひずみの測定を行ない、自己収縮に及ぼす骨材混入量の影響について検討した。また、コンクリートをセメントペーストおよび骨材の二相材料と考えて、既往の複合則を用いて骨材量が自己収縮に及ぼす影響について検討した。その結果、自己収縮ひずみは骨材の混入量が多いほど小さくなり、骨材の影響は複合則により概ね予測できることが明らかになった。

**キーワード:**高強度コンクリート、自己収縮、骨材混入量、複合則

### 1. はじめに

高強度コンクリートではセメントの水和に起因する自己収縮が大きくなることが明らかにされて以来<sup>1)</sup>、数多くの自己収縮に関する研究が行われている。自己収縮ひずみの予測方法としては、一般的な骨材混入量のコンクリートについては既に予測式が提案されている<sup>2)</sup>。コンクリートの自己収縮ひずみはペースト部分で生じるため、骨材混入量の影響を著しく受ける。コンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料として考えれば、既往の複合則により骨材混入の影響を予測できることが指摘されている<sup>3)</sup>。しかし、この報告では、材齢1日以前に生じる自己収縮は考慮されていない。高強度コンクリートでは、凝結時から材齢1日程度までに自己収縮ひずみが著しく大きくなる場合が多い。そこで、本研究ではコンクリートの骨材混入量を変化させたコンクリートの自己収縮ひずみを凝結の始発から測定し、材齢1日までの自己収縮ひずみを含めた実測値から自己収縮に与える骨材混入量の影響を調べた。さらに既往の複合則による自己収縮ひずみの計算値と実測値の比較を行い、骨材量の影響の予測法を検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

##### (1) シリーズ1

普通ポルトランドセメント、葛生産砕石（硬質砂岩、絶乾比重2.60、吸水率1.00%、粗粒率6.77、最大寸法20mm）、葛生産砕砂（硬質砂岩、絶乾比重2.50、吸水率1.19%、粗粒率2.86）、混和剤としてポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤(W/C=20%および30%)およびリグニン系AE剤(W/C=50%)を用いた。配合は表-1に示すとおり、水セメント比を20%、30%および50%とし、セメントペーストおよび骨材量の異なる2種類のコンクリート（一般的な骨材量とその1/2の骨材量）を製造した。

##### (2) シリーズ2

普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび低発熱ポルトランドセメントを用いた。川砂(比重2.60、吸水率1.76%、粗粒率3.15)、川砂利(比重2.75、吸水率1.26%、粗粒率7.03、最大寸法25mm)、ポリカルボン酸塩系の高性能AE減水剤を用い、水セメント比30%の一般的な骨材量のコンクリートを製造した。コンクリートの配合は表-2に、セメントの鉱物組成等は表-3に示す。

\*1 足利工業大学助教授 工学部土木工学科 工博(正会員)  
 \*2 足利工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻  
 \*3 足利工業大学 工学部土木工学科

## 2. 2 試験方法

自己収縮ひずみの測定はJCI自己収縮研究委員会の方法<sup>4)</sup>により行った(図-1参照)。ただし、本研究ではコンクリートおよびセメントペーストの測定値を直接比較するためにセメントペーストについても10×10×40cm供試体を用い、凝結試験はコンクリートの凝結試験の場合と同様の方法で行った。なお、セメントの水和熱により若干の温度上昇があるので、熱膨張係数をコンクリートでは10×10<sup>-6</sup>/°C、ペーストでは20

×10<sup>-6</sup>/°C、骨材を通常の半分とした場合では15×10<sup>-6</sup>/°Cとして長さの補正を行った。

セメントペーストのヤング係数の測定にはΦ5×10cm供試体を用いた。脱型後直ちにアルミ箔粘着テープで供試体をシールし、温度20°Cの養生室で養生し、材齢1日、7日および28日で測定した。

骨材のヤング係数試験の供試体には、砕石母岩からΦ3×6cmのコアを抜き取り、表面を研磨したものを使用した。

表-1 コンクリートの配合(シリーズ1)

水セメント比 W/C (%)	骨材 体積 濃度	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤* (c×%)	スランプ* (cm)	スランプ* フー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	凝結時間	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G						始発 時間 (分)	終結 時間 (分)
20	0.524	38	170	850	505	856	2.2	20.0	40×26	2.0	24.6	274	405
20	0.262	38	273	1363	253	428	2.0	—	18×16	3.7	20.8	261	490
20	0.000	—	387	1937	0	0	1.7	—	16×17	6.0	20.4	303	480
30	0.621	41	165	550	646	966	0.6	7.0	—	2.5	13.0	369	473
30	0.310	41	319	1063	323	483	0.4	23.5	43×42	2.5	19.8	306	421
30	0.000	—	487	1622	0	0	0.4	—	18×18	4.0	21.0	308	443
50	0.662	43	170	340	722	996	0.03	6.0	—	5.0	20.5	295	440
50	0.331	43	376	752	361	498	0.01	—	—	1.2	16.0	426	573
50	0.000	—	612	1227	0	0	0.01	—	22×22	1.5	19.7	433	564

注) \*: W/C=20, 30%は高性能AE減水剤, W/C=50%はAE剤を使用した。

表-2 コンクリートの配合(シリーズ2)

セメント の種類	水セメント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				高性能 AE 減水剤 (c×%)	スランプ* (cm)	スランプ* フー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G					
普通	30	37	165	550	606	1092	1.0	19.5	37×32	2.3	24.7
中庸熱	30	37	165	550	611	1097	1.0	22.5	46×44	2.0	24.6
低発熱	30	37	165	550	611	1097	1.0	21.5	33×26	2.3	24.1

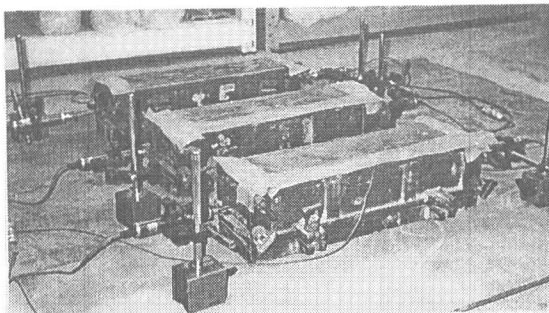


図-1 自己収縮の測定状況(凝結の始発より材齢24時間まで)

表-3 セメントの鉱物組成(シリーズ2)

セメント 種類	C <sub>3</sub> S (%)	C <sub>2</sub> S (%)	C <sub>3</sub> A (%)	C <sub>4</sub> AF (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
普通	64.9	11.0	7.1	8.2	3260
中庸熱	50.8	29.5	0.9	12.8	3220
低発熱	22.4	57.8	3.3	9.7	3270

### 3. 試験結果及び考察

#### 3. 1 骨材混入量の影響 (シリーズ1)

図-2および図-3は、凝結の始発から材齢24時間程度までにおける自己収縮ひずみの測定結果を示している。水セメント比20%および30%のいずれの場合も、凝結の始発から材齢12時間程度までは極めて自己収縮ひずみの増加速度が大きい。いずれの配合の場合もセメントペーストの自己収縮が最も大きく、骨材の混入率が大きくなるに従い自己収縮は小さくなる。水セメント比が小さい場合は自己収縮が外部拘束を受けるために生じる引張応力は材齢1日以前の若材齢に著しく増加することを考えると<sup>6)</sup>、材齢1日以前の若材齢に生じる自己収縮も含めて検討することが重要であると考えられる。なお、水セメント比50%の場合は、材齢24時間以内に生じる自己収縮ひずみは極めて小さいので無視できる。

図-4~図-6は、凝結の始発から材齢3~4ヶ月までの自己収縮ひずみを示している。いずれの配合についても、骨材の混入率が大きい程、自己収縮は小さくなっている。なお、自己収縮ひずみの測定期間中の供試体の質量変化率は最大でも0.01%程度以下と極めて小さく、乾燥および吸湿の影響は無視できると考えられる。

図-7は、材齢28日における自己収縮ひずみと水セメント比の関係を示している。セメントペーストおよびいずれの骨材混入率のコンクリ

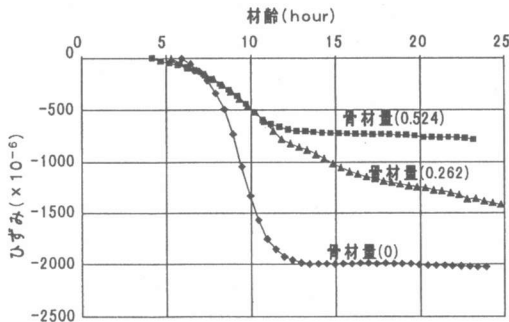


図-2 自己収縮ひずみの経時変化(W/C=20%, 24時間以前)

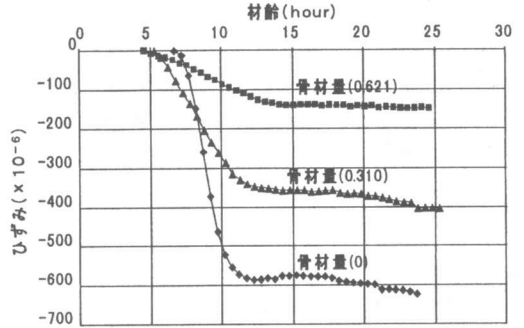


図-3 自己収縮ひずみの経時変化(W/C=30%, 24時間以前)

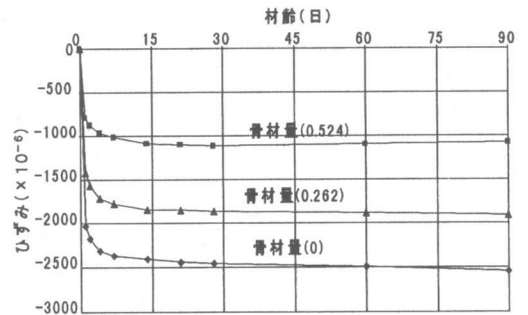


図-4 自己収縮ひずみの経時変化(W/C=20%)

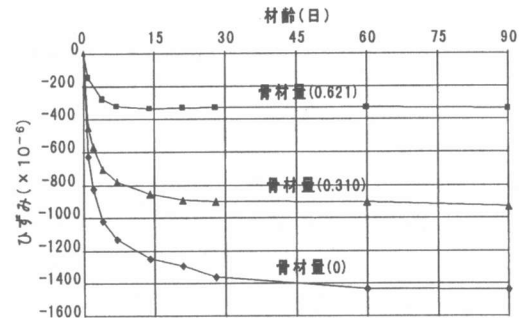


図-5 自己収縮ひずみの経時変化(W/C=30%)

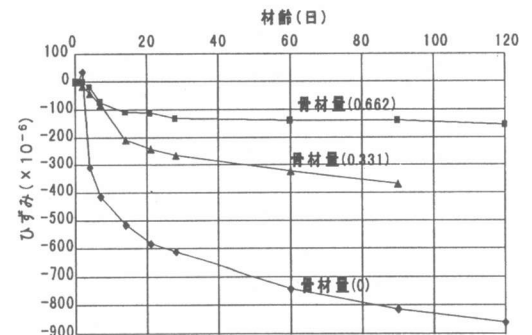


図-6 自己収縮ひずみの経時変化(W/C=50%)

ートの場合も、水セメント比が小さいほど自己収縮ひずみは著しく大きくなる。骨材を混入することによる自己収縮ひずみの低減率は、水セメント比が大きくなるに従い大きくなっている。これは、水セメント比が大きい場合の方が骨材混入率が大きく、またセメントペーストのヤング係数が小さいため骨材による拘束効果がより大きくなるためと考えられる。

コンクリートの自己収縮はセメントペースト部分で生じるので、骨材を混入するとセメントペーストの体積割合の減少および骨材の拘束効果により自己収縮は小さくなる。コンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料として、簡単なモデル化をし、コンクリートの諸物性を予測しようとする研究は古くから行われており、代表的なものとして乾燥収縮を扱ったHobbsのモデルがある<sup>9)</sup>。自己収縮についても、Hobbsモデルの適用性が検討されており、材齢1日以降に生じる自己収縮についてはその適用性が確認されている<sup>9)</sup>。しかし前述したように、水セメント比が小さいコンクリートでは材齢1日以前の自己収縮ひずみを含めて検討する必要がある。そこで、本研究では凝結の始発から測定された自己収縮ひずみの実測値を用いて、Hobbsモデルの適用性を検討し、直列モデルおよび並列モデルについても合わせて比較検討した。直列モデル(式(1))、並列モデル(式(2))およびHobbsモデル(式(3))は次式に示す通りである。

$$\epsilon_c / \epsilon_p = 1 - V_a \quad (1)$$

$$\epsilon_c / \epsilon_p = (1 - V_a) / \{ (E_a / E_p - 1) V_a + 1 \} \quad (2)$$

$$\epsilon_c / \epsilon_p = \frac{(1 - V_a) / (K_a / K_p + 1)}{1 + K_a / K_p + V_a (K_a / K_p - 1)} \quad (3)$$

ここで、

- $\epsilon_c$  : コンクリートの自己収縮ひずみ
- $\epsilon_p$  : セメントペーストの自己収縮ひずみ
- $V_a$  : 骨材の体積濃度
- $E_a$  : 骨材のヤング係数
- $E_p$  : セメントペーストのヤング係数
- $K_a$  : 骨材の体積弾性数

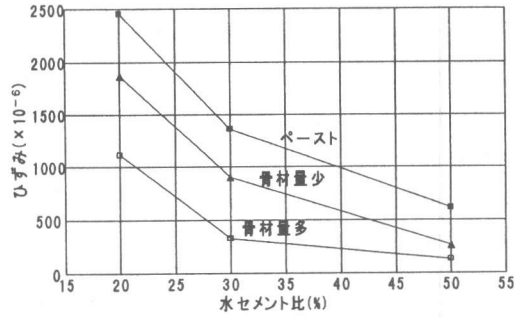


図-7 水セメント比の影響

$K_p$  : セメントペーストの体積弾性係数  
 $(K = E / 3 (1 - 2 \nu))$   
 $\nu$  : ポアソン比 (0.2と仮定)

図-8～図-13は、水セメント比および骨材量の異なるコンクリートの自己収縮を式(1)～(3)により算出した予測値と実測値を比較したものである。ここで、材齢1日、7日、28日におけるセメントペーストのヤング係数の実測値(表-4参照)および骨材のヤング係数の実測値(74.0kN/mm<sup>2</sup>)を用い、セメントペーストの自己収縮ひずみを基にコンクリートの自己収縮ひずみを算出した。自己収縮ひずみの実測値は概ね直列モデルと並列モデルによる予測値の間にあり、Hobbsモデルによりほぼ予測できることが示されている。

表-4 セメントペーストのヤング係数

水セメント比 (%)	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
	材齢 (日)		
	1	7	28
20	20.2	25.1	31.6
30	14.9	23.7	25.2
50	6.6	14.8	15.8

### 3.2 セメントの種類の影響(シリーズ2)

コンクリートの自己収縮はセメントの種類により著しく影響を受けることが明らかになっている<sup>1)</sup>。ここでは、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび低発熱ポルトランドセメントを用いた水セメント比30%の

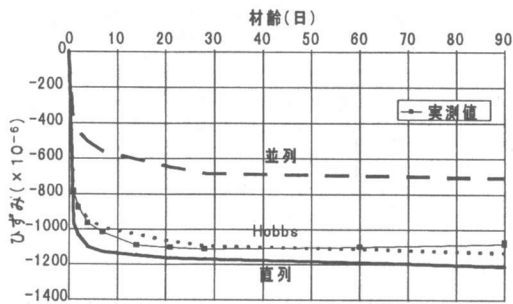


図-8 自己収縮の予測(W/C=20%,  $V_a=0.524$ )

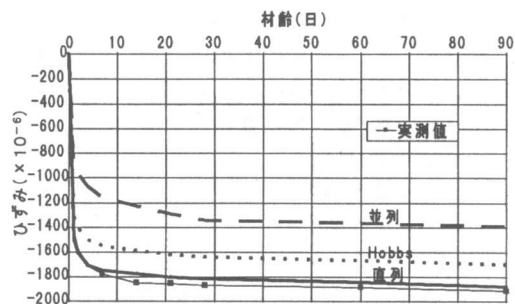


図-9 自己収縮の予測(W/C=20%,  $V_a=0.262$ )

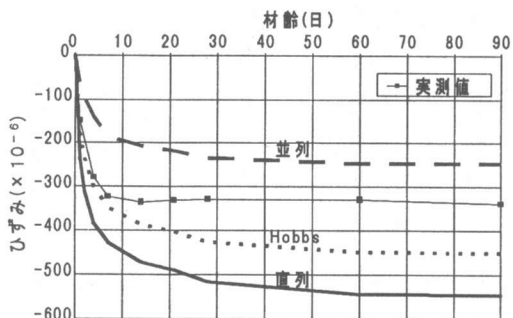


図-10 自己収縮の予測(W/C=30%,  $V_a=0.621$ )

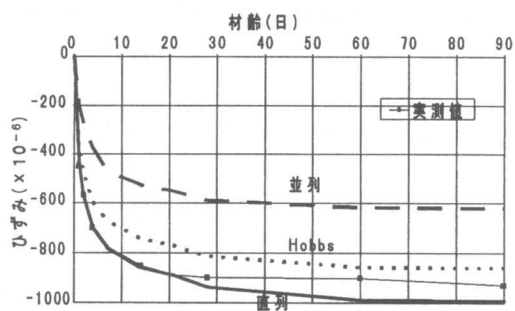


図-11 自己収縮の予測(W/C=30%,  $V_a=0.310$ )

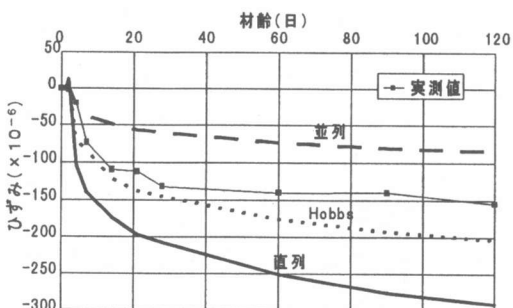


図-12 自己収縮の予測(W/C=50%,  $V_a=0.662$ )

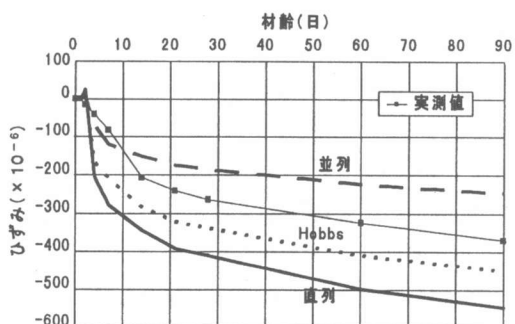


図-13 自己収縮の予測(W/C=50%,  $V_a=0.331$ )

コンクリートの自己収縮ひずみの予測を試みた。これらのセメントを用いたセメントペーストの自己収縮ひずみの測定値が得られていないので、著者らが既に提案している次式<sup>1)</sup>により推定した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{as} = & a \cdot \alpha_{C_3S}(t) \cdot (\%C_3S) \\ & + b \cdot \alpha_{C_2S}(t) \cdot (\%C_2S) \\ & + c \cdot \alpha_{C_3A}(t) \cdot (\%C_3A) \\ & + d \cdot \alpha_{C_4AF}(t) \cdot (\%C_4AF) \\ & + e \cdot (\text{Blaine}) + f \quad (\times 10^{-6}) \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、

$\varepsilon_{as}$  : セメントペーストの自己収縮ひずみ  
 $\alpha_i(t)$  : 各鉱物の反応率(%)  
 $(\%i)$  : 各鉱物の含有率(%) ( $i$ は鉱物の種類)  
 $(\text{Blaine})$  : セメントの比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )  
 $a, b, c, d, e, f$  : 定数

水セメント比30%の場合は、 $a = -0.069$ ,  $b = -0.114$ ,  $c = 1.566$ ,  $d = 1.558$ ,  $e = 0.224$ ,  $f = -1606$ とし<sup>1)</sup>, 鉱物の反応率を100%とし自己収縮ひずみの終局値を求めた。また、自己収縮ひずみの経時変化については次式<sup>2)</sup>を用いた。

$$\beta(t) = 1 - \exp(-a(t-t_0)^b) \quad (5)$$

ここで、

$\beta(t)$  : 自己収縮ひずみの進行速度を表す係数

a, b : 定数(表-5を参照)

t : 材齢(日)

$t_0$  : 凝結の始発(日)

図-14はセメントペーストの自己収縮ひずみの経時変化の実測値と計算値の比較を示している。図-15は式(4)および式(5)によりセメントペーストの自己収縮ひずみを求め、骨材の混入量の影響をHobbs式により評価してコンクリートの自己収縮ひずみを推定し実測値と比較したものであるが、両者は概ね一致しているといえる。

#### 4. まとめ

自己収縮ひずみの測定を凝結の始発から行ない骨材混入量の影響について検討した結果、自己収縮ひずみは骨材の混入量が多いほど小さくなり、骨材量の影響は既往の複合則により概ね予測できることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 田澤栄一・宮沢伸吾・重川幸司：水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少，セメント・コンクリート論文集，No. 45，pp.122-127，1991
- 2) 田澤栄一・宮沢伸吾：コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究，土木学会論文誌，No. 571/V-36，pp. 211-219，1997
- 3) 田澤栄一，宮沢伸吾，佐藤 剛，小西謙二郎：コンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.561-566，1992
- 4) 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
- 5) 田澤栄一・三浦智哉・宮沢伸吾：コンクリートのプラスチックひび割れに及ぼす自己収縮の影響，セメント・コンクリート論文集，No. 49，pp.1139-1144，1995

表-5 式(5)における係数

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

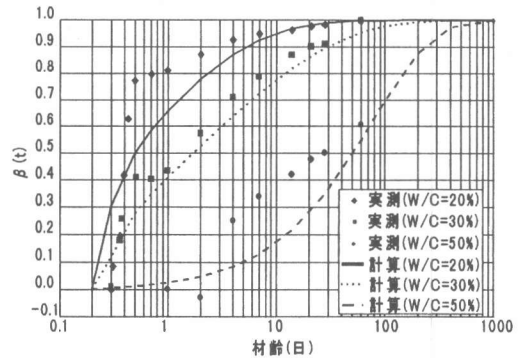


図-14 セメントペーストの自己収縮ひずみの経時変化の実測値と計算値の比較

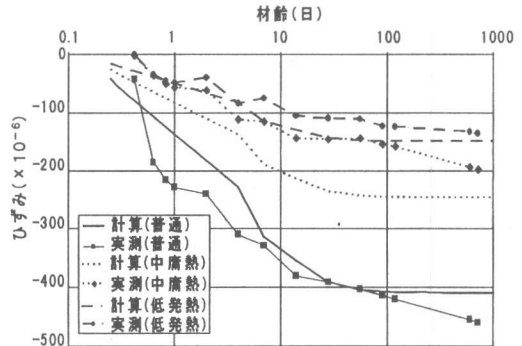


図-15 コンクリートの自己収縮ひずみの実測値と計算値の比較

- 6) Hobbs D.W. : Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.445-450, 1974
- 7) 田澤栄一・宮沢伸吾・三浦智哉・谷慎太郎：各種セメントを用いたセメントペーストの自己収縮，第21回セメント・コンクリート研究討議会論文報告集，No.13，pp.69-74，1994