

論文

[1094] コンクリートの自己収縮

正会員 田澤 栄一 (広島大学)
 正会員○宮沢 伸吾 (広島大学)
 佐藤 剛 (広島大学大学院)
 小西謙二郎 (広島大学)

1. まえがき

セメントの水和反応により生じるコンクリートの収縮は Autogenous shrinkage (自己収縮) として古くから知られているが [1] [2] [3], その大きさは高々 100×10^{-6} 程度とされ実用上ほとんど無視されてきた。著者らは、密封したセメントペースト供試体の長さ変化の測定結果から、高性能減水剤やシリカヒュームを混入して水セメント比を小さくすると極めて大きな自己収縮を生じることを報告した [4] [5] [6]。本研究では、特に低水セメント比のモルタルおよびコンクリートの自己収縮特性を明らかにすることを目的とした。また、自己収縮に及ぼす骨材混入の影響について明らかにするために、骨材の体積濃度および弾性係数を変化させた供試体の自己収縮ひずみを測定すると共に、種々の複合則を用いた推定値と比較検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメント、粗骨材には流紋岩質砕石 (最大寸法 20mm, 比重 2.67, 吸水率 0.87%)、細骨材には風化花崗岩系山砂 (比重 2.57, 吸水率 1.99%) および粗骨材と同一母岩の流紋岩質砕砂を使用した。骨材の弾性係数を大幅に変化させるために、 $\phi 5 \times 5$ mm のポリエチレンおよびフッ素ゴムを骨材として使用した。これらの骨材の力学的特性の試験結果を表 1 に示す。また、骨材を気泡で置き換えることを考え、発泡開始時間を遅延させるために熱処理 (350°C, 3 時間) した

表-1 骨材の力学的性質

	Rhyolite	Polyethylene	Rubber
E. (kgf/cm ²)	7.29×10^5	9.59×10^3	1.04×10^2
ν	0.227	0.459	(0.49)
K. (kgf/cm ²)	4.45×10^5	3.90×10^4	1.73×10^3

(): Assumed value

表-2 モルタルの配合

アルミニウム粉末を使用した。混和材料としては、リグニンスルホン酸塩系 AE 減水剤 (WR)、ナフタリン系高性能減水剤 (SP1)、アミノスルホン酸塩系高性能 AE 減水剤 (SP5)、微粉状のシリカヒューム (SF) (比表面積 2×10^5 cm²/g) を使用した。

W/C	Unit content (kg/m ³)				V.	Aggregate	W/C	Unit content (kg/m ³)				V.	Chemical admixture				
	W	C	A	ad.				W	C	SF	S			ad.			
0.30	487	1622	0	0	0	Rhyolite (2.5-5mm)	0.20	377	1695	188	0	57	0	Aminosulfonate type			
	438	1460	268	0	0.1			340	1532	170	247	51	0.1				
	340	1135	803	0	0.3			267	1201	133	747	41	0.3				
	243	810	1337	0	0.5			192	866	96	1257	29	0.5				
	438	1460	95	0	0.1			0.30	0.30	436	1454	0	267		0	0.1	Naphthalen sulfonate formaldehyde type
	343	1144	280	0	0.3	336	1122			0	793	0	0.3				
	243	810	474	0	0.5	240	800			0	1315	7.7	0.5				
	438	1460	216	0	0.1	0.50	0.50			282	563*	0	1408	1.4	0.54	Lignin type	
	341	1135	648	0	0.3					Aggregate: Decomposed granite (0-5mm)							
	243	810	1080	0	0.5			*: High-early strength Portland cement no mark: Ordinary Portland cement									

2. 2 配合

W/C=0.30のセメントペーストに弾性係数の異なる各種骨材を体積濃度0~0.5で混入しモルタルを作成した。またコンクリートの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響を調べるために、最大寸法20mmの流紋岩質砕石および山砂を用いW/C=0.20, 0.30, 0.50とした。これらの配合を表2. 3に示す。

空隙率を変化させる場合は、アルミニウム粉末をセメント重量の0.1%添加し、以下の方法で空隙率を変化させた。すなわち、鉛直に立てたφ5×20cm型枠に試料を打ち込み、ガラス板で蓋をした上に約10kgのおもりを載せて発泡による膨張を拘束

した。試料の打ち込み高さを変化させることにより空隙率を0~0.295と変化させた。

2. 3 養生方法

供試体は、表面仕上げを行った後、サラン樹脂シートを仕上げ面に密着させさらに濡れむしろで覆い、20±2°C, 95±5%R.H.の室内に静置した。材令1日で脱型し、水分の逸散を防ぐために直ちにアルミ箔粘着テープ(厚さ0.05mm)で供試体全面をシールし、アルミテープの継目の多い供試体端部をブチルゴム系の粘着テープでシールした。その後、20±1°Cの恒温室に静置した。

2. 4 測定方法

材令1日で脱型したのち直ちに基長をとり長さ変化の原点とした。4×4×16cm供試体の場合は両端部の中心にプラグを埋め込み、その他の形状の供試体についてはコンタクトチップを両側面に貼り付け、1/1000mmのダイヤルゲージを用いて供試体長手方向の長さ変化を測定した。同一条件の供試体を10×10×40cmでは2個、その他の場合は3個作製し、結果を平均値で示した

3. 長さ変化に関する複合則

コンクリートの自己収縮について複合則を用いて検討するために、ここではコンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料と考え、最も簡単なモデルである直列モデル(式(1))および並列モデル(式(2))を用いた。また、コンクリートの乾燥収縮に関して骨材の拘束効果を考慮したモデルが従来より種々提案されているが[7]、これらはいずれもほぼ同一の予測値を与えることが確認されている[8]。ここではHobbs[8]により提案されている式(3)を自己収縮についても適用できるか否かについて検討した。以上の式の誘導において骨材の自己収縮は0とした。なお直列モデルおよび並列モデルにより予測値の最大値および最小値を得ることができると考えられる(弾性係数比(E_a/E_p)により大小関係は逆になる)。

$$\varepsilon_c/\varepsilon_p = 1 - V_a \quad (1)$$

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

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

表-3 コンクリートの配合

Slump (cm)	Air (%)	w/c	Unit content. (kg/m ³)					ad. (%/C)
			W	C	SF	S	G	
25	1.1	0.20	160	720	80	443	1075	0.75 ^{*1}
20.5	2.2	0.30	195	649	0	586	993	0.40 ^{*2}
-	-		190	570	63	586	993	0.40 ^{*2}
6.0	3.5	0.50	180	360	0	799	1056	0.14 ^{*3}

*1 Aromatic aminosulfonate macromolecule (SP5)
*2 β-naphthalen sulfonate formaldehyde high condensates (SP1)
*3 Lignin sulfonic acid
Coarse aggregate: Rhyolite (Maximum size=20mm)
Fine aggregate: Decomposed granite
SF: Condensed silica fume

表-4 セメントペーストの力学的性質 (W/C=0.30, φ5x10cm, Sealed curing)

Age (days)	1	2	7	28
E _p (×10 ⁵ kgf/cm ²)	1.04	1.49	2.08	2.40
ν	0.197	0.235	0.268	0.241
K _p (×10 ⁵ kgf/cm ²)	0.572	0.937	1.49	1.54

ここに、 ϵ_c :コンクリートの自己収縮ひずみ、
 ϵ_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 :骨材の静弾性係数、
 E_p :セメントペーストの静弾性係数、
 K_a :骨材の体積弾性係数、
 K_p :セメントペーストの体積弾性係数

$$(K = E/3(1-2\nu))$$

なお、セメントペーストの静弾性係数は表4に示したように材令と共に変化するが、対象とする全期間における弾性係数の平均値を用いて計算した場合と、弾性係数を材令ごとに変化させながら逐次計算した場合とを比較した結果、両者に大きな差は認められなかったため前者の方法で計算した。

4. 結果および考察

4.1 自己収縮に及ぼす骨材の影響

図1~4は、セメントペーストに弾性係数の異なる各種骨材を体積濃度0~0.5で混入した4x4x16cmモルタル供試体の自己収縮ひずみの測定結果を示したものである。いずれの骨材を用いた場合も、骨材の体積濃度の増加と共に自己収縮は減少している。図5は、アルミ粉末の混入により空隙率を変化させたφ5x20cmのセメントペーストについての測定結果であるが、空隙率が0.1~0.3程度の範囲では自己収縮ひずみは空隙率によらずほぼ一定であった。

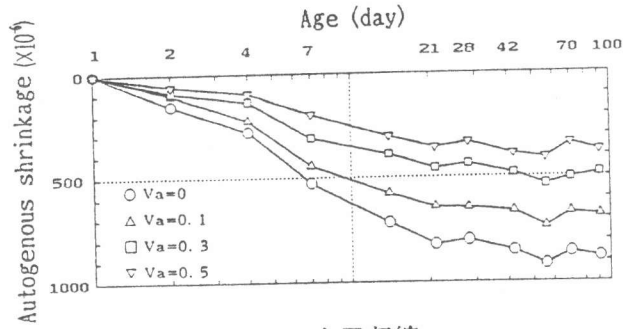


図-1 モルタルの自己収縮
(流紋岩, W/C=0.30, 4x4x16cm)

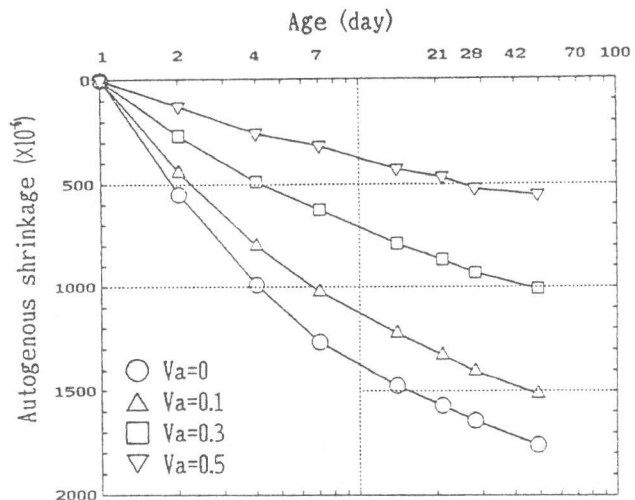


図-2 モルタルの自己収縮
(山砂, W/(C+SF)=0.20, SF/(C+SF)=0.10, 4x4x16cm)

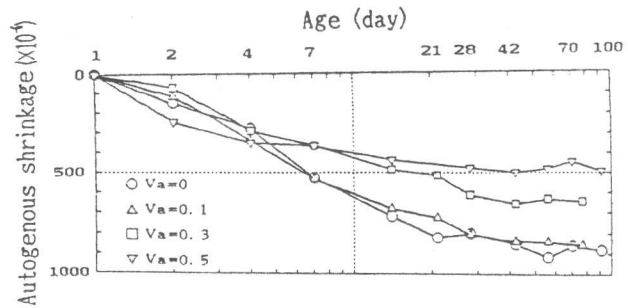


図-3 モルタルの自己収縮
(ポリエチレン, W/C=0.30, 4x4x16cm)

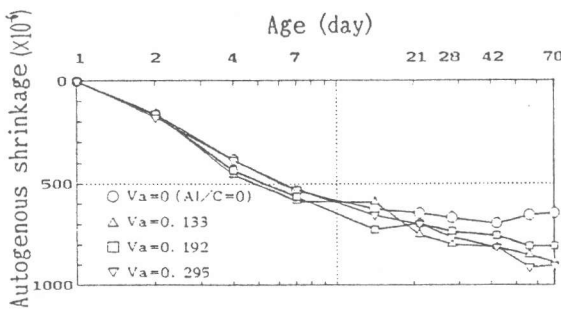


図-5 セメントペーストの自己収縮
(Al粉末, W/C=0.30, φ5x20cm)

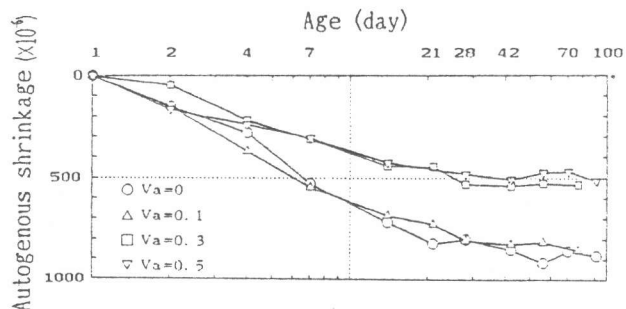


図-4 モルタルの自己収縮
(珪素ガラス, W/C=0.30, 4x4x16cm)

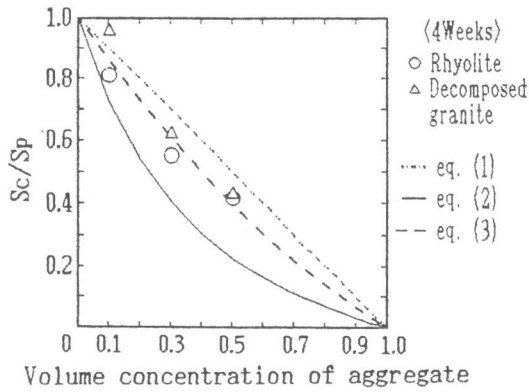


図-6 自己収縮に及ぼす骨材量の影響
(流紋岩・山砂, W/C=0.30, 4x4x16cm)

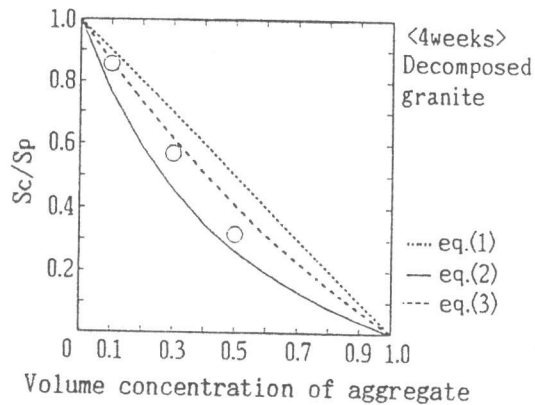


図-7 自己収縮に及ぼす骨材量の影響
(山砂, W/(C+SF)=0.20, SF/(C+SF)=0.10, 4x4x16cm)

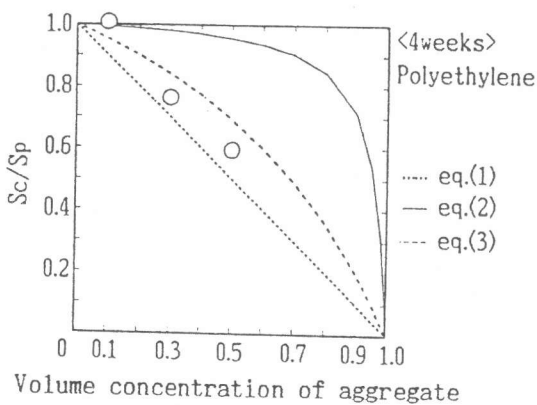


図-8 自己収縮に及ぼす骨材量の影響
(ポリエチレン, W/C=0.30, 4x4x16cm)

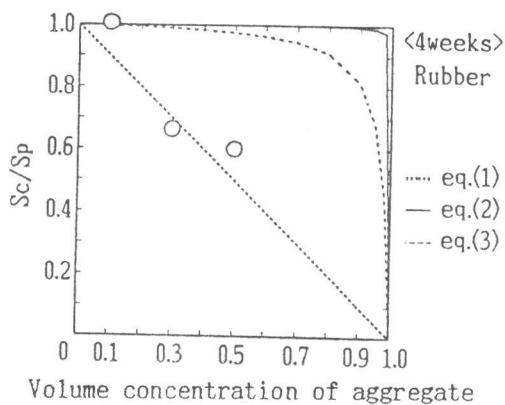


図-9 自己収縮に及ぼす骨材量の影響
(フッ素ゴム, W/C=0.30, 4x4x16cm)

自己収縮の実測値を前述した複合則による計算値と比較した結果を図6～9に示す。流紋岩、山砂およびポリエチレンを用いた場合はHobbsのモデル(式(3))による予測値と比較的によく一致している。なお、山砂の弾性係数は粒紋岩のそれと同一とした。

フッ素ゴムを用いた場合は直列モデル(式(1))による予測値が実測値と比較的一致している。ゴム弾性は弾性の生じるメカニズムが根本的に異なるので、弾性係数を用いて通常の個体の弾性と同一に取り扱うこと自体に問題があるものと考えられる。他方、気泡を骨材に置き換えた場合は空隙率を変化させても自己収縮はほとんど変化せず(図5)、気泡による自己収縮の低減効果は認められなかった。

なお、図10は材令14日まで水中養生した後、20℃、80%R.H.条件下で測定した乾燥収縮について示したものであるが、Hobbsモデルによる予測値が実測値とよく一致している。

図11は、 K_a/K_p と ϵ_c/ϵ_p の関係をHobbsモデルによる予測値と共に示したものである。フッ素ゴムの場合を除くと、骨材の弾性係数の増大と共に、自己収縮が減少することが示されている。

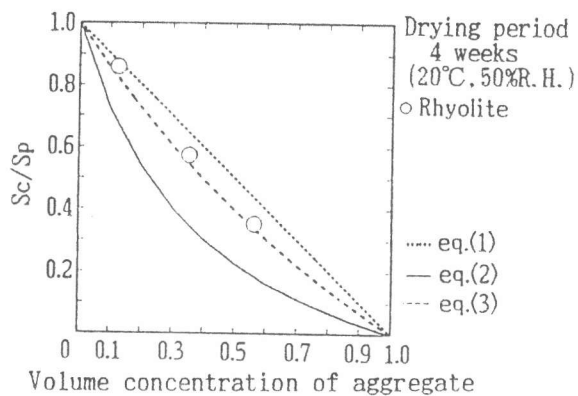


図-10 乾燥収縮に及ぼす骨材量の影響
(流紋岩, W/C=0.30, 4x4x16cm)

以上のことから、骨材の混入により自己収縮は低減し、その効果は自己収縮を生じるセメントペースト量の減少および骨材の弾性変形に伴う拘束効果により説明できると言える。

4. 2 コンクリートの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響

セメントペーストの自己収縮は、水セメント比が小さくなるほど大きくなることを既に報告している[5]。ここでは、モルタルおよびコンクリートについて自己収縮に及ぼす水セメント比の影響について述べる。なお、以下の図中で配合は、(セメント種別)(水結合材比)-(シリカヒューム置換率%)-(混和剤添加率%)と略記した(N:普通, H:早強)。

図12は、材令1日を原点にして測定したモルタル供試体(4×4×16cm)の自己収縮を示したものである。モルタルの場合も水セメント比が小さいほど自己収縮は大きくなっており、高性能AE減水剤およびシリカヒュームを用い水結合材比を0.20とした場合には材令49日で 550×10^{-6} もの自己収縮を生じた。

図13は流紋岩碎石(最大寸法20mm)および山砂を用いたコンクリート供試体(10×10×40cm)の自己収縮を示したものである。材令1日を原点にして測定した材令56日における自己収縮ひずみはW/C=0.50では 100×10^{-6} 程度、W/C=0.30では 200×10^{-6} 程度と水セメント比が小さいほど大きくなっている。またW/C=0.30の場合、シリカヒュームの混入により自己収縮が増加している。高性能AE減水剤およびシリカヒュームを用いて水結合材比を0.20とした場合は、早期材令における自己収縮の増加が大きく、また材令91日では 400×10^{-6} 程度とかなり大きな自己収縮が認められた。なおセメントペーストによる実験結果によると、高性能減水剤(Sp1)および高性能AE減水剤(Sp5)の添加により、自己収縮ひずみの大きさは余り変化しない[4]、[9]。

図14は、コンクリート供試体について、水結合材比と単位セメントペースト量当りの自己収縮の関係を示したものである。自己収縮は水結合材比が小さいほど大きくなることを示している。

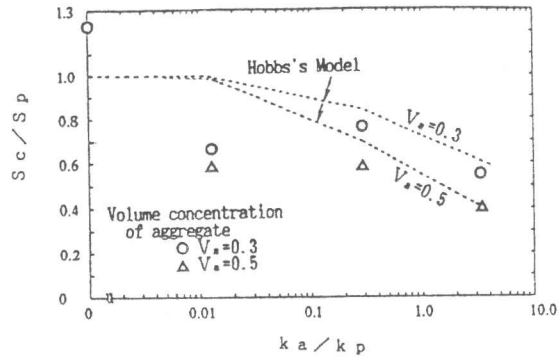


図-11 骨材の弾性係数と自己収縮の関係 (W/C=0.30, 4×4×16cm, 材令28日) Age (day)

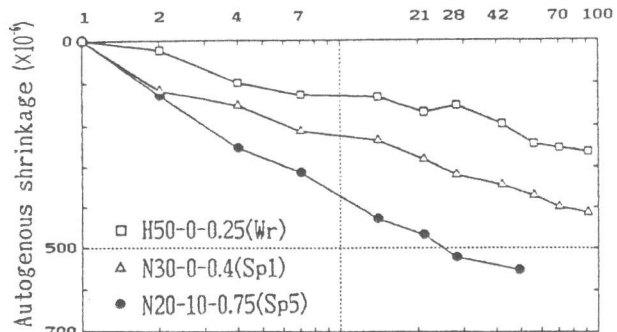


図-12 モルタルの自己収縮に及ぼすW/Cの影響 (山砂, Va=0.50-0.54, 4×4×16cm)

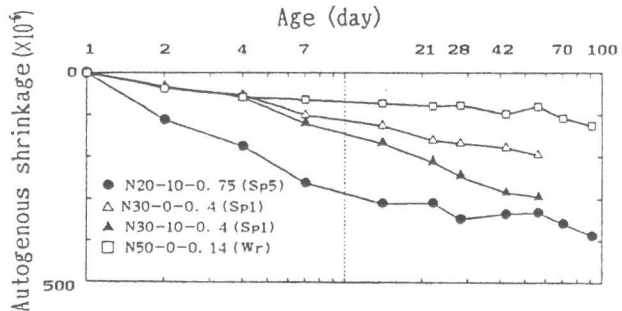


図-13 コンクリートの自己収縮に及ぼすW/Cの影響 (流紋岩&山砂, Va=0.58-0.71, 10×10×40cm)

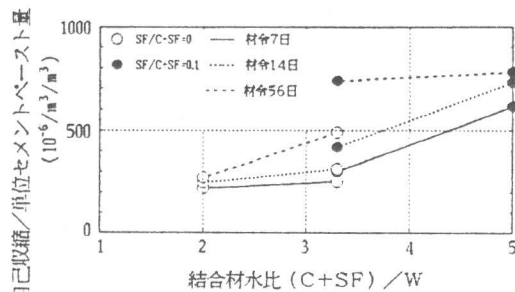


図-14 水結合材比とコンクリートの自己収縮の関係 (10×10×40cm)

従来より、単位セメントペースト量当りの乾燥収縮ひずみは水セメント比が小さくなるほど小さくなると言われているが[10]、自己収縮の場合は全く逆の傾向となることが明かとなった。

以上のことから、低水セメント比のコンクリート、特にシリカヒュームを混入した超高強度コンクリートを用いる場合、ひびわれの発生などに乾燥収縮のみでなく自己収縮の影響が大きくなる可能性があると考えられる。

5. 結論

本研究の範囲で得られた結論を要約すると以下の通りである。

- (1) モルタルおよびコンクリートの自己収縮は、水セメント比が小さくなるほど大きくなり、乾燥収縮の場合と全く逆の傾向を示した。
- (2) シリカヒュームおよび高性能AE減水剤を用いて水セメント比を0.20と極めて小さくした10×10×40cmコンクリート供試体は、材令1日を原点にして測定すると材令91日で約 400×10^{-6} と大きな自己収縮を生じた。
- (3) モルタルおよびコンクリートの自己収縮ひずみは、骨材の体積濃度の増加および弾性係数の増大に伴い減少した。

なお、本研究の一部は平成3年度文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)）を受けて行われたものであり、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Davis, H. E.: Autogenous Volume Changes of Concrete, Proc. ASTM, 40, pp.1103-1110, 1940
- 2) 中条金兵衛, 近藤 実: セメント、モルタル、コンクリートの早期収縮について, セメント技術年報, 7, pp.159-164, 1953
- 3) 本間栄五郎, 樋田岩美: セメントペーストの水和初期における体積変化について, セメント技術年報, 16, pp.121-125, 1962
- 4) 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, pp.122-127, 1991
- 5) 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤 剛: セメントペーストの自己収縮, 第46回セメント技術大会講演集, 1992 (発表予定)
- 6) Tazawa, E. and Miyazawa, S.: Autogenous Shrinkage of Cement Paste with Condensed Silica Fume, 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey, 1992 (to be published)
- 7) Pickett, G.: Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and a Hypothesis Concerning Shrinkage, Journal of ACI, Vol.52, No.5, pp.581-590, 1956
- 8) Hobbs, D.W.: Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.445-450, 1974
- 9) 田澤栄一他: 自己乾燥によるセメントペーストの収縮特性, 第18回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.31-36, 1991
- 10) 長瀧重義, 米倉亜州夫: 高強度コンクリートの乾燥収縮及びクリープの特性, コンクリート工学, Vol.20, No.4, pp.75-87, 1982