

セメントの水和反応によるコンクリートの収縮と空隙の測定

Measurements of Shrinkage and Voids Caused by Hydration of Cement in Concrete

岩月 栄治[†], 森野 奎二[†], 村瀬 孝泰[‡]

Eiji IWATSUKI, Keiji MORINO and Takayasu MURASE

Abstract: The chemical shrinkage is generated, when cement reacts with water. As a skeleton is formed after setting of cement, the hardened cement body cannot shrink any more as much as the volume reduction caused by hydration. Therefore, the hydrates are compensated by the formation of voids in the microstructure. While, the macroscopic volume change, namely autogenous shrinkage depends on the rigidity of microstructure that has close relation with the morphology of hydrates. Autogenous shrinkage is caused by self-desiccation which is the result of the formation of fine pores in the microstructure of hardened cement body and the water consumption by the hydration reaction of cement. In this paper, chemical shrinkage, autogenous shrinkage and voids, which are produced in cement paste, mortar and concrete, were measured. The volume change of specimen was measured by a new equipment and length change of specimen measured by the JCI method. The microstructure of concrete was observed with SEM. It was clear that both shrinkage ratios and the quantity of voids were closely related to an amount of cement and aggregate.

1. はじめに

セメントが水と反応すると、化学収縮が起こる。しかし、セメントの凝結後は骨格が形成されるので、セメント硬化体は、水和反応に起因する体積減少量と同量を縮小することは出来ない。それ故、水和生成物の微細構造中に空隙を生じることになる。一方、巨視的な体積変化、すなわち、自己収縮は水和物の形態と密接に関係した微視的な組織に支配される。自己収縮が起こるのは、セメントの水和反応によって、セメント硬化体の微細構造中に微小空隙が発生することと、水が消費されることにより内部が乾燥状態になる自己乾燥によるとされている^{1, 2, 3)}。

このようなセメントの水和反応による収縮は、昔から知られていたが、コンクリートの水セメント

比が50、60%前後の時代においては、この問題に関する研究は、ほとんど行われてこなかった。しかし、近年の高強度コンクリートのような水結合材比25~40%で、結合材料(セメント+シリカフュームなど)も450~600kg/m³のようなセメント量の多い高性能コンクリートで、しかも大型構造物が造られる状況下では、この収縮問題は重要な課題となっている。とくに、田澤⁴⁾らによって水セメント比の小さいコンクリートほど水和反応による収縮が大きくなるということが明らかにされて以来、注目をされるようになった。

本研究では、セメントペースト、モルタル、及びコンクリート中で発生している化学収縮、自己収縮及び空隙を新たに考案した測定装置によって測定し、コンクリート工学協会が推奨している長さ変化測定方法による結果と合わせて検討した。また、コンクリートやモルタル内部の微細構造を走査電子顕微鏡で観察し、空隙やひび割れの状態を調べた。

[†] 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

[‡] 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻

2. 実験方法

2.1 セメントペースト、モルタル、コンクリートの

水和収縮、自己収縮および空隙の測定方法

ペースト、モルタル、コンクリートの水和収縮、自己収縮および空隙の測定は、図 1 に示す鉄製の容器を用いた。鉄製の容器に水または水酸化カルシウム飽和溶液と、円柱および円盤状のセメントペーストやコンクリートを入れて容器を密閉し、供試体自体の収縮量と水が供試体内部に入り込む量（空隙量）をメスピペットの目盛りの水位変化量より測定するものである。容器のふた、ゴム栓およびメスピペットの接続部分はシリコンパテを用いて密閉した。供試体は、練混ぜ終了後にステンレス製の型枠に打設し、型枠のまま鉄製用容器に入れてできるだけ早い時期（練混ぜ後約 3 分）から測定を開始した。測定開始約 24 時間後に鉄製容器から取り出し、型枠を外して再度容器に入れて測定を継続した。容器内の水温は熱伝対（銅・

コンスタンタン）を用いて測定し、データロガーで記録した。供試体の形状は、ペーストは直径 ϕ 20cm 高さ 6cm と ϕ 10cm 高さ 20cm の 2 種類とした。またモルタルおよびコンクリートは直径 ϕ 20cm 高さ 20cm と直径 ϕ 10cm 高さ 20cm の 2 種類とした。鉄製容器の貯蔵は、20℃ および 23℃ の実験室内に容器を設置した場合（以後 20℃ 室内と 23℃ 室内と記述）と、28℃ 一定に調整した水槽中（後述の実験結果から水温を決定）に設置した場合（以後 28℃ 水槽内と記述）の 3 シリーズとした。

測定が終了した供試体は、鉄製容器から取り出した後に再度乾燥・吸水を行って重量変化量から全空隙量（供試体内部に入り込んだ水の量）を求めた。また供試体内部の走査電子顕微鏡観察をおこなった。

2.2 セメントの水和反応による鉄製容器内の水温測定⁵⁾

セメントの水和時の発熱によって、鉄製容器内

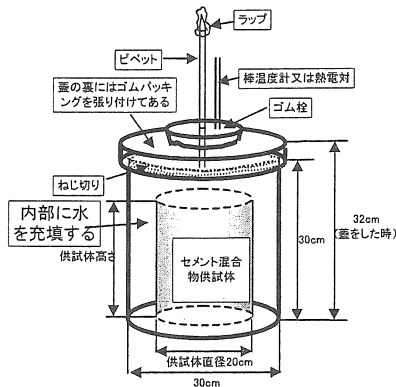


図 1 鉄製容器を用いた収縮と空隙の測定方法⁵⁾

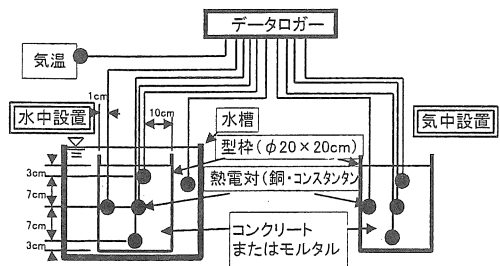


図 2 水和熱の測定方法⁵⁾

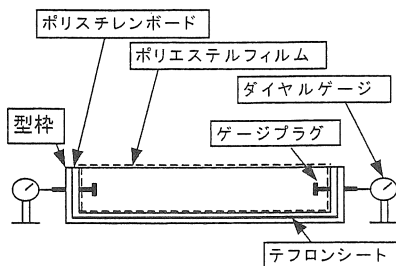


図 3 モルタルおよびコンクリートの自己収縮の測定方法¹⁾ (材齢約 3 日迄)

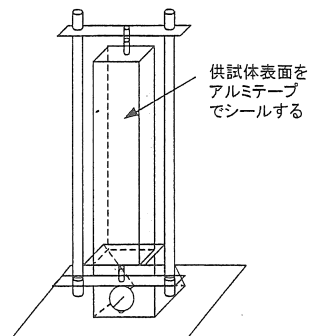


図 4 モルタルおよびコンクリートの自己収縮の測定方法 (材齢約 3 日以降)

表 1 使用したセメントの化学成分と鉱物組成

比重	ブレン値 (cm ² /g)	化学成分 (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
3.15	3160	21.7	5.3	2.7	62.0	1.5
		SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ Oeq	ig.loss
		2.3	0.27	0.52	0.61	1.4
鉱物組成 (%)		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄
		41.4	31.1	9.5	8.2	3.9

表 2 セメント成分から算定した水和収縮の理論値

水セメント比 (%)	自己収縮委員会による水和収縮の理論値 (%)
25	11.6
50	8.1
60	8.2

表 3 セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの配合

セメント硬化体の種類	貯蔵温度 °C	水セメント比		空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤の使用量 kg/m ³	
		W/C (%)	W/C+SF (%)			水 w	セメント C	シリカフューム SF	細骨材 S	粗骨材 G		
										5~10mm		10~20mm
セメントペースト	23	25	-	-	-	440	1760	-	-	-	-	35.2
	20,28											
モルタル	23	25	-	-	-	189	756	-	1513	-	-	15.1
	20,28											30.2
	23	50	-	-	-	318	635	-	1273	-	-	6.4
	20,28											12.8
コンクリート	23	-	25	4.5	45	150	540	60	710	354	530	10.8
	20,28								725	372	558	32.4
	23	50	-	-	-	300	-	830	414	620	3.0	
	20,28							837	430	644	6.0	

*コンクリートの23°Cと20,28°Cの細・粗骨材の単位量が異なるのは粗骨材の比重が異なった為。

の水または水酸化カルシウム溶液の膨張がメスピペットの測定値に大きく影響することが考えられる(水の1°C当たりの体膨張係数: 2.1×10^{-4})。そのため、測定時の温度を検討するために図2に示すような温度測定をおこなった。

2.3 モルタルおよびコンクリートの角柱供試体を用いた自己収縮の測定

自己収縮の測定方法は、日本コンクリート工学協会の自己収縮委員会による試験方法¹⁾に準じて行った。測定の概要を図3および図4に示す。供試体の形状は10×10×40cmの型枠を用い、長さ方向には供試体の収縮量を測定するゲージプラグを入れている。また、型枠の内側には、供試体の収縮に拘束力が働かないようにポリスチレンボードとポリエチレンフィルムを張った。収縮の測定は、型枠に試料打設後約1.5時間から両端のゲージプラグに1/1000のダイヤルゲージまたは高感度変位計をセットして測定を開始した。データの記録はデータロガー等を用いた。測定中は供試体の乾燥を防ぐために濡れたウエスで供試体上面を覆った。測定開始後約3日に脱型し、乾燥を防ぐためにアルミテープで供試体全面を密閉して、図4に

$$CS_{hy100} = \frac{CSC_{hy100}}{W/C + 1 / \rho_c} \quad (\%) \quad \dots \quad (1)$$

CS_{hy100}: 100%水和時の理論収縮率
 W/C: 水セメント比 ρ_c: 使用セメントの比重
 CSC_{hy100}: 以下の式による
 $CSC_{hy100} = \{5.98C_1 + 5.33C_2 + 28.6C_3 + 16.7C_4 - (23.6C_1 + 10.1C_2)B/A\} / 100$

C₁: C₃S C₂: C₂S
 C₃: C₃A C₄: C₄AF
 C₅: CaSO₄
 A: C₁/270.2 + C₂/486.0
 B: 3C₅/408.5

示すような方法(1/100ダイヤルゲージ使用)で測定を継続した。供試体の測定および貯蔵場所は、20°C一定とした。

2.4 供試体の使用材料と配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメント、混和材は粉末シリカフューム(エルケム社製 No.2410)を用いた。表1にセメントの化学成分と鉱物組成を示す。このセメントの100%水和した場合の水和収縮率の理論値は、日本コンクリート工学協会自己収縮委員会の算定方法(式(1))¹⁾では表2に示したようであり、水セメント比25%では水和収縮率は11.6%と算定される。

表 4 水和熱による鉄製容器内の水温の測定結果

供試体	設置状態	熱電対の位置	供試体の最高温度(°C)	最高温度の時間(h-m)	鉄製容器内の水温(°C)
セメントペースト1) W/C=25%	水中	中心	31.9	8-15	25.8
モルタル2) W/C=25%			29.6	9-45	27.1
コンクリート3) W/C+SF=25%			28.8	11-55	26.9

1)ペーストはW/C=25%、形状はφ20×6cm
 2)モルタルはW/C=25%、形状はφ20×20cm
 3)コンクリートはW/C+SF=25%、形状はφ20×20cm

モルタルおよびコンクリートに使用した骨材は、細骨材に珪砂(5号, 愛知県藤岡町産)、粗骨材に砂岩碎石(5~10mm:40%、10~20mm:60%, 愛知県春日井産)を使用した。減水剤はポリアルキリアリルスルホン酸系を使用した。表3にコンクリートの配合を示す。23℃貯蔵と20℃および28℃貯蔵で骨材の単位量が異なるのは比重が若干異なったためである。

3. 結果および考察

3.1 セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの水和熱による鉄製容器内の水温の変化

表4にセメントの水和熱による鉄製容器内の水温変動の測定結果を、図5にペーストの測定結果を一例として示す。水の最高温度はW/C=25%のモルタルで練混ぜ後8~11時間に27.1℃が記録された。これらから、鉄製容器を水槽に浸漬して測定する場合は水槽の温度を28℃一定とすれば、セメントの水和熱による鉄製容器内の水の膨張による測定誤差を省くことができる。また夏期に気温が上昇しても水を冷却する必要がなく、設備的に簡単にすることができる。

3.2 鉄製容器で測定したセメントペースト、モルタルおよびコンクリートの収縮率

図6に鉄製容器で測定したセメントペースト(W/C=25%)のピペットの変化率を示す。同様に、図7にモルタル(W/C=25%)、図8にモルタル(W/C=50%)、図9にコンクリート(W/C=25%)、図10にコンクリート(W/C=50%)を示す。供試体の形状の違いでは、ペースト、モルタルおよびコンクリートにおいてφ10×20cmの供試体は、材齢1日目まではφ20cmの供試体とほとんど同じ変化率であるが、それ以後はφ20cmの供試体よりも大き

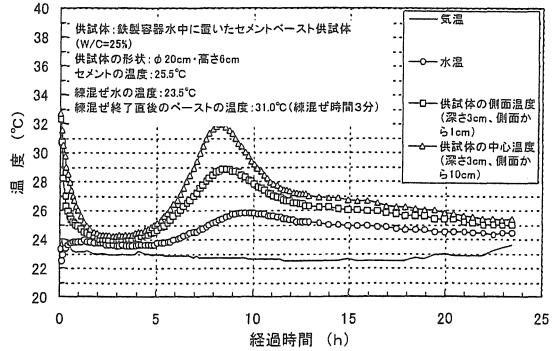


図5 ペーストの温度測定結果

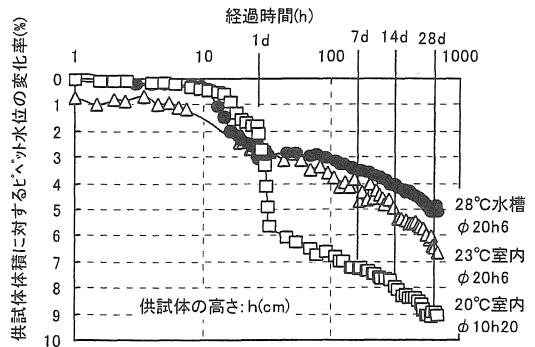


図6 鉄製容器で測定したセメントペーストのピペットの水位変化率と経過時間の関係

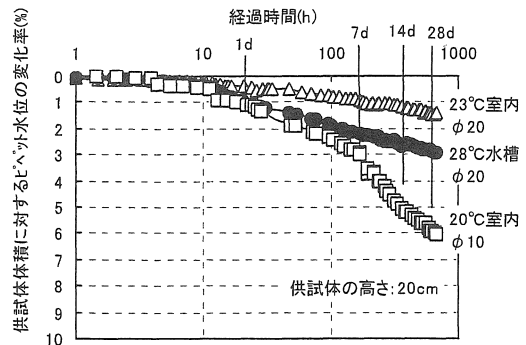


図7 鉄製容器で測定したモルタル(W/C=25%)のピペットの水位変化率と経過時間の関係

くなっている。これは直径が小さいために水が供試体内部まで浸透しやすいためと考えられる。また、貯蔵温度の差によるピペットの変化率の差は、図6~10の23℃と28℃を比較すると一定の傾向は

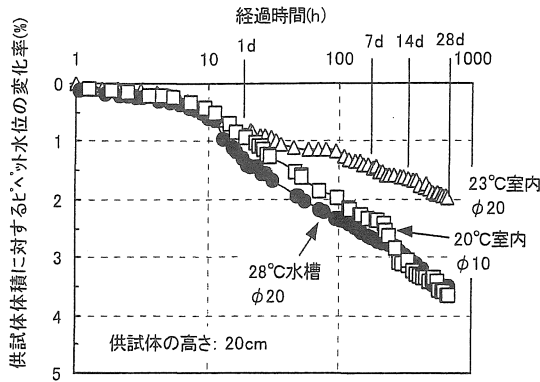


図 8 鉄製容器で測定したモルタル (W/C=50%) のピベットの水位変化率と経過時間の関係

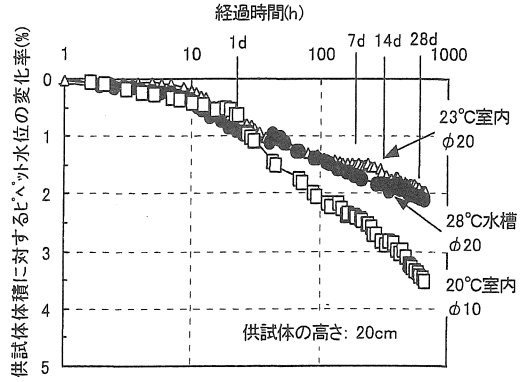


図 9 鉄製容器で測定したコンクリート (W/C=25%) のピベットの水位変化率と経過時間の関係

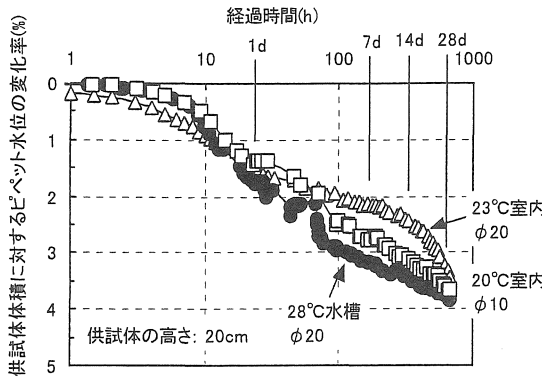


図 10 鉄製容器で測定したコンクリート (W/C=50%) のピベットの水位変化率と経過時間の関係

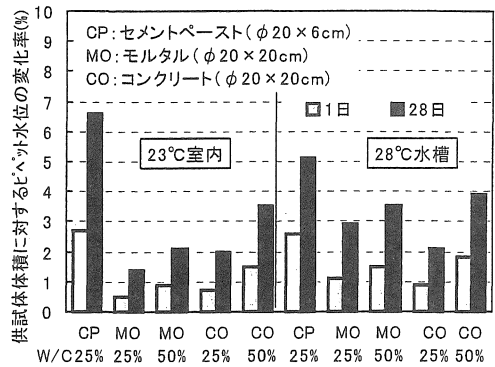


図 11 鉄製容器で測定した材齢 1 日と 28 日のピベットの水位変化率 (直径 20cm)

みられない。このことから 5℃程度の差ではピベットの变化率に大きな差は生じないと考えられる。

図 11 に、図 6～10 の供試体直径 φ20cm、貯蔵温度 23℃および 28℃の材齢 1 日と 28 日のピベットの变化率を示す。ピベットの变化率は、材齢 1 日と 28 日では同様の傾向を示しており、23℃のピベットの变化率の大きいものは、順にセメントペースト W/C=25% (セメント量 1760kg/m³)、コンクリート W/C=50% (300kg/m³)、モルタル W/C=50% (635kg/m³)、コンクリート W/C+SF=25% (540kg/m³)、モルタル W/C=25% (756kg/m³) である。同様に 28℃では、セメントペースト W/C=25%、コンクリート W/C=50%、モルタル W/C=50%、モルタル W/C=25%、コンクリート W/C+SF=25% である。これらからセメントペーストの变化率が他と比べて大きくなっている。これはセメント量が多いために

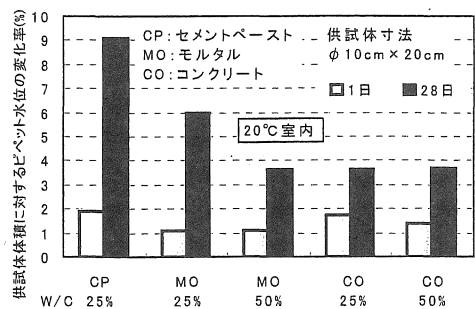


図 12 鉄製容器で測定した材齢 1 日と 28 日のピベットの水位変化率 (直径 10cm)

水和収縮と自己収縮が大きく現れたためと考えられる。また、モルタルとコンクリートでは W/C=25% よりも W/C=50% のほうがピベットの变化率が大き

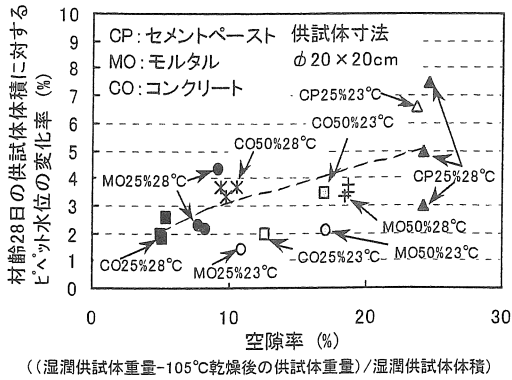


図 13 鉄製容器で測定した供試体のピペットの変化率と供試体の吸水率との関係 (直径 20cm)

くなっている。これはコンクリートはモルタルよりもセメント量が少なく骨材量が多いため供試体内の骨材とペーストの界面に空隙が多く発生したためと考えられる。

図 12 に図 6~10 の供試体直径 $\phi 10 \text{cm}$ 、貯蔵温度 20°C の材齢 1 日と 28 日のピペットの変化率を示す。変化率の大きいものは、順にセメントペースト W/C=25% (セメント量 1760kg/m³)、モルタル W/C=25% (756kg/m³)、モルタル W/C=50% (635kg/m³)、コンクリート W/C+SF=25% (540 kg/m³)、コンクリート W/C=50% (300kg/m³) である。前述の $\phi 20 \text{cm}$ の供試体と同様にセメント量の多いセメントペーストが大きな変化率を示している。

3.3 鉄製容器で測定した供試体の空隙量の測定結果

図 13 に直径 $\phi 20 \text{cm}$ の供試体を鉄製容器を用いて測定した材齢 28 日のメスピペットの変化率と、測定後の供試体を湿潤・乾燥して求めた空隙率との関係を示す。空隙率は約 5~25% が測定され、ピペットの変化率と空隙率は 2~5 倍程度の差がみられている。この図ではペーストは図の右上方にプロットされ、モルタル、コンクリートは中央~左下方にプロットされており、概ね正の比例関係を示している。また図 14 に示したように供試体の形状が $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ であっても同様の傾向を示している。これらから、鉄製容器で測定したピペットの変化率は水和収縮による空隙量と対応していると考えられる。

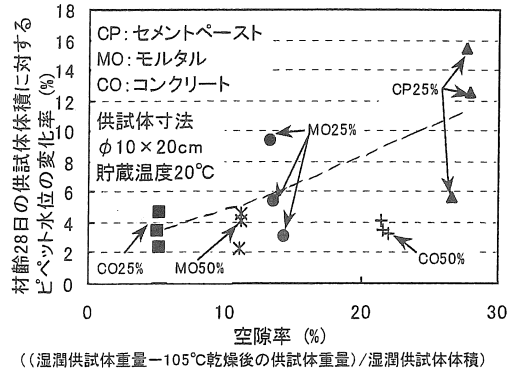


図 14 鉄製容器で測定した供試体のピペットの変化率と供試体の吸水率との関係 (直径 10cm)

3.4 角柱供試体を用いたモルタルおよびコンクリートの自己収縮ひずみの測定結果

図 15 に角柱供試体を用いた自己収縮ひずみの測定結果 (日本コンクリート工学協会自己収縮委員会による方法に準じた測定結果) を示す。材齢 28 日の自己収縮ひずみは、モルタルは W/C=25% では 450 μ 、W/C=50% では 324 μ である。また、コンクリートは W/C+SF=25% では 205 μ 、W/C=50% では 14 μ である。これらから、モルタル、コンクリートとも水セメント比が小さくなるとほど自己収縮ひずみが大きくなっており、既往の文献¹⁾と同様の結果となっている。また、自己収縮ひずみが大きいモルタルの W/C=25% は、材齢 28 日のひずみの 70% を材齢 1 日まで終えており、自己収縮は材齢の早い時期に発生することがわかる。

図 16 は図 15 の縦軸をセメント量 1g 当たりの自己収縮ひずみに換算したものである。セメント 1g 当たりの自己収縮ひずみは、コンクリートの W/C=25%、骨材量 1655kg/m³ は 0.09 μ 、W/C=50%、骨材量 1911kg/m³ は 0.01 μ であり、骨材量が多いほど自己収縮ひずみが小さくなっておる。これはモルタルでも同様であり、骨材が収縮に対して拘束していることが推測される。

3.5 鉄製容器で測定した収縮率および空隙率と角柱供試体で測定した自己収縮率との比較

表 5 に鉄製容器のピペットの変化率と供試体の湿潤・乾燥によって求めた空隙率および角柱供試体で測定した自己収縮率との比較を示す。鉄製容

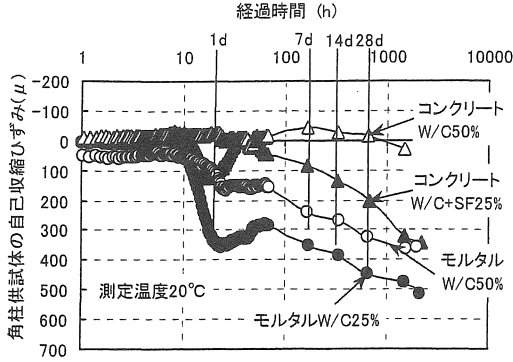


図 15 角柱供試体を用いた自己収縮ひずみの測定結果

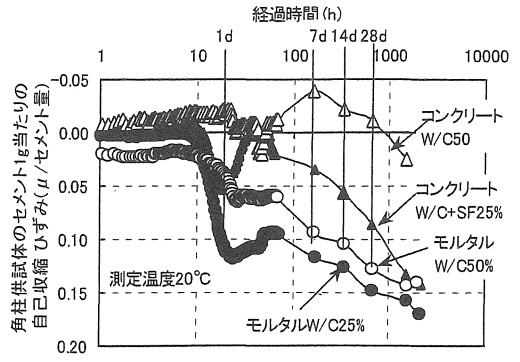


図 16 角柱供試体を用いた自己収縮ひずみをセメント 1g 当たり換算したひずみ

器で測定後の供試体を湿潤・乾燥して求めた空隙率は、セメントの水和によって発生した空隙、未水和水量、エンタラップトエア、エントレインドエアの総計であると考えられる。また角柱供試体の自己収縮率は鉄製容器で測定したピベットの変化率と較べて非常に小さいことから、鉄製容器で測定したピベットの変化率は、その大部分はセメントの水和反応によりモルタル、コンクリート内に発生した空隙と解釈できる。またコンクリート W/C=25% (セメント量 540kg/m³、骨材量 1655 kg/m³) の空隙率は 2.11% であり、W/C=50% (セメント量 300kg/m³、骨材量 1911kg/m³) の空隙率は 3.84% であることから、セメント量が少ないにもかかわらず、骨材量が増えるほど空隙率は多くなっている。このことは、セメントの水和収縮に伴って生ずる空隙は、コンクリート中で最も弱点であるセメントペーストと骨材の界面に生じやすいために、骨材量が多いほど空隙が多く発生したためと考えられる。

3-6 供試体内部の空隙の走査電子顕微鏡観察

写真 1~写真 4 に鉄製容器で測定を行った供試体内部の走査電子顕微鏡観察結果を示す。空隙は表 6 のように寸法や形状が分類される⁹⁾。ゲル空隙とは、セメントの水和物である C-S-Hゲルの層状構造の中に存在する空隙であり、毛細管空隙とは、セメントペーストが練り混ぜた時点で水によって満たされていた空間を水和の進行に伴って水和生成物が充填した後に残存してできた空隙であ

表 5 鉄製容器および角柱供試体を用いた収縮率と空隙率の比較

配合	W/C (%)	セメント量 (kg/m ³)	(1)鉄製容器を使用した測定値		(2)角柱供試体の
			材齢28日の供試体体積に対するピベットの変化率 (%)	測定後の供試体を湿潤・乾燥して求めた空隙率 (%)	材齢28日の自己収縮率(ひずみを体積に換算) (%)
モルタル	25	756	2.93	8.43	0.14
	50	635	3.49	18.59	0.10
コンクリート	25	540	2.11	5.13	0.06
	50	300	3.84	9.86	0

(1)供試体はφ20×20cm、貯蔵温度28°Cのもの
(2)供試体形状は10×10×40cm、貯蔵温度20°Cのもの

表 6 空隙の種類、寸法および形状

空隙の種類	寸法	形状
ゲル空隙	1nm - 3nm	不定形
毛細管空隙	3nm - 30μm	不定形
エントレインドエア	10μm - 30μm	球状
エンタラップドエア	100μm - 5mm	球状

る。このような空隙について、鉄製容器で測定した供試体の内部を走査電子顕微鏡で観察した。

写真 1 はコンクリート供試体 (W/C+SF=25%) の内部で、10cm 断面の供試体表面 (外周から約 2mm 中) である。セメント水和物の C-S-H が多孔質な状態が確認され、キャピラリー空隙となっている。写真 2 はモルタル供試体 (φ20×20cm、W/C=50%) の中心部分の試料であり、小さなキャピラリー空隙に C-S-H の網状結晶が大きく成長している。写真 3 はセメントペースト供試体 (φ20×6cm、W/C=25%) の中心部分であり、球状のエントレインドエアやエンタラップドエアがみられる。写真 4 はモルタル供試体 (φ20×20cm、W/C=50%) の中心部分の試料で、骨材の界面には空隙がみられている。

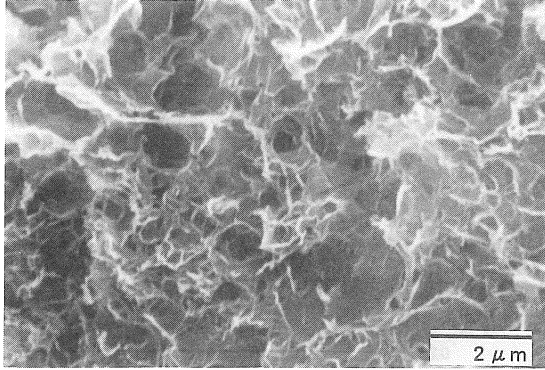


写真1 コンクリート供試体の走査電子顕微鏡写真
(W/C+SF=25%、10cm断面の供試体表面で
外周から約2mm中)

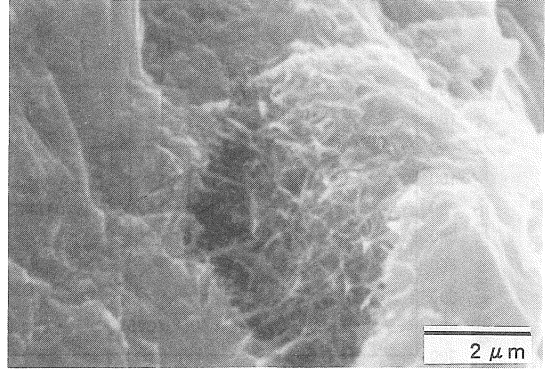


写真2 モルタル供試体の走査電子顕微鏡写真
(φ20×20cm、W/C=50%の中心部分)

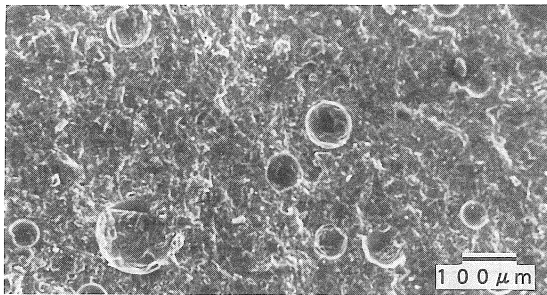


写真3 セメントペースト供試体の走査電子顕微鏡
写真 (φ20×6cm、W/C=25%、供試体
の中心部分)

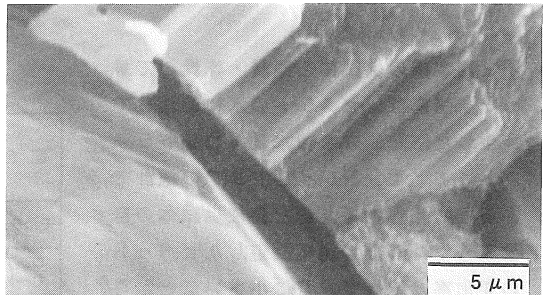


写真4 モルタル供試体の走査電子顕微鏡写真
(φ20×20cm、W/C=50%の中心部分)

4. 結 論

(1) コンクリートの W/C=25% (セメント量 540kg/m³、骨材量 1655kg/m³) の空隙率は 2.11% であり、W/C=50% (セメント量 300kg/m³、骨材量 1911kg/m³) の空隙率は 3.84% の結果から分かるように、セメント量が少ないにもかかわらず、骨材量が増えるほど空隙率は多くなった。このことは、セメントの水和収縮に伴って生ずる空隙は、コンクリート中で最も弱点であるセメントペーストと骨材の界面に生じやすいために、骨材量が多いほど空隙が多く発生したためと考えられる。

(2) セメント 1g 当たりの自己収縮ひずみは、コンクリートの W/C=25%、骨材量 1655kg/m³ では 0.09μ であり、W/C=50%、骨材量 1911kg/m³ では 0.01μ であった。すなわち、骨材量が多いほどセメント 1g 当たりの自己収縮ひずみが小さくなっていることから、骨材が収縮に対して拘束していることが推測される。

謝 辞

本研究の一部は、平成9年度文部省科学研究費補助金基盤研究A(課題番号07505005研究代表者田辺忠顕名大教授)および本学重点配分研究費によった。ここに謝意を表します。

参考文献

- (社)日本コンクリート工学協会:自己収縮委員会報告書,1996.
- Japan Concrete Institute:Autoshrink'98 Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 1998.
- E.Tazawa:Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute,1998
- 田澤栄一、宮澤伸吾、笠井哲朗:セメントの硬化収縮と硬化体の内部空隙について、セメント技術年報, No. 40, pp75-78, 1986
- 岩月栄治、森野奎二、不破昭、村瀬孝泰:セメントの水和収縮に伴うコンクリートの空隙の測定,平成10年度研究発表会講演概要集,土木学会中部支部, pp. 549-550, 1999.
- 森野奎二、大井孝和、内藤幸雄:コンクリートの微視的構造と養生条件の影響,日本学術会議、第23回材料研究連合講演会前刷集, pp. 7-9, 1979.

(受理 平成11年3月20日)