

# セメント系材料の自己収縮に及ぼす 結合材および配合の影響

田澤栄一\*・宮澤伸吾\*\*

セメント系材料の自己収縮に及ぼす使用材料や配合の影響について実験的に検討した。高性能減水剤およびシリカフェームを用いて水セメント比を小さくすると自己収縮は極めて大きくなった。粉末度の高い高炉スラグ微粉末の使用により自己収縮は増大した。セメントの  $C_3A$  含有量が大きいほど自己収縮は増大すること、骨材混入の影響は既往の複合則により予測できることを示した。また、自己収縮の低減方法についても検討した。

**Key Words:** *autogenous shrinkage, water-cement ratio, cement composition, blast-furnace slag, silica fume*

## 1. はじめに

コンクリートのひびわれを制御するためにはその体積変化を知ることが重要であり、温度変化や乾燥による体積変化については数多くの研究が行われている。一方、セメントの水和反応により生じるコンクリートの自己収縮 (Autogenous shrinkage) は、通常のコンクリートでは長さ変化にして高々  $100 \times 10^{-6}$  程度であるとされており<sup>1)</sup>、従来のひびわれの解析や設計に考慮されることはなかった。しかし、水セメント比の小さいセメントペーストでは極めて大きな自己収縮が生じることが著者らにより最近明らかにされた<sup>2)</sup>。

本研究では、凝結直後から長期材令にわたりセメントペーストの長さ変化を測定し、自己収縮に及ぼす配合、セメントの種類、混和材料などの影響について検討した。また、モルタルおよびコンクリートを用いて、自己収縮に及ぼす骨材混入の影響について検討した。

## 2. 既往の研究

コンクリートの硬化過程において、セメントと水の反応生成物は反応前の各体積の和に比べて減少することは古くから知られており、硬化収縮 (Chemical shrinkage) と呼ばれている。例えば、1900年に Le Chatelier がセメントペーストの硬化収縮について言及していること、また Kuhl がフラスコに打ち込んだセメントペーストの吸水量から硬化収縮を測定していることを White が紹介している<sup>3)</sup>。また、Powers は、Kühl と同様の原理でセメントの各鉱物の硬化収縮を測定している<sup>4)</sup>。著者らは、セメントの水和反応式から理論収縮率を算出し、実測値とほぼ一致することを報告した<sup>5), 6)</sup>。

もし外部から水の補給がない場合は、凝結によりセメント硬化体の骨格が形成された後は水和の進行と共に内部空隙が形成されることになり、この現象は水分逸散を伴う乾燥と区別する意味で自己乾燥 (Self desiccation) と呼ばれている<sup>7)</sup>。Copeland らは、破碎した硬化セメントペーストを入れた密封容器中の相対湿度を測定した結果、材令と共に容器内の相対湿度は減少することを示している<sup>8)</sup>。

外力、水分の侵入や逸散、温度変化、炭酸化等によらずセメントの水和の進行に伴うコンクリートのマクロな体積減少は自己収縮 (Autogenous shrinkage あるいは Self-desiccation shrinkage) として知られている。材令 1 日程度までの初期収縮についてはセメントペーストについて古くから研究がなされている。本間らは、ゴム袋に密封したセメントペーストの水中重量の測定により打ち込み直後から初期収縮を測定しており、材令 24 時間で長さ変化に換算して  $5000 \sim 10000 \times 10^{-6}$  程度の収縮を生じるとしている<sup>9)</sup>。また、並行して断熱温度上昇試験を行い、温度上昇速度と収縮速度の経時変化がほぼ一致することから、早期収縮がセメントの水和反応に起因していることを示した。中条らは、モルタルの早期収縮ひずみを  $1.5 \times 2.5 \times 18 \text{cm}$  供試体の長さ変化から測定し、打設直後から 5 時間までに  $1000 \times 10^{-6}$  程度の収縮ひずみを計測している<sup>10)</sup>。

一方、長期材令にわたる自己収縮の研究としては、Davis の報告がしばしば引用されている。彼は、コンクリートの自己収縮を数年にわたり測定した結果から、その大きさは高々  $100 \times 10^{-6}$  程度であるとしている<sup>11)</sup>。一般のコンクリート構造物では乾燥収縮が生じ、これに自己収縮が加算されるが、自己収縮は乾燥収縮と比べて 1 桁程度小さいので実用上の目的では一般に無視できると説明されてきた<sup>12)</sup>。そのため、コンクリートの自己収縮に関する研究はその後ほとんど行われなかった。

\*正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類 (建設系)  
(〒724 東広島市鏡山 1-4-1)

\*\*正会員 工博 広島大学助手

しかし、高性能減水剤やシリカフェームの開発により水セメント比を極めて小さくした高強度コンクリートの製造が可能になった。このような高強度コンクリートでは自己収縮が大きくなるという報告が最近なされている。Mcgrathらは、モルタル供試体内部の相対湿度の測定を行い、材令の進行に伴う湿度低下がシリカフェームの混入により著しくなることを報告している(1990)<sup>13</sup>。

Larrardは、コンクリート供試体の長さ変化の測定から、高強度コンクリートの自己収縮は普通コンクリートのそれより大きくなることを報告している(1990)<sup>14</sup>。彼はコンクリートの自己収縮に及ぼす骨材量の影響について複合則により説明することを試みている(1992)<sup>15</sup>。

Paillereらは、シールして水分の逸散を防いだコンクリート供試体について拘束ひびわれ試験を行い、シリカフェームと高性能減水剤を用いて水セメント比を極めて小さくすると自己収縮により貫通ひびわれが生じ得ると報告している(1989)<sup>16</sup>。Schrageらは、Paillereらと同様の拘束実験を断熱条件下で行い、硬化時温度応力には自己収縮の影響が含まれることを示唆している(1992)<sup>17</sup>。Hollandらは、ダムの減勢池の補修にシリカフェームを混入した超高強度コンクリートを用いたが打設後2~3日に貫通ひびわれが発生し、その原因として自己収縮の可能性があるとしている(1986)<sup>18</sup>。

このように高強度コンクリートの自己収縮に関する研究は諸外国において緒についたばかりであり、材料や配合の影響、打ち込み直後から長期にわたる収縮特性、その低減方法等についてまだほとんど明らかにされていないのが現状である。

### 3. 実験概要

#### (1) 使用材料および配合

表一は、本研究で使用したセメントの物理試験および化学試験結果を示したものである。また、表二に示した鉱物組成は、表一の値を基にしてBogueの式によりもめた計算値である。

混和材料としてはシリカフェーム(SF)および高炉スラグ微粉末(BS)を用いた。シリカフェーム(SF)としては、粉末タイプでBETによる比表面積が約160 000 cm<sup>2</sup>/gおよび約200 000 cm<sup>2</sup>/g、比重はともに2.20のもの2種類を使用した。高炉スラグ微粉末(BS)としては、表三に示すように比表面積3 380~8 360 cm<sup>2</sup>/gの3種類のものを使用した。高炉スラグ微粉末は、SO<sub>3</sub>換算で2%となるように2水せつこうを添加したものを基準とした。

自己収縮を低減する目的で、2種類の乾燥収縮低減剤(アルキレンオキソド系: D1, グリコールエーテル系: D2)および3種類の膨張材(CSA系: E1, CaO系: E2, E3)を使用した。また、撥水処理したシリカ質微粉末

表一 セメントの化学成分

	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Ig. loss (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)
N	3520	1.7	21.4	5.3	3.1	63.4	1.0	2.0	0.39	0.45
M	2990	1.1	23.6	3.3	4.0	64.0	0.8	1.7	0.30	0.32
H	4250	1.0	20.4	5.1	2.8	65.4	0.9	2.9	0.33	0.40
S	3300	1.3	21.7	3.6	4.5	63.9	1.0	2.3	0.27	0.37
G	3500	1.4	17.8	4.3	3.4	48.5	1.1	1.6	0.24	0.34
O	3120	1.3	22.0	3.6	4.6	64.0	0.9	2.2	0.26	0.38
A	4420	0.5	5.9	49.7	4.6	35.1	0.8	-	0.06	0.18
W	3700	2.9	21.6	4.5	0.2	66.1	0.6	2.5	0.07	0.48
B	3510	1.7	24.8	8.6	2.2	54.4	2.6	1.4	0.29	0.39
L	3300	0.9	28.9	2.5	2.5	63.6	0.7	2.2	0.21	0.43

N: Ordinary cement, M: Moderate heat cement, H: High-early strength cement, S: Sulfate resisting cement, G: Geothermal cement, O: Oil well cement, A: Alumina cement, W: White cement, B: Blast-furnace slag cement(B-type), L: Low heat cement

表二 セメントの鉱物組成

Type of cement	Mineral compound (X)				
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>
N	49.7	23.9	8.8	9.4	3.4
M	48.4	31.2	2.0	12.2	2.98
H	64.6	9.7	8.8	8.5	4.93
S	58.0	18.5	1.9	13.7	3.91
W	67.2	11.2	11.6	0.6	4.25
O	56.2	20.7	1.8	14.0	3.74
L	27.8	56.3	2.4	7.6	3.74

表三 高炉スラグ微粉末の性質

Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Specific gravity	Chemical composition (%)						Basicity
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	
3380	2.90	34.6	13.9	0.2	42.7	5.9	0.8	1.81
4060	2.90	34.4	14.1	0.2	42.8	6.1	0.8	1.83
8360	2.90	34.2	13.9	0.2	42.7	6.1	0.8	1.83

(比重1.4, 10~300μm)を使用した。

細骨材には風化花崗岩系山砂(比重2.57, 粗粒率2.64, 吸水率1.99%), 粗骨材には流紋岩質碎石(最大寸法20mm, 比重2.67, 吸水率0.87%)を使用した。

混和剤としては、セメントペーストおよびモルタルにはナフタリン系高性能減水剤、コンクリートにはメタクリル酸誘導体を含む特殊高分子スルホン酸塩系の高性能減水剤を使用した。

#### (2) 練りませ方法

セメントペーストおよびモルタルの練りませには、ホバート型モルタルミキサ(公称容量0.010m<sup>3</sup>)を用いた。混和材を混入する場合は1分間低速(自転100rpm, 公転28.5rpm)で空練りした。W/(C+SF)=0.17の場合は、空練り後中速(自転200rpm, 公転57.1rpm)で3~5分間練りませ流動性が得られた後、高速(自転280rpm, 公転80.0rpm)で3分間練りませた。その他の配合では中速で3分練りませた。

コンクリートの練りませは、強制練りミキサ(公称容量0.05m<sup>3</sup>)により3分間を標準とした。ただし、W/(C+SF)=0.17の場合は、コンクリートが粘性を帯びるまで練りませを行った。

#### (3) 自己収縮ひずみの測定方法

a) 材令24時間までの測定(セメントペースト)

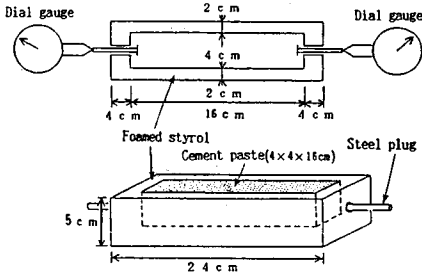


図-1 自己収縮の測定方法 (材令 24 時間まで)

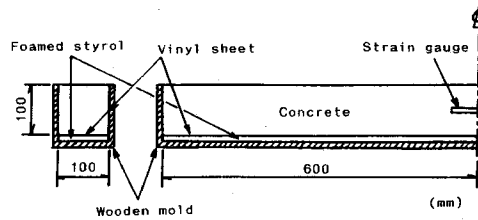


図-2 コンクリートの自己収縮の測定方法

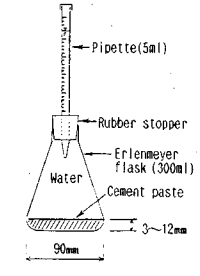


図-3 硬化収縮率の測定方法

図-1 に示すように、打ち込み直後から試料の自由な変形を測定するために剛性の低い発泡スチロール製型枠にセメントペーストを打設した。供試体寸法は  $4 \times 4 \times 16$  cm とし、発泡スチロール製枠とセメントペーストとの間には水分の逸散を防ぐためにビニールシートを敷いた。打設後直ちに仕上げ面にポリ塩化ビニリデン系フィルムを密着しその上を湿布で覆い、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $95 \pm 5\%$  R. H. の室内に静置した。ひずみの測定は、供試体両端にセットした鋼製プラグにダイヤルゲージを当て始発時前後に長さの原点をとり材令 24 時間まで行った。同一条件の供試体を 2 個作製し結果は平均値で示した。

b) 材令 24 時間以後の測定 (セメントペースト)

セメントペーストを鋼製型枠に打設し表面仕上げを行った後、ポリ塩化ビニリデン系フィルムを仕上げ面に密着させ、さらに濡れむしりで覆い、脱型まで  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $95 \pm 5\%$  R. H. の室内に静置した。材令 24 時間で脱型し、直ちにアルミ箔粘着テープ (厚さ 0.05 mm) によりシールし、さらに継目の多い供試体端部をブチルゴム系のテープでシールした。その後、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の室内に横に寝かせて静置した。脱型時を原点として長期材令まで供試体長手方向の自己収縮ひずみをコンタクトージを用いて測定した。同一条件の試料を 3 個作製し、結果は平均値で示した。

c) コンクリートの自己収縮ひずみの測定

供試体寸法は図-2 に示すような  $10 \times 10 \times 120$  cm とした。木製型枠を横に寝かせ、打ち込み直後から試料の自由な変形を測定するために型枠底面に厚さ 10 mm の発泡スチロールをしき、さらに型枠の内側全面にビニールシートをしきその中にコンクリートを打設した。水分の逸散を防ぐために打設から脱型時まで表面をビニールシートおよび湿布で覆った。材令 24 時間で脱型した後、ビニールシートおよびアルミ箔粘着テープで全面シールし、 $20^\circ\text{C}$  室内に静置した。供試体は立てて静置した。供試体の長さ変化を埋め込みゲージ (弾性係数: 約 50 MPa) により打ち込み直後から測定した。

なお、参考のために一部の供試体は材令 24 時間で脱型した後に乾燥させた。乾燥供試体は 2 側面を露出させ

その他の面はアルミ箔粘着テープでシールし  $20^\circ\text{C}$ 、50% R.H. 室内に静置した。

(4) 硬化収縮率の試験方法

セメントの水和反応による絶対体積の減少率すなわち硬化収縮率は、内部空隙増加率を測定することにより実測することができる<sup>9)</sup>。図-3 に示すように、打ち込み高さが約 3~12 mm となるように 300 ml のガラス製三角フラスコにセメントペーストを採り、外部振動機で十分締め固め、直ちにピペットの目盛り位置まで水 (水道水を沸騰させた後  $20^\circ\text{C}$  に調整したもの) を加えた。打ち込み直後を原点とし所定の材令における水の減少量をピペットの目盛りから読み、この減少量を初期のセメントペースト体積で除して求めた値を硬化収縮率とした。測定は、 $20^\circ\text{C}$  室内で行い、同一配合について 2 試料採って行った。なお、水セメント比が低い場合には、硬化体組織が緻密なため水の浸透速度が遅くなる。水和反応に伴い形成される内部空隙のすべてに水を浸透させるためには、打ち込み高さを薄くする必要があるが、精度を上げるためには試料体積が多い方が望ましい。図-4 に示すように打ち込み高さを 3~12 mm と変化させても測定値は概ね同じであったので、この程度の試料厚さであれば測定用水の浸透速度が空隙増加速度に追従するものと考えられる。以下、測定精度を考慮して試料厚さは 12 mm とした。

なお、測定用水投入時に若干の材料分離が認められたが、用いたセメントペーストの水結合材比は 0.40 以下と低いため材料分離は水の投入口付近のみに限られた。さらに、本実験で得られた測定値が既往の実験結果<sup>9)</sup>や水和反応式から求めた理論値<sup>9)</sup>と概ね一致することから、材料分離の影響は無視できると考えられる。

4. 自己収縮に及ぼす配合の影響

(1) 硬化収縮と自己収縮の関係

図-4 は、 $4 \times 4 \times 16$  cm セメントペースト供試体の自己収縮ひずみの測定値 ( $\epsilon$ ) から求めた体積減少率の近似値 ( $3\epsilon$ ) および図-2 の方法で求めた硬化収縮率の測定値を示したものである。同図には、使用したセメントの

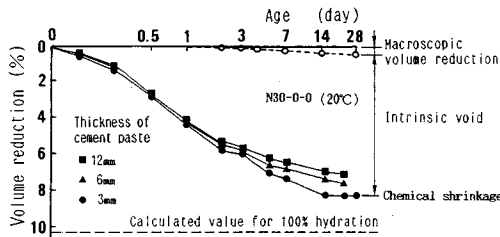


図-4 硬化収縮と自己収縮の関係

鉱物組成と水和反応式から求めた 100%反応時の理論収縮率<sup>9)</sup>を破線により示したが測定値とほぼ一致している。また、密封養生条件下でも外部から十分な水の補給がある場合と同様に水和が進行すると仮定すると、硬化収縮率とマクロな体積減少率の差は水和反応に伴う内部空隙の増加率を意味する。同図より、硬化収縮の大部分は内部空隙の形成により補われており、自己収縮により補われる割合は小さいことがわかる。しかし後述するように、工学的にひびわれを評価するひずみとして考えると、自己収縮は極めて大きな値でありうるようになった。以下、自己収縮に及ぼす配合の影響について述べる。

(2) 自己収縮に及ぼす配合の影響<sup>19)</sup>

a) セメントペースト

図-5は、普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストの自己収縮ひずみを始発前後から測定した結果を示したものである。以下の図において配合は、(セメントの種類)(水結合材比%)-(混和材置換率%)-(混和剤添加率%)と略記した。セメントの種類の記事は表-1で示したものとした。材令1日以前で水和熱により、最大で約20°Cの温度上昇が認められた。若材令時の熱膨張挙動は間隙水の熱膨張の影響を受け複雑であると考えられるが、ここではセメントペーストの熱膨張係数を  $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  として供試体長さの補正を行った。

同図より、凝結直後から材令1日までに生じる自己収縮は水セメント比が小さいほど大きくなることがわかる。水セメント比0.30以下の場合、ほぼ終結時から自己収縮が起こり始めている。シリカフュームおよび高性能減水剤により水結合材比を0.17とした場合には、終結直後から極めて大きな自己収縮が生じ、材令1日で  $2500 \times 10^{-6}$  と極めて大きな値となった。しかし、材令1日以後では、シリカフューム無混入の場合は逆に水セメント比が大きいほど自己収縮の増加速度が大きくなった。なお、高性能減水剤の影響は水セメント比のそれより小さい<sup>2)</sup>。

図-6は、早強ポルトランドセメントを用いたセメントペーストの自己収縮を材令24時間を原点にして測定した結果である。材令24時間以降の自己収縮は  $W/C=0.30 \sim 0.40$  程度で最大となり、これより水セメント比が

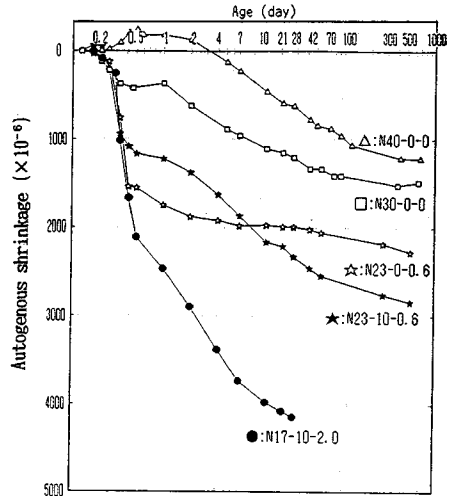


図-5 セメントペーストの自己収縮(凝結時原点)

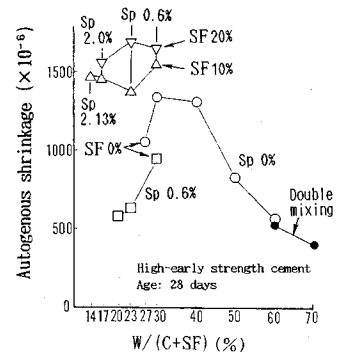


図-6 セメントペーストの自己収縮(材令24時間原点)

大きくても小さくても自己収縮は減少した。ただし、シリカフュームを混入した場合には水セメント比がさらに小さな範囲まで自己収縮は増大した。

以上のように水セメント比の影響が材令により異なるのは次のように説明できる。自己収縮を生じさせる駆動力は、自己乾燥(Self-desiccation)により間隙水に発生する負圧によると考えられる。水セメント比の減少により間隙水のメニスカス半径が減少するため負圧は増加する。材令1日程度以前の初期材令では、この影響が卓越すると考えられる<sup>26)</sup>。しかし、材令と共に硬化体の弾性係数が増加してくると収縮力と抵抗力の兼ね合いがより重要になるものと考えられる。なお、水セメント比が極めて小さい場合は、長期材令で水和が停滞することもまた自己収縮速度の減少の一因と考えられる。

b) コンクリート

図-7は、埋め込みゲージ(弾性係数:50MPa)により測定したコンクリートの長さ変化を示したものである。 $W/(C+SF)=0.17$ の場合には、凝結直後から極めて大きな自己収縮ひずみを生じ、長期にわたり自己収縮が

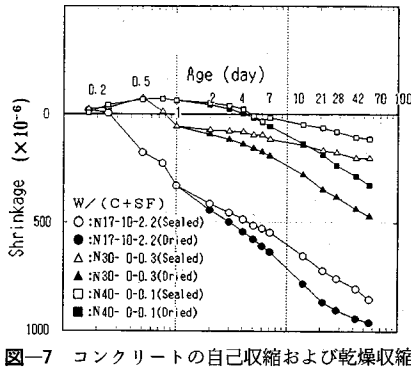


図-7 コンクリートの自己収縮および乾燥収縮

継続している。材令2ヶ月における自己収縮ひずみは  $W/(C+SF)=0.40$  で  $100 \times 10^{-6}$ ,  $W/(C+SF)=0.30$  で  $200 \times 10^{-6}$  程度であるが,  $W/(C+SF)=0.17$  の場合は  $800 \times 10^{-6}$  と極めて大きくなった<sup>23)</sup>。

同図より, 密封供試体と乾燥供試体の収縮ひずみの差に着目すると,  $W/(C+SF)=0.17$  の場合は両者の差が小さく, 乾燥供試体の収縮の大部分が自己収縮によることを示している。

コンクリートの自己収縮が水セメント比が小さくなるに従って大きくなるという実験結果は, 乾燥収縮の場合と逆の傾向である。また, 水セメント比の極めて小さい超高強度コンクリートでは, 水分の逸散により生じると考えられていた乾燥収縮ひびわれやプラスチック収縮ひびわれは, 自己収縮の影響を大きく受けることが明らかとなった。

### (3) 水中養生中の収縮<sup>22)</sup>

図-8は, 早強セメントで作製した  $4 \times 4 \times 16$ cm セメントペースト供試体を材令1日で脱型した後, 直ちに水中に浸せきし水中養生中の長さ変化を測定した結果を示したものである。  $W/C=0.30$  の場合は湿潤膨張が認められるが,  $W/(C+SF)=0.17$  の場合は水中でも大きな収縮ひずみを示している。

図-9は, 水セメント比0.30の場合について水中養生中の長さ変化に及ぼす供試体寸法の影響を示したものである。断面寸法の小さな  $2 \times 2 \times 16$ cm 及び  $4 \times 4 \times 16$ cm 供試体では湿潤膨張する傾向にあるが, 断面寸法の大きな  $10 \times 10 \times 40$ cm の場合, 水中で収縮ひずみを示している。

このように水中養生中の収縮は従来の湿潤膨張の概念に矛盾し一見不可解な現象であるが, 水セメント比がきわめて小さい場合や供試体の断面寸法が大きい場合は, 水中に保存するだけでは水の浸透速度が硬化収縮によって生じる空隙の生成速度に追いつかず, 表層部だけしか水で充填されず内部は自己乾燥状態となったため生じた同一の現象と考えることができる。

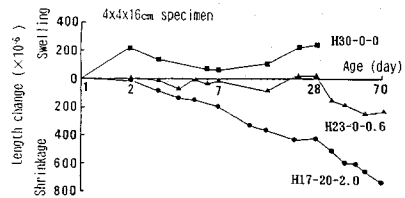


図-8 水中養生中の長さ変化 (W/Cの影響)

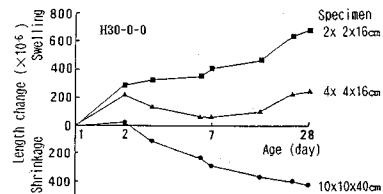


図-9 水中養生中の長さ変化 (供試体寸法の影響)

### (4) モルタルの曲げ強度に及ぼす自己収縮の影響

セメントペーストの実験結果から, 低水結合材比の場合, 自己乾燥は圧縮強度をほとんど変化させないが曲げ強度を著しく低下させることを著者らは既に報告した<sup>2)</sup>。

図-10は, 早強ポルトランドセメントを用いたモルタル供試体 ( $10 \times 10 \times 40$ cm) を材令7日まで水中養生した後, 全面シールならびに2面乾燥させた場合の曲げ強度の経時変化を示したものである。全面シールした供試体の重量減少は生じていないことを確認している。強度試験はシールを剥した直後に行い, 2面乾燥させた場合は, 乾燥面を上下縁として曲げ載荷した。同図より,  $W/C=0.50$  および  $0.70$  の場合は, シールした供試体の曲げ強度はほとんど変化していないのに対し,  $W/C=0.30$  の場合は著しく低下している。

従来より, 乾燥途中で曲げ強度が低下するのは乾燥収縮に起因する自己応力によると考えられていた。すなわち供試体表面部の乾燥収縮が内部の拘束を受け引張の自己応力を生じるためと説明されている。しかし, 水セメント比が低い場合に, 水中養生終了後に供試体をシールして乾燥を防いでも曲げ強度がしだいに減少する現象は従来の乾燥収縮の理論では説明できない。

図-11は, 図-10と同様の条件下で行った供試体の長さ変化の測定結果を示したものである。全面シールしたモルタル供試体でも収縮ひずみが認められ, 特に  $W/C=0.30$  の場合は, 乾燥収縮の  $2/3$  程度と大きな収縮ひずみが生じている。これは水セメント比が低い場合, 硬化体組織が緻密なため水中養生中に水が供試体表層部だけに浸透し, 中心部は自己乾燥状態になることに起因すると思われる。

一方, このような断面内の水分分布は, 内部拘束により供試体表面部に圧縮の自己応力を生じさせる。しか

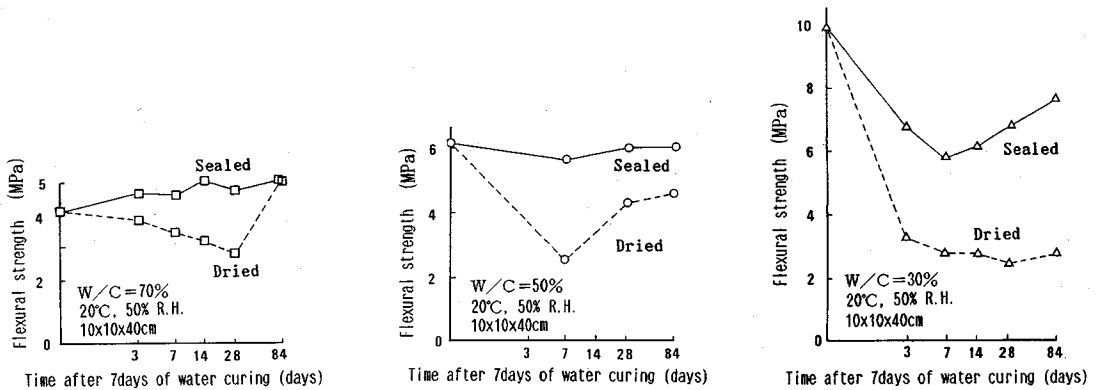


図-10 モルタルの曲げ強度の水中養生後の経時変化

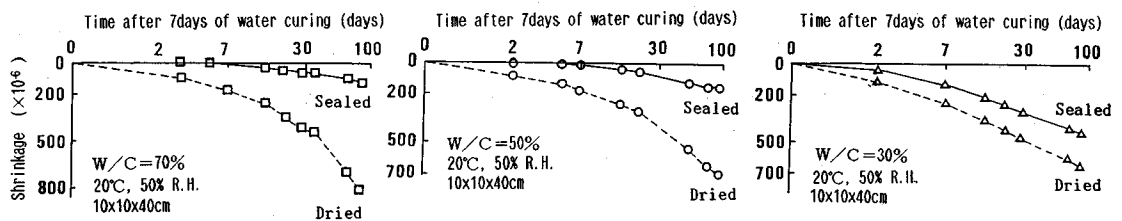


図-11 モルタルの水中養生後の長さ変化

し、供試体を全面シールした後も供試体表面部の水分が中心部に向かって移動するため、表面部は湿潤状態から自己乾燥状態へと変化し、自己応力も圧縮から引張へと変化すると考えられる。引張の自己応力がピークに達した後は、水分分布の均一化およびクリープにより自己応力は消失していくと考えられる。シール供試体の曲げ強度の低下およびその後の回復は、以上のような自己応力の経時変化により説明できる。

従来、コンクリートの乾燥収縮に関する研究においては、一般に自己収縮は無視されてきた。しかし、水セメント比の低い場合は、収縮や強度に及ぼす自己収縮の影響が極めて大きくなることが明らかとなった。

### 5. 自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響<sup>20)</sup>

図-12は、セメントペーストの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響を示したものである。材令700日を越えてなお収縮が継続しているセメントがあることが認められる。また、セメントの種類により自己収縮の大きさは著しく異なる。普通セメント(N)と比較すると、早強セメント(H)では初期の自己収縮が大きく、中庸熱セメント(M)では自己収縮が小さくなっている。高炉スラグセメントB種(B)では、長期にわたり自己収縮が増大している。また、C<sub>3</sub>S系セメント(L)は、材令70日までの範囲では、自己収縮が極めて小さくなった。セメントの化学組成の影響について、以下の方法で検討す

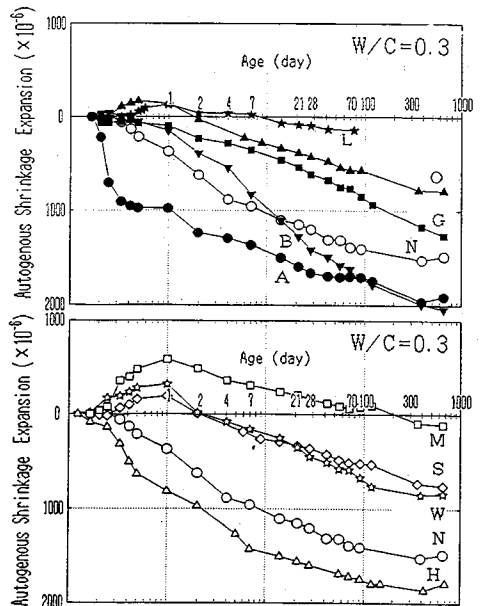


図-12 セメントペーストの自己収縮に及ぼすセメント種類の影響

る。

セメントペーストの自己収縮ひずみが、各鉱物の反応で生じる反応生成物の種類に依存し、各鉱物ごとに異なった大きさで生じるひずみを線形的に重ね合わせたものであると仮定する。図-12に示したデータのうちクリ

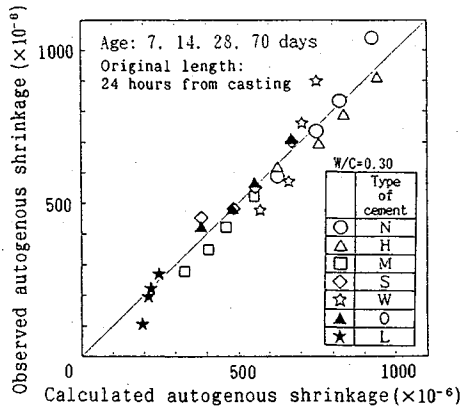


図-13 自己収縮の計算値と実測値の比較

ンカーベースの7種類のセメントの自己収縮ひずみの測定値を用い、鉱物組成は表-2、反応率はCopeland<sup>2D</sup>らが示した値を用いて重回帰を行うと次式が得られた。

$$\begin{aligned} \epsilon_{as} = & -0.012\alpha_{C3S}(t) \cdot (\%C_3S) \\ & -0.070\alpha_{C2S}(t) \cdot (\%C_2S) \\ & +2.256\alpha_{C3A}(t) \cdot (\%C_3A) \\ & +0.859\alpha_{C4AF}(t) \cdot (\%C_4AF) \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

(W/C=0.30, 4×4×16cm セメントペースト, 材令 24 時間原点)

ここに、 $\epsilon_{as}$  : 自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ ),  $\alpha_i(t)$  : 各鉱物の反応率 (%),  $t$  : 材令, ( $\%i$ ) : 各鉱物の含有率 (%),  $i$  : 鉱物の種類

ただし、材令 24 時間以前では試料の沈下の影響、温度上昇に伴う間隙水膨張の影響、凝結時間の違いによる測定開始時刻の影響を受けると考えられる。そこで、これらの影響を除くために材令 24 時間を基準とし、各鉱物の反応率も材令 24 時間を起点にして計算した。

本実験で使用したセメントに含まれる鉱物質微粉末は化学成分がセメントと類似していること、また混入率が 5% 以下 (JIS) と少ないことから、鉱物組成算出に Bogue 式を適用しても誤差は小さいと考えられる。そこで、本研究ではセメント中の鉱物質微粉末の影響は無視した。

石膏の影響は含有率にセメント間で幅が小さいので除外した。また、既報<sup>20)</sup>で示したように材令 24 時間以降ではセメントの粉末度の影響は少ないのでここでは考慮しなかった。

図-13は、式(1)による予測値と実測値の比較を示したものである。いずれの材令においても両者はよく一致しており、本方法によりセメントペーストの自己収縮ひずみを予測できることを示している。また、 $C_3A$  および  $C_4AF$  の係数が大きくなっているのに対し、 $C_3S$  および  $C_2S$  の係数は絶対値が 1~2 桁小さく符号が逆で負になっている。このことは、 $C_3A$  および  $C_4AF$  の反応が自

己収縮の大きさに大きく関わっており、これらの含有量が多いほど自己収縮が大きくなることを示している。

なお、乾燥条件下での収縮に及ぼすセメントの鉱物組成の影響については古くから研究されており、 $C_3A$  の影響が最も大きいことが示されている<sup>27), 28)</sup>。しかし、本研究の結果と比較すると乾燥収縮の場合には鉱物ごとの係数の差が極めて少ないことから、鉱物組成の影響は自己収縮の場合に顕著に現れるものと考えられる。

### 6. 高炉スラグ微粉末の粉末度及び置換率の影響

前章では、高炉スラグセメント B 種を用いたセメントペーストの自己収縮が、長期材令において普通セメントと比べて大きくなることを示した。ここでは、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混和材として混入し、粉末度および置換率の影響について検討した。なお、自己収縮に及ぼす石膏含有率の影響を高炉スラグ微粉末 (粉末度 4060 $cm^2/g$ ) の置換率 50% の系で調べた結果、 $SO_3$  換算で 0~4% の範囲では、後述する高炉スラグ微粉末混入の影響に比べて極めて小さかった。

図-14は、W/C=0.40 のセメントペーストの自己収縮ひずみに及ぼす高炉スラグ微粉末の粉末度および置換率の影響を示したものである。粉末度 3380 $cm^2/g$  の場合は、高炉スラグ微粉末を混入することにより自己収縮は若干小さくなっている。一方、粉末度 4060 $cm^2/g$  では材令 4 日以降、粉末度 8360 $cm^2/g$  では材令 2 日以降における自己収縮速度が高炉スラグ微粉末無混入の場合に比べて増大している。

図-15は、図-14のデータを打ち込み時を原点としてまとめて示したものである。粉末度 3380 $cm^2/g$  の場合は、高炉スラグ微粉末の混入率の増大にともない自己収縮は若干減少した。それに対し粉末度の高い高炉スラグ微粉末を用いるとセメントペーストの自己収縮ひずみは増加し、置換率 70% 程度で自己収縮ひずみは最大となった。

図-16は、硬化収縮率に及ぼす高炉スラグ微粉末の粉末度および置換率の影響を示したものである。粉末度 3380, 4060 $cm^2/g$  の場合、置換率 50% 以上で置換率の増加と共に硬化収縮率が減少しており、反応率が低下していることが解る。一方、粉末度 8360 $cm^2/g$  では、置換率 25~70% で硬化収縮率が無添加の場合と比べて若干増加した。自己収縮のデータを示した図-15の結果と比較すると、硬化収縮率と自己収縮ひずみは直接的な相関はないことが認められる。

図-17は、高炉スラグ微粉末を混入したセメントペーストについて水銀圧入法により求めた細孔径分布を示したものである。粉末度 4080 および 8360 $cm^2/g$  で置換率 70% の場合、プレーンの場合と比べて微細な細孔が増加

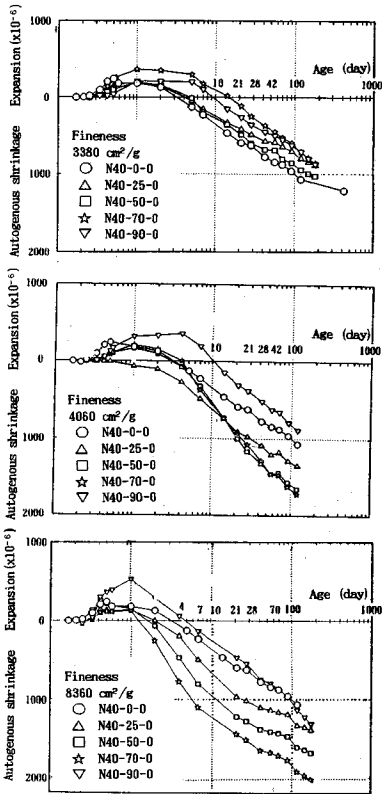


図-14 自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響

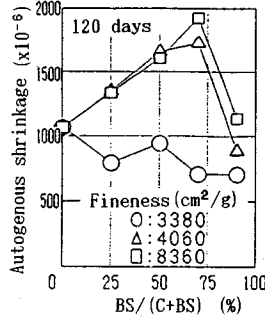


図-15 高炉スラグ微粉末の置換率と自己収縮の関係

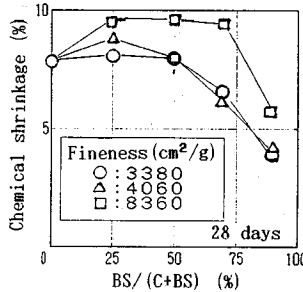


図-16 高炉スラグ微粉末の置換率と硬化収縮率の関係

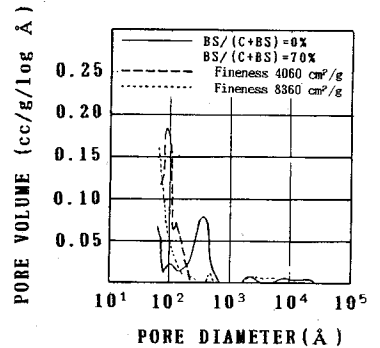


図-17 細孔径分布に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響

し組織が緻密化している。これらの条件では自己収縮が増大していることから、自己収縮の駆動力が毛細管張力によることを示唆している。

### 7. 自己収縮に及ぼす骨材混入の影響

自己収縮はセメントペースト部分で生じるので、骨材を混入することにより自己収縮は減少する。骨材の効果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、直列モデル(式(2)), 並列モデル(式(3))およびコンクリートの乾燥収縮に関して提案されているHobbs<sup>24)</sup>の式(4)を用いた。これらの式の誘導において骨材の収縮は0とした。

$$\epsilon_c/\epsilon_p = 1 - V_a \dots\dots\dots(2)$$

$$\epsilon_c/\epsilon_p = (1 - V_a) / \{(E_a/E_p - 1) V_a + 1\} \dots\dots\dots(3)$$

$$\epsilon_c/\epsilon_p = \frac{(1 - V_a)(K_a/K_p + 1)}{1 + K_a/K_p + V_a(K_a/K_p - 1)} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\epsilon_c$ 、 $\epsilon_p$ :コンクリートおよび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、 $E_a$ 、 $E_p$ :骨材およびセメントペーストの静弾性係数、 $K_a$ 、 $K_p$ :骨材およびセメントペーストの体積弾性係数、 $K = E/3 (1 - 2\nu)$

$E_a > E_p$  の場合は、直列式および並列式はそれぞれ推定値の上限值および下限値を与える。

図-18は、モルタルおよびコンクリートについての測定結果を各複合則による予測値と共に示したものである。Hobbsによる予測値と実測値は概ね一致している。骨材の混入により自己収縮は低減され、その効果は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<sup>25)</sup>。

### 8. 自己収縮の低減方法

#### (1) 乾燥収縮低減剤および膨張材の影響<sup>22)</sup>

コンクリートの乾燥収縮によるひびわれを低減する目的で、従来より種々の膨張材や収縮低減剤が使用されている。ここでは、これらの混和材料が自己収縮の低減にも効果があるか否かを検討した。添加率は、乾燥収縮の低減を目的とした場合の標準添加率を目安とした。

図-19に示すように、アルキレンオキッド系またはグリコールエーテル系の乾燥収縮低減剤の使用によりセメントペーストの自己乾燥の増加速度はかなり小さくなっている。アルキレンオキッド系の混入により、水の表面張力は約1/2に低下しており自己収縮の低下率と概ね一致している。



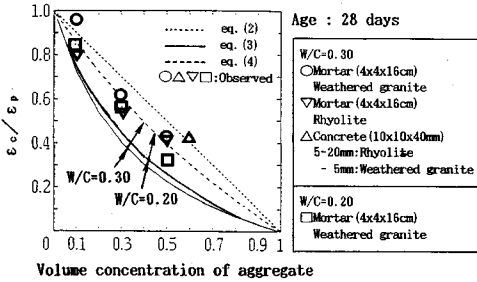


図-18 自己収縮に及ぼす骨材の体積濃度の影響

同図に示すように、いずれの膨張材を用いた場合も、乾燥収縮の場合と同様に自己収縮の低減効果が認められたが、その効果は膨張材の種類によりかなり異なった。同じ CaO 系のもので製品により効果が異なり、特に膨張材 E3 を用いた場合は、自己収縮は長期にわたり著しく低減された。一方、他の膨張材 (E1, E2) を用いた場合は、膨張終了後に自己収縮が生じ、自己収縮速度は無混入の場合と比べて同等かそれ以上となった。

(2) 撥水性粉末の影響

図-20 は、セメントペーストの自己収縮に及ぼす撥水性シリカ質粉末の影響について示したものである。混入率 7.5% 以上の場合、材令 100 日程度まで自己収縮が極めて小さくなっている。ただし、それ以降は自己収縮が増加していく傾向にある。モルタル (W/C=0.40) の表面と水との接触角を測定した結果、撥水性粉末をセメントに対して 7.5% 混入すると、材令 7 日で 47.5° から 115.3°、材令 28 日で 48.2° から 64.6° に増加した。撥水性粉末の混入により接触角が増加し、硬化体の表面で水の濡れが悪くなったことを示している。このことから類推すると撥水性粉末の混入により自己収縮が減少したのは、間隙水と固相の接触角が大きくなり間隙水に生じる負圧が減少したためであると考えられる。

9. 結論

本研究の範囲内で得られた主な結論を要約すると次のようになる。

- (1) 水セメント比 0.30 程度以下のセメントペーストでは凝結直後から自己収縮が生じ、材令 1 日程度までの初期材令における自己収縮は水セメント比が小さいほど大きくなる。
- (2) 早強セメントを用い混和材無混入の場合は、セメントペーストの材令 1 日程度以降の長期における自己収縮は水セメント比 0.30~0.40 で最大となる。ただし、シリカフェームおよび高性能減水剤を混入して水結合材比をさらに小さくした場合は、自己収縮が著しく増大する。
- (3) 水結合材比が小さいコンクリート (W/(C+

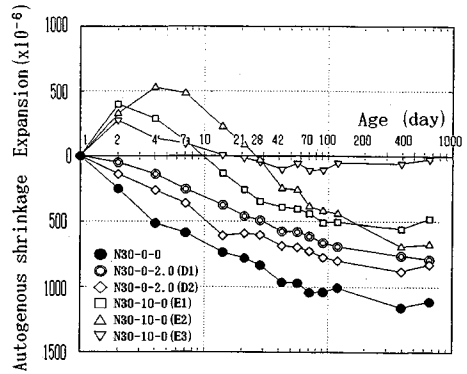


図-19 自己収縮に及ぼす乾燥収縮低減剤および膨張材の影響

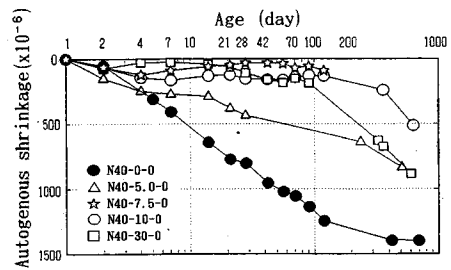


図-20 自己収縮に及ぼす撥水性粉末の影響

SF)=0.17) が乾燥を受ける場合、全収縮のうち乾燥収縮の占める割合は極めて小さく、大部分が自己収縮に起因する収縮である。

(4) セメントペーストの自己収縮に及ぼすセメントの鉱物組成の影響は、式 (1) により評価することができ (W/C=0.30), C<sub>3</sub>A および C<sub>4</sub>AF 含有量の多いセメントほど自己収縮は大きくなる。

(5) 粉末度が 4000cm<sup>2</sup>/g 程度以上の高炉スラグ微粉末を用いるとセメントペーストの自己収縮は増大し、置換率 50~70% で最大となる。

(6) 自己収縮は骨材の混入率が増加するにしたがい減少する。この実験結果は、コンクリートをセメントペーストと骨材の 2 相材料とした既往の複合則による予測値とよく一致する。

(7) 表面張力低減剤および撥水性粉末の混入により、セメントペーストの自己収縮を低減することができる。また、膨張材によりセメントペーストの自己収縮を低減することができるが、その効果は膨張材の種類により著しく異なる。

本研究の一部は、平成 4 年度文部省科学研究費補助金及びセメント協会研究奨励金の補助により行われた。また日本セメント (株) および秩父セメント (株) に御協力を賜った。さらに広島大学工学部構造材料研究室の

卒業生及び学生の重川幸司氏, 三宅啓文氏, 佐藤 剛氏, 小泉恵介氏, 小西謙二郎氏, 佐藤克俊氏, 三浦智哉氏に多大な御協力を賜わった。記して感謝の意を表す次第である。

### 参 考 文 献

- 1) Davis, H.E.: Autogenous volume change of concrete, Proc. ASTM, 40, pp. 1103-1110, 1940.
- 2) 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.
- 3) White, A.H.: Volume change in hydrated portland cement, Concrete, Vol.33, No.2, pp. 41-45, 1928.
- 4) Powers, T.C.: Adsorption of water by portland cement paste during the hardening process, Industrial and engineering chemistry, Vol.27, No.7, pp. 790-794, 1935.
- 5) Tazawa, E.: Influence of curing time on shrinkage and weight loss of hydrating portland cement, Proc. of JSCE, No. 159, 1969.
- 6) 田澤栄一・宮沢伸吾・笠井哲郎: 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, 40, pp. 75-78, 1986.
- 7) Powers, T. C. and Brownyard, T.L.: Study of the physical properties of hardened portland cement paste, Part 9, Bulletin No. 22, PCA, 1948.
- 8) Copeland, L. E. and Bragg, R.H.: Self-desiccation in Portland-cement paste, Bulletin No.52, PCA, pp. 1-11, 1955.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Davis, H. E.: Autogenous volume change of concrete, Proc. ASTM, 40, pp. 1103-1110, 1940.
- 12) Neville, A.M.: Hardened concrete, Physical and mechanical aspects, ACI Monograph, No.6, pp. 122, 1971.
- 13) Mcgrath, P.: Self-desiccation of Portland-cement and silica fume modified mortar, Ceramic Transactions, Advances in Cementitious Materials, Vol. 16, The American Ceramic Society, pp. 489-500, 1990.
- 14) de Larrard, F.: Creep and shrinkage of high-strength field concrete. High-Strength Concrete, ACI, SP-121, pp. 577-598, 1990.
- 15) de Larrard, F. and Le Roy, R.: The influence of mix composition on mechanical properties of high-performance silica-fume concrete, 4th CANMET/ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP-132, pp. 965-986, 1992.
- 16) Paillere, A. M., Buil, M. and Serrano, J. J.: Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete, ACI Material Journal, vol.86, No. 2, pp. 139-144, 1989.
- 17) Schrage, I., Mangold, M. and Sticha, J.: An approach to high-performance concrete in Germany, 4th CANMET/ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, pp. 493-511, 1992.
- 18) Holland, T. C. et al.: Use of silica-fume concrete to repair abrasion-erosion damage in the Kinzua Dam stilling basin, 2th CANMET/ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, SP-91, pp. 841-863, 1986.
- 19) 田澤栄一・宮沢伸吾・佐藤 剛: セメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp. 684-689, 1992.12.
- 20) 田澤栄一・宮沢伸吾・佐藤 剛: 自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響, 第47回セメント技術大会講演集, pp. 554-559, 1993.
- 21) Brunauer, S. and Copeland, L.E.: The Chemistry of concrete, Scientific American, 1964.
- 22) Tazawa, E. and Miyazawa, S.: Autogenous shrinkage caused by self desiccation in cementitious material, 9th Int. Cong. on the Chemistry of Cement, IV, pp. 712-718, New Delhi, 1992, 11.
- 23) 宮沢伸吾・田澤栄一・佐藤 剛・佐藤克俊: 鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15-1, pp. 57-62, 1993.
- 24) Hobbs, D.W.: Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete, Journal of ACI, Vol.71, No. 9, pp. 445-450, 1974.
- 25) 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.
- 26) Wittmann, F.H.: On the action of capillary pressure in fresh concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 49-56, 1976.
- 27) 中條金兵衛・關野真司・近藤 実: 道路用セメントの研究(第1報), セメント技術年報, Vol. 5, pp. 149-156, 1950.
- 28) 浜田 稔・藤松 進: 日米両国セメントの収縮およびき裂性状に関する比較研究, セメント技術年報, No. 12, pp. 149-155, 1958.

(1993.7.15 受付)

## INFLUENCE OF BINDER AND MIX PROPORTION ON AUTOGENOUS SHRINKAGE OF CEMENTITIOUS MATERIALS

Ei-ichi TAZAWA and Shingo MIYAZAWA

Effect of cement, admixture, water-binder ratio and volume concentration of aggregate, on autogenous shrinkage of cement based materials was experimentally investigated. Large amount of autogenous shrinkage was observed in cement paste and concrete with very low water-binder ratio. Autogenous shrinkage was increased with increase in  $C_3A$  content of cement. It was increased by blast-furnace slag with higher fineness. Effect of volume concentration of aggregate was able to be estimated by an existing composite low. Some kind of admixtures could decrease autogenous shrinkage.