

[1013] シリカフュームを用いたコンクリートの乾燥収縮特性

正会員○竹村 和夫 (呉工業高等専門学校)  
 正会員 米倉 亜州夫 (広島大学工学部)  
 正会員 田中 敏嗣 (広島大学大学院)

1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮は、部材が拘束されているとひびわれを生じる原因となり構造物の耐久性の低下の一因ともなる。また、プレストレストコンクリートではプレストレス損失にも影響を及ぼす。乾燥収縮機構はコンクリート中の水分の挙動、とくにセメントゲル空隙中の水分によって説明されることが多い。一方、近年、高性能減水剤を用いることにより水セメント比の極めて低いコンクリートが製造可能となっている。さらに、最近コンクリート材料として利用が注目されているシリカフュームは粒径が極めて小さくしかも粒形が球状であるため更に水結合材比の小さい高強度コンクリートを作ることができる。水セメント比を極端に小さくすることやシリカフュームを用いることによってペーストの細孔構造が変化しゲル中の水分の挙動が変化することが予想されるのでコンクリートの乾燥収縮も異なってくると考えられる。

従って、本報告では、コンクリートの水セメント比(水結合材比)を 15~50%の範囲で変え、シリカフュームのセメントに対する代替率も変えて、乾燥収縮、ポロシチー、強度などについて実験的に検討を行った。

2. 実験の概要

本実験に使用した材料は、普通ポルトランドセメント、表-1に示すシリカフューム、太田川産の川砂(比重=2.56、FM=2.66、吸水率=1.35%)、最大寸法20mmの碎石(比重=2.63、FM=6.63、吸水率=1.43%)であり、高性能減水剤はポリアルキルアリルスルホン酸塩系のものを用いた。

表-1 シリカフュームの比重と化学成分(百分率)

比 重	強熱減量	C	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	合計
2.19	1.1	0.9	97.0	0.09	0.09	0.11	0.09	0.3	0.09	99.8

コンクリートの配合はシリカフュームを用いて水結合材比の低いコンクリートの乾燥収縮を検討するため、シリカフュームを用いないプレーンコンクリートとともに表-2に示す10種のものを用いた。

表-2 コンクリートの配合

配合の 記号	Ms (mm)	W/(C+Si) (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	Si (kg/m <sup>3</sup> )	SP. (Cx%)
50-0	20	50	44	180	360	773	1010	0	0.4
50-10	20	50	44	180	324	768	1003	36	0.7
50-20	20	50	44	180	288	762	996	72	1.4
30-0	20	30	40	180	600	625	965	0	0.5
30-10	20	30	40	180	540	616	951	60	0.5
30-20	20	30	40	180	480	608	938	120	1.2
20-0	20	20	38	180	900	502	841	0	6.0
20-10	20	20	38	180	810	490	821	90	5.0
20-20	20	20	38	180	720	477	800	180	2.3
15-20	20	15	37	180	960	367	642	240	5.5

強制練りミキサで練りませ、乾燥収縮測定用には10×10×40cm供試体、強度試験用にはφ10×20cm円柱供試体を作成した。いずれの供試体も材令28日までは20°C±1 deg.の

注)Ms;粗骨材最大寸法, Si;シリカフューム, SP.;高性能減水剤

水中で養生し、以後は $20^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ deg.}$ 、 $60 \pm 5\% \text{ RH}$  の室内で養生した。乾燥収縮測定用供試体は水上げ後コンパレータを用いて基長(約340 mm)を測定した。円柱供試体は材令28、56及び91日で圧縮強度試験と割裂強度試験に供した。ポロシチーの測定は材令28日の割裂試験後の供試体から取り出した試料を用いて水銀圧入法によった。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 コンクリートの強度について

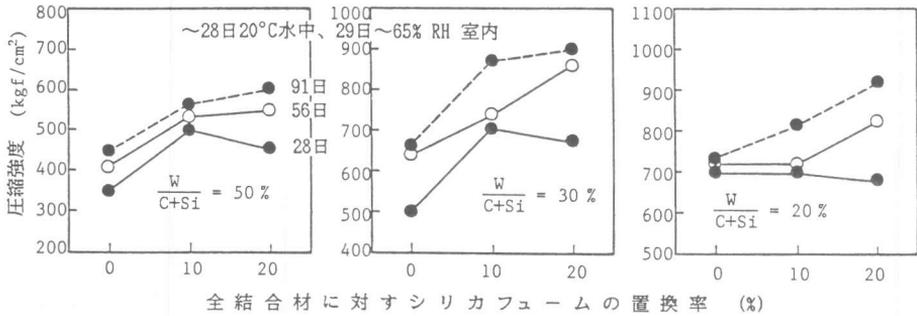


図-1 シリカフューム置換率とコンクリートの圧縮強度

図-1は材令28日までは水中養生以後は室内で養生を行ったコンクリートの圧縮強度試験結果である。シリカフュームを用いると同一水結合材比での圧縮強度はいずれもプレーンコンクリートより高くなっており、しかも材令28日の値以外は、シリカフュームの置換率を増すと強度も大となっている。置換率15%<sup>1)</sup>まではシリカフュームを用いると材令7日から28日の強度改善に効果が大いという報告もあるが、内割では10%<sup>2)</sup>で中長期の強度が増大するとの報告もされている。

表-3は各コンクリートのぜい度係数を示している。水結合材比が小となると、ぜい度係数は大となるが、水結合材比が低い部分ではシリカフュームの使用によるぜい度係数への影響はほとんど見られない。

図-2に示すように、結合材水比と圧縮強度との関係は、結合材水比が大となると、あるいは圧縮強度が $700 \text{ kg/cm}^2$ をこえると直線関係を示していないが、これは使用した粗骨材に問題があったためと考えられる。

#### 3.2 ポロシチーについて

図-3から図-5はポロシチーの測定結果から細孔径分布を示したものである。また、図-6はその容積分率を示している。水結合材比が小となると全細孔容積が減少し、細孔径は小さくなっている。また、シリカフュームを用いるとさらに細孔容

表-3 ぜい度係数

W C+Si	Si C+Si	ぜい度 係数
50	0	11
50	10	14
50	20	14
30	0	18
30	10	17
30	20	16
20	0	17
20	10	18
20	20	18
15	20	19

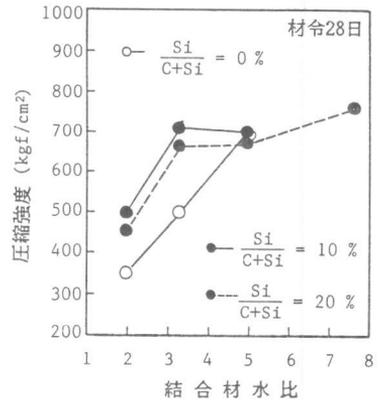


図-2 結合材水比と圧縮強度

積と細孔径は小となる傾向が見られる。

これは、シリカフュームとセメントの反応生成物がセメントペーストのキャピラリ-空隙の一部を充填しているためと考えられる。

### 3.3 乾燥収縮について

図-7及び図-8は、乾燥収縮ひずみと重量減少率の測定結果の例を示している。これらの図のように、水結合材比が小となると乾燥収縮ひずみは小さくなり、シリカフュームを用いるとさらに低減されるといえるが、水結合材比が15%にもなると適切なワーカビリティを得ることが困難となり、乾燥収縮は水結合材比20%のものより多少大きくなっている。

乾燥収縮をセメントゲル中の水分の移動

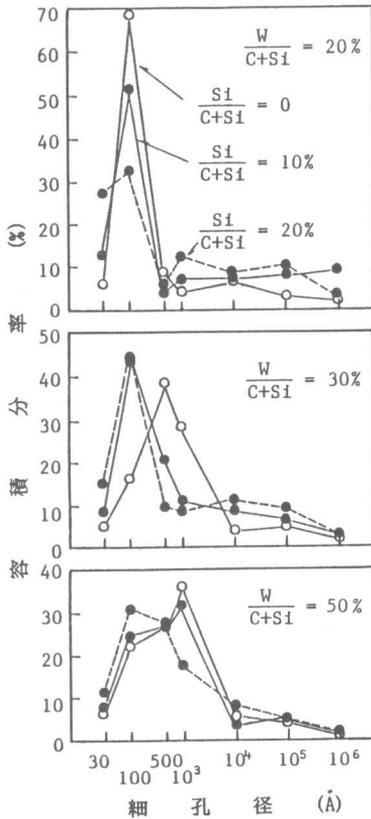


図-6 細孔径とその容積分率

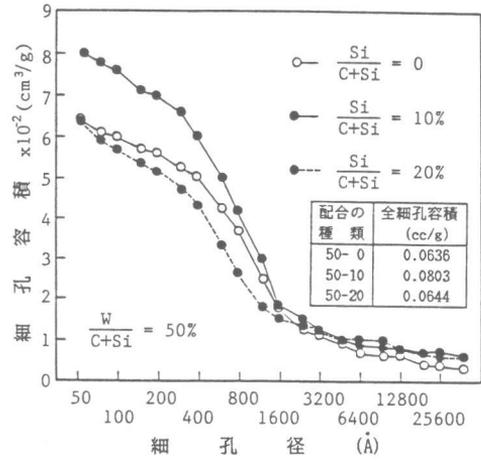


図-3 細孔径分布

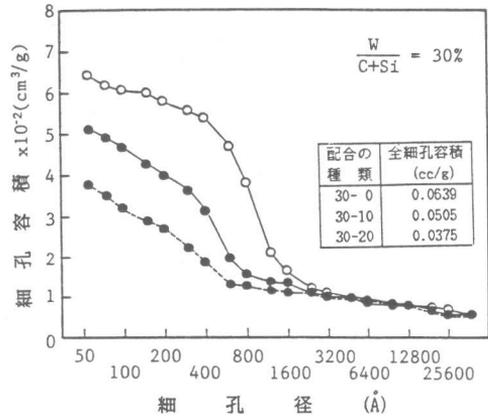


図-4 細孔径分布

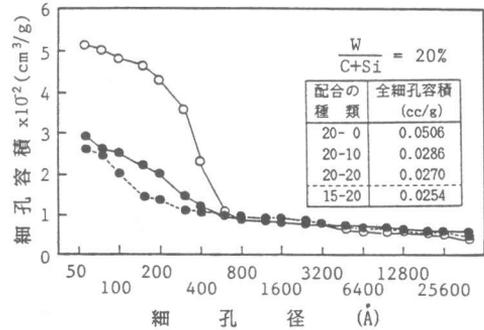


図-5 細孔径分布

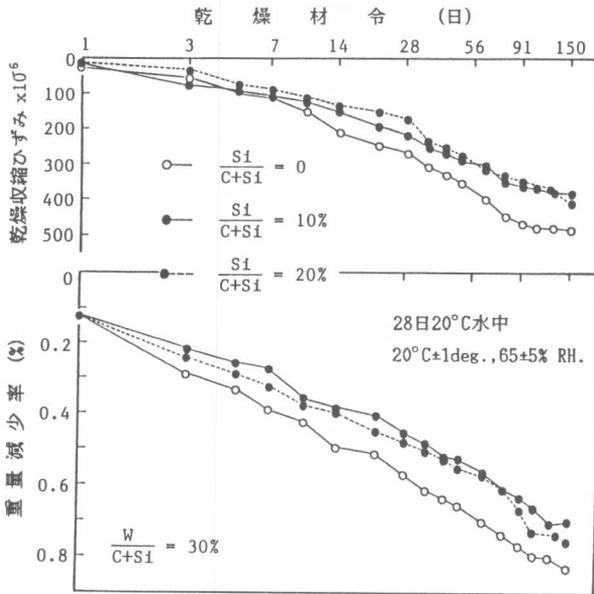


図-7 乾燥材令と乾燥収縮ひずみ及び重量減少率

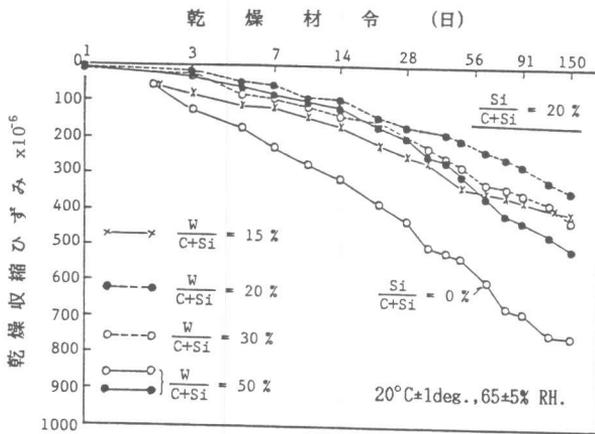


図-8 乾燥材令と乾燥収縮ひずみ

によるセメントゲルの収縮によると考えると、ペースト量の多い配合のコンクリートは乾燥収縮ひずみが大きくなるはずである。シリカフェームは比重がセメントより小さいため、ペースト量は増大しているはずである。普通のコンクリート（単位ペースト量0.35程度以下）ではペースト量が大きくなると乾燥収縮ひずみが増加するが、単位ペースト量当りの乾燥収縮ひずみはペースト量に左右されず一定であ

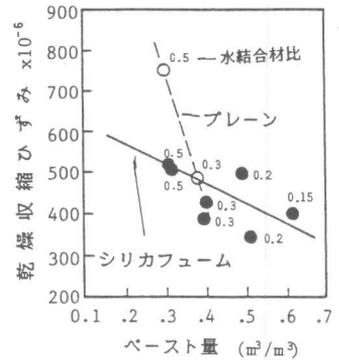


図-9 ペースト量と乾燥収縮ひずみとの関係

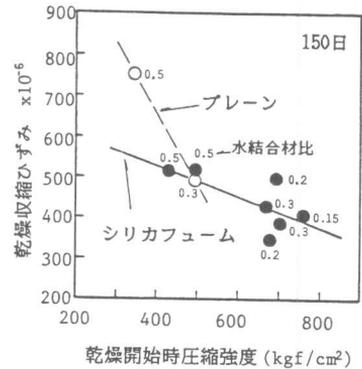


図-10 圧縮強度と乾燥収縮ひずみとの関係

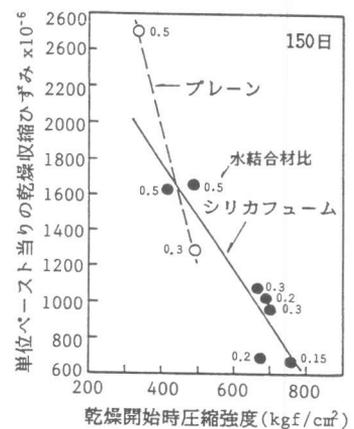


図-11 圧縮強度と単位ペースト量当りの乾燥収縮ひずみ

3) することも報告されている。

シリカフュームを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみはプレーンコンクリートより小さくなるという報告が多いようであるが、モルタルの場合や貧配合のコンクリートの場合には乾燥収縮は大となることもあるという報告もあり、慎重な取扱いが必要であることが指摘されている<sup>4)</sup>

実験結果から単位ペースト量と乾燥収縮ひずみとの関係を求めると、図-9に示すようになり、ペースト量の増加とともに乾燥収縮は減少する傾向を示している。シリカフュームを用いたコンクリートで、置換率 20%の配合では、水結合材比 20% のものは 50%のものに比しペースト量が約 1.6倍になるにもかかわらず材令 150日での乾燥収縮ひずみは約 33%小さくなっている。

この要因のひとつに、コンクリートの強度が考えられるので、乾燥開始時(材令28日)における圧縮強度と乾燥収縮ひずみとの関係を示すと、図-10のようである。圧縮強度が増すと乾燥収縮は小さくなることを示している。すなわち、コンクリートの強度が増すと変形がおこりにくいことを示している。圧縮強度が 700 kgf/cm<sup>2</sup>付近で打点にばらつきが見られるが、これは図-2に示した結合材水比と圧縮強度との関係に見られるように、この強度付近でコンクリートの強度が頭打になったためと考えられる。

そのほかの要因としては、コンクリート中の骨材がセメントペーストの収縮を拘束することを考えると、水セメント比が 30%以下の場合には、全結合材が水和するためには水量が不足し、未水和の結合材が残存していると考えられるから、未水和の結合材が骨材的な役割を果たし、ペーストの収縮を拘束し、乾燥収縮が小さくなるのではないかと思われる。

図-11に示すように、縦軸を単位ペースト量当りの乾燥収縮ひずみに整理し直すと直線関係が、より明確になる。プレーンコンクリートのデータが少ないが、同一圧縮強度における単位ペースト当りの乾燥収縮ひずみはプレーンコンクリートとシリカフュームを用いたコンクリートでは同程度と考えて良いのではないかと思われる。図-1に示したように、シリカフュームを用いると同一水結合材比における圧縮強度がプレーンコンクリートより大となるので、ペースト量に大差がなければ、乾燥収縮ひずみが小さくなるといえる。

図-12は、乾燥開始時の圧縮強度と散逸水量との関係を示している。圧縮強度が高いと水が散逸しにくくなることを示している。これは図-6に示したように、水セメント比が低くなると全細孔容積が減少し、細孔径が小さくなるためといえる。

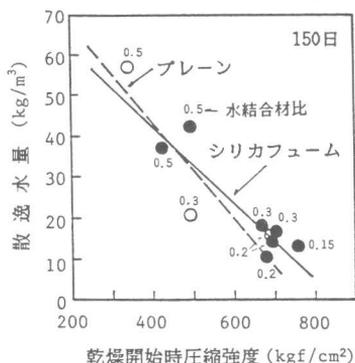


図-12 圧縮強度と散逸水量

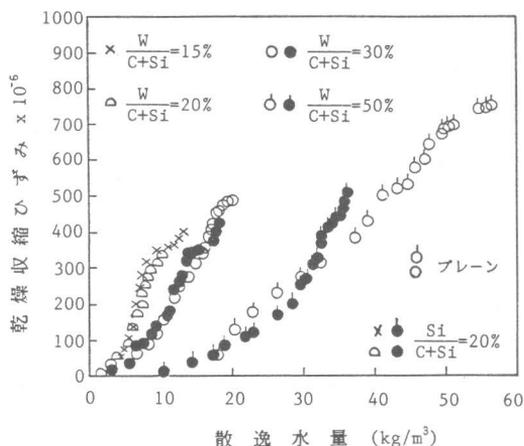


図-13 散逸水量と乾燥収縮ひずみ

図-13は乾燥収縮ひずみにおよぼす散逸水量の影響を示している。水結合材比が小さいと同一散逸水量での乾燥収縮ひずみが大となり、シリカフームを用いるとプレーンコンクリートに比し長期材令での同一散逸水量に対する収縮ひずみが大ききようである。<sup>5)</sup>これは水結合材比の低いコンクリートやプレーンコンクリートと同一水結合材比でシリカフームを用いた場合は、細孔径が小さくなるため、同一散逸水量で大きな毛細管張力が発生するためと考えられる。しかし、同一材令ではシリカフームを用いたコンクリートはプレーンコンクリートより散逸水量が相当少なくなるので、図-14に示すように、乾燥収縮は小となっている。

#### 4. まとめ

主として水セメント比の低いコンクリートにシリカフームを添加した場合の乾燥収縮を検討する目的で、同一水量で水結合材比を15~50%とし、圧縮強度、水銀圧入法によるポロシチー、コンパレータ法による乾燥収縮について調査した結果をまとめると、次のようである。

1) セメントに対するシリカフームの置換率が20%程度まででは、コンクリートの圧縮強度、引張強度とも改善される。

2) プレーンコンクリートでは水セメント比が小となると細孔容積は減少し、細孔径が小さくなるが、シリカフームを用いると同一水結合材比のプレーンコンクリートより細孔容積、細孔径とも小となる傾向があり、水結合材比を20%とするとその傾向が強い。

3) シリカフームを用いると乾燥収縮ひずみ、重量減少率とも同一水結合材比のプレーンコンクリートより小となる。

4) シリカフームを用いたコンクリートでは、水結合材比を下げるためペースト量を増加しても乾燥収縮ひずみは減少する。

5) 乾燥収縮ひずみはコンクリートの圧縮強度が大となると、ほぼ直線的に減少する。

6) シリカフームを用いたコンクリートは、同一散逸水量で比較すると、プレーンコンクリートより乾燥収縮が多少大となるようであるが、水分の散逸速度が小さいため同一材令では散逸水量が少ないので乾燥収縮はプレーンコンクリートより小さくなる。

#### 参考文献

1. 田沢 雄二郎；セメントコンクリート，No.465，PP.20~25，1985
2. 河野，吉栖；第3回コンクリート工学年次講演会論文集，PP.69~72，1981
3. 坂，六車；セメント技術年報，No.24，PP.407~411，1960
4. セメント協会；海洋開発専門委員会報告 M-2，PP.50~53，1986
5. 長滝，米倉；コンクリート工学，Vol.23，No.5，PP.5~15，1985

なお、本研究は昭和61年度文部省科学研究費(一般研究C，研究代表者；米倉)の一部として行ったものである。

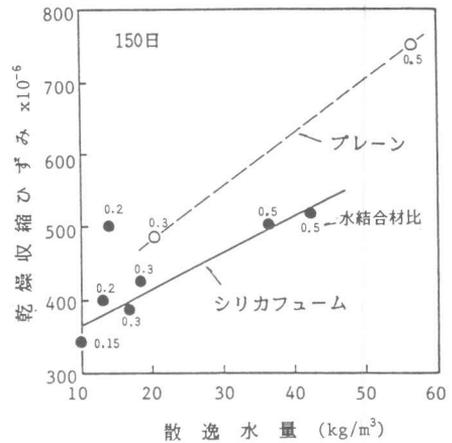


図-14 同一材令における散逸水量と乾燥収縮ひずみとの関係