

## [52] 活性シリカを用いたコンクリートの乾燥収縮およびクリープに関する研究

正会員 ○米 倉 亜州夫（広島大学工学部）

伊 藤 祐 二（広島大学大学院）

### 1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮およびクリープについては、今までの多数の研究により、影響を及ぼす種々の要因が検討され、各々の機構についても幾つかの説が提案されている。しかし、現象の全てを完全に説明することのできる理論は、両者の場合ともまだ存在しないと言われている。現在、中高湿度域における乾燥収縮は、セメントペースト部分の空隙に発生する毛細管張力によるとする毛細管張力理論が最も有力であり、このことは1968年のRILEMの大会で認められている。乾燥に伴なって発生する毛細管張力は、セメントペースト中の細孔の量と大きさの分布に支配されると考えられる。また、コンクリートの乾燥収縮および低応力強度比におけるクリープは、主にセメントペースト中の細孔の変形に起因すると思われる。従って、種々の方法により、細孔容積および細孔径分布を変化させたコンクリートの乾燥収縮およびクリープを検討することにより、両者の機構の解明に一歩近づくことができると思われる。そこで、本研究は、水セメント比を2.5～6.5%と変化させ、セメントペーストのポロシティを著しく変化させることができると言わわれている活性シリカ<sup>1)</sup>を混入し、さらに製造時の養生条件を標準またはオートクレーブ養生としたコンクリートの乾燥収縮、クリープおよび逸散水量を調べ、両者の機構について検討したものである。

### 2. 実験の概要

表-1に実験計画を示す。使用材料は、早強ポルトランドセメント、太田川産砂、広島県可部町産砕石、ナフタリンスルフォン酸塩系の高性能減水剤および活性シリカである。活性シリカはフェロシリコン製造時の副産物で、平均粒径1μ弱の超微粉末である。活性シリカ混入率はセメント重量の30%であり、無混入の場合と比較した。養生条件は標準(N)およびオートクレーブ(AC)養生の2種類である。図-1に乾燥収縮およびクリープ試験用供試体を示す。供試体は材令1日で脱型し、N養生の場合は、20℃の水中で材令28日まで水中養生し、AC養生の場合は、昇温速度6.0℃/hr、最高温度180℃を5時間保持した後自然冷却させ、その後材令28日まで標準養生した。材令28日で圧縮強度試験を行ない、乾燥収縮試験用供試体の場合は、基長後20℃、湿度50%の気中に静置し、クリープ試験用供試体の場合は、基長後PC鋼棒にて応力を導入し、その後20℃、湿度50%の気中または20℃の水中に静置し、400日間長さ変化および重量変化を測定した。クリープ試験の際、供試体の収縮に伴なうPC鋼棒の応力減少については、再緊張を行なわず補正計算を行なって、結果の整理を行なった。

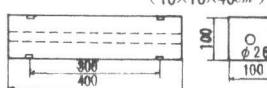
### 3. 試験の結果と考察

1)活性シリカ混入の有無とコンクリート中の細孔構造 図-2はNおよびAC養生をした、材令7日におけるセメントペーストの細孔径分布を水銀圧入式ポロシメーターによって測定した結果を示している。この図より、活性シリカを混入した場合の細孔径分布は、無混入の場合に比べて、N養生の場合、小さい径の細孔が多くなり、AC養生の場合、細孔容積が著しく小さくなっている。これは活性シリカを混入することにより、無混入の場合より、N養生の場合、水和反応が促進され、強度発現が早いこと、またAC養生をすると大量にトベルモライトが生成

表-1 実験計画

活性シリカ 混入率(%)	C×0		C×30		
	単位水量 W/C(%)	N養生	AC養生	N養生	AC養生
2.5	S.C.	S.			
3.0	S.C.	S.C.	S.C.	S.C.	
4.0	S.C.	S.	S.C.	S.	
5.0	S.C.	S.C.	S.C.	S.C.	
6.5	S.C.	S.	S.C.	S.	

S: 乾燥収縮試験, C: クリープ試験

1)乾燥収縮試験用供試体  
(10×10×40cm)

2)クリープ試験用供試体(10×10×40cm)

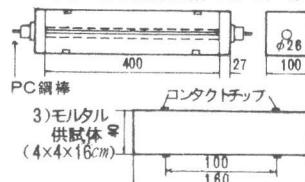
3)モルタル  
供試体  
(4×4×16cm)

図-1 供試体寸法

し、結晶が空隙を埋めるように成長し高強度が得られるためと言える。しかし、水銀圧入法では  $75 \sim 30,000 \text{ \AA}$  ( $= 3 \mu$ ) 程度の範囲の細孔径分布しか測定できないので、 $75 \text{ \AA}$  より小さい径の領域および  $3 \mu$  より大きい領域の測定は他の方法によらなければならない。温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度  $50\%$  で長期間コンクリートを乾燥させた場合、半径  $7.5 \sim 15 \text{ \AA}$  の細孔と言われるセメントゲル空隙に存在する水分は蒸発しないと言われている。そこで長期間乾燥させた乾燥収縮供試体の逸散水量と残留水量を測定することにより、逸散水量からは  $16 \text{ \AA}$  以上の細孔容積、残留水量からは  $16 \text{ \AA}$  以下の細孔容積が求まると思われる。

図-3は、コンクリートの乾燥収縮供試体の単位ペースト量当りの逸散水量と圧縮強度( $\sigma_c$ )との関係を乾燥日数28日および400日の場合について示したものである。この図より、活性シリカ混入コンクリートの逸散水量は、無混入の場合と比べて、N養生の場合、同一圧縮強度において、乾燥初期にやや小さく、400日ではほぼ等しくなっている。この場合、材令28日まで標準養生後、乾燥を開始しているので、無混入の場合も水和が進行していること、乾燥が400日程度と短いことより、大きい径の細孔の細孔容積は、同一 $\sigma_c$ においてシリカ混入の場合、無混入の場合とそれほどの差はないと思われる。一方、AC養生した場合の逸散水量は、活性シリカを混入した場合は無混入の場合より乾燥初期に小さく、乾燥400日においては両者の差が小さくなっている。同一湿度条件下においては、大きな径の細孔に存在している水分ほど早く蒸発するので、活性シリカを混入することで細孔径分布は小さい径の細孔の割合が増大すると言える。

図-4は、材令28日まで標準養生後、400日間、温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度  $50\%$  の条件下で乾燥した  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  のモルタル供試体を炉乾燥し、炉乾燥前後の重量差を残留水量として求めたものを示している。この図より、活性シリカ混入の場合の残留水量は無混入の場合より、どの養生の場合も同一 $\sigma_c$ において大きいのが認められる。このことは活性シリカを混入することにより、同一養生条件、同一 $\sigma_c$ においては、無混入の場合に比べて細孔容積は配合によらずほぼ等しいと考えられるが、この条件下では水分が逸散しない半径  $16 \text{ \AA}$  以下の超微細孔の割合が著しく増大すると言える。

以上のことより、活性シリカの混入と圧縮強度の増大により、径の小さい細孔の割合が著しく増大すると言える。

ii) 乾燥収縮 図-5はコンクリートの乾燥収縮( $E_s$ )と単位ペースト量( $P$ )との関係を、乾燥日数400日、N養生の場合について示している。この図より、シリカ無混入の場合、水セメント比(W/C)40%までは、 $E_s$ は $P$ の増大に伴なって増大しているが、W/Cが30および25%の高強度コンクリートの場合には、 $P$ が著しく大きいにもかかわらず、 $E_s$ は減少している。又、活性シリカ混入の場合の $E_s$ は無混入の場合より、同一W/Cにおいては $P$ が大きいにもかかわらず、W/C=65%の場合以外ほぼ同じかやや小さくなっている。以上のこととは乾燥収縮が $P$ ばかりでなくW/Cおよびシリカの有無にも関係していることを示している。そこ

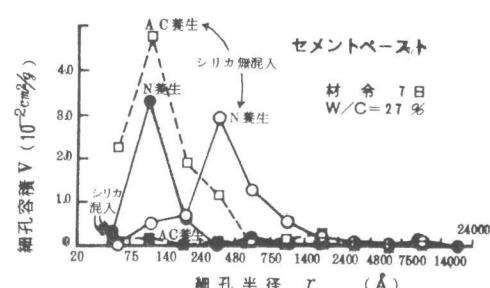


図-2 細孔容積—細孔半径

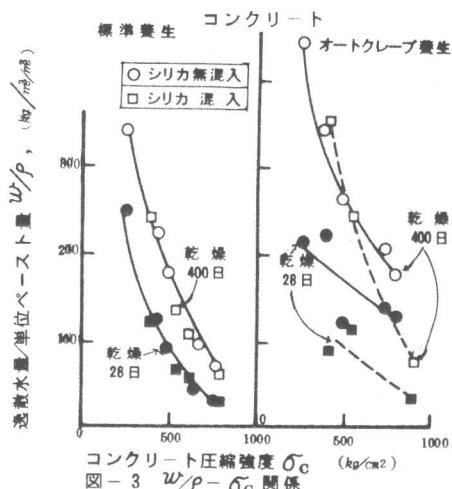


図-3  $W/P - \sigma_c$  関係

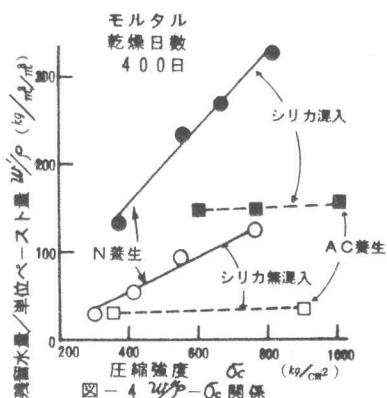


図-4  $W/P - \sigma_c$  関係

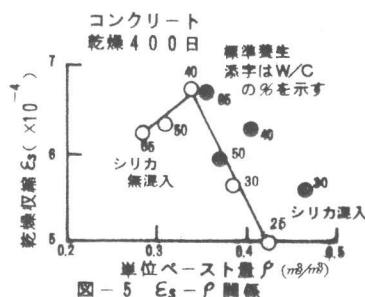


図-5  $E_s - P$  関係

で、図-6以降の図においては、乾燥収縮又はクリープを単位ペースト量で割った値を用いる。これは、コンクリートにおいて収縮する部分の大部分はセメントペーストであるので、異なる配合の場合には収縮歪を単位ペースト量で割った値で比較検討するのが合理的だと思われるからである。

図-6および7は、各々コンクリートおよびモルタルの場合の単位ペースト量当りの乾燥収縮( $\varepsilon_s/\rho$ )と圧縮強度( $\sigma_c$ )との関係を、乾燥400日、NおよびAC養生および活性シリカの有無の場合について示している。これらの図より、コンクリートにおいてN養生した場合の $\varepsilon_s/\rho$ は、活性シリカの有無によらずあまり相違していないが、モルタルにおいてN養生した場合の $\varepsilon_s/\rho$ は、シリカ混入の場合が無混入の場合より、同一 $\sigma_c$ において大きいのが認められる。これは、前述のごとく活性シリカを混入すると小さな径の細孔の割合が大きくなり、無混入の場合より同一 $\sigma_c$ において乾燥しにくくなり、このような傾向は供試体寸法が大きいほど著しいことと、乾燥に伴なって発生する毛細管張力は、小さな径の細孔に発生する場合ほど大きいためと思われる。すなわち、モルタル供試体は供試体寸法が小さく、乾燥しやすく、十分毛細管張力が発生するため活性シリカ混入の場合の $\varepsilon_s/\rho$ が無混入の場合より、同一 $\sigma_c$ において大きくなったものと思われる。故に、コンクリートの場合にも、より長期の乾燥日数においては、モルタルの場合と同様な傾向になるものと思われる。一方、AC養生の場合の $\varepsilon_s/\rho$ は、活性シリカ混入の場合が無混入の場合より、コンクリートとモルタルの種別によらず、同一 $\sigma_c$ において大きいのが認められる。AC養生の場合の細孔径分布は、一般にN養生の場合と較べて、同一 $\sigma_c$ において大きい径のものが多く細孔容積も大きくなる。そのため乾燥が進みやすい。従って、AC養生の場合、コンクリートの場合にも、活性シリカの有無による $\varepsilon_s/\rho$ の相違がより一層明らかになったものと思われる。故に、長期乾燥日数においては、活性シリカ混入の場合の $\varepsilon_s/\rho$ が無混入の場合と比べて、養生条件によらず同一 $\sigma_c$ において大きくなるものと思われる。

図-8は、コンクリートの単位ペースト量当りの乾燥収縮( $\varepsilon_s/\rho$ )と単位ペースト量当りの逸散水量( $w/\rho$ )との関係を、W/C=50%でNおよびAC養生した場合について示している。この図より、 $w/\rho$ の増大に対する $\varepsilon_s/\rho$ の増大の割合は、活性シリカ混入の場合が無混入の場合より、N養生の場合、やや大きいが、AC養生の場合は、著しく大きいことが認められる。このことは、乾燥収縮が細孔容積ばかりでなく、細孔径分布にも影響を受けることを示している。毛細管張力は細孔中に残留している水分にメニスカスが形成される場合に発生するが、前述のごとくセメントゲル空隙に存在する水分は蒸発せず、この部分にメニスカスが形成されるといわれている。<sup>2)</sup>活性シリカを混入した場合、半径16Å以下の細孔が無混入の場合より増大するため、発生する毛細管張力が大きくなることが、上記の乾燥収縮の結果に影響を及ぼしていると言える。このことは、乾燥収縮を毛細管張力による弾性変形とクリープ変形の和であるという考え方<sup>3)</sup>、すなわち毛細管張力理論の裏付となっていると言える。

⑨クリープ 図-9および10は、単位ペースト量当りの単位クリープ( $\varepsilon_c/\rho$ )と圧縮強度( $\sigma_c$ )との関係を、NおよびAC養生の場合について示している。図-9より、N養生の場合の $\varepsilon_c/\rho$ は、活性シリカ混入の場合が無混入の場合と比べて、空中および水中養生のいずれの場合も、同一 $\sigma_c$ において大きいのが認められる。これは、活性シリカ混入により無混入の場合と比べて、同一 $\sigma_c$ において小さな径の細孔の割合が大きくなつたためと思われる。これは、比較的大きな径の細孔は弾性変形時に変形してしまうが、小さな径の細孔は弾性変形時にはあま

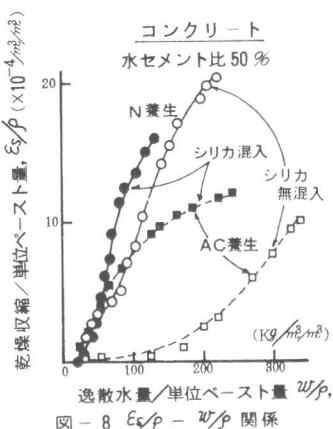
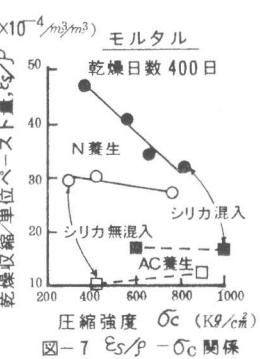
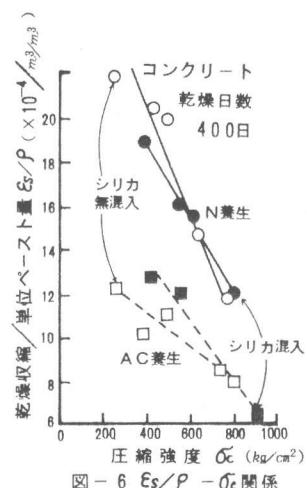


図-8  $\varepsilon_s/\rho - w/\rho$  関係

り変形せず、その後クリープの際に徐々に変形すると考えられるからである。このことは、低応力強度比におけるクリープが細孔の変形と密接に関係していることを示していると思われる。なお本研究における応力強度比は 0.3 である。

一方、図-10より、活性シリカを混入して AC 養生した場合の  $\varepsilon_c/\rho$  は無混入の場合と比べて、同一  $\sigma_c$  において、空中養生の場合には大きいが、水中養生の場合には逆に小さいことが認められる。これは、活性シリカを混入して AC 養生すると無混入の場合と比べて、N 養生の場合の差以上に、小さな径の細孔の割合が大きくなるが、同時に強硬で安定なトベルモライトの生成量が著しく大きくなるため、弾性変形後、低応力強度比においては載荷応力に対して変形可能な細孔が非常に少なく、水中養生の場合には活性シリカ混入により  $\varepsilon_c/\rho$  が小さくなつたものと思われる。一方、空中養生の場合には、供試体には乾燥に伴なつて発生する毛細管張力による応力が、載荷応力とともに作用しており、毛細管張力は小さな径の細孔に発生する場合ほど大きいので、活性シリカ混入の場合には、大きな毛細管張力による応力が発生し、 $\varepsilon_c/\rho$  が大きくなつたものと思われる。

続いて、図-9、10より、空中養生の場合の  $\varepsilon_c/\rho$  と水中養生の場合の  $\varepsilon_c/\rho$  の差である乾燥クリープ (Drying Creep) を検討する。活性シリカ混入の場合の乾燥クリープは無混入の場合と較べて、どの養生の場合も同一  $\sigma_c$  において大きくなつてゐる。この理由は、クリープ供試体の場合には載荷時の弾性変形により、コンクリート中のポロシティが乾燥収縮供試体とは異なつてきており、そのため乾燥の進行状態も異なつてゐると思われる。従って、クリープ供試体の乾燥収縮の部分は、無応力状態における乾燥収縮歪とは異なると思われる。すなわち、クリープ供試体と乾燥収縮供試体に発生する毛細管張力の大きさの差は、活性シリカ混入の場合が無混入の場合より、同一  $\sigma_c$  において大きいと思われる。又、シリカ無混入で AC 養生した場合の乾燥クリープは負の値になつてゐるが、このことは物理的に矛盾する。これは、現在の空中養生の場合のクリープの求め方 (全変形量より乾燥収縮を差し引くという方法) に問題のあることを意味すると思われる。このことは、クリープ供試体の場合、弾性変形時に大きな細孔は圧滅されてしまうが、乾燥収縮供試体の場合、大きな細孔がそのまま乾燥収縮に寄与するため、クリープ供試体の乾燥収縮部分が無応力状態の乾燥収縮より小さくなるためと思われる。

以上のことより、コンクリートの乾燥収縮および低応力強度比のクリープは、主にセメントペースト中の細孔の変形に起因すると考えられる。すなわち、乾燥収縮の場合は乾燥に伴なつて発生する毛細管張力による応力が、クリープの場合には、水中においては載荷応力が、空中においては載荷応力と毛細管張力による応力の両方が作用し、細孔の縮小化によって収縮を引き起こすと考えられる。従って、乾燥収縮およびクリープは、作用する応力の大きさと、細孔の変形のしやすさとの相互のかねあいによって決まると思われる。

#### 4. 結 論

本研究の範囲内で次のようなことが言えると思われる。1) 活用シリカを用いたコンクリートの乾燥収縮およびクリープは、無混入の場合より、オートクレーブ養生をした場合の基本クリープを除き、一般に大きくなることが認められた。これは、活性シリカ混入により小さな径の細孔の割合が大きくなるためである。このことより、乾燥収縮および低応力強度比におけるクリープは、細孔の量と細孔径に密接に関係があると言える。2) 現在の空中養生のクリープの求め方には問題があり、空中養生のクリープはクリープ供試体および乾燥収縮供試体の乾燥の進行程度および毛細管張力による応力を考慮する必要があると思われる。

参考文献 1) 長滝、米倉、横田、セメント・コンクリート、No.387、1979、pp.8~15 2) T. C. Powers, International Conference on the Structure of Concrete 1965 3) 長滝、米倉、第2回コンクリート工学年次講演会 講演論文集、1980

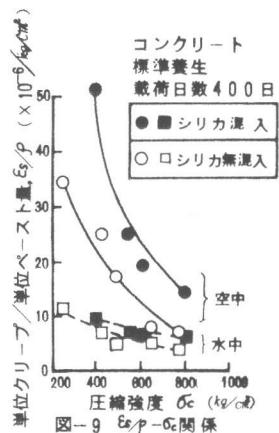


図-9  $\varepsilon_c/\rho - \sigma_c$  関係

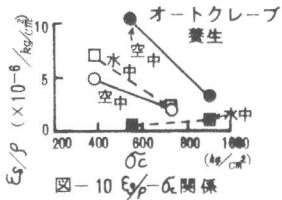


図-10  $\varepsilon_c/\rho - \sigma_c$  関係