

結晶性ケイ酸カルシウム材料の収縮特性の検討

埼玉大学 工学部 建設工学科 学生会員 小山凜太郎
 埼玉大学大学院理工学研究科 准教授 正会員 浅本晋吾
 旭化成ホームズ(株)住宅総合技術研究所 松井久仁雄

1. はじめに

毛細管張力は、コンクリートの乾燥収縮の主要因の一つとして考えられてきたが、セメント硬化体では乾燥に伴う非晶質 C-S-H の構造変化の影響が大きいこと、毛細管張力特有の長さ変化挙動である収縮の回復が確認されないことなどを理由に、否定的な意見が多い。しかし、結晶性の安定したセメント系材料(軽量気泡コンクリート以下、ALC)を用いた場合、乾燥に伴う収縮の回復が確認されている¹ことから、セメント硬化体の収縮に対する毛細管張力の寄与も棄却できない。本研究では、セメント硬化体と化学組成が類似する結晶性が安定したケイ酸カルシウム材料を用い、乾湿に伴う長さ変化等温線を検討することで、毛細管張力が寄与する湿度域、空隙径を把握し、さらには、吸着水脱着による表面エネルギーの影響も検討した。乾燥によって構造変化しないセメント系材料を用いることで古典的な収縮機構の検証と、セメント硬化体の収縮における C-S-H 構造変化の影響を逆説的に示すことを目的としている。

2. 結晶性ケイ酸カルシウム材料の長さ変化等温線に関する実験概要

実験には、ALC は幅 40.1mm×長さ 80.2mm×厚み 10.9mm の工場製品を用い、トバモライトとゾノトライトには、実験室合成の粉体約 8g を約 80Mpa で圧縮成形し、幅 44.4mm×長さ 81.8mm、厚さはそれぞれ 2.1mm、2.2mm となった平板状試料を用いた。長さ変化は各供試体にゲージ長 30mm の防水型ひずみゲージを貼り付けて測定し、ALC は 20℃の水中に浸漬し、ひずみが安定した時点の長さを初期値とした。圧縮成形した供試体は飽水させると形状を維持できなかったため湿度 95%で十分吸湿させ、ひずみが安定したところを初期値とした。その後、設定温度 20℃の恒温槽内にデシケータを配置し、飽和塩法で湿度を調整したデシケータ内に各供試体を設置し、各湿度でひずみが安定するまで静置した。相対湿度 11%まで測定を行った後、続いて吸着測定も行い、ALC は飽水状態まで、圧縮成形した供試体は湿度 95%まで測定し、長さ変化等温線を得た。

3. 結果と考察

(1) 長さ変化等温線の計測結果と考察

ALC 及び圧縮成形したトバモライトとゾノトライトの長さ変化等温線を図 1 に示す。供試体ごとに長さ変化率を縦軸に、湿度センサで実測した相対湿度を横軸にプロットした。ALC は相対湿度 75~92%付近で収縮の回復が確認された。これは、毛細管張力による負圧が毛管水の脱着により空隙内で作用しなくなったためと考えられる。また、飽水時の脱着側と吸着側の長さ変化率を比較すると、吸着側が約 220 μ 膨張していることがわかる。乾燥前に 3 日間飽水し、質量とひずみはおおむね平衡になっていたものの、完全に飽水には至っておらず、測定開始の長さ変化の起点で収縮ひずみが残っていたことが要因と考えられる。真空下で飽水したのちの検討が今後必要といえる。

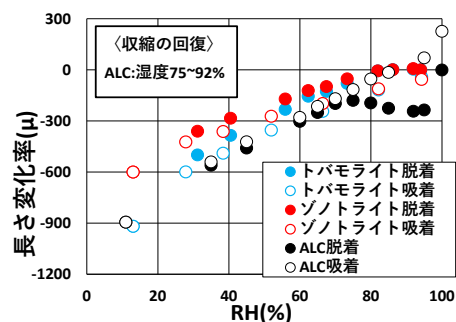


図 1: ALC 及び圧縮成形した供試体の長さ変化等温線

圧縮成形したトバモライトとゾノトライトでは相対湿度 95%から 82%まで収縮せず、収縮の回復も観察されなかった。この理由として、飽水していないため、吸湿で水分は空隙壁面に吸着するものの、比較的大きな細孔内で毛管凝縮によるメニスカスが形成せず、毛細管張力が主要因となる高湿度で、空隙に毛細管張力が作用しなかったことが考えられる。

キーワード ケイ酸カルシウム水和物 長さ変化等温線 毛細管張力 表面エネルギー

連絡先: 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学理工学研究科 TEL 048-858-3739

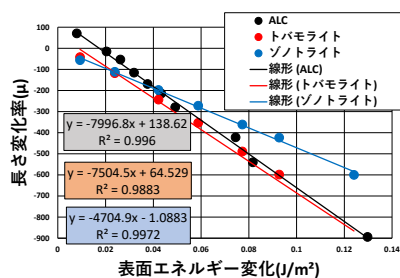


図 2：表面エネルギー変化と吸着側の長さ変化率の関係

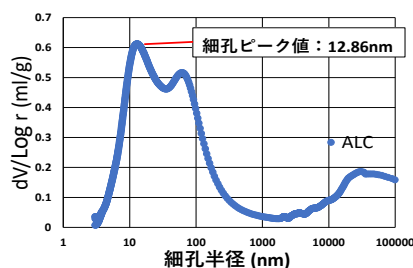


図 3：水銀圧入法による細孔分布

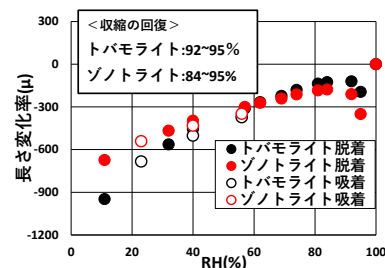


図 4：圧縮成形後オートクレーブ養生した供試体の長さ変化等温線

図 2 に、各供試体の吸着側の各湿度における長さ変化率と、式(1)により計算される表面エネルギー変化 ΔF の関係を示す。ここで、 P/P_0 は相対圧、 R は一般気体定数、 V_m はモル体積、 T は温度である。

$$\Delta F = \frac{-10^9 RT}{V_m} \times \left[0.584 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - 0.189 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \ln \left(-\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right) \right] \quad (1)$$

セメント硬化体において、50%以下の相対湿度の長さ変化率は表面エネルギー変化とほぼ直線関係となるため、その機構は表面エネルギーで説明できる²と報告されている。本実験で用いた結晶性ケイ酸カルシウム材料すべてにおいて、表面エネルギー変化と吸着側の長さ変化率には直線関係が確認できたため、吸着側の長さ変化挙動は表面エネルギー変化で説明できると考えられる。また、湿度 70%以下の湿度領域で、脱着と吸着の長さ変化率はほぼ一致していることから、70%以下の湿度領域の長さ変化は可逆現象である表面エネルギー変化により説明が可能と考えられる。

(2) 高湿度領域における ALC の収縮挙動と空隙構造の関連

気液界面が平衡状態となる細孔径(ケルビン半径 r_k)は、式(2)で求められる。ALC の長さ変化等温線の計測で長さ変化率が極小となった湿度 92%でのケルビン半径と、図 3 の水銀圧入法による細孔分布のピーク値と比較した結果、ほぼ同等の値となった

表 1：計算細孔半径と細孔ピークの比較

湿度 92%ケルビン半径	細孔ピーク
12.76nm	12.86nm

$$r_k = \frac{2\gamma V_l}{RT} \times \frac{1}{\ln(P/P_0)} \quad (2)$$

γ : 液相の表面張力、 V_l : 液相モル体積

(表 1)。湿度 92%以下では、細孔ピーク (12.86nm)より小さい空隙で毛管凝縮した液状水が急激に消失することが表 1 から示唆され、毛細管張力による負圧から解放されたことで収縮の回復が生じたと考えられる。収縮の回復は、毛細管張力特有の現象であり、半径 12nm 付近での毛細管張力による負圧の確認と、高湿度での ALC の収縮に対する毛細管張力の寄与について検証できたとと言える。

4. まとめと今後の展望

実験で用いた ALC では、高湿度での収縮機構は毛細管張力が主要因と考えられ、低湿度と吸着では表面エネルギー変化が長さ変化要因として考えられた。また、圧縮成形した合成トバモライトとゾノトライトの長さ変化は、表面エネルギー変化で説明できることがわかった。

追加実験として圧縮成形したトバモライトとゾノトライトの粉体をオートクレーブ容器に水とともに密閉し 200℃で養生すると、飽水状態にしても形状を維持することができた。これらの供試体の長さ変化等温線の途中経過を図 4 に示す。トバモライトでは湿度 92~95%で、ゾノトライトでは湿度 84~95%において、ALC と同じく収縮の回復を確認できた。今後、水銀圧入などの計測により空隙径と毛細管張力の作用について検討する予定ではあるが、結晶性ケイ酸カルシウム材料を用いると高湿度で毛細管張力が作用し、収縮の回復が明確に確認できた。セメント硬化体で収縮の回復が起こらない理由は、複雑な空隙分布と非晶質である C-S-H の乾燥による構造変化が毛細管張力による負圧解放の影響を小さくしているためと推測される。

参考文献

1. 松井久仁雄, 小川晃博: 多孔質材の空隙構造と体積変化挙動の連関, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No1, pp. 495-500, 2008.
2. M. J. Setzer and F. H. Wittmann: Surface energy and mechanical behavior of hardened cement paste, Appl. Phys., 3, pp. 175-188, 1974.