

## 内部空隙内の液体特性に着目したコンクリートの収縮機構の解明

東京大学大学院 学生員 浅本 晋吾  
東京大学大学院 正会員 石田 哲也

### 1. はじめに

コンクリートの収縮現象は構造物の性能に初期から長期に渡って大きな影響を与えるため、その定量的予測を行うことはライフサイクルコストを考慮した設計を施す上で非常に重要である。既往の研究では、高・中湿度域では毛細管張力理論、低湿度域では表面エネルギー理論が有力な説として考えられている。しかしながら、個々の理論が収縮に与える寄与量、有効範囲について明確にした研究は少なく、収縮挙動を精度よく予測するには、各理論の寄与量・適用範囲、さらには、他の影響要因などを検討する必要がある。

そこで、本研究では、コンクリート内部の水を様々な液体と置き換え収縮実験を行い、内部液体特性の違いの観点から毛細管張力・表面エネルギーの寄与量の検証を行い、その適用範囲について検討を行った。

### 2. 実験概要

供試体は、W/C:35%、60%のセメントペーストで作成した。供試体寸法は、40×40×160 (mm) の角柱供試体である。打設1日後に脱型し28日間の水中養生後、105℃に保たれた絶乾炉で重量変化がなくなるまで乾燥させた。なお、ひずみ測定のため、脱型後コンタクトチップを供試体に埋め込んだ。その後、内部に水が浸漬しないように室温まで冷却し、20℃で保たれた恒温恒湿室内でメタノール、エタノール、潤滑油、水に浸漬させた。ここでは、各々の液体に浸漬することで、絶乾によりもたらされた収縮回復性に注目する。また、十分な時間を与えて重量変化がなくなるまで浸漬させた後、真空乾燥を施した。セメント硬化体内部に存在する液体の物性（特に表面張力）の違いにより、真空下での収縮挙動の変化について着目するものである。

また、上記と同様の配合・寸法の供試体を作成し、28日間水中養生後、予め絶乾を施した。その後、充分に水に浸漬させ（収縮・飽和度を充分に回復させ）、湿度80%、60%（温度：20℃）の条件下で乾燥させた。乾燥後、エタノールに浸漬した。これは、メニスカスの存在する毛管の半径を増加させることで毛細管張力を減少させ、収縮の回復量に着目し毛細管張力の寄与量を検討するためである。

### 3. 実験結果及び考察

実験結果を図1~4に示す。なお、紙面の都合上W/C:35%の結果のみ掲載するが、W/C:60%においても同様の傾向を示した。

飽和度は、水がほぼ100%回復するのに対し、他の液体ではW/C:35%のときには約62%、W/C:60%では約75%しか回復しなかった。毛細管張力によって液体は空隙に浸漬することから、液体は小さな空隙から浸漬していき、分子サイズ以上の空隙には浸漬していきはざである。しかしながら、水、メタノール、エタノール、潤滑油の分子の大きさはそれぞれ約3、4、5、8~10とさほど差はなく、分子サイズの影響は少ないと考えられる。そこで、ナノスケールのゲル・層間水の可逆・不可逆性に着目した。

直径数nm以下のゲル・層間空隙内の水は、毛細管中の凝縮水とは若干性質を異にしており、分子レベルで水分子がゲル表面に吸着しているような状態にあると思われる。よって、絶乾により吸着水が逸散しゲル粒子の固体表面エネルギーが増加すると、空隙半径が非常に小さいため粒子が互いに引き合い、固層と固層が吸着、もしくは、固層間距離が非常に小さくなると考えられる。水は表面張力、セメントゲル粒子との親和性が大きい空隙を広げ再浸漬可能であるが、他の液体は表面張力、親和性が小さく微細空隙に再び浸漬できないと考えられる。実際、熱力学連成解析システムDuCOM<sup>1)</sup>によって計算した各空隙率は表2のようになり、水以外の液体の可逆量と半径3nm以上の空隙量とがほぼ一致している。よって、微細なゲル水と層間水が水のみ可逆であるというこの仮説も解析的アプローチと矛盾のないものとなる。

キーワード：乾燥収縮，毛細管張力，固体表面エネルギー，界面張力

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 TEL:03-5841-6146 FAX:03-5841-6010

また、表面エネルギー理論に従い、絶乾後どの液体を浸漬しても収縮は回復すると考えられたが、水に浸漬させたときのみ収縮が回復した。飽和度の実験結果から考察したように、吸着水の逸散によって吸着、縮小したゲル粒子の固層間距離は水を浸漬したのみ回復すると考えると、この現象は説明できる。従って、本実験結果から、吸着水が逸脱するような低湿度域における乾燥収縮では数 nm 以下のゲル水・層間水の消失が大きく影響しているのではないかと考えられる。

さらに、各種液体を浸漬させた後真空において乾燥させたときの収縮ひずみは、図 3 に示すように水を浸漬させたときのみ発生した。特に、水以外の液体では層間水が存在せず、毛細管張力のみが収縮の原因として働くはずであるが、収縮は発生しなかった。従って、毛細管張力の影響は比較的小さいのではないかと考えた。

その仮説を検証するため、高・中湿度域で乾燥させた後エタノールに浸漬し毛細管張力を減少させると、図 4 に示すように収縮は大きく回復した。よって、毛細管張力の影響は大きいことが分かる。毛細管張力は液体の表面張力というよりセメント硬化体と液体の界面張力の大きさに比例する。従って、本実験結果から、ガラスなどの界面張力から算出された一般の液体の表面張力から理論展開を行うのではなく、液体とセメント硬化体の界面張力を算出しモデル化を試みる必要があるということがわかった。また、非回復な乾燥収縮ひずみも無視できない程度に残った。一度絶乾履歴を経験しているため、乾燥ひび割れ発生よってもたらされる塑性ひずみの影響は少ないと考えられる。また、水ではなくエタノールに浸漬したことから上記で考察したように、層間水は回復不可能と考えられる。これらのことから毛細管張力以外の収縮要因として、層間水の若干の消失が考えられる。実際、常温においても層間水はわずかながら消失することが実験により確かめられている<sup>2)</sup>。よって、今後これらの微細な空隙中の水分挙動を定量的に把握する必要があると言える。

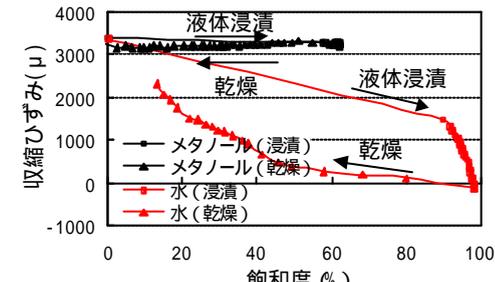
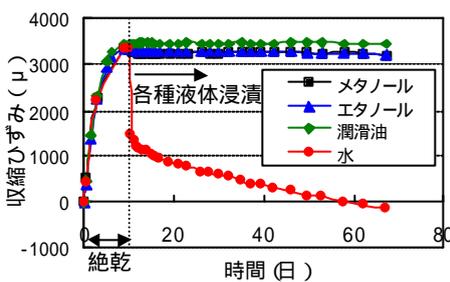
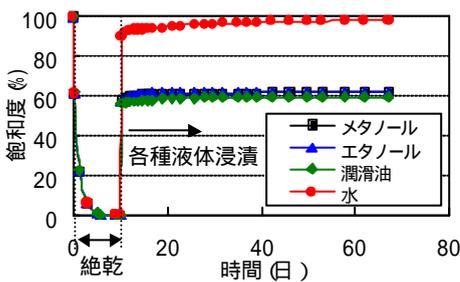


図 1 液体浸漬による飽和度の変化

図 2 液体浸漬による収縮ひずみの変化

図 3 液体浸漬後の乾燥収縮ひずみ

表 1 各種液体に浸漬させたときの最大飽和度

	水	潤滑油	メタノール	エタノール
W/C:35%	98.6%	59.6%	62.0%	62.0%
W/C:60%	98.2%	73.3%	76.3%	76.1%

表 2 解析による各空隙率

	半径 3nm 以上の空隙率 (主として毛細管空隙)	半径 3nm 以下の空隙率 (ゲル+層間空隙)
W/C:35%	62.1%	37.9%
W/C:60%	75.3%	24.7%

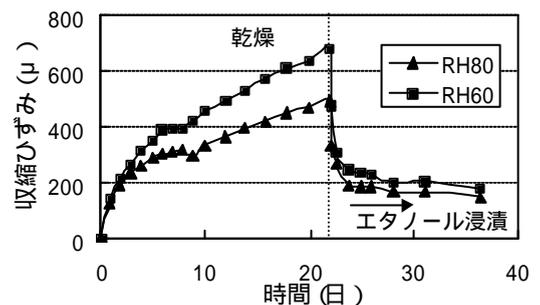


図 4 乾燥後エタノール浸漬させた収縮ひずみ

#### 4. まとめ

乾燥収縮の主原因とされる毛細管張力・表面エネルギー理論の検討・検証を目的に、コンクリート空隙内の液体を様々な液体に置換して収縮実験を行った。その結果、ゲル・層間空隙に存在するナノスケールの水が大きく影響を及ぼすことが分かった。今後の課題としては、それらの消失・回復速度の把握などが挙げられる。

最後に、東京大学大学院の前川宏一教授には多大なご指導を頂きました。ここに、深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T., Modeling of Concrete Performance, E & FN SPON, 1999
- 2) 磐田吾郎：セメント硬化体内部における水分相平衡の温度感受性，東京大学修士論文，2003