

# コンクリートの凍結融解性状に関する基礎研究

## —モルタルの伸縮挙動と内部空隙の凍結状況—

Freezing-and-Thawing Behavior of Concrete

—Length Changing and Observation on Freezing Pore Behavior of Mortar—

岡 本 修 一\*・魚 本 健 人\*

Shuichi OKAMOTO and Taketo UOMOTO

### 1. は じ め に

コンクリートのみならず多孔質材料においては、寒冷地での凍結融解による劣化は重要な課題であり、現在コンクリートにおいては、劣化防止対策として AE 剤や AE 減水剤等を使用し、コンクリート中に微細な独立気泡を適量混入させるという手法が確立されている。一方、劣化機構に関しては、T. C. Powers の研究を始め、我が国においても、洪・鎌田両氏の研究成果等に代表されるように、コンクリートの毛細管空隙中の水の挙動（相変化に伴う体積膨張や水圧、毛細管空隙中の水の過冷却、未凍結水の移動 etc.）が重要であることが明らかにされている<sup>1), 2)</sup>。しかし、コンクリートの凍結融解による劣化挙動を全て合理的に説明するに至っていない。

そこで本研究では、凍結融解機構のモデル化を目標に、基礎資料を得ることを目的とし、空隙の飽水度を变化させたモルタル供試体を用い、凍結融解時の伸縮状況を測定するとともに、これまで困難であったコンクリート内部の凍結過程あるいは凍結状況をビデオ・マイクロスコープで観察し、まず空隙の凍結状況を視覚的に捕らえることを試みた。

### 2. 実 験 概 要

#### 2.1 供試体の作成ならびに飽水度の調整方法

供試体は、試験時の断面内温度ならびに水分分布が比較的容易に均一とできる  $4 \times 4 \times 16$  cm のモルタル供試体とした。配合は、W/C = 65%, S/C = 2 とし、セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には富士川産の川砂（比重：2.63, 吸水率：2.01%）を使用した。

供試体は、打設後 1 日で脱型し、材齢 12 日まで  $20^{\circ}\text{C}$  水中養生を行い、内部含水率を調整させた後、ラップフィルムで包みポリエチレン袋に入れ材齢 14 日まで封緘養生を

\*東京大学生産技術研究所 第 5 部

行った。材齢 14 日の時点で凍結融解試験ならびに飽水度の測定を開始した。なお、ここで言う飽水度は、内部含水率調整後の供試体を  $105^{\circ}\text{C}$  で絶乾状態まで乾燥させた場合の蒸発水量と、その後、真空飽水度法により求めた供試体中の総空隙量の体積比として示した値である。

#### 2.2 凍結融解試験

凍結融解試験用供試体は、ポリエチレン袋で封緘した状態のまま不凍液の入った温度可変槽に設置し試験を行った。試験は、約 16 時間で  $20^{\circ}\text{C}$  から  $-20^{\circ}\text{C}$  まで降温、約 2 時間温度を保持した後、約 6 時間で  $20^{\circ}\text{C}$  まで昇温を 1 サイクルとし、20 サイクルまで繰り返した。供試体の温度履歴については熱電対で、伸縮挙動については供試体の中心部に設置した埋め込み型ひずみゲージにより測定を行った。また、劣化の程度を知るために超音波法による相対動弾性係数の測定も行った。

#### 2.3 凍結時の断面観察

凍結断面観察は、CCD カメラを搭載したビデオ・マイクロスコープにより行った。測定方法としては、凍結融解 20 サイクル終了後に、供試体を再度  $-20^{\circ}\text{C}$  に凍結させ凍結融解試験槽から取り出し、凍結した状態で三点曲げ試験を行い、直ちにその破断面を観察するものとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 凍結融解時の伸縮挙動

内部水分の凍結が伸縮挙動に影響する程度を把握するため、真空飽和度法により内部空隙を水と不凍液（主成分エチレングリコール）の各々で飽和させた供試体に関して予備試験を行った。試験では凍結融解を 3 回繰り返したが、1 サイクル目の温度と供試体の伸縮挙動の関係を図 1 に示す。

## 研究速報

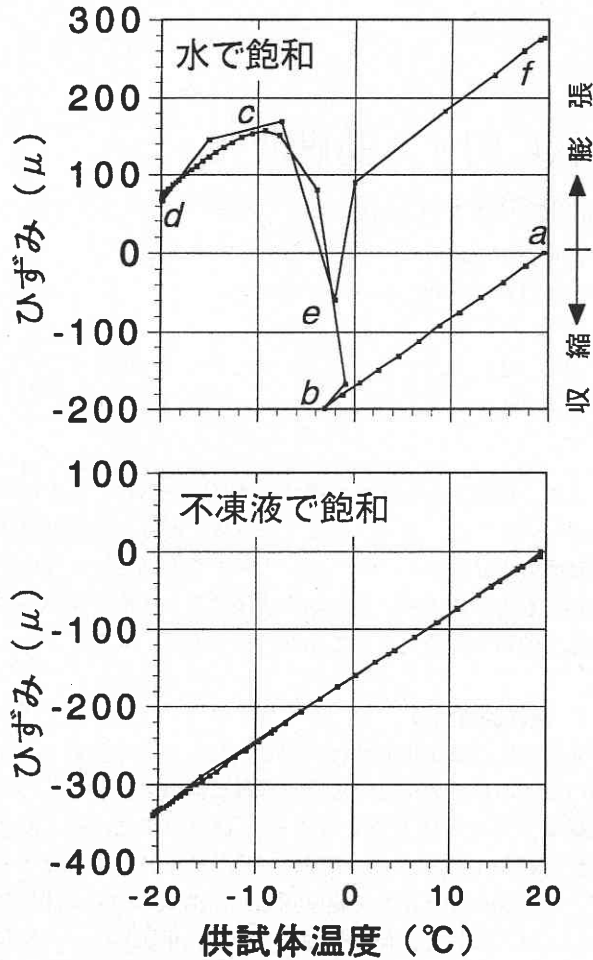


図1 凍結融解時の長さ変化の測定結果例

水で飽和させた場合の供試体の伸縮挙動は複雑で、まず凍結過程 (a-d 区間) をみると、 $-2^{\circ}\text{C}$  まで (a-b 区間) は不凍液で飽和させた場合と同程度の勾配で収縮し、 $-2^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$  (b-c 区間) では内部水分の凍結に伴う体積膨張の影響と考えられる膨張挙動を示し、 $-10^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$  (c-d 区間) では再び a-b 区間と同程度の勾配で収縮を示す。融解過程 (d-f 区間) においては、水分の凍結膨張により組織の微少破壊したためと考えられる残留ひずみを伴う。一方、内部空隙を不凍液で飽和させた場合には、 $20^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  の温度変化に対しひずみの変化は直線的で、その勾配から見掛けの線膨張係数を計算すると約  $8.5 \times 10^{-6}$  となり、一般的なモルタルの線膨張係数と一致する。つまり、今回の温度範囲においてモルタルの線膨張係数は、内部水分が凍結しなければ一定と見なせるものと考えられる。なお、 $-20^{\circ}\text{C}$  の時点で凍結した空隙がないことを断面観察し確認している。従って、 $0^{\circ}\text{C}$  までのひずみの勾配から算定した見掛けの線膨張係数

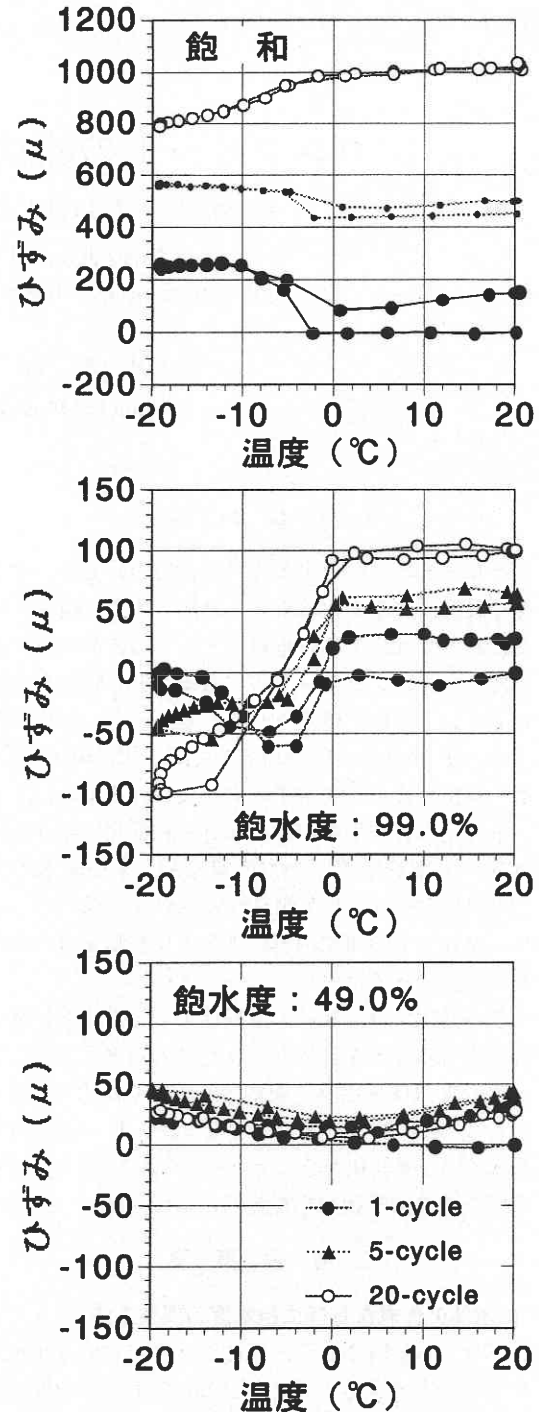


図2 相対動弾性係数と飽水度の関係

を用いて温度ひずみの影響を補正すれば、 $0^{\circ}\text{C}$  以下での水分凍結の影響をより明確とする事が可能である。そこで、以下図2に示す飽水度異なる供試体での試験結果に関しては温度補正を行ったものを示す。

飽和供試体では、予備試験の結果と同様に、凍結時には

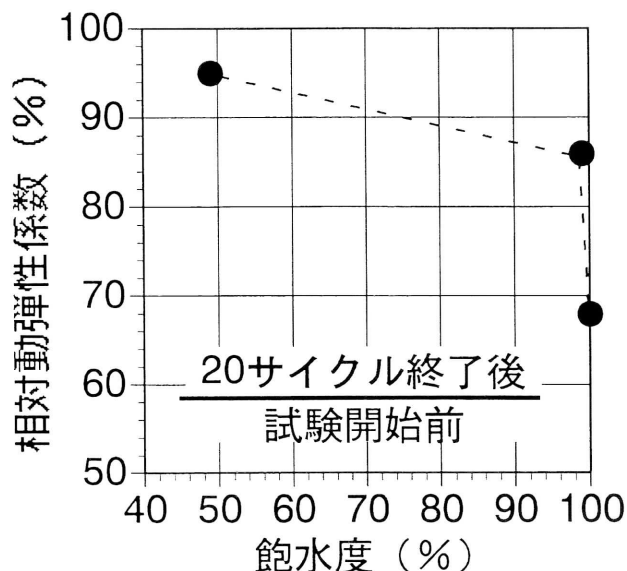


図3 細孔径分布と凍結細孔径の関係

約 $-2^{\circ}\text{C}$ 付近から膨張を示し、融解後に残留ひずみを伴う。この残留ひずみは、サイクルが進むにつれ増大してゆき、徐々に内部組織の緩みが進行していることが伺える。試験終了時には供試体表面に網目状の微細なひび割れが確認された。次に飽水度が99%の供試体においては、凍結過程では $-5^{\circ}\text{C}$ 付近までは温度収縮以上の収縮を示し、更に温度が低下すると膨張に転ずるが、凍結融解の回数が進むにつれ膨張の度合は小さくなる。飽和供試体ほどではないが、融解過程ではヒステリシスとともに残留ひずみが認められ、サイクルが進むにつれ大きくなっており、こちらも徐々に内部組織の緩みが進行していると考えられる。そこで、図3に超音波法により測定した20サイクル終了時の相対動弾性係数と飽水度の関係を示すが、図より飽水度が大きいものほど相対動弾性係数は低下しており、これからも内部組織が微小破壊を起こしていることがわかる。飽水度が49%の供試体では、凍結時の断面観察結果では、空隙中に水分凍結が認められるものの、発生しているひずみのほとんどは温度ひずみであると見なせ、相対動弾性係数の低下は、非常に少なく、水分凍結の影響は認められない。以上のように、凍結融解の繰り返しによる劣化は、供試体の飽水度に大きく依存する。

### 3.2 空隙の凍結状況

さて、上述のような伸縮挙動を示した供試体断面の凍結状態であるが、ビデオ・マイクロスコープによる観察結果を写真1～4に示す。いずれの飽水度の供試体についても、 $-20^{\circ}\text{C}$ の時点で内部に氷晶を持つ空隙が確認された。写

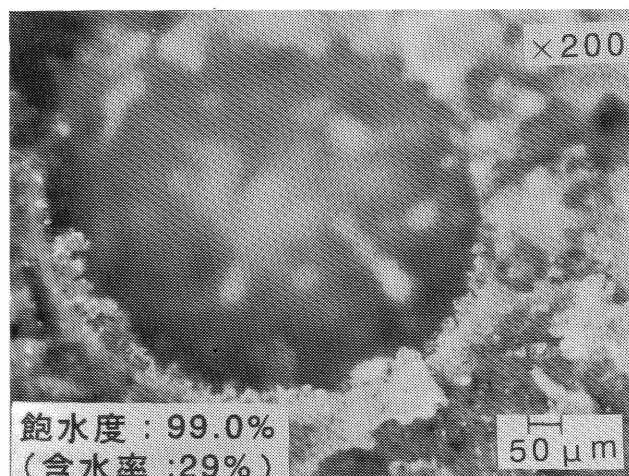


写真1 空隙の凍結状況 (1)

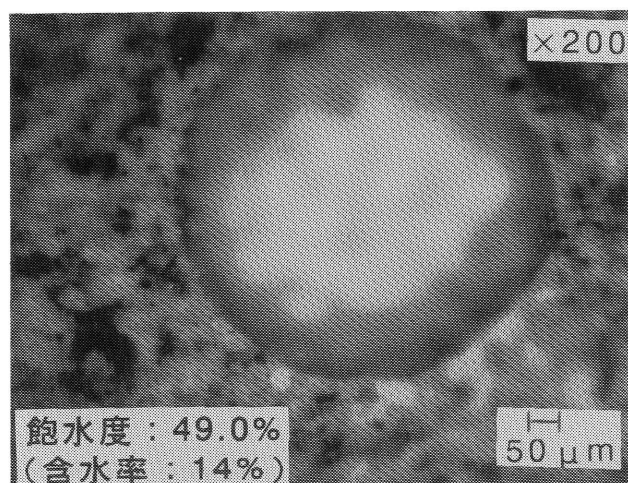


写真2 空隙の凍結状況 (2)

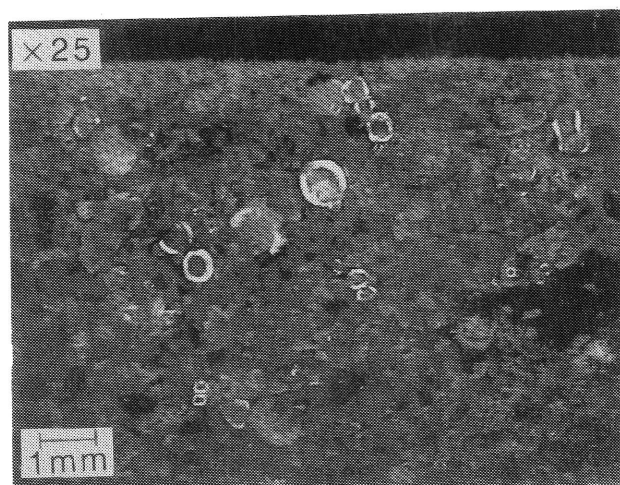


写真3 空隙の凍結状況 (3)

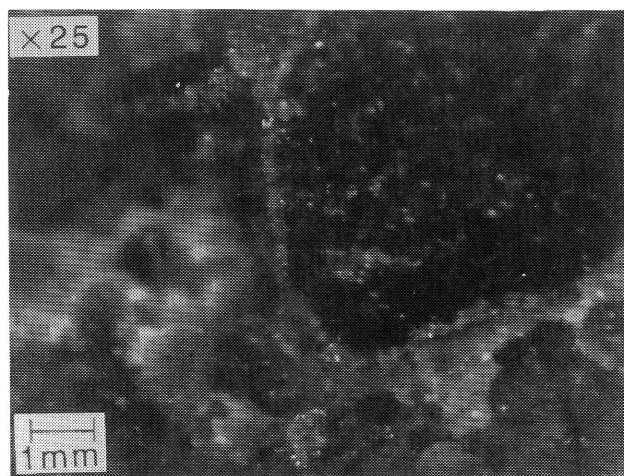


写真4 空隙の凍結状況 (4)

真1, 2は飽水度の異なった供試体において、ほぼ同程度の大きさの空隙の状況を示したものである。飽水度が大きいものほど空隙内の氷晶量が多く、その形態はある程度成長した結晶が集合したようになっており、空隙内部へと氷が成長した様にも受け取れる。この状況と供試体の挙動を単純には結びつけられないが、今回凍結時に膨張挙動を示した飽和あるいは飽水度99%の供試体では、場所によっては写真3に示すように周辺の大小の気泡のほとんどが氷晶で完全に充填されている箇所も認められ、従来いわれているように、氷の成長が可能な空間が内部水量に対して少ない場合には巨視的な膨張に繋がることは確かなようである。また、写真4に示すように周辺部分に細かな氷晶を有する細骨材が数多く確認できた。骨材の周辺部分は、いわゆる遷移帯と呼ばれる箇所であり、比較的ポーラスなばかりでなくペースト部分よりも強度が小さいと言われている<sup>3)</sup>。この箇所に氷晶が生成した場合には微少破壊を起こしやすいと考えられ、図3に示した相対動弾性係数の低下をもたらす

た一原因が遷移帯の微少破壊である可能性を示唆しているものと思われる。

#### 4. ま と め

コンクリートの凍結融解による劣化メカニズムを解明するための基礎的資料を得ることを目的に、空隙の飽水度を変化させたモルタル供試体の凍結融解時の伸縮状況の測定と同時に、ビデオ・マイクロスコープによる空隙の凍結状況の観察を行った。

その結果、モルタルの伸縮状況は飽水度に依存し、断面観察から飽水度が大きいものほど気泡内の氷晶量が多く、凍結時に膨張挙動を供試体では、完全に内部を氷晶で充填されたものも多く確認できた。

従来、凍結融解による劣化機構として、「氷の成長できる空間が内部水量に対して少ない場合には巨視的な膨張につながり最終的に劣化がおこる」と言われているが、今回試験より、視覚的にも確認することが出来た。

(1996年7月10日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) T. C. Powers: A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Proc. of ACI, Vol. 41, 1945.
- 2) 洪, 鎌田: コンクリートの凍害と初期凍害, コンクリート工学年, Vol. 16, No. 5, 1978.
- 3) 内川: 組織構造の観点から見た硬化セメントペースト, モルタル, およびコンクリートの類似点と相違点, セメント・コンクリート工学年, No. 507, May, 1989.