

# 論文 均質な細孔構造を有する材料の凍結融解挙動に関する実験的研究

渡邊 弘子<sup>\*1</sup>・石川 雅美<sup>\*2</sup>

要旨：細孔中の水分の凍結温度がその径に依存することはよく知られている。これをコンクリートに適用して考えると、コンクリートが有する細孔径分布によって凍結水量が異なり、凍結融解作用による劣化は異なると考えられる。そこで、これを確認するため、異なる細孔径分布を有する供試体を作製し凍結融解試験を行った。ただし、試験には均質でかつ変化しない細孔構造を有する材料としてセラミック供試体を用いた。検討の結果、細孔径分布の違いにより凍結融解作用による劣化に明白な差が認められ、劣化モードにも違いがあることが明らかとなった。

キーワード：細孔構造，凍結融解，セラミック供試体

## 1. はじめに

コンクリートの凍結融解メカニズムを考える上で、細孔径分布はきわめて重要な要因である。これは、コンクリートが有する細孔径の大きさによって細孔中の水分の凍結温度が異なり、この凍結温度の違いが劣化度の違いに反映すると考えられるからである。このような考え方は、古くはセメントペースト供試体を用いた Powerらの研究<sup>1)</sup>に始まり、近年では、コンクリート供試体を用いた山下ら<sup>2)</sup>や野本ら<sup>3)</sup>の研究、モルタル試験体を用いた岡本らの研究<sup>4)</sup>によって次第に明らかにされている。また、JCI反応モデル解析研究委員会からのさらに発展的な研究報告<sup>5)</sup>がある。しかしながら、モルタルあるいはコンクリートでは、試験期間中に水和が進行するなど細孔径分布を完全にコントロールすることが難しく、細孔径の大きさを絞り込んで劣化度との関係を明確にするのは必ずしも容易ではない。

そこで、本研究では、細孔径分布をごく狭い範囲に調整することが可能である材料としてセラミックを用いて凍結融解試験を実施し、細孔径の違いによる劣化モードおよび残留ひずみ量

の違いを確認することを試みた。筆者らは以前、数値シミュレーションによってコンクリート中の細孔径分布を表現する方法を提案しており<sup>6)</sup>、今回の研究は細孔径分布とひずみとを関連づけるデータを蓄積するものと位置づけている。

## 2. 試験方法

### 2.1 セラミック供試体の概要

試験には均質でかつ安定した細孔構造を有する材料としてセラミックを用いた。供試体の外観を写真-1に示す。セラミックを選択した理

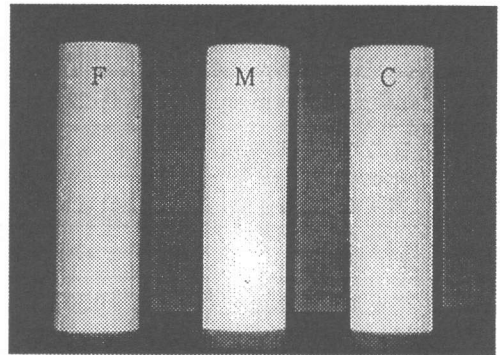


写真-1 供試体の外観

\*1東急建設（株）技術本部技術研究所土木研究部土木材料研究室（正会員）

\*2東急建設（株）施工本部土木設計部設計第一課 工博（正会員）

由は、コンクリートのように試験供与中にも水和反応が進行してその細孔径分布が変化する影響や、供試体個々のばらつきが大きい影響を除外するためである。供試体の細孔構造の一例を写真-2に示す。

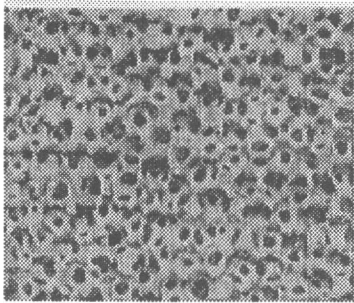


写真-2 供試体の細孔構造

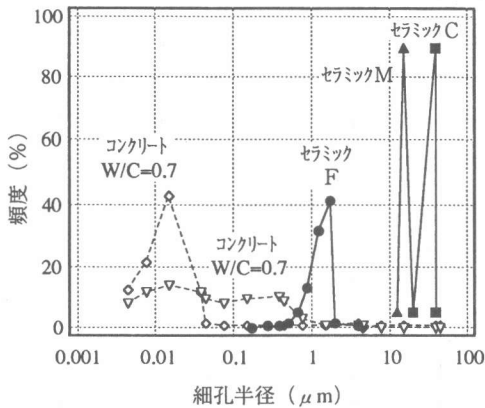


図-1 供試体の細孔径分布

セラミックの細孔径分布は、図-1に示す異なる3種とした。セラミックではコンクリートに比べて細孔径の分布範囲がきわめて狭いため、ほぼ均質な材料とみなすことができる。コンクリートと同等の細孔径分布を有するセラミックは作製できなかったため、コンクリートの細孔径分布に近い比較的小さな細孔径にピークをもつものとしてF、粗大径に分布するものとしてC、その中間程度のものとしてMを選択した。比較のため、コンクリートの細孔径分布の一例(W/C=0.4,0.7)を図-1に併せて示す。また、物理的性質を表-1に示す。

## 2.2 試験装置および供試体の温度管理

凍結融解試験は一槽式凍結融解試験機を用い、土木学会規準<sup>9)</sup>に準じて行った。ただし、セラミック供試体の内部には温度管理のための温度計を埋設できないため、シミュレーションによる数値解析により供試体中心部の温度を求めた。その結果、凍結過程で約30分ほどの遅れが生じるもののブライン液との温度差はほとんどないことがわかったため、供試体の温度管理はブライン液温度によって行った。試験温度範囲は-20℃～+7℃である。供試体寸法はφ6×20cm、凍結融解1サイクルは凍結1.5時間、融解2.5時間とした。

表-1 セラミック供試体の物理的性質

種類	セラミックF	セラミックM	セラミックC	コンクリート <sup>7)</sup>
総細孔量 (ml/g)	0.1226	0.8085	0.8556	—
細孔径の主な範囲 (μm)	0.3~10	100~200	300~400	—
密度 (kg/cm <sup>3</sup> )	2.61×10 <sup>-3</sup>	0.94×10 <sup>-3</sup>	0.9×10 <sup>-3</sup>	2.3×10 <sup>-3</sup>
見かけ気孔率 (%)	32	76	77	—
比熱 (kJ/kg・℃)	0.30	0.30	0.30	1.05~1.26
熱伝導率 (W/m・℃)	54.8	22.9	28.9	2.6~2.8
熱膨張率 (1/℃)	7.2×10 <sup>-6</sup>	7.2×10 <sup>-6</sup>	7.2×10 <sup>-6</sup>	10×10 <sup>-6</sup>
曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	820	67	73	—
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	670,000	132,000	121,000	—

### 2. 3 測定項目

測定項目は、目視観察、質量、長さ、ひずみおよび動弾性係数とした。長さおよびひずみ測定のために、供試体表面にコンタクトチップおよび低温用ひずみゲージを添付し、オーバーコート材で保護した。質量、長さおよび動弾性係数の測定は原則として20サイクル毎の融解終了後に行い、目視観察および写真撮影もこの時

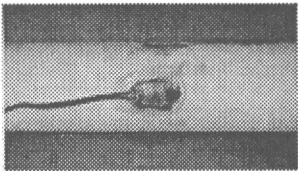
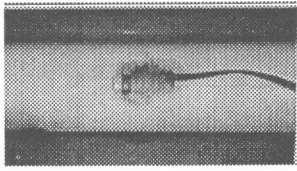
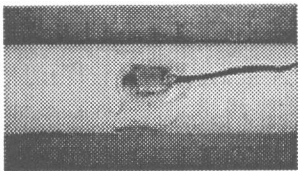
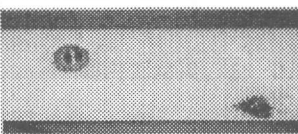
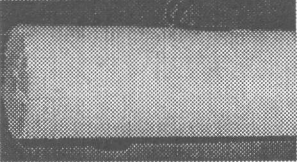
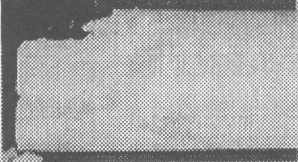
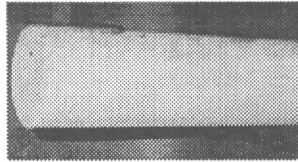
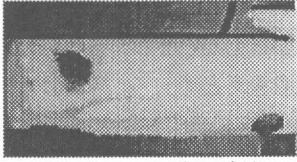
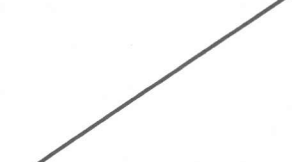
同時に行った。ひずみの測定は供試体に添付したひずみゲージをデータロガーに接続し、20分のインターバルで自動計測するよう設定した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3. 1 目視観察

目視による供試体の劣化状況を写真-3に、細孔径分布の違いによる劣化の違いの概念図を

写真-3 目視観察による供試体の劣化状況

	115サイクル	135サイクル	200サイクル
F	 変化なし	 変化なし	 変化なし
M	 84サイクル時にチップ脱落 全体的に組織が緩んでいる	 組織の緩みが軸ひび割れに進展	 200サイクル時に破壊
C	 軸ひび割れ発生	 135サイクル時に破壊	

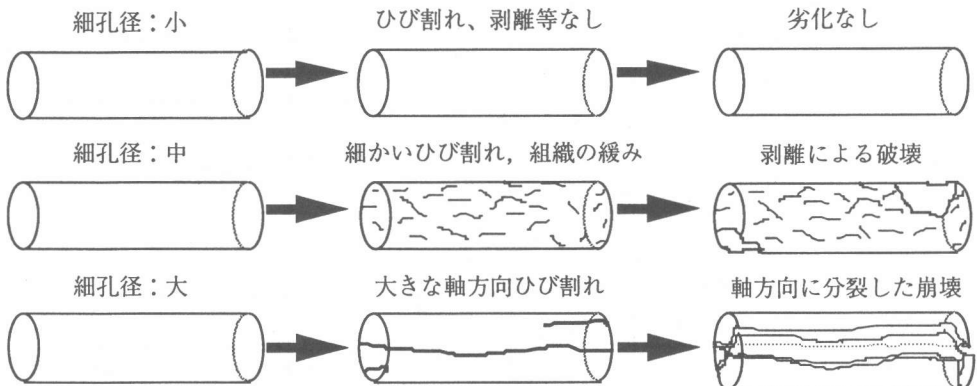


図-2 細孔径分布の違いによる劣化モードの違いの概念図

図一2に示す。写真から明らかなように、Fでは300サイクル経過後も供試体外観に変化はなく、健全さを保っていることがわかる。これに対し、Mでは100サイクル経過頃から細かいひび割れが多数発生し、全体的に組織が緩み始めた。このひび割れはサイクルを重ねる毎に進展し、組織の緩みが供試体全体に広がった後、端部から剥離を生じて破壊に至った。一方、Cでは、細かいひび割れの発生等が認められる以前に突然大きな軸方向ひび割れが発生し、その後すぐに供試体は軸方向に分裂して崩壊した。

このように、細孔径分布の違いによって劣化モードにも違いが生じることが認められた。ただし、Fの曲げ強度はMおよびCと比較して非常に大きいため、Fに劣化が生じない理由を細孔径が小さいためだけとは断言できない。しかし、曲げ強度がほぼ等しいMとCとの比較によれば、劣化モードの違いは細孔径分布の違いによるものであるという想像が成立すると考えられる。試験に用いた供試体の細孔径はコンクリートに比べて粗大な範囲に分布しているため、この結果を直接コンクリートに適用することはできないが、「ある径に卓越する細孔が存在するか否かによって劣形態が異なる」という鎌田の指摘<sup>9)</sup>を、明確にすることができたと考えられる。

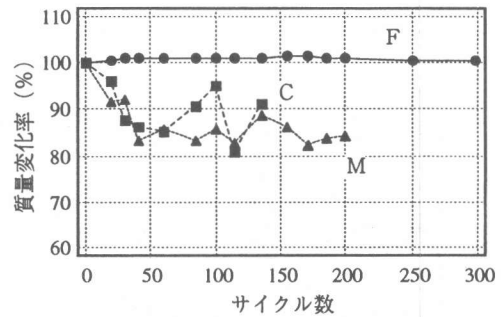
### 3. 2 質量、長さおよび動弾性係数

質量、長さおよび動弾性係数の測定結果を図一3～図一5に示す。いずれも、細孔径が小さいFでは300サイクル経過後も測定値に変化はなく、劣化が生じていないことを示している。これに対し、Mは200サイクル経過後に、またCは135サイクル経過後に測定不能となった。

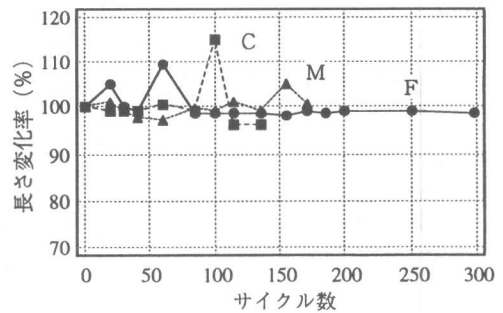
質量変化率でMおよびCが減少しているのは、スケーリングの発生によるものと考えられる。また、特にCにおいて質量が増加する場合は、劣化が進むにつれて供試体内部にひび割れが発生したり組織が緩んで粗大化したりするため、供試体内部に保有される水量が増えることが理由ではないかと考えられる。な

お、各サイクル時における質量の測定は、融解した供試体を一定時間恒温恒湿室内に放置し、供試体表面のみが乾燥した頃合いを見計らった後に行った。

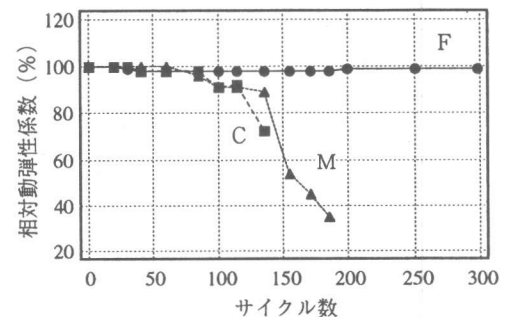
一方、長さ変化率でCが大きな伸びを示した100サイクル時点では、供試体に軸方向ひび割れが発生していることが目視観察により確認されている。



図一3 質量変化率



図一4 長さ変化率



図一5 相対動弾性係数変化

### 3. 3 残留ひずみ量

融解過程終了後の残留ひずみの測定結果を図-6に示す。いずれの供試体もサイクル数の増加に伴って残留ひずみ量が大きくなってゆくが、粗大な細孔径分布を有するものほどその増加量は大きいことがわかる。一般に、凍結融解作用下にあるコンクリートは、図-7<sup>10)</sup>に示すように凍結過程で膨張し融解過程で収縮するが、収縮は完全に元には戻らず、融解後にひずみが残留する(図中、残留膨張)。この残留ひずみ量は凍結水量に起因すると考えられるため、粗大な細孔径の多いものほど残留ひずみも大きくなると予想できる。

### 3. 4 ひずみ変化

供試体温度とひずみ変化との関係を図-8に示す。繁雑を避けるため、10, 100および測定最終サイクルのみを示した。ここに、測定最終サイクルは、F: 245サイクル, M: 200サイクル, C: 135サイクルである。

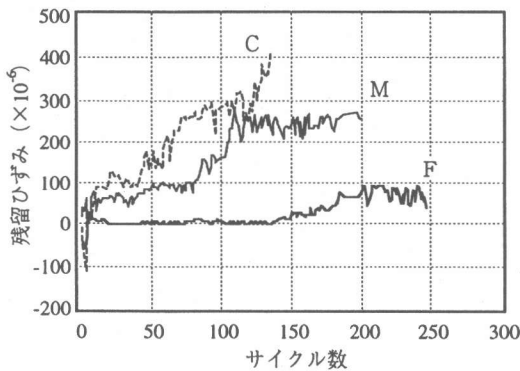


図-6 残留ひずみ量

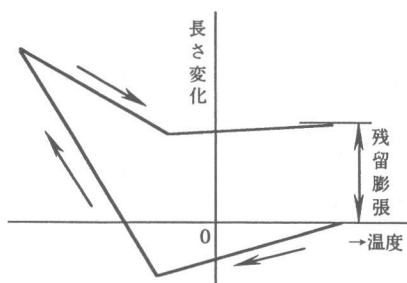


図-7 凍結融解時のコンクリートの長さ変化<sup>10)</sup>

これによれば、いずれの供試体も10サイクル時には曲線は閉じており、残留ひずみは生じていない。しかし、サイクルの増加に伴って曲線は閉じなくなり、残留ひずみは増加してゆく。例えば、もっとも細かい細孔径を有するFでは、245サイクル終了後も残留ひずみ量は $50 \times 10^{-6}$ 程度にすぎない。これに対し、Mでは曲線は徐々に上部に移動しており、破壊時(200サイクル)での残留ひずみ量は $150 \times 10^{-6}$ 近くに達し

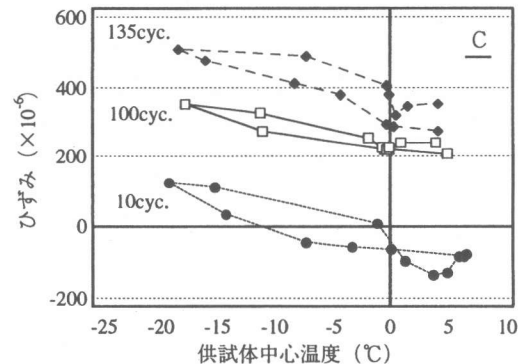
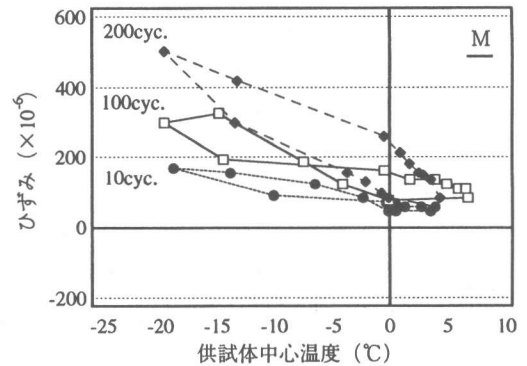
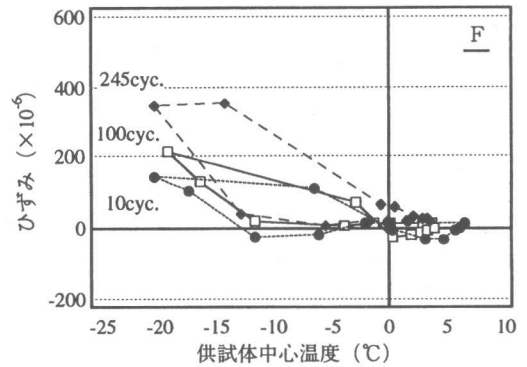


図-8 ひずみ変化

ている。さらに、もっとも粗大な細孔径分布を有するCでは、100サイクルまでに残留ひずみ量は $200 \times 10^{-6}$ まで大きくなり、破壊時(135サイクル)には $400 \times 10^{-6}$ にまで至った。

このように残留ひずみが増加する傾向は、粗大な細孔径分布を有する供試体ほど顕著である。この理由として次の仮定が考えられる。すなわち、粗大な細孔を多く有する供試体では、細かい細孔を有する供試体よりもひび割れや組織の緩みなどが発生しやすいことが実験結果より明らかとなった。組織の緩みは組織内の保水量を増大させるが、この水は粗大細孔にあるため0℃に近い温度で凍結しやすく、マイクロクラックの誘発や組織の緩みなどのさらなる劣化を引き起こす。このため、凍結融解サイクルが進むにつれて組織の粗大化が急激に進み、残留ひずみは飛躍的に大きくなってゆくと考えられる。

#### 4. まとめ

異なる空隙分布を有するセラミック供試体の凍結融解試験を行い、その劣化について検討を行った。検討の結果、卓越する細孔径の範囲により、劣化モードに違いがあることを確認した。すなわち、劣化が現れる供試体のうち、細孔径が相対的に小さい範囲にあるものでは劣化は組織全体の緩みとして現れるのに対し、細孔径が相対的に大きい範囲にあるものでは軸方向ひび割れとして現れた。

今後は実験的なアプローチとともに数値モデルの構築を進め、シミュレーションで求められた細孔径分布をもとに、凍結融解による劣化を初期ひずみ問題へと発展させていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) T.C.Powers : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Proc.of ACI, Vol.41, pp.245-272, 1945
- 2) 山下英俊ほか：凍害を受けるコンクリートの凍結水量の算定方法と耐凍害指標値の提案、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.729-734, 1991
- 3) 野本高憲ほか：最低温度が凍結融解作用下のコンクリートの劣化に及ぼす影響について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1015-1020, 1992
- 4) 岡本修一・魚本健人：モルタルの凍結融解による劣化挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.609-614, 1996
- 5) 日本コンクリート工学協会：セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集, 1996.5
- 6) 渡邊弘子・石川雅美：セメントペーストの細孔構造を予測する水和反応シミュレーションモデルの構築、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.615-620, 1996
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編, 1996
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書規準編, 1996
- 9) 鎌田英治：凍結融解作用を受けたコンクリートの挙動と細孔構造、セメント・コンクリート, No.460, pp.33-34, 1985.6
- 10) 山田順治・有泉昌編：わかりやすいセメントとコンクリートの知識, 鹿島出版会, 1976