

# 論文 乾燥を考慮したコンクリートの凍害劣化挙動

酒井 正樹\*1・千歩 修\*2・長谷川 拓哉\*3・中野 佑樹\*4

**要旨:** non-AE 高強度コンクリートは、乾湿繰返しにより耐凍害性が大きく低下する。この理由として、乾燥により生じる含水率分布および水分移動の影響が考えられる。本研究はその検証として、含水率分布がある場合の凍結融解時の水分移動性状、乾湿繰返しの有無による凍結水量の変化、含水率分布が異なる場合の耐凍害性を検討した。その結果、外部からの水分供給の有無および凍結融解開始時の表層の含水状態によって、異なる水分移動性状を示すこと、乾湿繰返しを行った試験体は水中養生直後のものより凍結水量が大きくなること、含水率分布のある試験体を長期間水中浸漬すると耐凍害性が向上することがわかった。

**キーワード:** 凍害劣化, 高強度コンクリート, 乾湿繰返し, 含水率分布, 水分移動, 凍結水量

## 1. はじめに

non-AE 高強度コンクリートは、2 週水中養生直後に凍結融解試験を行うと高い耐凍害性を示すが、乾燥を受けると耐凍害性が大幅に低下するものが報告されている<sup>1)</sup>。この理由として、乾燥による微細ひび割れの発生や組織の変質、コンクリート内部の水分移動、水分逸散の影響などが考えられる。著者らはこれまで、乾湿繰返しに起因した、表層の微細ひび割れの発生<sup>2)</sup>、凍結融解時の水分移動<sup>3)</sup>について検討してきた。凍結融解時の水分移動の詳細なメカニズムは、別の実験シリーズで検討を進めており、コンクリートの部分的な凍結が水分移動の要因の一つと考えられる。また、乾湿繰返し後の水中浸漬期間によって耐凍害性が異なるという結果があり、含水率分布の変化によって、耐凍害性も変化すると考えられる。

本研究は、non-AE 高強度コンクリートが、乾湿繰返しによって耐凍害性が低下する機構には、含水率分布が生じたコンクリート内部で起こる、凍結融解時の水分移動の影響があると考え、その検証を行ったものである。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験計画

実験の概要と主な目的を表-1 に示す。いずれのシ

リーズも、乾湿繰返しにより含水率分布を与えた試験体を対象としている。シリーズ I では、外部からの水分供給条件を変えて片面吸水凍結融解試験を行い、乾湿繰返しで生じた含水率分布が、凍結融解時にどのように変化するかを検討した。シリーズ II では、乾湿繰返しの有無と凍結水量の関係を検討した。シリーズ III では、乾湿繰返し後に期間を変えた水中浸漬を行って含水率分布を変化させ、水中凍結融解試験により、凍結融解試験開始時の含水率分布が耐凍害性におよぼす影響を検討した。

表-2 にシリーズ I、表-3 にシリーズ II、表-4 にシリーズ III の実験計画を示す。いずれのシリーズも W/C25% の non-AE コンクリートを対象とし、標準(乾湿繰返しを行わない)試験体 [S] と、乾湿繰返し試験体 [d] の 2 種類を設定した。乾湿繰返しの条件は、乾燥 40°C・42 時間、水中浸漬 6 時間<sup>4)</sup>とし 7 サイクル行った。

シリーズ I では、凍結融解時に外部からの水分供給条

表-1 各シリーズの概要 (主な目的)

シリーズ I	外部からの水分供給条件を変えた片面吸水凍結融解試験(含水率分布がある場合の凍結融解時の水分移動性状の確認)
シリーズ II	乾湿繰返しの有無と凍結水量の関係の検討
シリーズ III	乾湿繰返し後の吸水時間を変えた凍結融解試験(凍結融解試験開始時の含水率分布が耐凍害性におよぼす影響の検討)

表-2 実験計画 (シリーズ I)

W/C (%)	air (%)	凍結融解試験開始条件[記号]	試験条件[記号]	測定部位	試験体寸法	試験方法	測定項目
25	1.0	標準[S] 乾湿繰返し[d] (40°C乾燥42h, 水中浸漬6h×7c)	露出[R] 封緘[F]	表層(1cm)	10×10×6cm	片面吸水凍結融解試験 (JIS A 1435を参考)	質量含水率(比抵抗) 湿度(温湿度計) 質量変化率
				中間(3cm) 内部(5cm)	10×10×40cm	凍結融解試験 (JIS A 1148 A法)	質量含水率(比抵抗) 質量変化率 長さ変化率 相対動弾性係数

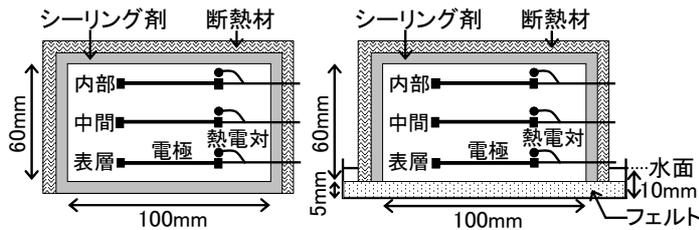
※試験体記号:[ ]内の記号を用い、「凍結融解試験開始条件」+「試験条件」+「測定部位」とする (例:SR表層)

\*1 株式会社 大林組 修士(工学) (正会員)

\*2 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻教授 工学博士 (正会員)

\*3 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻 (正会員)



※温湿度計を同位置に埋め込んだ試験体も作製した

図-1 片面吸水凍結融解試験体 (左：封緘，右：露出)

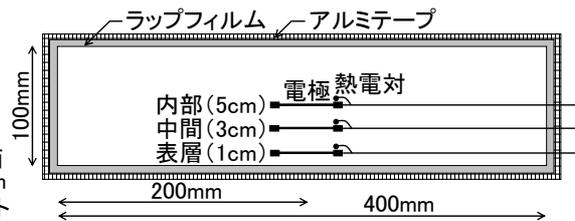


図-2 水中凍結融解試験体 (封緘)

表-3 実験計画 (シリーズ II)

W/C (%)	AIR (%)	水中凍結融解試験開始条件	測定部位	測定項目
25	1.0	標準 乾湿繰返し※	表層(1cm) 中間(3cm) 内部(5cm)	潜熱積算温度

※:シリーズ I と同一条件

表-4 実験計画 (シリーズ III)

W/C (%)	AIR (%)	水中凍結融解試験開始条件 [試験体記号]	測定項目
25	1.0	標準[S] ・乾湿繰返し※, 6c乾燥終了時[d] ・乾湿繰返し※+水中浸漬0日[0d] +水中浸漬2日[2d] +水中浸漬4日[4d] +水中浸漬7日[7d]	・質量変化率 ・長さ変化率 (ダイヤルゲージ) ・相対動弾性係数

※:シリーズ I と同一条件

表-5 コンクリートの調合

W/C (%)	目標 AIR (%)	目標スランブフロー(cm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				高性能 AE 減水剤 (C×%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
25	1.0	60.0×60.0	175	700	634	931	1.25

表-6 コンクリートの基礎性状

シリーズ	実測 AIR(%)	実測スランブフロー(cm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
I	1.6	54.0×55.5	110.1	3.8×10 <sup>4</sup>
II・III	2.0	40.0×38.0	95.5	3.5×10 <sup>4</sup>

件が異なるように、図-1に示す封緘試験体 [F] と露出試験体 [R] を作製して、片面吸水凍結融解試験を行い、表層・中間・内部の含水状態の変化を検討した。dF 試験体は、乾湿繰返し時に吸水面を露出させて含水率分布を生じさせ、凍結融解を封緘状態で行うものである。なお、これらの試験体は水中凍結融解試験体の表層から中心部分までのコンクリート部分を想定したものであり、水分および熱の移動が同様となるようにしたものである。含水状態の検討は、比抵抗による質量含水率、温湿度計による相対湿度、質量変化率の3種類の指標を用いて行った。また、水中凍結融解試験(封緘：図-2，露出：ラップフィルム等なし)により、同様の測定を行い、凍結融解時の水分移動性状について検討した。

シリーズIIでは、凍結水量を潜熱積算温度により評価し、乾湿繰返しの有無と凍結水量の関係を検討した。なお、試験体は水中凍結融解試験を行い、凍結融解繰返しの影響についても検討した。

シリーズIIIでは、乾湿繰返し後に期間を変えた水中浸漬を行って、凍結融解開始時の含水率分布の状態を変え、水中凍結融解試験によりそれらの耐凍害性を検討した。

## 2.2 試験体の作製

コンクリートの調合を表-5に、基礎性状を表-6に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>)、細骨材は勇払産陸砂(表乾密度2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.26%)、粗骨材は常盤産砕石(表乾密度2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率2.69%)を用いた。高性能AE減水剤(SP8S)はスランブフローが60cmになるように調整して添加した。

試験体寸法は、シリーズIでは図-1、図-2に示す通

りであり、シリーズIIでは10×10×10 (cm)、シリーズIIIでは7.5×7.5×40 (cm)とした。試験体数は、シリーズI・IIは各1体、シリーズIIIでは各2体とした。いずれも打込み翌日に脱型し、14日間の水中養生を行った。

## 2.3 試験方法

片面吸水凍結融解試験はJIS A 1435 (片面吸水凍結融解法)を参考に行った。凍結融解1サイクルは、凍結4時間、融解4時間の8時間とし、測定部位“内部”の温度が、凍結温度-18℃、融解温度10℃となるように、温度条件を設定した。水中凍結融解試験は、JIS A 1148 A法(水中凍結融解法)に準じて行った。いずれも、乾湿繰返しを行った試験体は2日間(シリーズIIIでは表-4に示す期間)の水中浸漬後に凍結融解試験を開始した。なお、片面吸水凍結融解試験では初期の数十サイクルをもって測定を終了した。

潜熱積算温度の測定は、長谷川らの方法<sup>5)</sup>に準じて行った。ただし、表層・中間・内部の違いを検討するため、試験体寸法は異なるものとした。

また、コンクリートの基礎性状として、28日水中養生後の圧縮強度とヤング係数を測定した。

## 2.4 測定方法

相対湿度の測定は、温湿度計(測定範囲:10~95%RH)およびデータロガーを用いて連続的に行った。

質量含水率の測定は、電極法<sup>6)</sup>により行った。電極はステンレス製電極棒(φ=2mm)を使用し、長さ45mm、間隔8mmとした。電気抵抗の測定には、LCRメータを使用し、電極の面積と間隔の影響を除去するために、0.01規定のKCl水溶液を用いてキャリブレーション試験を行

い、比抵抗に換算した。また、長期間放置し含水率を調整した試験体から求めた、質量含水率、比抵抗、温度の関係式(式(1))を用いて、測定した温度、比抵抗から質量含水率を算出した。

$$\ln(\rho) = \frac{3892}{T} - 1.085M + 1.576 \quad (1)$$

(R<sup>2</sup>=0.94)

ここに、 $\rho$  : 比抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}$ )  
 T : 絶対温度(K)  
 M : 質量含水率(%)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 片面吸水凍結融解試験結果(シリーズ I)

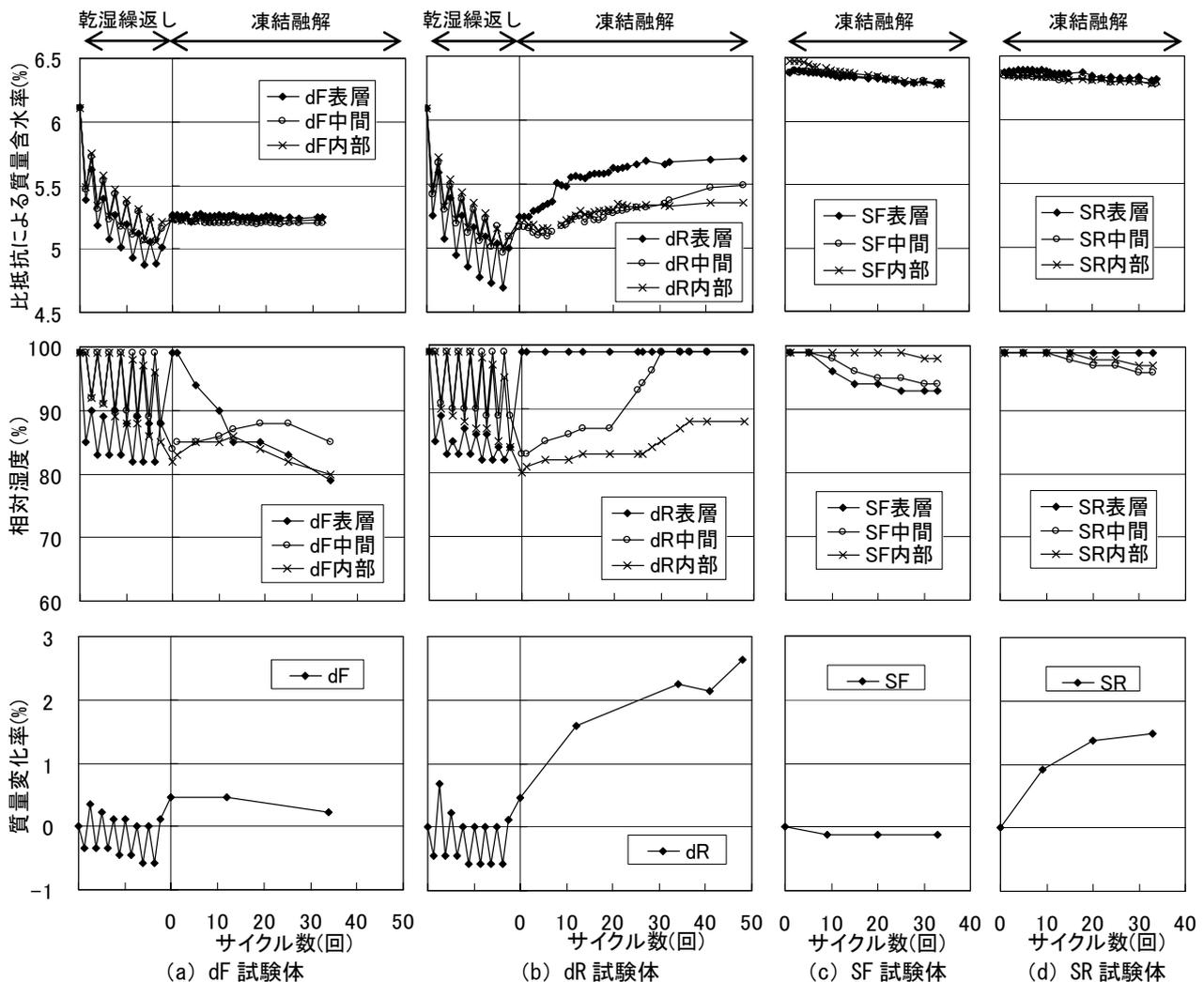
図-3 に乾湿繰返しおよび片面吸水凍結融解試験結果を示す。比抵抗による質量含水率、相対湿度、質量変化率とともに、乾湿繰返しでは乾燥時 40℃、湿潤時 15℃での値とし、凍結融解では 4℃での値とした。また、質量変化率は、断熱材の乾燥または吸水を含んだ見かけの値

であり、コンクリートのみの評価はできなかった。

乾湿繰返し試験体 [dF, dR] について、乾湿繰返しおよび 2 日間の水浸漬時の含水状態を検討する。

比抵抗による質量含水率および湿潤時の相対湿度は、乾湿繰返し 7 サイクルを通じて低下している。また、1 サイクルでの変化をみると、乾燥過程において、表層で含水率の低下が大きく、乾湿繰返しにおける水分の出入りの多くは表層で行われると考えられる。

凍結融解試験前の 2 日間の水浸漬では、比抵抗による質量含水率は、表層・中間・内部でほとんど同じであったが、乾湿繰返し開始時に比べて約 1% 低下した。湿潤時の相対湿度でも同様に、中間・内部は開始時より低い相対湿度となった。しかしながら、表層の相対湿度は 100% に戻っており、表層と中間の間に含水率の大きな勾配ができていると考えられる。なお、比抵抗による質量含水率と相対湿度による表層の含水状態の違いは、測定方法による差と考えられる。また、いずれの指標でも、乾湿繰返しによる乾燥の影響が残った状態で、凍結融解



※乾湿繰返しでは、乾燥時 40℃・湿潤時 15℃での値とし、凍結融解では、4℃での値とした

図-3 片面吸水凍結融解試験結果 (比抵抗による質量含水率, 相対湿度, 質量変化率)

試験が始まることがわかる。

質量変化率は、乾燥過程で減少、湿潤過程で増加しているが、凍結融解試験前の2日間の水浸漬終了時には乾湿繰返し開始時の水準まで戻り、乾燥の影響は見られなかった。乾湿繰返しによる含水率分布は、試験体質量の計測だけでは評価できないと思われる。

次に、乾湿繰返し試験体 [dF, dR] および標準試験体 [SF, SR] について、片面吸水凍結融解試験時の含水状態を検討する。

dF 試験体は、凍結融解を繰返しても、比抵抗による質量含水率は、表層・中間・内部ともに凍結融解開始時のまま変化せず、水分移動は見られなかった。相対湿度は、凍結融解開始時には、表層のみ高い状態の含水率分布が見られたが、凍結融解の進行に伴い、表層・中間・内部で同等の相対湿度となる傾向が見られた。凍結融解 20 サイクル以降の相対湿度の低下は、封緘が不十分であったことや、養生が進んだ影響と考えられる。また、質量変化率も、凍結融解時は変化が見られなかった。

以上より、乾湿繰返しを受けた試験体は、凍結融解時に外部からの水分供給がなければ、水分移動はほとんど生じないと考えられる。

dR 試験体は、凍結融解が始まると、比抵抗による質量含水率は表層で上昇、中間・内部で一時的に低下し、凍結融解開始時にはわずかであった表層・中間・内部の含

水率分布が大きくなっている。凍結融解に伴い中間・内部の水分が表層方向へ移動したことが考えられる。凍結融解初期における表層での含水率の上昇および中間から表層方向への水分移動は、既往の研究<sup>3)</sup>結果が再現されており、乾湿繰返しによる微細ひびわれの発生や、凍結水量の増加が影響していると考えられる。凍結融解が進むと、表層からの水分の移動により、表層、中間、内部の順に高含水率となることわかる。

相対湿度は、表層が凍結融解開始時に既に高含水状態であったが、凍結融解が始まると、同様に表層から中間・内部へと水分が移動し、順に相対湿度が上昇している。また、質量変化率も、凍結融解の進行に伴い上昇したが、これは断熱材の吸水による影響と考えられる。

以上より、乾湿繰返しを受けた試験体は、凍結融解時に外部からの水分供給があると、乾湿繰返しで生じた含水率勾配の影響が維持された状態で、表層から内部へ水分移動が生じ、含水率が上昇しているものと考えられる。また、凍結融解開始時に、表層に乾燥の影響が残っている場合は、中間・内部から表層方向へ水分移動が生じると考えられる。

SF 試験体および SR 試験体は、凍結融解時には、外部からの水分供給の有無に関わらず、比抵抗による質量含水率は変化せず、水分移動は生じないことがわかる。相対湿度の低下がみられるが、これは封緘が不十分であ

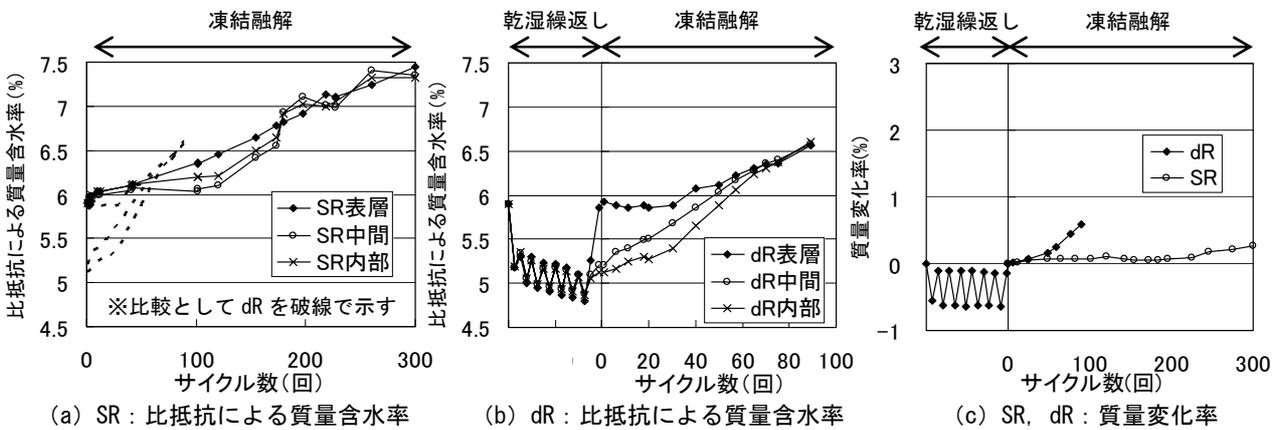


図-4 水中凍結融解試験結果 (比抵抗による質量含水率, 質量変化率)

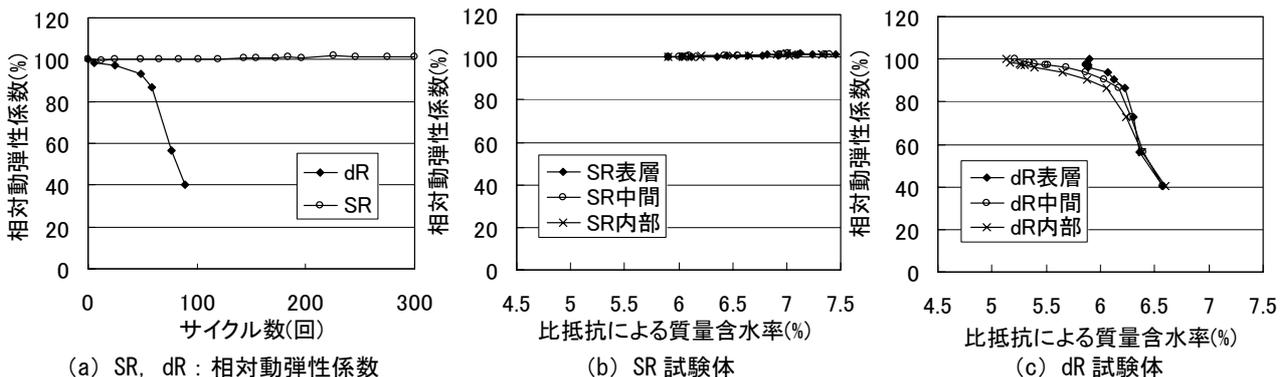


図-5 水中凍結融解時の相対動弾性係数と比抵抗による質量含水率の関係

たことや、養生が進んだ影響と考えられる。

以上より、凍結融解開始時に含水率分布を持たない場合は、外部からの水分供給の有無に関わらず、内部および外部からの水分移動は生じないと考えられる。

### 3.2 水中凍結融解試験結果(シリーズ I)

図-4 に乾湿繰返しおよび水中凍結融解試験結果を示す。封緘試験体 [F] は、凍結融解試験中に封緘が破損し、データが得られなかった。

SR 試験体の比抵抗による質量含水率は、凍結融解初期の 40 サイクル程度までは変化が小さいが、100 サイクル程度となると表層、内部、中間の順に含水率が高い状態となっており、200 サイクルを超えると含水率が一様となっている。300 サイクルを通してみると、ほとんど一定の割合で含水率が上昇していると考えられる。

片面吸水凍結融解試験の結果と比較すると、40 サイクル程度までの挙動は同様と考えられる。

dR 試験体の比抵抗による質量含水率は、乾湿繰返し後の 2 日間の水中浸漬では、表層の含水率が乾湿繰返し開始時の高含水率へと戻っている。凍結融解では、表層の含水率の変化が少なく、中間・内部の含水率が上昇しており、表層から内部へ水分が移動していると考えられる。凍結融解が 50 サイクルを超えると、表層・中間・内部の含水率の差は小さくなり、養生後よりも高い含水率となっている。これは、ひび割れや組織の緩みが生じ、水分が移動しやすい状態になっていることが考えられる。

片面吸水凍結融解試験の結果と比較すると、凍結融解初期に見られた、中間・内部から表層方向への水分移動が見られずに、全体の含水率が上昇している。中間・内部から表層方向へ水分移動の傾向がみられなかった理由としては、表層が高含水率であったことに加え、水中凍結融解試験による表層から内部への水分の移動が大きかったことが考えられる。

また、質量変化率でも、SR 試験体、dR 試験体ともに比抵抗による質量含水率の変化と同様な挙動を示した。

図-5 に水中凍結融解時の相対動弾性係数の変化と比抵抗による質量含水率の関係を示す。

SR 試験体、dR 試験体の凍結融解時の相対動弾性係数の変化を見ると、乾湿繰返しにより大幅に耐凍害性が低下することが確認できる。

SR 試験体の、比抵抗による質量含水率と相対動弾性係数の関係をみると、含水率は上昇しているが、本実験の範囲では相対動弾性係数の低下は見られなかった。

dR 試験体の、比抵抗による質量含水率と相対動弾性係数の関係をみると、中間・内部の含水率が徐々に上昇し、養生後の含水率である約 6%に達したところで急激な相対動弾性係数の低下が見られた。これは、ある限界の含水率以上になると劣化が進行することを示しており、限

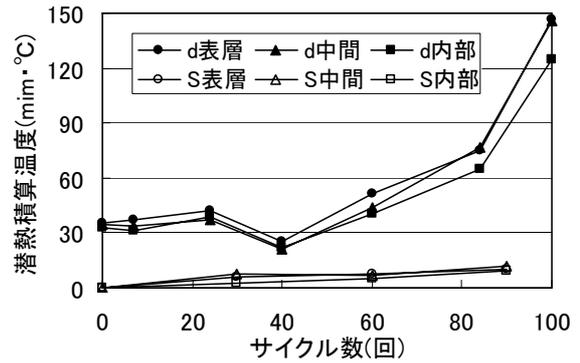


図-6 乾湿繰返しによる潜熱積算温度の変化

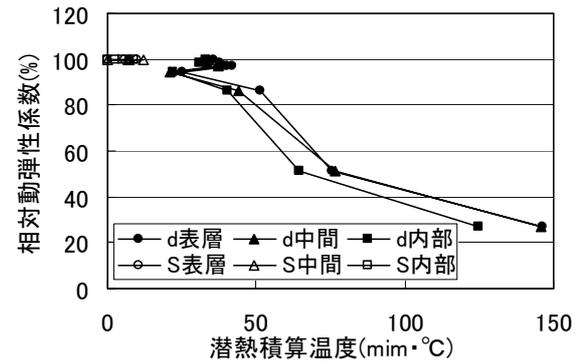


図-7 潜熱積算温度と相対動弾性係数の関係

界飽水度法<sup>7)</sup>の考え方に対応するものと考えられる。また、相対動弾性係数が60%を下回ると表層・中間・内部の含水率はほとんど等しくなり、高含水率となっている。

### 3.3 乾湿繰返しによる凍結水量の変化(シリーズ II)

図-6 に標準試験体 [S] と乾湿繰返し試験体 [d] の融解時の潜熱積算温度の変化を示す。なお、潜熱積算温度は凍結水量に対応する値である。

水中養生直後に凍結融解試験を始めた S 試験体では、凍結融解開始時には、表層・中間・内部ともに潜熱積算温度は算出できず、凍結水量はほとんどないと考えられる。長谷川らの示した、潜熱積算温度と水セメント比の関係<sup>5)</sup>によると、水セメント比 25%では潜熱積算温度はほとんど 0 と考えられ、本研究の結果と一致している。また、凍結融解を行った試験体でも、測定を行った 100 サイクルまでは、潜熱積算温度は小さな値となっている。

一方で、乾湿繰返しおよび 2 日間の水中浸漬を行った d 試験体では、凍結融解開始時には、表層・中間・内部ともに 35 (mim·°C) 程度の潜熱積算温度が算出され、乾湿繰返しを行った試験体では、凍結水量が増加するものと考えられる。また、凍結融解を繰り返すと、わずかであるが表層、中間、内部の順に潜熱積算温度が大きくなり、この順に凍結水量が多いと考えられる。このことから、表層の凍結水量の増大により、水分移動が引き起こされると考えられるが、表層・中間・内部の潜熱積算温度の差はわずかであり、部位による凍結水量の差については、他の手法による検討が必要と思われる。また、

凍結融解 50 サイクルを過ぎて、相対動弾性係数が低下し始めると、潜熱積算温度は急激に増大した。

図-7 に潜熱積算温度と相対動弾性係数の関係を示す。S 試験体では、相対動弾性係数の低下がみられず、潜熱積算温度もほとんど 0 のままであった。相対動弾性係数が低下し始めるまでは、凍結水量はほとんどないまま変化しないと考えられる。一方、d 試験体では、相対動弾性係数の低下に伴い、潜熱積算温度が増大している。これは、組織の緩みやひび割れの発生に伴い細孔径が粗大化し、凍結できる水の量が増加したためと考えられる。

### 3.4 吸水時間を変えた試験体の耐凍害性(シリーズⅢ)

図-8 に乾湿繰返し後の水中浸漬時間を変えた試験体の凍結融解試験結果を示す。

相対動弾性係数の低下より、耐凍害性は  $0d < d = 2d < 4d < 7d < S$  の順となった。乾湿繰返し後の水中浸漬時間が長いほど、耐凍害性が大きくなることわかる。この理由として、乾湿繰返しにより生じた含水率分布が水中浸漬時間が長くなることにより小さくなったこと、乾湿繰返しで表層に生じた微細ひびわれなどの組織の変化が未水和セメントの水和によって治癒したこと、含水率の上昇により毛細管が水で満たされ氷の生成できる空間が減少したことなどが考えられる。

質量変化率は、水中浸漬期間に関わらず、劣化に伴い一定の割合で増加しており、相対動弾性係数が 60% となる時には約 0.5% となり、ほとんど同等な結果となった。

## 4. まとめ

non-AE 高強度コンクリートについて以下のことが明らかとなった。

- 乾湿繰返しによる含水率分布がある場合の凍結融解時の水分移動性状について、
  - 凍結融解時に外部からの水分供給がなければ水分移動はほとんど生じない。
  - 凍結融解時に外部からの水分供給があると、乾湿繰返しで生じた含水率勾配の影響が維持された状態で、表層から内部へ水分移動が生じ、含水率が上昇する。
  - 含水率分布状況および吸水条件により、中間・内部から表層方向へ水分移動が生じることがある。
- 凍結融解開始時に含水率分布を持たない場合は、外部からの水分供給の有無に関わらず、内部および外部での水分移動は生じにくいと考えられる。
- 乾湿繰返しを行った試験体は、水中養生直後のものより凍結水量が増加する。
- 乾湿繰返し後の水中浸漬時間が長いほど耐凍害性が大きくなる。

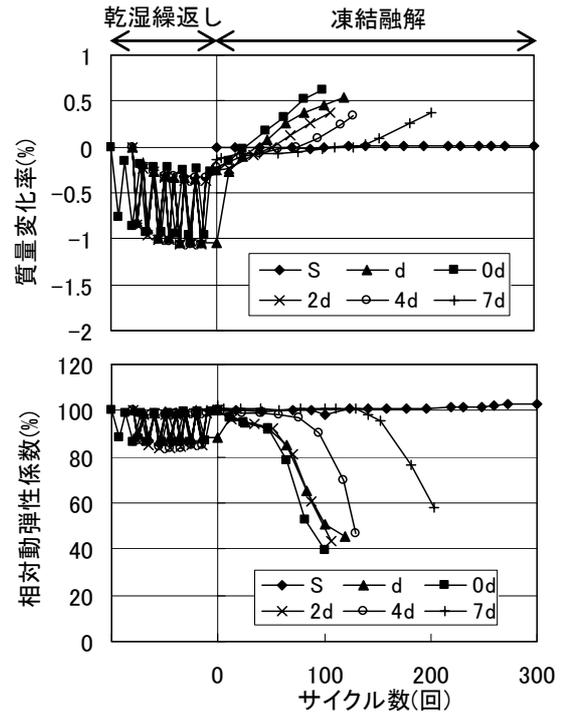


図-8 乾湿繰返し後の吸水時間を変えた試験体の凍結融解時の質量変化率、相対動弾性係数

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(B)「高性能コンクリートの実環境における性状変化と耐凍害性」(課題番号: 19360243, 研究代表者: 千歩修)によったものであり、ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 木村信孝ほか: 暴露条件・粗骨材種別が高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.745-750, 2005.7
- 酒井正樹ほか: 部材の乾燥を考慮した高強度コンクリートの凍結融解抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.905-910, 2006.7
- 酒井正樹ほか: 乾湿繰返し・凍結融解を受けるコンクリートの含水状態および長さ変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1167-1172, 2007.7
- 米田恭子ほか: 乾湿繰返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1131-1136, 2007.7
- 長谷川真吾ほか: セメント硬化体中水分の凍結水量測定手法の一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.851-856, 2006.7
- 鎌田英治ほか: コンクリート内部の含水量の測定, セメント技術年報, No.30, pp.288-292, 1978
- G. Fagerlund: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete, materials and structures, vol.10, no58, pp.217-229, 1977