

論文 コンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす乾燥温度の影響

濱 幸雄^{*1}・小林和寛^{*2}・青野義道^{*3}・柴田純夫^{*4}

要旨：コンクリート構造物が供用中に受ける過度な乾燥などに起因する微細なひび割れが耐凍害性を低下させる可能性が指摘されている。本研究では、凍結融解開始前の乾燥温度の違いが微細ひび割れ発生に及ぼす影響を把握するとともに、CIF 試験によって吸水性状と耐凍害性の関係性を評価した。その結果、乾燥によってコンクリートの粗骨材界面に生じる比較的幅の広いひび割れが凍害劣化に及ぼす影響は小さいこと、乾燥温度が高いほど限界飽水度が低くなり、耐凍害性が低下することが明らかとなった。

キーワード：乾燥, 吸水性状, 耐凍害性, CIF 試験, ひび割れ

1. はじめに

コンクリートの凍害劣化は、凍結温度、凍結融解回数など冬期の気象条件の影響を大きく受けるが、夏期の乾燥や養生の影響も大きく、軽微な乾燥は耐凍害性を向上させるが、過度な乾燥は耐凍害性を低下させることが知られている。また、経年したコンクリートにおいて、乾燥収縮などに起因する微細なひび割れが耐凍害性を低下させる可能性が指摘されている¹⁾。実環境下の構造体コンクリートでは、部材の種類や方位によって差はあるものの、北海道においても夏期のコンクリートの表面温度は 50℃前後になることがある。コンクリート構造物の供用中における耐凍害性の変化に関する知見を得るために、コンクリートが受ける乾燥程度の差が、微細ひび割れの発生、吸水性状、耐凍害性に及ぼ

す影響を明らかにする必要がある。本研究では、水セメント比、空気量および養生程度の異なるコンクリートを対象として、凍結融解開始前の乾燥温度の違いが微細ひび割れ発生に及ぼす影響を把握するとともに、実環境に近い条件の試験方法である CIF 試験によって吸水性状と耐凍害性の関係性を評価することを目的としている。

2. 実験計画および方法

表-1 に実験計画を示す。水セメント比、空気量の異なる 5 種類のコンクリートを作製した。また、35N, 55N, 55A の 3 種類については、コンクリートの練り上がり直後にウェットスクリーニングしたモルタル供試体も作製した。供試体の養生条件は、水中養生期間を 2 週と 13 週の 2 水準、水中養生後 CIF 試験開始までの乾燥温度

表-1 実験計画

記号	W/C (%)	目標空気量 (%)	水中養生期間	乾燥温度 (°C)	試験項目
35N*	35	1.0	2週 13週	20	気泡組織測定 (浮力法) 凍結融解試験 (CIF法) ひび割れ観察
35A1		3.0			
35A2		5.0			
55N*	55	1.0		40	
55A*		4.0			

*: ウェットスクリーニングしたモルタル供試体も作製

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 工博 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻

*3 住友金属鉱山シボレックス (株) 技術部 (正会員)

*4 住友金属鉱山シボレックス (株) 技術部長 工博

表-2 コンクリートの調合

記号	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (ℓ/m ³)				化学混和剤 (C×%)		
				W	C	S	G	SP	AE	消泡剤
35N	35	1.0	44.3	180	164	286	360	0.9	—	0.02
35A1		3.0		177	161	280	353	0.9	0.00075	0.02
35A2		5.0		173	157	274	345	0.9	0.001	—
55N	55	1.0	44.5	210	121	293	366	—	—	—
55A		4.0	45.2	184	107	302	366	—	0.25	—

表-3 コンクリートの練り上がり性状と気泡組織の測定結果

記号	練り上がり性状				気泡組織 (浮力法)		
	空気量 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	練り上がり温度 (°C)	空気量 (%)	比表面積 (mm ⁻¹)	気泡間隔係数 (μm)
35N	1.5	23.5	435×435	23.5	0.8	9.8	1205
35A1	3.0	23.2	435×400	23.0	2.1	16.8	463
35A2	5.2	22.8	420×390	22.5	3.9	21.3	276
55N	1.3	23.1	—	26.1	0.4	12.2	1190
55A	5.2	20.3	—	24.8	2.8	15.2	376

を 20°C、40°C、60°C の 3 水準とし、乾燥期間は全て 2 週間とした。なお、モルタル供試体では、水中養生期間を 2 週と 13 週の 2 水準、水中養生後 CIF 試験開始までの乾燥温度を 40°C のみとした。試験項目は浮力法²⁾による気泡組織測定、RILEM CIF 法³⁾による凍結融解試験、マイクロスコブによるひび割れ観察の 3 項目である。

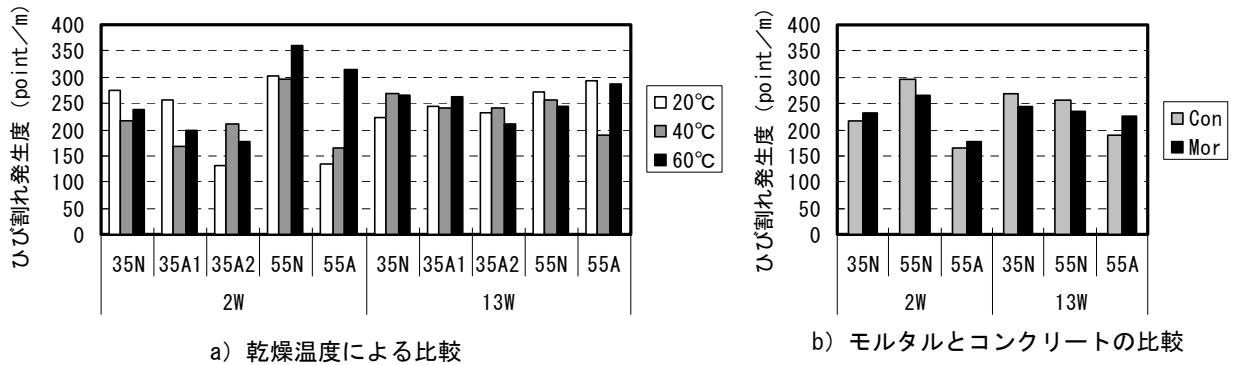
セメントは普通ポルトランドセメント ($\rho = 3.16\text{g/cm}^3$) を、細骨材は登別産陸砂 (表乾密度 = 2.67g/cm^3 , 粗粒率 = 2.70, 吸水率 = 1.52%), 粗骨材は白老産砕石 (敷生川水系安山岩, 表乾密度 = 2.67g/cm^3 , 粗粒率 = 6.64, 吸水率 = 1.83%) を使用し、高性能 AE 減水剤, AE 剤, および空気量調整剤を用いて空気量を調整した。表-2 にコンクリートの調合表を、表-3 に練り上がり性状および浮力法による気泡組織の測定結果を示す。

浮力法による気泡組織の測定は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱型枠にコンクリートを打設し、コンクリートがまだ固まらない段階で、先端に試料採取用のシリンジとウェットスクリーニング用の 6 mm 間隔のケージを取り付けた振動ドリルをコンクリート中に深さ 10cm まで挿入し、15cc のモルタル試料を採取して、AVA-2000 (Germann Instrument 社製) を用いて気泡組織の測定を行い、

空気量、比表面積、気泡間隔係数を算出した。

CIF 試験は、恒温恒湿室中 (20°C, 60%RH) での 7 日間の下面吸水試験と 56 サイクルの凍結融解試験から成っている。凍結融解の条件は、最高温度 20°C (1 時間保持), 最低温度 -20°C (3 時間保持), 温度勾配 $\pm 10\text{K/h}$ で 1 日 2 サイクルの下面吸水状態での一面凍結融解である。供試体寸法は $7.5 \times 7.5 \times 20\text{cm}$ の直方体で、所定の養生後に 4 側面をブチルゴム付きのアルミテープでシールしたものをを用いた。CIF 試験での測定項目は質量変化、たわみ振動法による動弾性係数、剥離量とした。

ひび割れの観察は乾燥終了後の供試体の $7.5 \times 7.5\text{cm}$ の断面を #80, #320, #800 のカーボランダムで研磨後、赤色の染色浸透探傷剤を塗布した後さらに #800 のカーボランダムで研磨し、リニアトラバース法に準じて、マイクロスコブの倍率を 50 倍、トラバース長を 1397mm (骨材最大寸法 4.8mm) として、測線を横切るひび割れ本数をカウントした。なお、マトリクス中および粗骨材界面のひび割れを対象とし、モルタル供試体とコンクリート供試体でのトラバース長を同程度とするために、コンクリート供試体でのトラバース長は粗骨材部分を除いた値とした。



図一 1 ひび割れ発生度の比較

3. 実験結果および考察

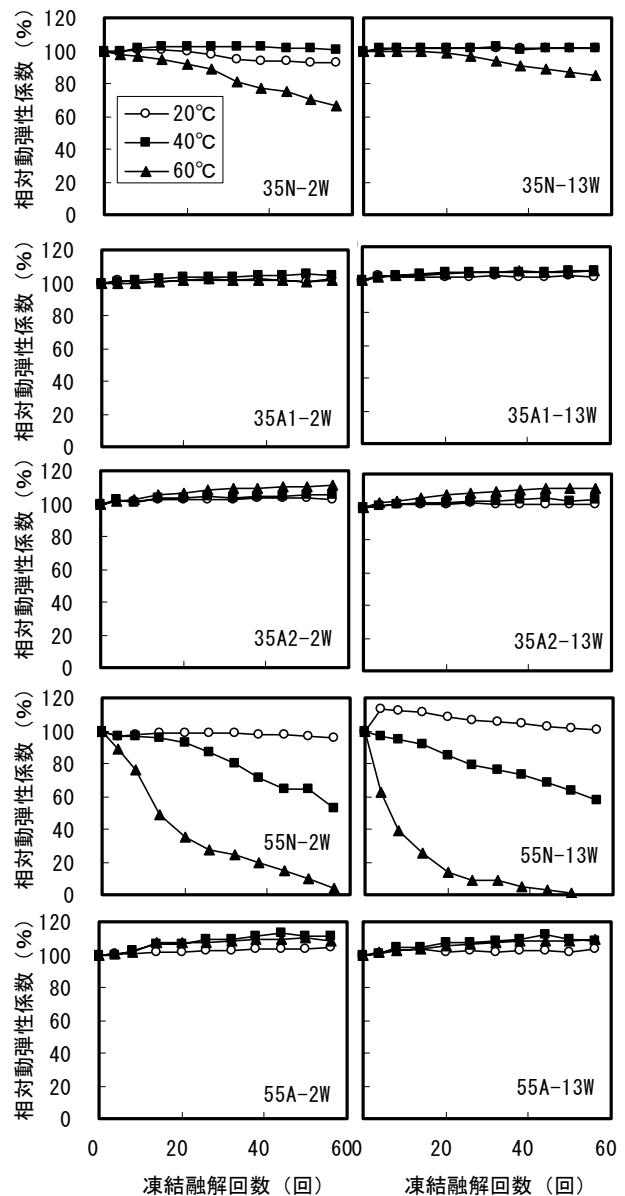
3.1 ひび割れ観察結果

図一 1 に単位長さあたりのひび割れ発生度を示す。コンクリートでは粗骨材界面の遷移帯で比較的幅の広いひび割れが数多く発生していたが、モルタルとコンクリートの単位長さあたりのひび割れ発生度には差が見られなかった。また、既往の研究⁴⁾では、高強度コンクリートや過度な乾燥を受けたコンクリートでは、微細ひび割れが多く発生すると言われているが、今回の結果では必ずしも高温での乾燥が多くひび割れを発生させているわけではなく、コンクリート種類、養生条件、乾燥温度などによるひび割れ発生度の違いに明確な傾向は認められなかった。本研究で用いたマイクロスコープによるひび割れ観察方法では、およそ 50 μm 以上の幅のひび割れの発生度をカウントすることは可能であるが、それぞれのひび割れの幅、深さなどを定量化することはできなかった。

3.2 凍結融解試験結果

(1) 相対動弾性係数

図一 2 に CIF 試験でのコンクリートの相対動弾性係数の変化を示す。35A1, 35A2, 55A の AE コンクリートでは、水セメント比、水中養生期間、乾燥温度によらず、全ての条件で相対動弾性係数の低下は認められなかった。一方、nonAE コンクリートでは、水セメント比 35% の場合は 60°C 乾燥で、水セメント比 55% の場合は 40°C 乾燥および 60°C 乾燥とした条件で、相対動弾性係数の低下が認められ、特に 55N では乾燥温度が



図一 2 相対動弾性係数の変化
(乾燥温度による比較)

高いほど相対動弾性係数の低下が著しくなった。

図-3に40℃乾燥したモルタル供試体の動弾性係数の変化を同じ条件のコンクリートと比較して示す。55Nのモルタルの40サイクル以降の相対動弾性係数の低下がやや大きいですが、モルタルとコンクリートの劣化挙動に大きな差は認められない。ひび割れ観察において、コンクリートでは粗骨材界面に比較的幅の広いひび割れが多く見られたが、相対動弾性係数の変化に及ぼす粗骨材界面のひび割れ影響は小さいといえる。

(2) 剥離量

図-4にCIF試験でのコンクリートの剥離量の変化を示す。水セメント比35%のコンクリートでは水中養生期間、乾燥温度によらず剥離量 $30\text{g}/\text{m}^2$ 以下の軽微なスケーリングであるのに対して、水セメント比55%の55Nでは20℃乾燥、40℃乾燥で約 $100\text{g}/\text{m}^2$ の剥離量となり、特に60℃乾燥で激しいスケーリングが見られた。また、55Aでは水中養生13週の条件で乾燥温度が高い場合に剥離量の増加が認められた。

図-5にCIF試験終了時の総剥離量を示す。剥離量の少ない水セメント比35%のコンクリートを含めた全ての供試体で乾燥温度が高い方が剥離量が多い傾向を示しており、55Nの60℃乾燥での剥離量が極めて多い。また、40℃乾燥したモルタル供試体の方がコンクリートよりも剥離量が多くなる傾向を示している。前述のように、顕微鏡で確認できる幅 $50\mu\text{m}$ 程度のひび割れ数にはモルタルとコンクリートで大きな差がないことから、マトリックス部分に生じる $50\mu\text{m}$ 以下のひび割れや細孔組織の変化が劣化に影響を及ぼしている可能性がある。

(3) 吸水率 (質量変化率)

図-6にCIF試験での吸水率の変化を示す。ここでの吸水率は、水中養生終了時の質量を基準とした値であり、CIF試験中の質量変化率を示すものである。水セメント比によらず、乾燥温度が高いほど試験開始時の吸水率は低いが、7日間の毛管吸引による吸水でほぼ平衡状態に達し、その後の凍結融解作用によるマイクロ氷レンズ

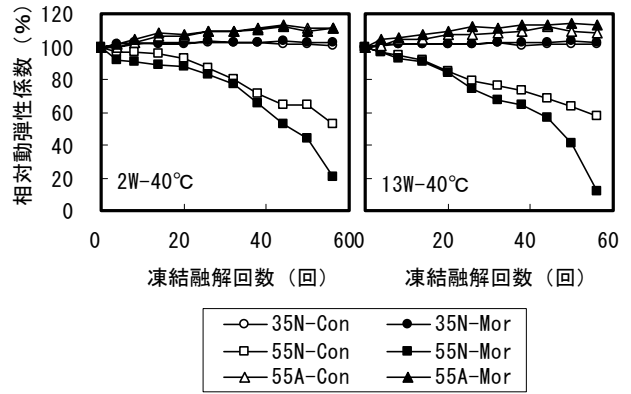


図-3 相対動弾性係数の変化
(モルタルとコンクリートの比較)

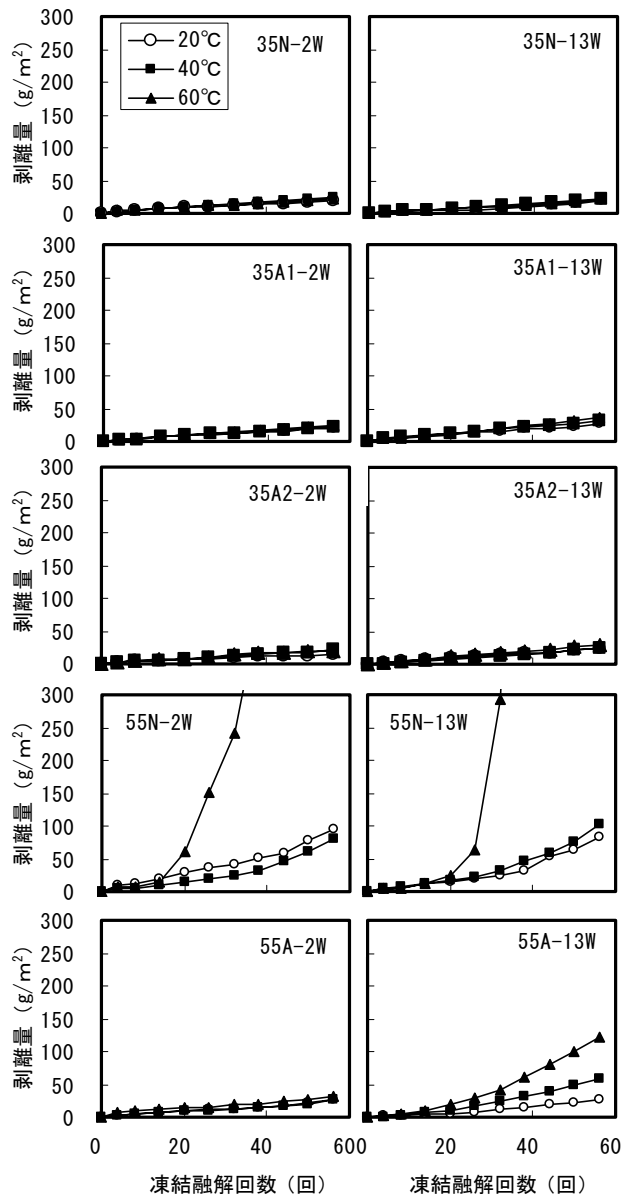


図-4 剥離量の変化
(乾燥温度による比較)

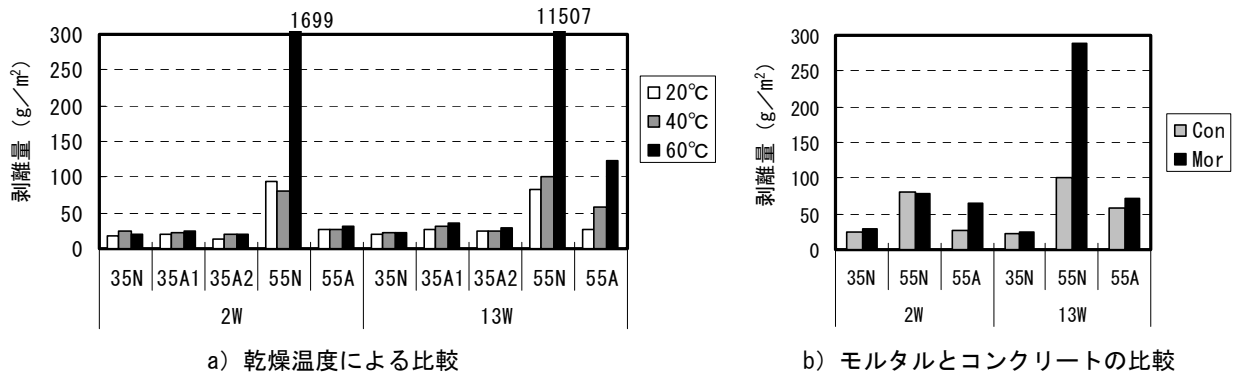


図-5 CIF試験における総剥離量

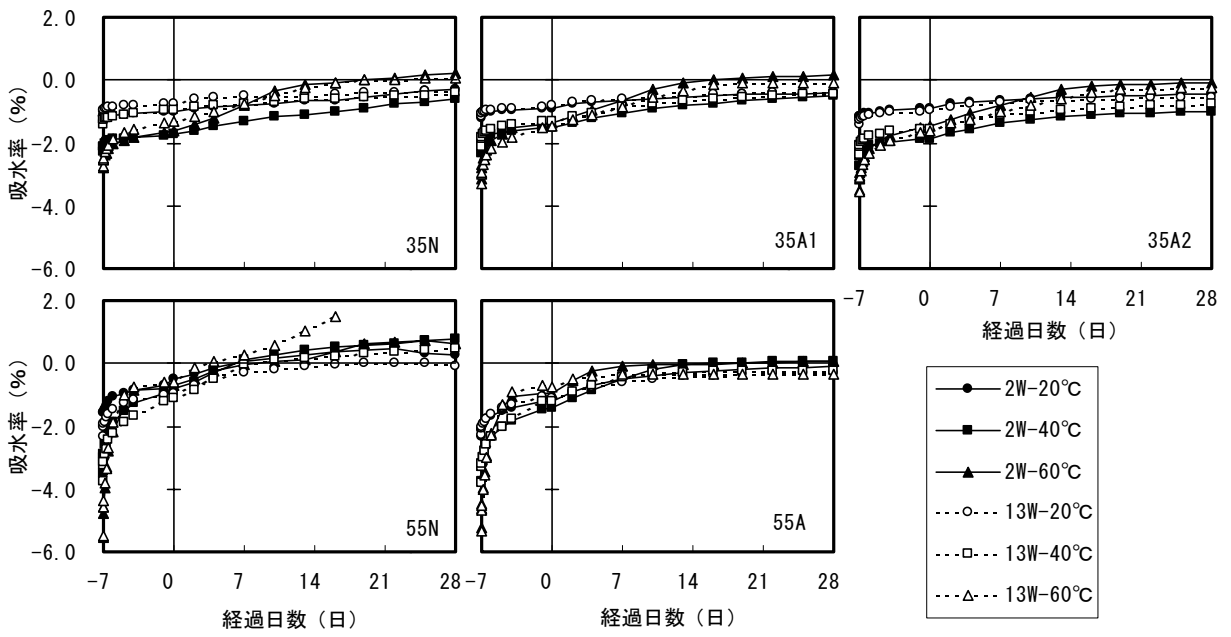


図-6 CIF試験における吸水率の経時変化

ポンプ効果⁵⁾による吸水によって最終的な吸水率が高くなる傾向が認められる。また、水セメント比 35%のコンクリートは、水セメント比 55%のコンクリートに比べて、乾燥による質量減少が少なく、20°Cおよび 40°Cの乾燥条件では凍結融解作用による吸水率の増加も少ない傾向にある。

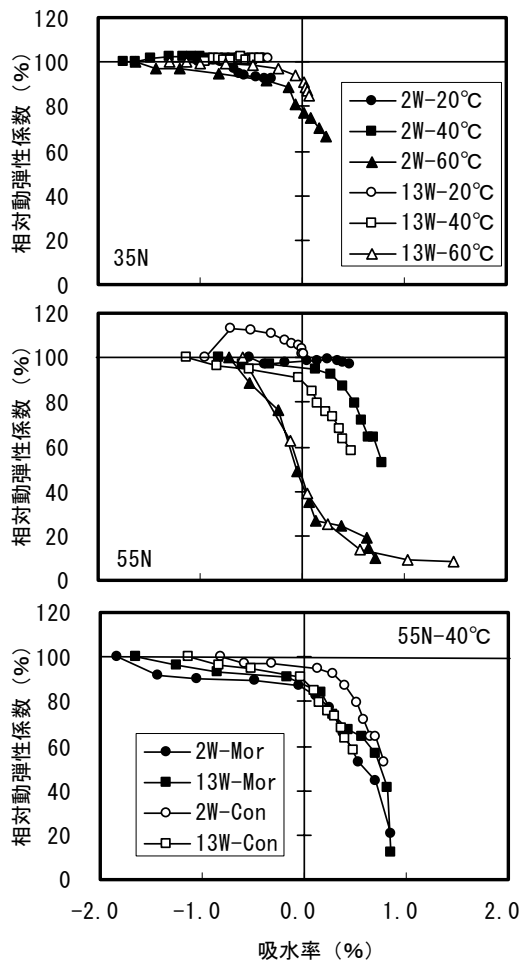
相対動弾性係数の低下を示した 35N の 60°C 乾燥、55N の 40°C および 60°C 乾燥の供試体では、CIF 試験の凍結融解過程で水中養生終了時の吸水率（基準値）を超えるまで吸水している。このことは、過度な乾燥によって発生する微細ひび割れの影響とも考えられるが、本研究の範囲では乾燥条件によるひび割れ発生度に大きな差が認められなかったことから、ここで観察され

たレベルのひび割れの数ではなく、ひび割れの幅、深さあるいはマトリックスの細孔構造の変化が影響している可能性がある。

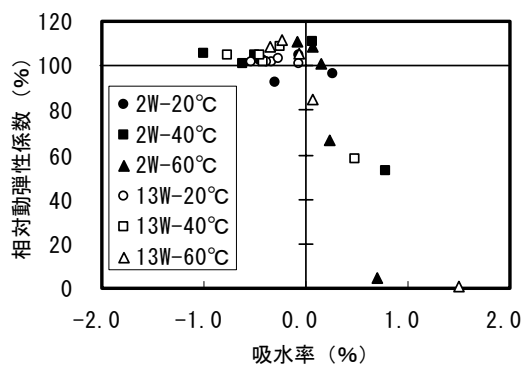
3.3 吸水性状と耐凍害性

図-7 に CIF 試験において劣化を示した 35N, 55N について、吸水率と相対動弾性係数の関係を示す。また、55N については 40°C 乾燥のモルタル供試体の結果との比較も示している。CIF 試験では相対動弾性係数が低下し始める吸水率を限界飽水度と見做すことができるが、その値は水中養生期間、乾燥温度によって異なっており、乾燥温度が高いほど小さく、モルタルの方がコンクリートよりも小さくなっている。

図-8 に CIF 試験終了時における吸水率と相対動弾性係数の関係を示す。試験終了時の吸水



図一七 CIF 試験における吸水率と
相対動弾性係数の関係



図一八 CIF 試験終了時の吸水率と
相対動弾性係数の関係

率が水中養生終了時の吸水率（基準値 0%）を境に相対動弾性係数の低下が見られ、吸水率が高いほど相対動弾性係数が低くなっている。図一七で得られた限界飽水度は水中養生終了時の吸水率（基準値 0%）以下であるが、劣化が進行することによって組織が緩み、吸水率がさらに増

加し、それがさらなる劣化を進行させることになる。

4. まとめ

- (1) ひび割れ発生度に調合、養生条件、乾燥温度、モルタルとコンクリートの差による明確な違いは認められなかった。
- (2) 乾燥によってコンクリートの粗骨材界面に生じる比較的幅の広いひび割れが凍害劣化に及ぼす影響は小さい。
- (3) 乾燥温度が高いほど限界飽水度は低くなり、耐凍害性が低下する。

謝辞

本実験を実施するにあたり、室蘭工業大学卒業生・佐藤光氏（現 三井住友建設（株））の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 浜ほか：高強度・高流動コンクリートの耐凍害性におよぼす凍結融解試験前の養生条件の影響，セメント・コンクリート論文集 No.56, pp.425-430, 2003.2
- 2) 浜，太田：フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004
- 3) RILEM Recommendation “CIF-Test — Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw test ; Reference Method and alternative Methods A&B”, Materials & Structure, 34, pp.515-525, 2001
- 4) 青野ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼすマイクロクラックの影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1117-1122, 2005
- 5) M.J.Setzer: Modeling and Testing the Freeze-Thaw Attack by Micro-Ice-Lens Model and CDF/CIF Test, Durability of High-Performance of Concrete, pp.17-28, 2004