

論文 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

青野 義道^{*1}・松下 文明^{*2}・柴田 純夫^{*3}・浜 幸雄^{*4}

要旨：乾湿繰り返しによって高強度コンクリートに生じる微細ひび割れが吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響を CIF 試験により検討した。乾湿繰り返しによって骨材界面及びマトリックス部分の微細なひび割れが増加し、さらに組織も粗くなることによって吸水が促進され、耐凍害性が著しく低下した。高温での乾燥は限界飽水度を低くし耐凍害性を低下させた。夏期は 50°C 程度の乾湿繰り返しを受ける可能性があり、HPC の場合でも良質な空気泡の連行が必要であることを示した。

キーワード：凍害, 高強度コンクリート, マイクロクラック, 細孔径分布, 空気泡

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い。著者らの最近の研究において, 通常の促進凍結融解試験で耐凍害性に優れていると評価されたコンクリートでも屋外暴露後に促進凍結融解試験を行うと耐凍害性が大きく低下するものがあり, 特に低水セメント比のハイパフォーマンスコンクリート (HPC) でこの傾向が著しいことが明らかとなった¹⁾。

経年したコンクリートの耐凍害性が低下する原因として, 現実の屋外の環境では乾湿繰り返し作用がコンクリートに微細なひび割れを発生させていることが考えられる。また, コンクリートの微細なひび割れは, ひび割れ自体が耐凍害性を低下させるのではなく, 水分浸透を容易にする役割をはたすことで, コンクリートの耐凍害性と密接にかかわっていると考えられる²⁾。したがって, 実環境下で生じる微細なひび割れと吸水性状および耐凍害性の関係を明らかにする必要がある。

凍結融解の繰り返しにおいては, 凍結過程の

水の押し込みと融解過程の水の吸い込みにより, 常温では吸水されない量の水がコンクリート中に供給される³⁾。これは, Setzer によって提案された熱力学的な考察に基づく micro-ice-lens pump 作用⁴⁾による効果と考えられ, コンクリートの耐凍害性を評価するには, 吸水性状の変化と耐凍害性の関係を併せて評価する必要があることを示唆するものと考えられる。

その関係を適切に評価できる新しい凍結融解試験として, CIF 試験が 2001 年に RILEM で提案されている⁵⁾。この試験は下面吸水条件での一面凍結融解を行うもので, 凍結融解の繰り返しによる凍害劣化とあわせて凍結融解条件下での吸水性状を測定することにより, 限界飽水度も把握することができる方法である。また, ASTM 法に比較して, 温度制御条件の精度が厳しく (CIF: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, ASTM: $\pm 2^{\circ}\text{C}$), より信頼性が高い方法でもある。

以上の背景から, 本研究では乾湿繰り返しによってコンクリートに生じる微細ひび割れが, 吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響を CIF 試験によって把握することとし, 細孔構造との関係についても検討した。

*1 住友金属鉱山シポレックス (株) 技術部 技術統括グループ (正会員)

*2 住友金属鉱山シポレックス (株) 技術部 三重分室 工博 (正会員)

*3 住友金属鉱山シポレックス (株) 技術部部長 工博

*4 室蘭工業大学 建設システム工学科助教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

供試体は既往の報告⁶⁾と同一であり、空気量、水セメント比を変えた4種類の調合に対し実験を行った。目標空気量1%の場合を non-AE (記号 N)、4%の場合を AE (記号 A) とした。普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm³)、細骨材は陸砂 (表乾密度 2.68 g/cm³, 吸水率 1.08%)、粗骨材は安山岩碎石 (表乾密度 2.69 g/cm³, 吸水率 2.54%) を用い、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤および空気量調整剤を用いた。表-1 にコンクリートの調合を、表-2 に基礎性状を示す。

供試体は 7.5×7.5×20cm の直方体とし、CIF 試験開始前の養生条件は、表-3 に示すように2週水中養生後に 20℃ 気中養生を3ヶ月行う条件 (I) と2週水中養生後に 50℃ (M) および 80℃ (S) で5日間の乾燥と 20℃ で2日間の水中浸漬を12サイクル行う条件の3条件とした。

CIF 試験は、供試体側面をシールした後、20℃、

65%RH の恒温恒湿室での7日間の下面吸水を経て、凍結融解を行うものである。図-1 に、下面吸水試験、図-2 に CIF 試験の概念図を示した。凍結融解の条件は最低温度 -20℃ (3時間保持)、最高温度 20℃ (1時間保持) とし、1日2サイクルで、56サイクルまで行った。測定項目は下面吸水時の質量変化と凍結融解時の質量変化・剥離量・たわみ振動法による1次共鳴振動数とした。

また、所定の養生を行った供試体でひび割れ観察と水銀圧入法による空隙構造の測定を行った。ひび割れの観察は、切断した供試体を研磨、超音波洗浄後、軽質芳香族炭化合物水素からなる染色浸透探傷剤を塗布し、倍率50倍としたマイクロスコープで、測線上を横切るひび割れ本数をカウントした。観察断面の代表性については、ASTM C 457 (リニアトラバース法) の骨材最大寸法による測線長と測定面積の考え方を準用した。水銀圧入法は、粗骨材を除いたモルタル部

表-1. コンクリートの調合

No.	W/C	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)	その他 (C×%)
				水	セメント	細骨材	粗骨材		
2N	0.25	1	39.3	175	700	623	968	1.3	0
2A	0.25	4	36.1	175	700	543	968	1.3	0.4*
5N	0.50	1	48.9	175	350	919	968	0.6	1.0**
5A	0.50	4	46.6	175	350	839	968	0.6	0.2**

SP : 高性能 AE 減水剤 * : AE 助剤 ** : 消泡剤

表-2. コンクリートの基礎性状

No.	実測空気量 (%)	気泡間隔係数* (μm)	スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	圧縮強度 (14日) (MPa)
2N	0.8	728	—	670×705	93.1
2A	4.1	323	—	770×730	87.7
5N	1.8	741	11.5	—	41.5
5A	3.1	373	19.2	—	68.5

* : ASTM C 457 リニアトラバース法

表-3. 養生条件

記号	養生条件	
	水中養生	乾燥および乾湿繰返し
I	20℃ 水中×2週間	[20℃ 乾燥] ×3ヶ月
M	20℃ 水中×2週間	[50℃ 乾燥×5日→20℃ 水中×2日] ×12サイクル
S	20℃ 水中×2週間	[80℃ 乾燥×5日→20℃ 水中×2日] ×12サイクル

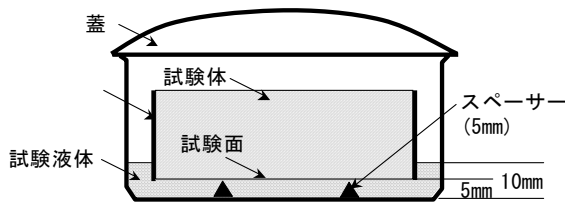


図-1. 下面吸水試験

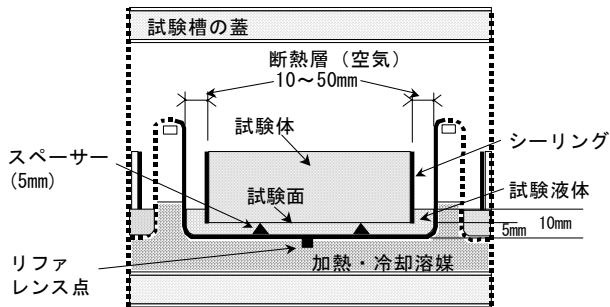


図-2. CIF試験

分をコンクリートカッターで5mm角に成型し、アセトンによる水和停止後、真空乾燥したものを試料とした。

3 実験結果及び考察

3.1 下面吸水での吸水率の経時変化

図-3に20°C、65%RHでの下面吸水での吸水率の経時変化(経過日数の平方根で表記)を示す。なお、ここでの吸水率は2週水中養生終了時の質量を基準とした値である。図-3から何れの供試体においても、基準の2週水中養生終了時の質量でほぼ飽和している。後述のように高温の乾湿繰り返しはひび割れの発生を増加させるが、このひび割れは供試体の吸水率を高める役割は持たないことが分かる。

3.2 CIF試験における吸水率の経時変化

図-4にCIF試験における吸水率の経時変化を示す。凍結融解開始後は吸水率の変化が図-5と異なり、基準の2週水中養生終了時の質量を超える場合がある。特に non-AE コンクリートで乾湿繰り返し養生の場合に、また乾燥温度が高いほど顕著である。特に 5N-I は、凍結融解開始後の吸水率の上昇が極めて大きい。凍結融解に伴う吸水率の上昇は、Setzer による micro-ice-lens pump 作用⁴⁾によるものと考えられる。これは、自由水の凍結温度以下の過冷却

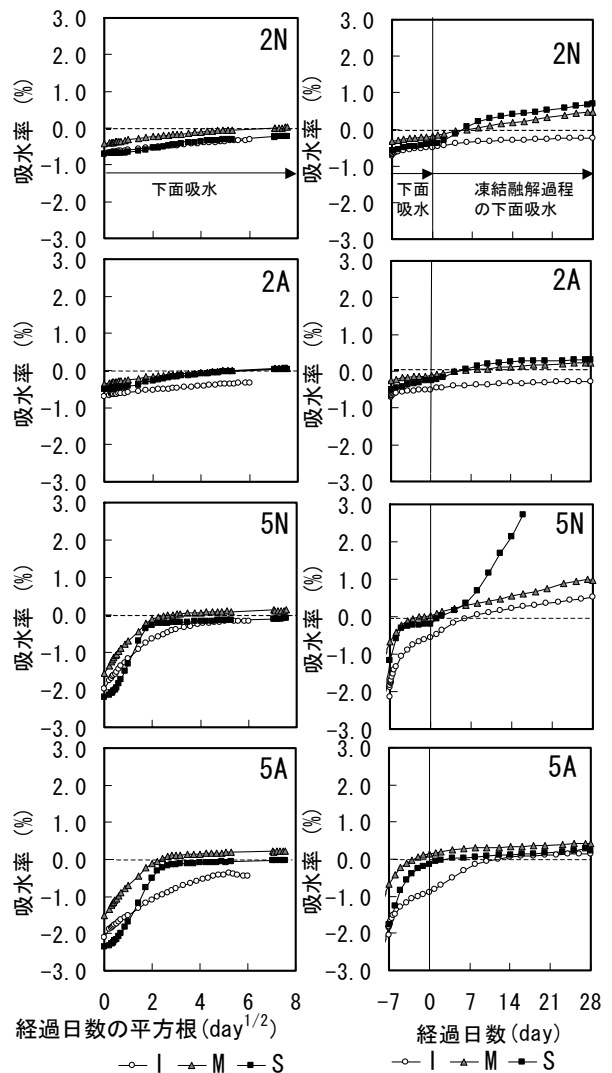


図-3. 下面吸水における吸水率経時変化
図-4. CIF試験における吸水率経時変化 (20°C, 60%RH)

状態にある細孔中の水、氷および水蒸気の共存状態を説明する表面熱力学から導かれる圧力差によって、細孔中の氷(micro-ice-lens)へ向かって未凍結水が移動する動的なプロセスを説明するものである。乾湿繰り返しにより生じたひび割れは、この micro-ice-lens 作用による吸水を促進するものと考えられる。

3.3 相対動弾性係数の経時変化

図-5に凍結融解作用による相対動弾性係数の変化を示す。乾湿繰り返しにおける乾燥温度が高いほど相対動弾性係数が早い段階から低下を始め、その低下量も大きくなり耐凍害性は低下する。一般的な non-AE の HPC に相当する 2N

では、20℃乾燥での条件では耐凍害性は低下しないが、高温の乾湿繰り返しを与えることで低下が著しくなる。これは、著者らの最近の研究結果¹⁾である暴露後の耐凍害性の低下と対応しているものと考えられる。

同一の供試体について ASTM C666 A 法にて評価した既往の結果⁶⁾との比較を表-4にまとめた。両試験方法において、それぞれの相対的な評価結果の傾向は一致するが、CIF に比較して ASTM による評価結果が厳しく判定される場合がある。ASTM 法では実際には劣化しない可能性の高いコンクリート (例えば 5A) をも劣化すると判定する可能性があり、CIF の方がより現実的な試験方法であると考えられる。一方で、ASTM はより安全側で判定される方法であるとも考えられる。

3.4 相対動弾性係数と吸水率の関係

図-6に相対動弾性係数と吸水率の関係を示す。吸水率がある値を超えた段階で相対動弾性係数の低下が見られ、吸水率の増加にともないさらに低下している。乾湿繰り返しにおける乾燥温度が高いほど、また non-AE でその傾向が著しい。高温の乾湿繰り返しにより、後述する図-8に示すようにコンクリート中にひび割れが発生し、吸水しやすくするとともに、non-AE であることにより凍結水によるひび割れの発生が加速されたものと考えられる。

なお、この相対動弾性係数が低下する吸水率が凍害劣化に対する限界飽水度を示しており、乾湿繰り返しは限界飽水度を低下させることが分かる。

3.4 スケーリングによる剥離量

図-7に CIF 試験でのスケーリングによる剥離量を示す。水セメント比が大きく、乾燥温度が高いほどスケーリングによる剥離量が多い。特に 5N-M, 5N-S では激しいスケーリングが見られた。HPC では相対動弾性係数が低下していてもスケーリングによる剥離量は少ない。

3.5 マイクロスコープによるひび割れ観察

図-8にマイクロスコープによるひび割れ観

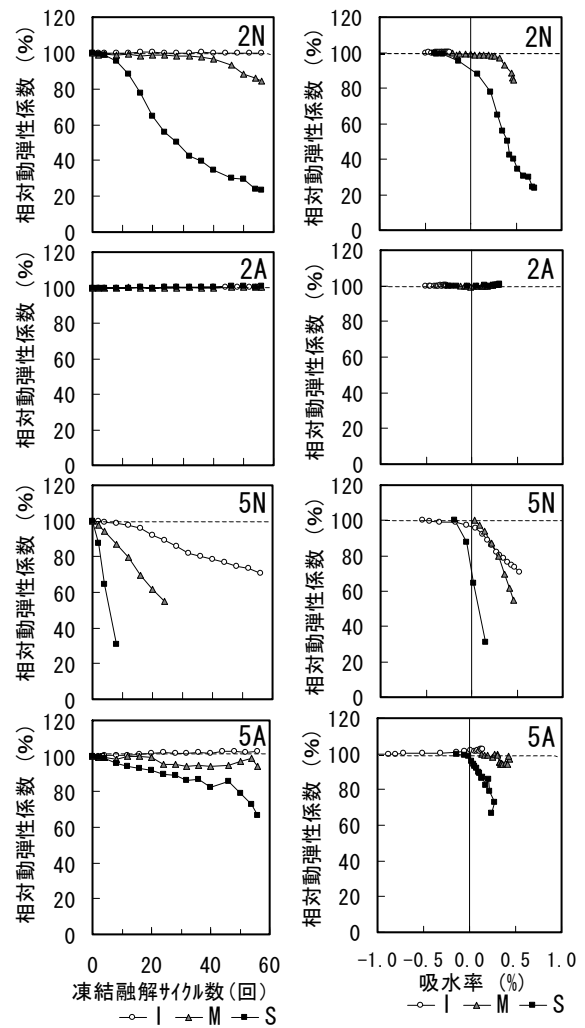


図-5. 相対動弾性係数の経時変化

図-6. 相対動弾性係数と吸水率の関係

表-4. CIF と ASTM⁶⁾の結果比較

	I		M		S	
	C	A	C	A	C	A
2N	○	○	△	×	×	×
2A	○	○	○	△	○	△
5N	×	×	×	×	×	×
5A	○	△	△	×	×	×

- ・ C: CIF (本研究), A: ASTM C666 A 法⁶⁾
- ・ 凍結融解繰り返し期間中の相対動弾性率が、
○: 低下なし
△: 軽微な (80%までの) 低下
×: 低下 (80%を下回る)
- ・ 網掛け部: 両者の結果に差があるもの

察の結果を示す。乾湿繰り返し養生によってひび割れ量が増加し、乾燥温度が高いほど増加している。ひび割れ量の増加は水セメント比 50% の場合に顕著である。代表的なひび割れの観察

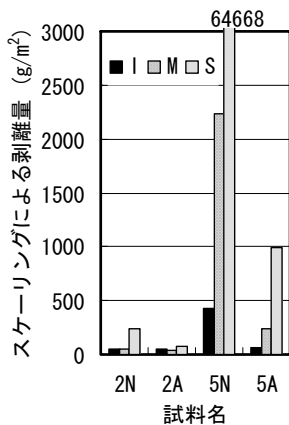


図-7. スケーリングによる剥離量

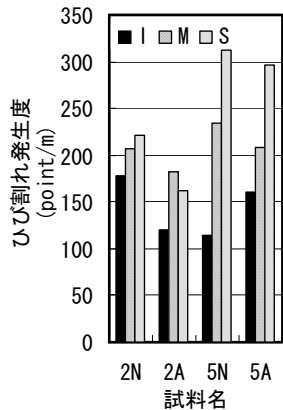


図-8. ひび割れ量の比較

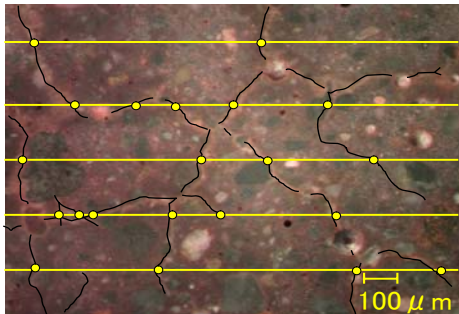


図-9. ひび割れの観察像

(クラックは、発生状態を分かりやすくするため黒線でトレースしてある。実線は測線、丸印はクラックの測定ポイントを示す。)

像を図-9に示した。骨材界面およびマトリックス部分に微細なひび割れが見られ、それらは気泡を繋ぐように連続している特徴がある。

3.6 細孔構造

図-10に水銀圧入法による細孔構造の測定結果を示す。高温での乾湿繰り返しを受けることにより、 $0.1\mu\text{m}$ 付近の細孔量が増加し、組織が粗くなっていることがわかる。特に、水セメント比50%の場合に顕著である。non-AEとAEでは、細孔量の変化に大差は認められない。

コンクリートの耐凍害性は、コンクリートを構成するセメントペーストの特定範囲の細孔構造が密接に関連することが知られており、鎌田らは、統計的な解析から、セメントペーストにおいては -18°C までの凍結温度で細孔半径 18nm ~ $1\mu\text{m}$ の範囲の細孔が多いほど耐凍害性が低下することを示し、また、コンクリート中の気

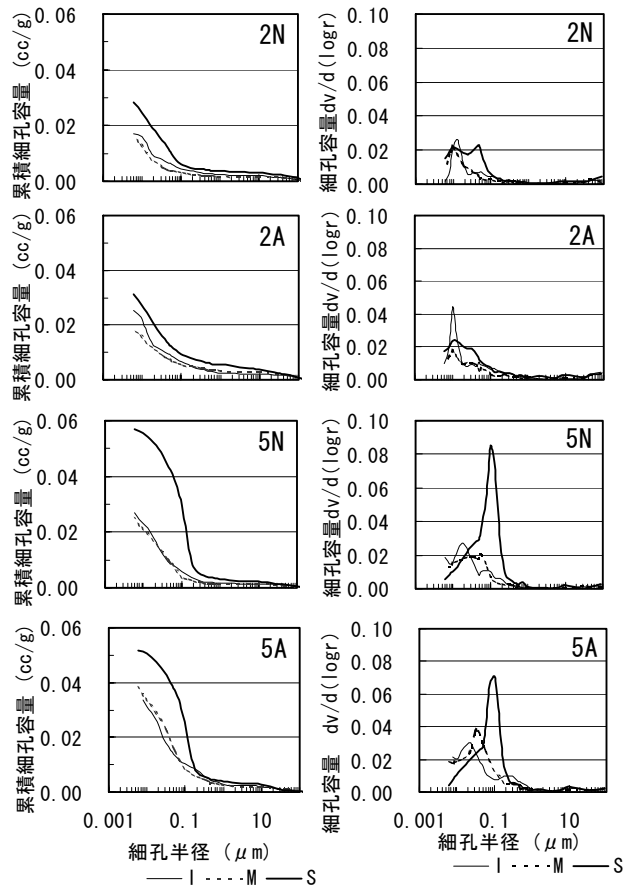


図-10. 水銀圧入法による細孔径分布

泡による耐凍害性への効果は、細孔構造の影響を上回ることを推察している⁷⁾。図-10で増加した細孔径 $0.1\mu\text{m}$ はこの範囲に含まれることから、高温での乾湿繰り返しによる耐凍害性の低下は、図-8で示したひび割れの増加のみならず、セメントペーストの細孔構造の変化も影響していることが推察される。一方、non-AEとAEで、乾湿繰り返しによる細孔量の変化に大差がないにも関わらず、耐凍害性に大きな違いが現れたのは、細孔径分布の影響よりも、気泡の効果が上回ることを示す。HPCにおいても、AEコンクリートとすることが耐凍害性を確保する上で重要であると考えられる。

乾湿繰り返しによる細孔構造の変化の原因については、今後ペースト系における試験により検討する必要がある。

4. まとめ

乾湿繰返しを与えたコンクリートを CIF 試験によって評価した結果, 以下のことが分かった。

- 1) 乾湿繰返しにより, コンクリート中に微細なひび割れが発生するが, このひび割れはコンクリートの吸水率を高める役割は持たない。
- 2) CIF 試験の過程では, 乾湿繰返しの乾燥温度が高いほどコンクリートの吸水率が高まる傾向を示した。ひび割れは, micro-ice-lens pump 作用による吸水を促進するものと考えられる。
- 3) CIF 試験による相対動弾性係数, および限界飽水度は, 乾湿繰返しの乾燥温度が高いほど低下が大きい。特に, non-AE でその傾向が著しい。
- 4) 同一試験体について, ASTM C666 A 法で評価した既往の結果は, CIF 試験の結果と相対的な傾向は一致したが, 前者が厳しく判定される傾向がある。
- 5) 乾湿繰返しにより, non-AE, AE とともに細孔径分布は粗くなる傾向を示したが, AE の耐凍害性の低下への影響は小さく, 気泡の効果が細孔径の影響を上回る。よって, HPC においても, AE とすることが耐凍害性の観点からより好ましい。

謝辞

本研究を実施するにあたり, 北海道大学大学院 千歩修教授, 同修論生 濱田英介氏 (現前田建設 (株)) に供試体をご提供頂いた。記して感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) Y.Hama, O.Senbu, F.Tomosawa: Effect of Curing Condition before Freezing and Thawing Test to Frost Resistance of High Performance Concrete, Proceedings of 6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete,

pp.1017-1025,2002

- 2) 田畑雅幸, 洪悦郎, 鎌田英治: コンクリートの凍害におけるひび割れの考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.366, pp.11-17, 1986
- 3) 浜幸雄, 千歩修, 友澤史紀: コンクリートの凍害劣化に及ぼす吸水・乾燥の影響の定量化, セメント・コンクリート, No675, pp40-45, May, 2003
- 4) M.J.Setzer: Modeling and Testing the Freeze-Thaw Attack by Micro-Ice-Lens Model and CDF/CIF Test, Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures, pp.17-28, 2004
- 5) RILEM Draft Recommendation (M.J. Setzer): CIF Test-Test method of Frost Resistance of Concrete. (Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw Test) , Reference method and alternative methods A and B, Materials and Structures, Vol.34, pp.515-525, 2001
- 6) 千歩修, 濱田英介, 友澤史紀: 乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp731-736, 2003
- 7) 鎌田英治, 千歩修, 田畑雅幸, 田中宏和: コンクリートの凍害におよぼす細孔構造の役割についての統計的解析, 日本建築学会構造系論文集, No487, pp1-9, 1996