

コンクリートの耐凍害性と凍結融解時の吸水性状に及ぼす乾燥の影響

正会員○ 濱田 英介^{*1} 同 千歩 修^{*2}
 同 友澤 史紀^{*3} 同 浜 幸雄^{*4}
 会員外 馬場 雄一郎^{*5}

1. はじめに

実構造物におけるコンクリートの凍害劣化は、コンクリートの材料、調合などの内的要因のほか、気温、水分の供給条件などの外的要因の影響を受ける。一般に、材料、調合に起因するコンクリート自体の耐凍害性は促進凍結融解試験により評価される。わが国ではASTM C666 A法に準じた凍結融解試験が広く用いられており、実際のコンクリート構造物の凍害劣化をこの試験結果をもとに予測、評価することが望まれている。しかし、この試験は元来コンクリートの耐凍害性の相対評価を目的としたものであり、耐用年数を推定するためのものではない。また、コンクリートの打設後から養生期間を通して常時水分が供給される条件で連続的に凍結融解を繰り返す促進試験の条件は、実構造物での多様な水分供給や乾燥の条件に対応したものではない。¹⁾また、夏期の軽微な乾燥がコンクリートの耐凍害性を向上されること²⁾、過度な乾燥によるひび割れが耐凍害性を低下させること³⁾が明らかとなっているが、それらの影響を定量的に評価する方法は未だ確立されていない。実構造物の凍害劣化を予測するためには、促進試験の結果を適正に評価するとともに、部材の吸水条件、コンクリートの飽水度、凍結融解による劣化過程での乾燥と養生などが凍害劣化に及ぼす影響について明らかにする必要がある。

本研究では、乾燥の行程を加えた水中凍結融解試験および限界飽水度試験によりコンクリートの耐凍害性に及ぼす乾燥の影響を把握し、CIF試験および下面吸水試験により凍結融解時の吸水性状に及ぼす乾燥の影響について検討した。

2. 実験概要

実験計画を表1に示す。使用したコンクリートは水セメント比35、55、65%の3水準とし、nonAEコンクリートを標準としたが、試験A、Bでは水セメント比55%について空気量3、5%のAEコンクリートを加えた。コンクリートの調合を表2に示す。

水中凍結融解試験は、7.5×7.5×40cmの角柱供試体を用い、ASTM C666 A法に準じた凍結融解(-18～5°C、1日6サイクル)を行った。試験開始材齢は4週水中養生および4週水中養生+2週乾燥(20°C、60%RH

表1 実験計画(試験内容)

試験項目		試験内容
A	水中凍結水中融解試験 (ASTM C666 A法)	①:標準条件(連続凍結融解試験) ②:60サイクル毎2週乾燥※ ③:60サイクル毎2週水中養生
B	限界飽水度試験 (RILEM CDC3-1993)	①:S _{CR} 決定のための凍結融解試験 ②:S _{CAP} 決定のための吸湿試験
C	CIF試験	下面吸水・凍結融解
D	凍結融解作用下における 下面吸水性状試験	①:下面吸水(N) ②:下面吸水・凍結 ③:封緘凍結・下面吸水融解(TA) ④:下面開放凍結・下面吸水融解(TB)

※1:12日間気中・2日水中とする。

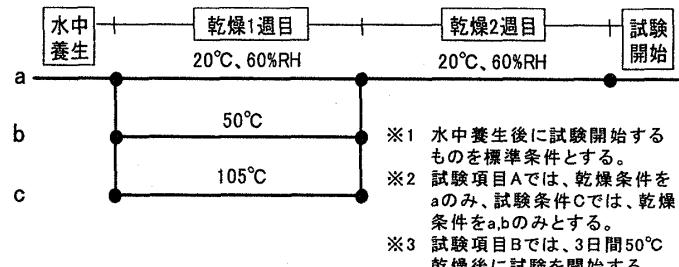


図1 試験開始前の乾燥条件

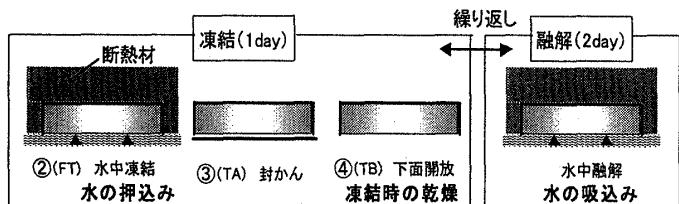


図2 試験項目Dにおける凍結融解時の吸水条件

表3 コンクリートの調合表

試験項目	W/C (%)	目標AIR	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対質量(kg/m ³)			AE剤量(%)	
					セメント	細骨材	粗骨材	AE剤*	高性能AE減水剤
A	35	1	46.1	175	500	803	941	0.01	0.85
	55	1	48.8	190	345	893	941	—	—
	55	3	49.1	175	318	903	941	0.0015	—
	55	5	47.5	175	318	850	941	0.0035	—
B	65	1	50.0	190	292	938	941	—	—
	35	1	46.7	175	500	820	941	0.01	0.85
	55	1	49.4	190	345	910	941	—	—
	65	1	50.6	190	292	955	941	—	—
※:W/C=35%のコンクリートは消泡剤を使用。									

※:W/C=35%のコンクリートは消泡剤を使用。

Effect of Drying Proceder on Frost Resistance and Water Absorption during Freezing-Thawing of Concrete

HAMADA Eisuke et al.

で12日、水中浸漬2日)の2水準とし、連続凍結融解を標準とし、凍結融解60サイクルごとに2週間の乾燥または水中養生を行う条件を加えた。

限界飽水度試験はRILEM CDC3に基づき、4週水中養生した円柱供試体を50°C乾燥後、真空吸水し、その後飽水度を15段階に調節した供試体を用いて封緘状態で6サイクルの気中凍結融解(-18~5°C、1日2サイクル)を行い限界飽水度(Scr)を定めるとともに、 $\phi 10 \times 25\text{mm}$ の供試体により14日間の吸湿試験を行い吸湿特性(Scap)を測定した。

CIF試験はRILEM試案に準じて、6週間の前養生後、7日間の下面吸水を行い、その後1日2サイクルの一面凍結融解(-20~20°C)を56サイクル行った。ただし、前養生の条件を4週水中養生+2週乾燥(20°C, 60%RH)と4週水中養生+1週50°C乾燥+1週乾燥(20°C, 60%RH)の2種類とし、質量変化と動弾性係数を測定した。

凍結融解時の下面吸水性状試験は、 $\phi 10 \times 25\text{mm}$ の供試体を用い、14日間の20°Cでの下面吸水後に図1に示す3条件での凍結融解作用下による吸水試験を行った。また、比較用として20°Cでの下面吸水を32日間継続する条件も加えた。なお、試験開始前の養生条件は4条件とし、4週水中養生に加えて図2に示す3条件の乾燥を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 乾燥の行程を加えた水中凍結融解試験の結果について

水中凍結融解試験における相対動弾性係数の変化を図3に示す。凍結融解試験開始前の乾燥、凍結融解過程の乾燥のいずれにおいても、その後の相対動弾性係数の低下は小さく、耐凍害性が向上している。これは、乾燥により水を含まない細孔空隙ができ、凍害を引き起こす水圧が緩和されるためと考えられる。また、凍結融解過程の水中養生においても耐凍害性が改善している。しかし、劣化が顕在化しているnonAEコンクリートではそれまでの劣化がある程度回復されるものの、その後の劣化は標準条件の場合と同程度であり、凍結融解過程における水中養生は、本質的な改善にはなってはいない。乾燥の方が、相対動弾性係数の低下を緩慢にする効果が高いことから、凍結融解が繰り返される行程では、主にコンクリートが劣化するのに必要な水を押し込む作用が働いていると考えられる。

(2) 限界飽水度試験の結果について

限界飽水度を図4に示す。水セメント比が大きいほど、また空気量が多いほど限界飽水度(Scr)は小さくなっている。水セメント比が小さいコンクリートは、内部の細孔径が小さく、凍結時の不凍水量の割合が大きいためと考えられる。

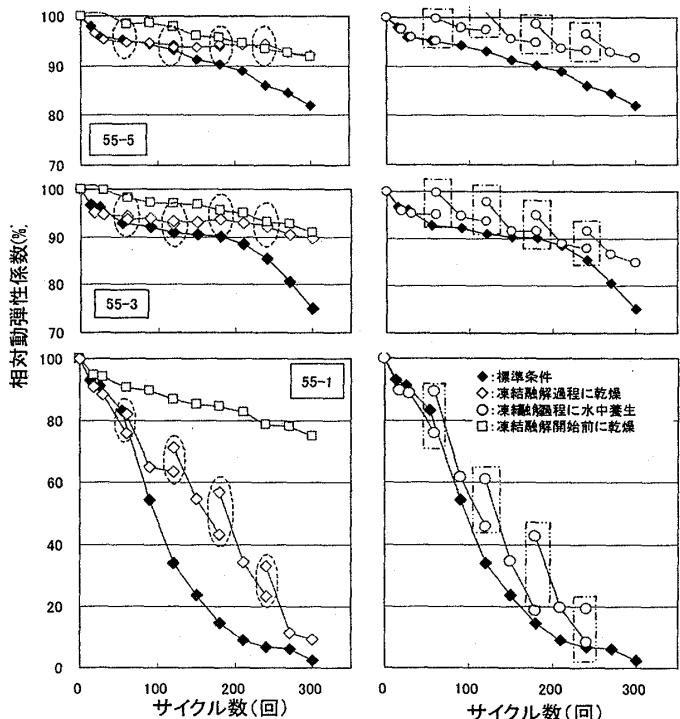


図3 水中凍結融解試験における相対動弾性係数の変化

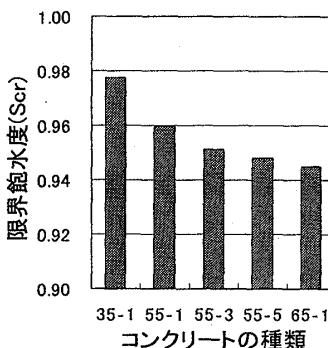


図4 限界飽水度

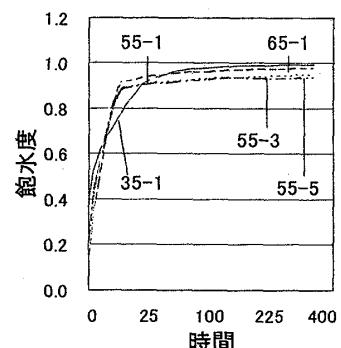


図5 吸水時間と飽水度の関係

吸水時間と飽水度の関係を図5に示す。Nick Pointまでの吸水勾配は細孔構造に依存しており、低水セメント比の35%の場合に、勾配が緩慢となっているが、他のコンクリートではほぼ同じである。また、平衡状態となったあとの飽水度はコンクリートによる差が小さいが、水セメント比が小さいほど、空気量が多いほど、飽水度が小さい結果となった。

(3) 水中凍結融解試験と限界飽水度試験の耐凍害性評価の比較

限界飽水度試験による耐凍害性の評価は、限界飽水度(Scr)と吸水特性(Scap)の差F(=Scr-Scap)として表され、F=0以下で凍害を受けると評価する。そのようにして得られた限界飽水度法による耐凍害性とASTM法による耐凍害性の関係を図6に示す。全体的には限界飽水度法による耐凍害性の高いコンクリートは、ASTM法においても高い傾向が認められ、両者は対応している。しかし、水セメント比35%のコンクリートはASTM法に

において耐凍害性が最も高い評価にも関わらず、限界飽水度試験では耐凍害性に劣るものとして評価される結果となった。この理由は、限界飽水度試験の行程にある50°Cの乾燥が、コンクリートに微細なひび割れを発生させ、コンクリートの細孔構造に影響を及ぼしたためと考えられる。この50°Cの乾燥は、自然環境下では夏期にありえる状況であり、自然環境下のコンクリートでも低水セメント比のコンクリートの耐凍害性が低くなっている可能性がある。屋外暴露後の供試体は、その後の水中凍結融解試験において脆弱な結果となるとの報告⁴⁾もあり、通常の水中養生後に試験を開始するASTM規格に準拠した水中凍結融解試験は、低水セメント比のコンクリートの耐凍害性を過大評価してしまう可能性がある。

乾燥によって生じたコンクリートの微細なひび割れは、局部的に水の浸透の容易な部分を形成することになり、凍結融解時の吸水性状にも影響を及ぼしていると考えられる。

(4) コンクリートの凍結融解時の吸水量と相対動弾性係数の変化

凍結融解時の吸水性状と凍害劣化を同時に考慮できるCIF試験を行った。乾燥を受けたコンクリートの吸水量の変化を図7に、相対動弾性係数の変化を図8に示す。50°Cの乾燥を受けたコンクリートは、20°Cの乾燥を受けたものと比べて、凍結融解時の吸水量が大きくなっている。それに伴なって、相対動弾性係数も50°Cの乾燥を受けたコンクリートの劣化が激しくなっている。この事から、凍結融解時の吸水量が多いものほど、凍害劣化が大きいことがわかる。

(5) コンクリートの下面吸水性状について

乾燥条件が異なるコンクリートを用いて、凍結融解前後における吸水性状試験を行った。乾燥をうけたコンクリートの下面吸水性状を図8に、また、NickPointまでをI、平衡状態をIIとした下面吸水における吸水速度を表3示す。水セメント比によらず、乾燥温度を50°C、105°Cとすることで、NickPointまでの時間が短くなっている。このことは、I区間の吸水速度から定量的にみることができ、水セメント比が大きいほど、乾燥温度が高いほど吸水速度が大きくなっている。これは、乾燥によってコンクリートに微細なひび割れが発生し、コンクリートが吸水しやすくなつたためと考えられる。水セメント比35%のコンクリートでは、乾燥温度20°Cの時の吸水速度は非常に小さいが、乾燥温度が高くなると10倍近く吸水速度が大きくなっている。他のコンクリートの吸水速度の増加が3~4倍であることから、低水セメント比35%のコンクリートは、普通コンクリートよりも乾燥の影響を受けやすいことがわかる。また、II区間の吸水速度は非常に小さ

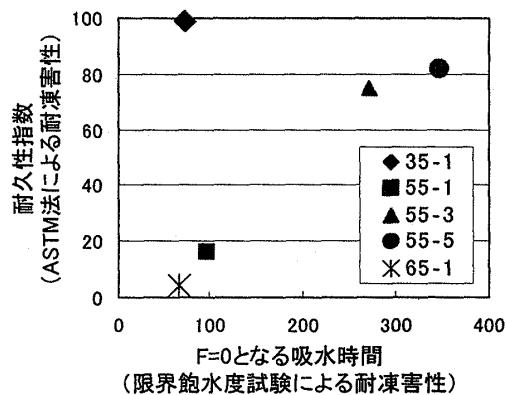


図6 ASTM法と限界飽水度法の耐凍害性評価の比較

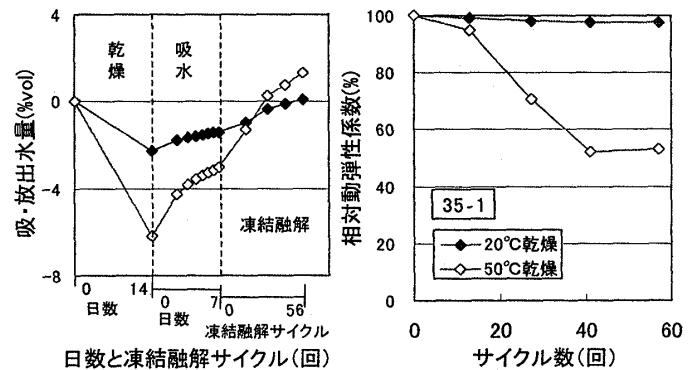


図7 CIF法によるコンクリートの吸・放出水量の変化

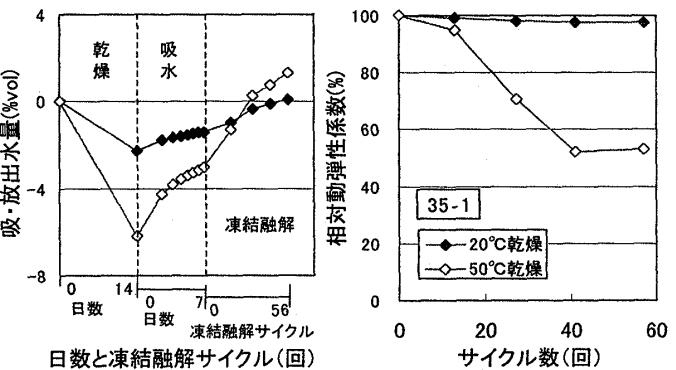


図8 CIF試験による相対動弾性係数の変化

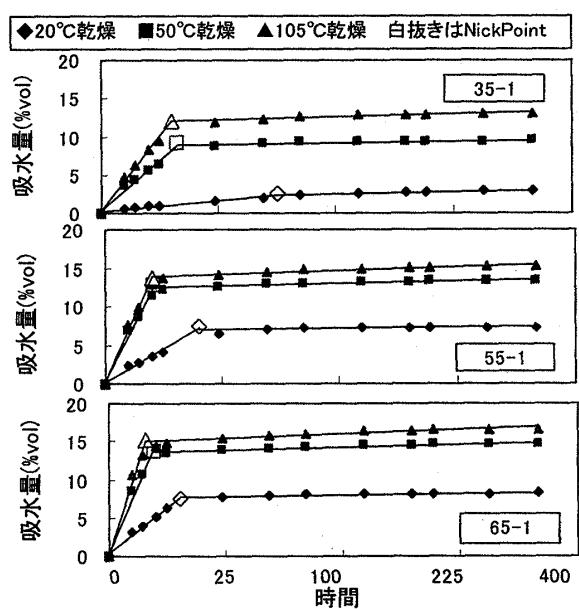


図9 コンクリートの吸水時間と吸水量の関係

表3 下面吸水における吸水速度

W/C	35		55		65	
	I	II	I	II	I	II
4週水中養生	-	0.01	-	0.01	-	0.02
20°C乾燥	0.29	0.04	1.78	0.02	2.39	0.03
50°C乾燥	2.66	0.02	5.83	0.04	7.16	0.05
105°C乾燥	3.89	0.05	6.56	0.05	9.64	0.06

単位: vol%/√時間

な値であるが、水セメント比が大きいほど、乾燥温度が高いほど大きい傾向がある。しかし、乾燥温度20°Cの水セメント比35%のコンクリートでは吸水速度が大きい。これは、コンクリートの緻密さが保たれているため、I区間での吸水量が少なく、平衡状態においても徐々に吸水していくためと考えられる。

コンクリートの凍結融解時の吸水量を図10に示す。全ての吸水条件において凍結融解作用を受けることで、標準条件のコンクリートよりも吸水量が大きくなっている。乾燥温度が高いものほどその差は大きくなっている。凍結時に乾燥させたコンクリートは、凍結時に多くの水が放出される。結果として、凍結融解作用で増加する吸水量は少なくなった。

凍結融解作用1回当たりの吸水量を図11に示す。水セメント比の大きいコンクリートは、凍結融解時の吸水量が大きい。しかし、乾燥温度が高くなると、低水セメント比のコンクリートも凍結融解時の吸水量が大きくなっている。乾燥を行った条件では、水セメント比による吸水量の違いが小さくなることから、低水セメント比のコンクリートは、乾燥の影響を受けやすいことがわかる。また、凍結時の水の押込み量は乾燥温度の違いによる明確な傾向はみられないが、融解時に水を吸い込む量は、乾燥温度が高くなるほど大きくなっている。これらの乾燥温度による吸水性状の違いは、コンクリート内部の微細なひび割れに起因すると考えられ、コンクリート構造物の耐用年数を予測するためには、自然環境下に合わせた実験室での乾燥条件を用いる必要がある。

4. まとめ

凍結融解が繰り返される行程では、主にコンクリートが劣化するのに必要な水を押し込む作用が働いていると考えられ、乾燥によってコンクリート中の水分を取り除くことによって、耐凍害性が改善される。しかし、限界飽水度試験と水中凍結融解試験の耐凍害性評価にも現れたように、乾燥温度が高くなると、コンクリートの耐凍害性が損なわれてしまう。その理由として、乾燥によって生じる微細なひび割れが影響していると考えられ、ひび割れは局部的な吸水性状を変化させている。凍結融解時の吸水量が大きいものほど、凍結融解による劣化が激しい結果となり、その吸水性状は、低水セメント比のコンクリートで影響が大きくなる。水中養生後に試験を開始するASTM規格に準じた凍結融解試験では、実構造物コンクリートの耐凍害性を過大評価する可能性がある。

*1 北海道大学大学院修士課程

*3 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

*5 旭川市役所

*2 北海道大学大学院工学研究科 助教授・工博

*4 室蘭工業大学 助教授・工博

図10 凍結融解時の吸水量の変化

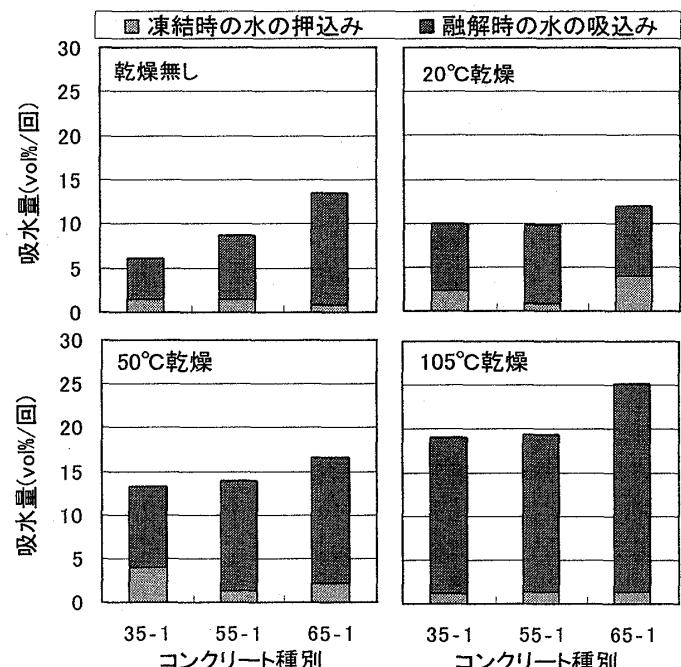


図11 凍結融解1サイクル当たりの吸水量

<参考文献>

- 日本コンクリート工学協会：自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム、1993
- 韓ら：自然環境下でも乾燥の影響を考慮したコンクリートの耐凍害性実験、日本建築学会学術講演概要集（北海道）、pp. 1113-1114、1995
- 田畠：コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究、北海道大学学位論文、1986
- 藤田：7～12年間屋外暴露した高性能コンクリートの耐凍害性に関する研究、北海道大学卒業論文、2001