

論文 養生・放置条件が低水セメント比コンクリートの耐凍害性におよぼす影響

千歩 修^{*1}・濱田 英介^{*2}・友澤 史紀^{*3}

要旨：本論文は，低水セメント比のコンクリートについて初期養生およびその後の放置条件を変えて凍結融解試験を行ったものである。初期養生条件は水中養生および封緘養生であり，放置条件は（放置なし），室内放置および屋外暴露であり，自己収縮，乾燥収縮等を想定したものである。また，粗骨材種別・量等のコンクリートの収縮に関連する要因も検討した。この結果，低水セメント比の nonAE コンクリートでは，水中養生後の凍結融解試験で耐凍害性がよいものでも，材料・調合および養生・放置条件によって耐凍害性が低下するものがあること，空気量の確保がこれらの耐凍害性の向上に有効なことが明らかになった。

キーワード：コンクリート，耐凍害性，封緘養生，室内放置，屋外暴露

1. はじめに

標準的な凍結融解試験で耐凍害性が高いと評価されたコンクリートでも，数年間の屋外暴露後に凍結融解試験を行うと耐凍害性が低下するものがあり，特に低水セメント比コンクリートでこの傾向が著しいことが報告¹⁾されている。この原因のひとつとして屋外暴露を行うことによってコンクリート中に微細なひびわれが発生していることが考えられる。

ここでは，実環境におけるコンクリートに対する微細なひびわれの発生要因として自己収縮，乾燥収縮および乾湿繰り返しを想定し，これらに対応した養生およびその後の放置を行い，これらの条件と耐凍害性の関係を検討する。

2. 実験の概要

実験計画を表1に示す。コンクリートの水セメント比は，自己収縮が大きくなるように25%と

表1 実験計画

コンクリート種別					凍結融解試験		
W/C (%)	目標空気量	粗骨材		記号	前の養生・放置条件		
		種類	容積比		初期	放置条件	
25	1	T	0.36	2NP	封緘養生 [S]	なし	
			0.30	2NQ			
		O	0.36	2NO			
	4	T	0.36	2AP		水中養生 [W]	屋内放置 (6カ月) [D]
			0.30	2AQ			
		O	0.36	2AO			
50	1	T	0.36	5NP	屋外曝露 (1年) [E]		
	4		0.36	5AP			

注) 試験体記号=コンクリート種別+初期養生+放置条件
ex. 2NP-SE (2NPで封緘養生後、屋外暴露したもの)

セメント: 普ボ、細骨材: 表乾密度(ρ_s)=2.68(g/cm³)、吸水率(q)=1.08(%)
粗骨材O: $\rho_s=2.64, q=0.66$ 、粗骨材T: $\rho_s=2.62, q=2.54$

コンクリート種別の記号

2 or 5 : W/C=25 or 50(%)

N or A : 目標空気量 1% or 4%

P or Q : 粗骨材T(Qは粗骨材容積比小) O : 粗骨材O

*1 北海道大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

*2 前田建設工業(株) 関東支店 工修 (正会員)

*3 日本大学 理工学部 建築学科教授 工博 (正会員)

し、比較に50%を加えた。また、収縮時の骨材の拘束によるひびわれ発生状況が異なるように、2種類の粗骨材(T:安山岩碎石, O:硬質砂岩碎石)を使用し、さらにその量(容積)を少なくしたものも加えた。なお、コンクリートの目標空気量は1%および4%とし、試験体は、水中養生または封緘養生(自己収縮を想定)の2種類の2週初期養生後、およびこれらの初期養生後に屋内放置6カ月後または屋外暴露1年後の計6条件の養生・放置を行い、これらの試験体に対して水中凍結水中融解試験(ASTM C666 A法)を行った。

コンクリートの調合および基礎性状を表2に示す。各コンクリートおよびウエットスクリーニングしたモルタルについて低弾性埋め込みゲージによる自己収縮の測定(図1)²⁾および圧縮強度・ヤング係数の測定を行った。また、コンクリートおよびウエットスクリーニングしたモルタルのヤング係数および調合表の値から弾性係数の複合則(Hashin-Hansen式)を用い、粗骨材のヤング係数を推定した。また、一粒の粗骨材表面を平滑に研磨し、この面に防水型ひずみゲージを貼り付けたものを作製し、この骨材を吸水状態から20~60%RHで乾燥させ、このひずみ差を骨材自体の乾燥収縮率³⁾とした。なお、自己収縮測定用および凍結融解試験用の型枠については、自己収縮が型枠との付着で拘束されないように型枠内面にテフロンシートの貼付等を行い、付着等が収縮を拘束しないように考慮した。

3. 結果および考察

図2および図3に粗骨材の吸水率と粗骨材自

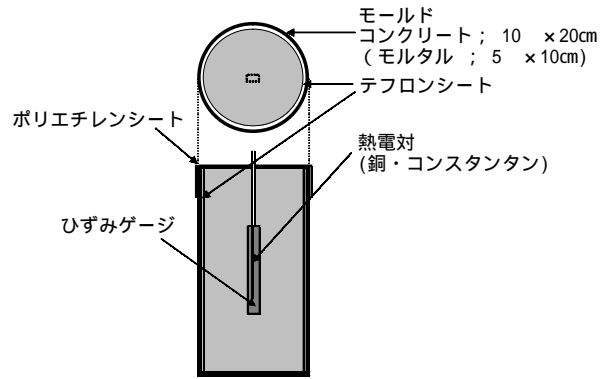


図1 自己収縮の測定方法

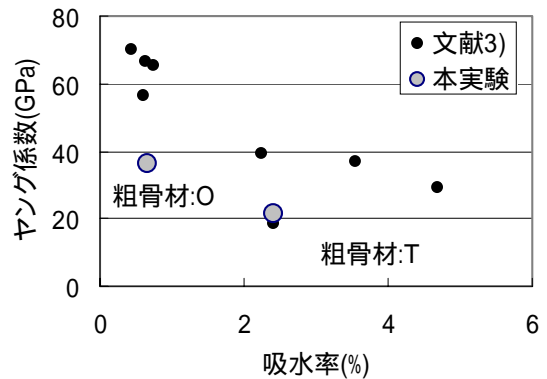


図2 粗骨材の吸水率とヤング係数の関係

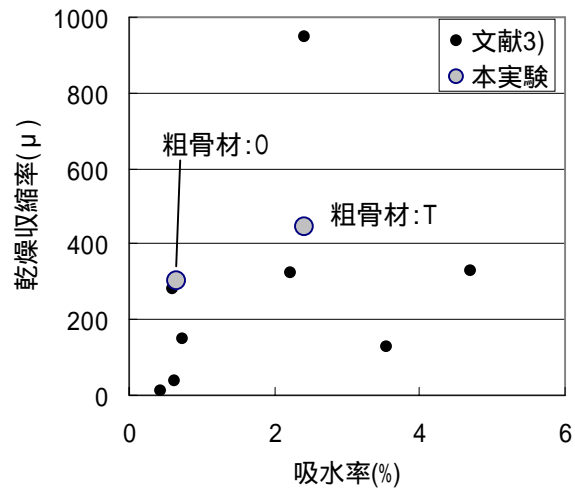


図3 粗骨材の吸水率と乾燥収縮率の関係

表2 コンクリートの調合および基礎性状

W/C (%)	目標 AIR (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			混和剤量 (kg/m ³)		実測空気量 (%)	スランプ (cm)	フロー (mm)	14日圧縮強度 (MPa)	
				セメント	細骨材	粗骨材	SP8S	AE助剤				コンクリート	モルタル
25	1	39.3	175	222	233	360	9.1	-	1.1	24.0	565 × 580	86.1	91.6
		49.5	175	222	293	300	9.1	-	1.6	24.0	495 × 475	83.4	92.4
		39.3	175	222	233	360	9.1	-	0.9	25以上	790 × 580	84.4	89.8
	4	36.1	175	222	203	360	7.7	0.056	4.2	22.5	400 × 365	73.4	67.5
		46.8	175	222	263	300	7.7	0.042	4.6	21.0	475 × 315	69.3	74.6
		36.1	175	222	203	360	7.7	0.056	4.8	25以上	500 × 365	66.4	71.5
50	1	48.9	175	111	344	360	2.1	-	1.7	12.0	-	41.8	47.2
	4	46.6	175	111	314	360	1.6	0.012	4.6	19.0	-	29.2	30.0

体のヤング係数・乾燥収縮率の関係を示す。なお、これらの図には同様の方法で求めた他の骨材のデータ³⁾を合わせて示す。これらの図から吸水率の小さな良質の骨材ほどヤング係数が大きく、乾燥収縮率が小さい傾向があることがわかる。また、今回の粗骨材では、Oの方が良質な骨材であることがわかる。

ウエットスクリーニングモルタルの自己収縮測定結果の一例を図4に示す。今回のデータでは、ばらつきの小さいもの・大きいものが認められたが、この原因は不明であった。ここでは、平均値を各コンクリート・モルタルの自己収縮ひずみとすることとした。

図5に各モルタル・コンクリートの自己収縮ひずみを示す。この図から水セメント比25%のものの自己収縮が大きく、モルタルに比べてコンクリートの自己収縮が小さく、nonAEに比べてAEの自己収縮が小さいことがわかる。なお、粗骨材の影響については、粗骨材容積の少ないもの(2NQ, 2AQ)のほうが自己収縮が小さくなっており、粗骨材種類(2NPと2NOまたは2APと2AO)の影響は小さくなっている。これらについては想定したものと異なる結果となっている。

図6に室内放置を行った試験体のコンクリートの性状の変化を示す。6カ月の室内放置によって大きく乾燥収縮が進んでいることがわかる。なお、屋外暴露の試験体については屋外暴露終了時の試験体が比較的湿潤状態であり、途中の測定を行っていないため、乾湿繰返しの程度等をとらえることはできなかった。

表3に凍結融解試験前の収縮量として封緘養生

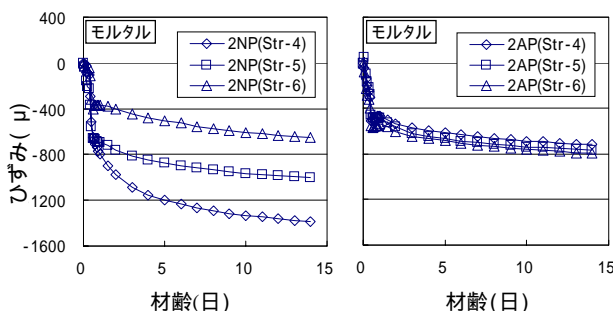


図4 自己収縮ひずみ測定結果

生14日後の自己収縮、および室内放置6カ月後の収縮量をに示す。また、ウエットスクリーニングモルタルとコンクリートの自己収縮の差を粗骨材の拘束によるものととらえ、この値を粗骨

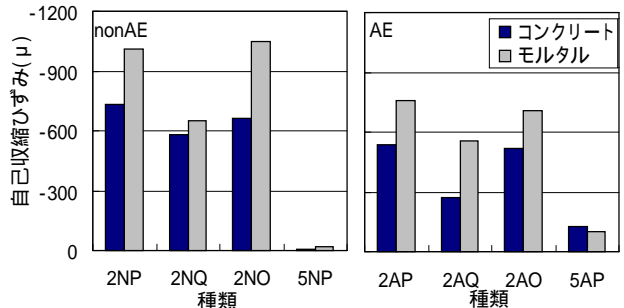


図5 自己収縮ひずみ測定結果

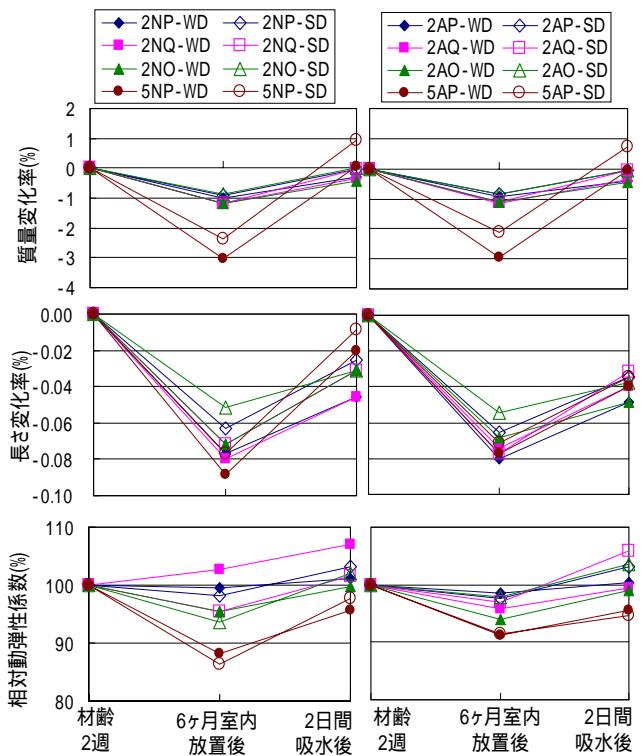


図6 室内放置によるコンクリート性状の変化

表3 凍結融解前の収縮量

記号	自己収縮 (μ)			室内放置6M後の収縮量 (μ)	
	コンクリート (A)	モルタル (B)	粗骨材の拘束力 (A - B)	水中養生 (W)	封緘養生 (S)
2NP	-736	-1013	277	771	629
2NQ	-584	-648	64	800	714
2NO	-663	-1046	383	686	514
2AP	-535	-761	226	800	657
2AQ	-274	-553	279	743	771
2AO	-516	-706	190	686	543
5NP	-4	-17	13	886	771
5AP	-127	-104	-23	771	714

材の拘束度とし、この表中に合わせて示す。なお、水中養生後に室内放置を行ったものの収縮量は、標準的な乾燥収縮試験(20 60%RH, 6カ月)に近い値になっているものと思われる。

図7にnonAEコンクリートの場合の凍結融解試験結果を示す。W/C50%の試験体では、どの条件でも早期に劣化が生じている。W/C25%では、初期養生後に凍結融解試験を行ったものをみると、封緘養生の試験体に劣化が生じているものが認められ、自己収縮の影響が考えられる。しかしながら、これらの試験体は同条件の試験体のうちの1体である。このため、劣化の発生は試験体作製時等に生じた内部の欠陥の有無によることも考えられる。

屋内放置後に凍結融解試験を行ったものでは、W/C25%でも初期養生条件によらずに早期に劣化する試験体がある。これらは粗骨材:Oを用いたものであり、粗骨材:Oは前述のように、粗骨材:Tに比べて良質な骨材(乾燥収縮が小さく、ヤング係数の大きい骨材)であるため、乾燥収縮を受ける場合には収縮の拘束が大きくなり、コンクリート内部にひびわれが多く発生しているものと思われる。

屋外暴露後に凍結融解試験を行ったものでは、試験体種別によって多少の差はあるものの、低水セメント比のものであっても、すべてのnonAEコンクリートが大きく劣化しており、屋外劣化によってコンクリートの性状が大きく変化しているといえ、内部に微細なひびわれが発生していることが考えられる。

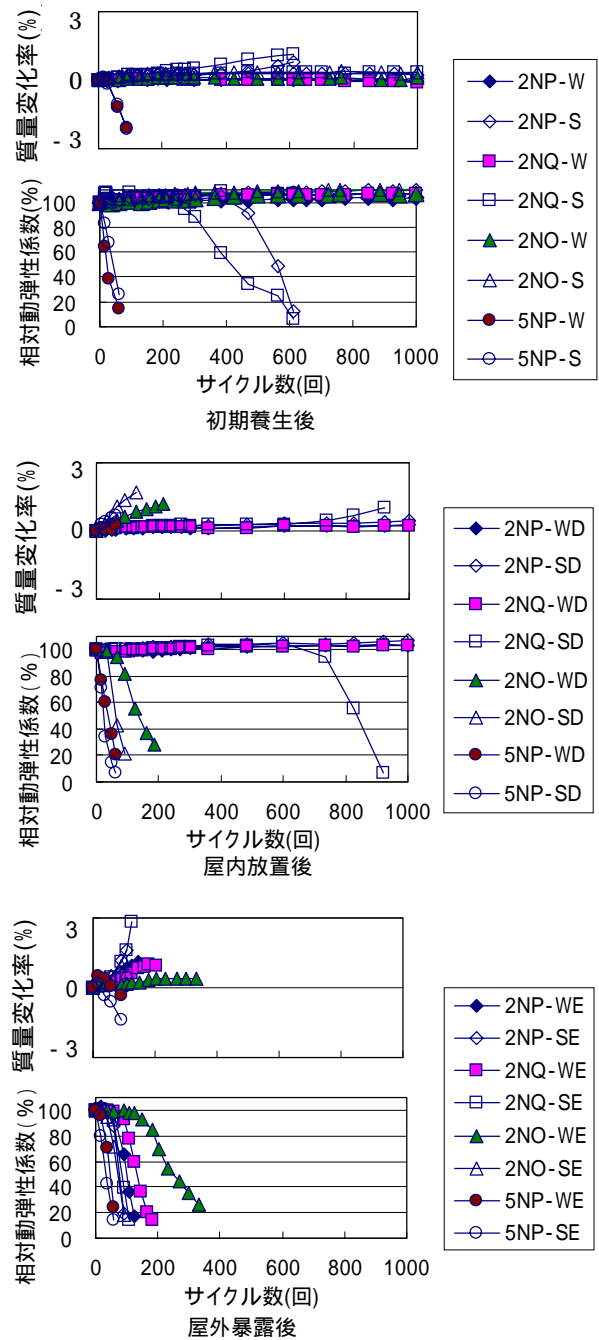


図7 凍結融解試験の結果(nonAE の場合)

表4 凍結融解結果のまとめ

記号	凍結融解試験で相対動弾性係数が60%を切るサイクル						耐久性指数(ASTM: 300サイクルで計算)					
	水中養生			封緘養生			水中養生			封緘養生		
	初期(W)	屋内放置(WD)	屋外曝露(WE)	初期(S)	屋内放置(SD)	屋外曝露(SE)	初期(W)	屋内放置(WD)	屋外曝露(WE)	初期(S)	屋内放置(SD)	屋外曝露(SE)
2NP	1000以上	1000以上	93.4	537.6	1000以上	71.4	100	100	19	100	100	13
2NQ	1000以上	1000以上	122.8	383.9	815	77.7	100	100	25	96	100	16
2NO	1000以上	119.9	223.1	1000以上	56.3	65.7	100	24	45	100	11	13
2AP	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	100	100	100	100	100	100
2AQ	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	100	100	100	100	100	100
2AO	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	100	100	100	100	100	100
5NP	19	30.1	41.7	35.4	22.1	27.4	4	6	8	7	4	5
5AP	1000以上	1000以上	1000以上	1000以上	462.5	1000	100	100	100	99	100	100

また、質量減少量を見ると、W/C50%のものは質量減少を示し、スケーリングが生じていることがわかる。これに対してW/C25%のものは質量増加を示している。このことから、低水セメント比のコンクリートでは微細なひびわれが組織全体に発生し、組織のゆるみが生じていることが考えられる。筆者らの既往の研究⁴⁾によれば、50 または 80 といった高温乾燥と水中浸漬の乾湿繰返しを行った場合、低水セメント比のコンクリートであっても、凍結融解試験でスケーリングを示しており、強制的な乾湿繰返しはコンクリート表層に大きな変化を与えていると考えられる。このため、実環境における乾湿繰返し等の作用は高温による促進試験で評価できない可能性がある。

表 4 に凍結融解試験のまとめを示す。低水セメント比のコンクリートでは、300サイクル以降に劣化が開始するものがあるため、劣化の指標として耐久性指数の他に、相対動弾性係数が60%となる凍結融解サイクルを求め、この値も劣化の指標として利用することとした。

封緘養生後の試験体で水セメント比25%の nonAEコンクリートについて、粗骨材の自己収縮拘束度 (=モルタルの自己収縮率 - コンクリートの自己収縮率) と凍結融解試験における劣化の関係を図 8 に示す。放置なし(封緘養生後に凍結融解試験を行ったもの)をみると粗骨材による自己収縮拘束度が小さくなるほど耐凍害性が低下するような傾向が認められる。しかしながら、骨材の拘束によるひびわれの発生を考えると、この傾向は逆になると考えられる。これは、自己収縮がうまく測定できなかった可能性のあること、および粗骨材の拘束だけでは自己収縮が作用するコンクリートの耐凍害性を評価できないことが考えられる。また、封緘養生後に室内放置を行ったものの耐凍害性については粗骨材:Oでは低下しているが、粗骨材:Tでは向上しており、室内放置の間にも様々な要因が影響がしているものと考えられる。

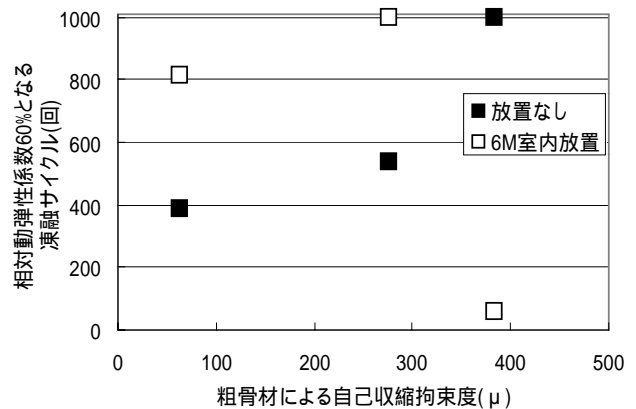


図 8 粗骨材による自己収縮拘束度と凍結融解試験における劣化の関係 (nonAE, 初期養生：封緘養生)

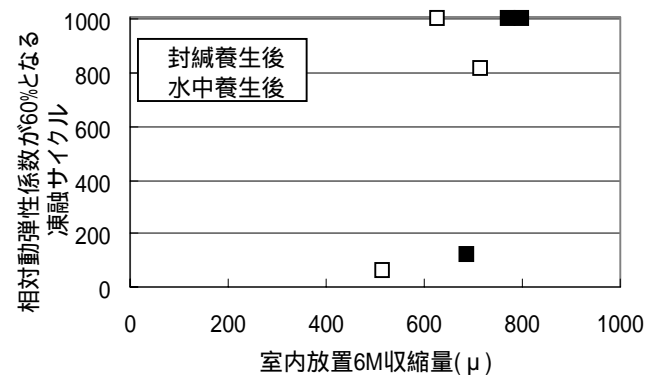


図 9 室内放置 6 カ月の収縮量と凍結融解試験における劣化の関係 (nonAE)

図 9 に、水セメント比25%の nonAEコンクリートについて、室内放置6カ月後におけるコンクリートの収縮量と凍結融解試験における劣化の関係を示す。この図から水中養生後に室内放置を行ったものについては収縮量の小さいものの耐凍害性が低下しているのがわかる。このコンクリートは粗骨材を良質なものとしたため、乾燥収縮が小さくなっているもので、骨材が収縮を拘束したためにコンクリート内部に微細なひびわれが発生し、耐凍害性が低下した可能性が考えられる。また、封緘養生後に室内放置を行ったものについては収縮量が水中養生後のものに比べて小さくなっているが、これは封緘養生時に乾燥しているためである。封緘養生後に室内放置を行ったものについても収縮量の小さなも

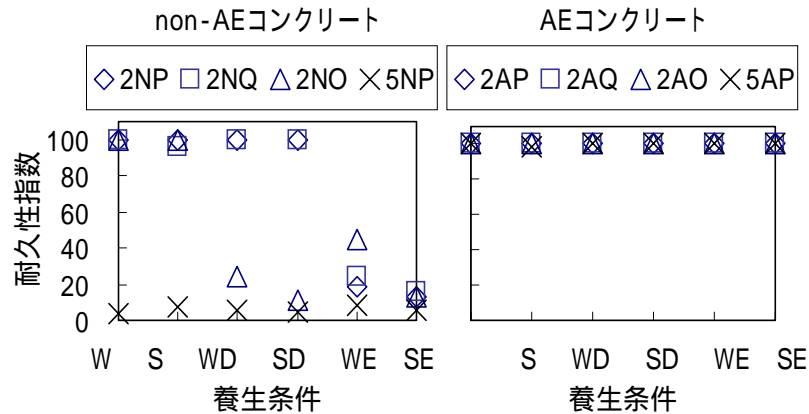


図 10 養生条件と耐久性指数の関係

ので耐凍害性が低下しており，同様の理由が考えられる。

図 10 に養生条件と耐久性指数の関係を nonAEとAEに分けて示す。この図から nonAEコンクリートでは図 7 等の説明と同様に，養生・放置条件によって耐凍害性のかなり低くなるものがあるが，AEコンクリートではすぐれた耐凍害性を示していることがわかる。このことから，耐凍害性の向上のためには，低水セメント比のコンクリートについても空気量の確保が重要であるといえる。

4. まとめ

- 1) 低水セメント比の nonAEコンクリートについて，以下のことが明らかとなった。
 - ・乾燥収縮を考慮した屋内放置6カ月のものでも使用骨材によって耐凍害性が低下するものがある。
 - ・乾湿繰り返し等の作用する屋外暴露 1 年のものでは，今回のすべての試験体の耐凍害性が大きく低下した。
 - ・上記の試験体は，劣化時に質量増加を示す。
- 2) AEコンクリートでは，水セメント比によらず，今回実施した養生・放置条件において優れた耐凍害性を示す。

また，今後の課題として，低水セメント比のコンクリートに対して，ASTM C666といった促進試験法で評価することの妥当性の検討，実環境における劣化との対応の明確化等が必要である。また，ここでは取り上げていないが，微細ひびわれの観察と定量化，空気量の役割と気泡組織等の検討も必要である。

参考文献

- 1) 浜 幸雄，千歩 修，友澤史紀，濱田英介：7～12年間の屋外暴露によるコンクリートの耐凍害性の変化，第56回セメント技術大会要旨 216-217，2002.5
- 2) 堀田智明，名和豊春：セメント系材料の自己収縮に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第542号 9-15，2001.4
- 3) 足立裕介，千歩 修，浜 幸雄，友澤史紀：コンクリートの乾燥収縮予測のための粗骨材基礎性状把握方法の検討，第56回セメント技術大会講演要旨 238-239，2002.5
- 4) 千歩 修，濱田英介，友澤史紀：乾湿繰り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 第25巻 731-736，2003.7