

# コンクリートの気泡組織に影響する要因と耐凍害性に関する研究

## AFFECTING FACTORS ON AIR VOID SYSTEM AND FROST RESISTANCE OF CONCRETE

濱 幸雄\*, 平野彰彦\*\*, 田畑雅幸\*\*\*, 新 大軌\*\*\*\*  
Yukio HAMA, Akihiko HIRANO, Masayuki TABATA  
and Daiki ATARASHI

The influence of various factors such as chemical admixture and mixing conditions on the air void system of concrete was investigated by the buoyancy method. When AE agent was used independently, the difference of quantity and quality of entrained air due to the type of AE agent was not recognized among 10 types of AE agent used in this study. However, when AE agent was used with superplasticizer, we could see big difference in air entraining due to the type of AE agent. Furthermore, the influence of mixing efficiency and grading of sand was also large besides AE agent. It was possible to control frost resistance by the appropriate quantity and quality of entrained air even if concrete was subjected to wetting/drying cycles. The section air quantity of diameter from 100 to 500 micrometer is especially effective to prevent frost damage of concrete.

**Keywords :** Concrete, Chemical Admixture, Mixing Condition, Air Void System, Buoyancy Method, Frost Resistance

コンクリート, 化学混和剤, 混練条件, 気泡組織, 浮力法, 耐凍害性

### 1. はじめに

コンクリートの耐凍害性を確保するためには適切なエントレインドエアの連行が必要であり, 一般にはフレッシュコンクリートの空気量を測定することによって品質管理が行われている。しかし, 厳密には耐凍害性に重要な気泡特性はその空気の絶対量ではなく, 気泡と気泡との間の距離(気泡間隔係数)であるといわれている。コンクリートが凍害による損傷から免れる気泡間隔係数の上限値として, Powers<sup>1)</sup>は気泡の間隔をペーストの特性や凍結速度と関連させた一連の理論式から  $250\mu\text{m}$  という値を導き, Backstrom ら<sup>2)</sup>は AE 剤の種類と使用量を変化させた実験の結果から  $200\mu\text{m}$  という値を示している。また, Pigeon ら<sup>3), 4)</sup>は凍結融解およびコンクリートの条件ごとに凍害劣化を受けなくなる気泡間隔係数の限界値(Critical Spacing Factor)が存在するとの概念を示し, 実験的に凍結速度ごとの Critical Spacing Factor を求め, 通常の ASTM C 666 A 法の凍結速度  $11^\circ\text{C/hr}$  の条件では Powers の示した  $250\mu\text{m}$  とほぼ一致することから, Powers の理論が正しいことを確認している。さらに, コンクリートの耐凍害性向上に対してはより小さな気泡ほどその抑制効果が大いとして, 直径  $300\mu\text{m}$  以下の空気量が 1.8%以上確保されれば十分な耐凍害性を有するコンクリートが得られるとの指摘<sup>5)</sup>もある。

著者ら<sup>6)</sup>は, JIS A1148 (A 法)による標準条件での凍結融解試験で優れた耐凍害性を示す低水セメント比のコンクリートが, 暴露期間中に生じる微細ひび割れなどの影響により暴露後の耐凍害性が著しく低下することを示すとともに, 供用中においても所要の耐凍害性を確保するためには連行空気の質の管理が重要である可能性を指摘している。しかし, このような場合においても気泡間隔係数  $200\sim 250\mu\text{m}$  以下が Critical Spacing Factor となるかどうかについての検証は十分に行われていない。

青野ら<sup>7), 8)</sup>は, 上記の耐凍害性低下のメカニズムについて, ひび割れがその主要因ではなく, 乾燥および乾湿繰返しによって C-S-H のシリケートアニオン鎖の重合が進行し, 層状構造へと変化するナノ構造変化に起因する直径  $40\sim 2000\text{nm}$  の細孔量増加が耐凍害性低下の支配的要因であることを示している。ここで, 直径  $40\sim 2000\text{nm}$  の細孔量が耐凍害性に影響するというのは, 鎌田らの研究<sup>9)</sup>に基づくものであるが, 同時に鎌田らはコンクリートの耐凍害性には細孔構造だけでなく, 凍害応力の緩和要素となる気泡組織の役割が大きく, AE コンクリートを含めた通常のコンクリートでは, 気泡組織は細孔構造を上回る影響度をもつことも指摘している。

上記のような背景を踏まえて, 著者ら<sup>10)</sup>はレディミクストコンクリートの品質管理への適用を考慮して, 気泡組織の制御と管理の

\* 室蘭工業大学建設システム工学科 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

\*\* 北海道職業能力開発大学校建築施工システム技術科 教授  
室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻  
博士後期課程

Prof., Dept. of Advanced Architectural Technology for Construction, Hokkaido Polytechnic College

\*\*\* 北海道職業能力開発大学校建築科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Eng., Muroran Institute of Technology

Prof., Dept. of Architectural Technology, Hokkaido Polytechnic College, Dr. Eng.

\*\*\*\* 室蘭工業大学応用化学科 助教・博士(工学)

Research Assoc., Dept. of Applied Chemistry, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

方法を確立することを目的として、フレッシュ状態の試料を用いて簡便に気泡間隔係数などの気泡パラメータの測定が可能な浮力法に着目し、一般に用いられている ASTM C 457 のリニアトラバース法と浮力法による測定結果の対応を比較検討している。その結果、浮力法による気泡間隔係数はリニアトラバース法よりやや大きめの値を示すものの、各試料間の相対的評価を行うには問題のない信頼できる結果が得られることを確認し、高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートでは、消泡剤を用いて空気量を調整すると気泡間隔係数が大きくなる傾向にあることを指摘している。また、コンクリートの空気連行性は、化学混和剤だけでなくセメント、骨材、温度、練混ぜの影響も大きいといわれているが<sup>11)</sup>、気泡径分布や気泡間隔係数などの気泡の質に及ぼす影響については十分に把握されていない。

本研究では、化学混和剤の種類および使用方法、混練条件などの各種要因がコンクリートの気泡組織に及ぼす影響について、浮力法を用いた気泡組織の測定によって検討するとともに、水セメント比 35% の高強度コンクリートを対象として、経年を想定した硬化後の乾湿繰返しによる耐凍害性の低下に対する気泡の効果を確認することを目的としている。

2. 実験概要

表 1 に実験計画表を示す。実験はモルタル実験とコンクリート実験に分けて行い、モルタル実験では、AE 剤の種類が気泡組織に及ぼす影響を検討する実験（シリーズ 1）と消泡剤が気泡組織に及ぼす影響を検討する実験（シリーズ 2）を行った。また、コンクリート実験では、高性能 AE 減水剤（SP）を用いた水セメント比 35% の高強度コンクリートを対象として、AE 剤と消泡剤を併用した場合の気泡組織と耐凍害性に及ぼす影響を検討する実験（シリーズ 3）と化学混和剤以外の骨材および混練条件が気泡組織と耐凍害性に及ぼす影響を検討する実験（シリーズ 4）を行った。

表 1 実験計画表

シリーズ	検討事項	使用材料				調査				試験項目			
		セメント	細骨材	粗骨材	化学混和剤	W/C (%)	Air (%)	スランブ (cm)	備考				
モルタル	1 AE剤種類の影響	OPC	登別産陸砂	-	AE剤10種(A~J)	標準量	50	-	-	JIS R 5201による	気泡組織		
					SP(Y)		35					4	21
					AE剤10種(A~J)		標準量						
	SP(X,Z)				0								
	消泡剤(R)				0.004								
	2 消泡剤の影響				0.02	標準量	35	4	21	コンクリート調合(表5)のモルタル部分の調合(左欄Air,スランブはコンクリートでの目標値)			
0													
		0.004											
コンクリート	3 AE剤と消泡剤の相互作用	安山岩碎石	SP(X)	標準量	35	2	21	SPのみ(空気量5%)を基準に、消泡剤使用して空気量2%、消泡剤とAE剤を併用して空気量5%、7%に調整					
			AE剤(A)						5				
	4 混練条件の影響		宇部珪砂	消泡剤(R)	標準量	35	4	21	実験計画法(L9)による実験				
				SP(Y)						7			
AE剤(A)	標準量	35	4	21	実験計画法(L9)による実験								

表 2 コンクリートの調合と練り上がり性状（シリーズ 3）

記号	W/C (%)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (ℓ/m <sup>3</sup> )				化学混和剤 (C×%)			練り上がり性状			
				W	C	S	G	SP	AE	消泡剤	空気量 (%)		スランブ (cm)	練り上がり温度 (°C)
X-2%	35	2	44.2	179	162	283	356	0.9	0	0.005	2.3	1.5		
X-5%A				173	157	274	346				0	5.1	3.3	24.9
X-5%B		5		0.002	0.005	170	154		269	339	5.4	3.8	24.0	23.6
X-7%						7	7.9		5.4	24.5	22.8			

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント (OPC) ( $\rho = 3.16 \text{ g/cm}^3$ ) を、細骨材は登別産陸砂(表乾密度 2.69  $\text{g/cm}^3$ , 吸水率 1.52%) (シリーズ 1~3) および宇部珪砂(1号 A-6号 A, 表乾密度 2.60  $\text{g/cm}^3$ , 吸水率 0.75%) (シリーズ 4) を、粗骨材は敷生川水系安山岩碎石(表乾密度 2.60  $\text{g/cm}^3$ , 吸水率 1.83%, 最大寸法 20mm)を用いた。

化学混和剤は、JIS A 6204 に適合するものとし、アルキルエーテル系 (A, B), 変性アルキルカルボン酸化合物系 (C), ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸塩 (D), 天然樹脂酸塩系 (E, F, G), 樹脂酸塩 (H, I), アニオン系 (J) の 10 種類の AE 剤とポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤 3 種類 (基本タイプ (X), 低空気連行タイプ (Y, Z)) を用いた。また、空気量調整剤としてポリアルキルグリコール系 (消泡剤 : R) を用いた。

2.2 実験計画

AE 剤の種類が気泡組織に及ぼす影響を検討する実験 (シリーズ 1) および消泡剤が気泡組織に及ぼす影響を検討する実験 (シリーズ 2) でのモルタルの調合は、水セメント比 50% の場合には JIS R 5201 の基準配合とし、水セメント比 35% の場合には水セメント比 35% の単位水量 175  $\text{kg/m}^3$ , 目標空気量 4%, 細骨材率 44.2% のコンクリート調合(表 5 の調合)から粗骨材を除いたモルタル部分の調合とした。なお、シリーズ 1 では上記の 10 種類の AE 剤と高性能 AE 減水剤 (低空気連行タイプ Y) を用い、その使用量はメーカーが推奨する標準量とした。また、シリーズ 2 では空気連行性の異なる 2 種類の高性能 AE 減水剤 (X, Z) を標準量用いたモルタルを基準として、消泡剤 (R) の使用量を 0, 0.004, 0.02 (C×%) の 3 水準とした。試験項目は、浮力法とリニアトラバース法による気泡組織の測定である。

コンクリート実験の AE 剤と消泡剤を併用した場合の気泡組織と耐凍害性に及ぼす影響を検討する実験 (シリーズ 3) では、高性能

AE 減水剤 (基本タイプ: X) を用いて、目標空気量を 2%, 5%, 7% として AE 剤(A)と消泡剤 (R) の使用量を調整した。表 2 にコンクリートの調合表を示す。なお、ここで用いた高性能 AE 減水剤は空気連行性をしているため、高性能 AE 減水剤単独で空気量が 5% となり、それに消泡剤を用いて空気量を 2% とし、さらに AE 剤を併用することにより空気量を 5% および 7% とした。

また、化学混和剤以外の骨材および混練条件が気泡組織と耐凍害性に及ぼす影響を検討する実験 (シリーズ 4) では、化学混和剤以外の細骨材粒度、粗骨材粒度、混練時間、練り上がり温度を変動要因として実験計画法 L9 による実験<sup>12)</sup>を行った。表 3 に実験の因子と水準を、表 4 に実験計画法の割り付けを示す。細骨材および粗骨材はふるい分けを行って、JIS A 5308 の標準粒度曲線の上限、中央、下限となるように粒度調整を行った。コンクリートの調合は、細骨材および粗骨材の粒度分布を JIS 標準粒度範囲の中央値、混練時間を 2 分、練り上がり温度を 20°C とした基本条件において、スランブ 21cm、空気量 4% を目標とした試し練りによって決定した表 5 に示す一定の調合とした。なお、高性能 AE 減水剤は低空気連行タイプ Y を、AE 剤は A を使用した。練り上がり性状を表 6 に示す。コンクリート実験では、いずれのシリーズにおいても、浮力法およびリニアトラバース法による気泡組織の測定と凍結融解試験を行った。

2.3 実験方法

(1) 気泡組織の測定<sup>10)</sup>

気泡組織の測定は、リニアトラバース法と浮力法により行った。リニアトラバース法は、φ10×20cm の円柱供試体を作製し、その硬化後に切断、研磨を行い、倍率 175 倍のマイクロスコープを用いて ASTM C 457 に準じて、所定の測線長を横切る気泡の個数および弦長を測定し、気泡間隔係数、比表面積、空気量を算出した。

浮力法は粉体の粒度分布測定で用いられる沈降天秤法を応用した方法で、フレッシュ状態のウェットスクリーニングしたモルタル試料を写真 1 に示す試験装置下部のグリセリン水溶液 (密度 1.206 g/cm<sup>3</sup>, 粘性係数 4.0Pa・sec) 中で攪拌し、分散・解放された気泡が気泡径を保持したまま上部のライザーコラム中の水中を上昇した気泡による浮力の経時変化を測定し、ストークスの法則を用いて気泡径分布および ASTM C 457 で定義される気泡間隔係数、比表面積、空気量を算出するものである。浮力法は、既往の研究に示されているように、直径 2mm 以下の気泡を対象としているため、空気量は圧力法、リニアトラバース法で得られる値よりも 2% 程度少なめに、気泡間隔係数はリニアトラバース法で得られる値よりも 100 μm 程度大きめに算出される傾向にあるものの、短時間で容易に測定が可能で、気泡径分布自体が測定結果として得られることに特徴がある。

浮力法による浮力の経時変化の測定結果の一例を図 1 に示す。水中を上昇する気泡は径の大きなものほどその上昇速度は早く、気泡径と上昇速度はストークスの法則により式(1)で関連付けられる<sup>7)</sup>。

$$v = \frac{g(\rho_a - \rho)}{18\mu} \cdot D_a^2 \quad (1)$$

ここに、v : 気泡の上昇速度 (m/sec)

g : 重力加速度 (m/sec<sup>2</sup>)

ρ<sub>a</sub> : 気泡の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

ρ : 媒質の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

表 3 実験因子と水準 (シリーズ 4)

因子 水準	A	B	C	D
	細骨材粒度	粗骨材粒度	混練時間	練温
1	上限	上限	2分	10°C
2	中央	中央	4分	20°C
3	下限	下限	6分	30°C

表 4 実験計画法 (L9)<sup>12)</sup> の割り付け (シリーズ 4)

因子 試験体	D	A	B	C
	練温	細骨材粒度	粗骨材粒度	混練時間
No.1	10°C	上限	上限	2分
No.2	10°C	中央	中央	4分
No.3	10°C	下限	下限	6分
No.4	20°C	上限	中央	6分
No.5	20°C	中央	下限	2分
No.6	20°C	下限	上限	4分
No.7	30°C	上限	下限	4分
No.8	30°C	中央	上限	6分
No.9	30°C	下限	中央	2分

表 5 コンクリートの調合 (シリーズ 4)

W/C (%)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (ℓ/m <sup>3</sup> )				化学混和剤 (C×%)	
			W	C	S	G	SP	AE
35	4	44.2	175	159	277	349	0.9	0

表 6 コンクリートの練り上がり性状 (シリーズ 4)

試験体	空気量 (%)		スランブ (cm)	練温 (°C)
	圧力法	浮力法		
No.1	4.1	2.5	21.4	17.7
No.2	5.5	2.8	23.4	16.5
No.3	8.0	4.0	23.5	14.5
No.4	8.9	5.9	22.3	21.0
No.5	4.4	3.1	22.7	21.0
No.6	5.8	1.8	24.0	22.1
No.7	9.3	4.2	21.9	24.1
No.8	10.8	6.8	23.5	24.2
No.9	5.5	2.3	20.9	24.6

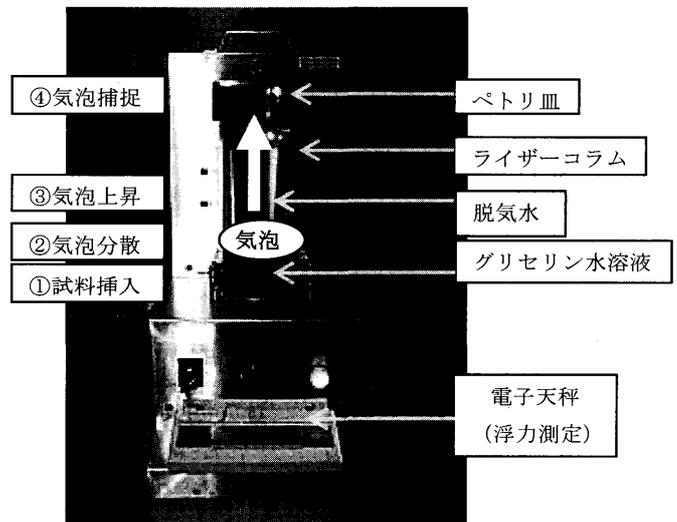


写真 1 浮力法測定装置

$\mu$  : 媒質の粘性係数 (Pa・sec)

$D_a$  : 気泡径 (m)

したがって、ある気泡径  $D_i$  に対応する気泡量  $V_{ai}$  は図1の結果から浮力の経時変化として式(2)で求めることができる。

$$V_{ai} = \sum_{t=t_{i-1}}^{t_i} t \Delta (dB/dt) \quad (2)$$

ここに、 $V_{ai}$  : 直径  $D_i$  の気泡の容積 (cc)

$t$  : 時間 (min)

$B$  : 浮力 (g)

さらに、試料中の全気泡量  $V_a$  はそれぞれの径の気泡量の合計で式(3)となり、気泡組織の比表面積は式(4)で、コンクリート全体の空気量  $A$  は式(5)で算出され、これらの結果から ASTM C457 で定義される気泡間隔係数を算出することができる。

$$V_a = \sum V_{ai} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i V_{ai}}{V_a} \quad (4)$$

ここに、 $V_a$  : 全気泡の容積 (cc)

$V_{ai}$  : 直径  $D_i$  の気泡の容積 (cc)

$\alpha$  : 比表面積 ( $mm^2$ )

$\alpha_i$  : 直径  $D_i$  の気泡の比表面積 ( $mm^2$ )

$$A = \frac{M_0 \frac{V_a}{V_0}}{M_0 \frac{V_a}{V_0} + 100} \cdot 100 \quad (5)$$

ただし、 $M_0 = M / (100 - Ae) \times 100$  (%)

$V_0 = V_s - V_a$

ここに、 $A$  : 空気量 (%)

$M$  : コンクリート中のモルタルの容積率 (%)

$Ae$  : 目標空気量 (%)

$V_s$  : 試料の容積 (cc)

## (2) 凍結融解試験

凍結融解試験は、7.5×7.5×40cm の角柱供試体を用いて、JIS A

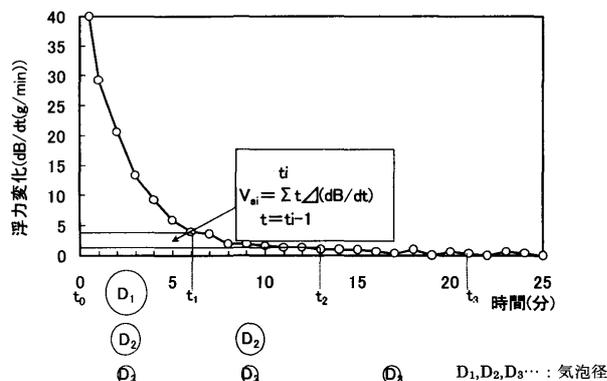


図1 浮力の経時変化の一例 (浮力法)

1148 A 法 (水中凍結融解試験方法) に準じて行った。凍結融解試験開始前の養生条件は、シリーズ3では2週水中養生とし、シリーズ4では2週水中養生後に30℃での5日間の乾燥と2日間の20℃水中養生を7サイクル繰り返す条件 (30℃乾湿) と50℃での5日間の乾燥と2日間の水中養生を4サイクル繰り返す条件 (50℃乾湿) の2条件とした。乾湿の繰り返しは、コンクリートの夏季の乾燥および降雨による含水率の上昇を考慮して設定した。測定項目は、一次共鳴振動数による相対動弾性係数、質量変化、長さ変化とした。

## 3. 結果および考察

### 3.1 AE 剤の種類が気泡組織に及ぼす影響 (シリーズ1)

図2に浮力法による空気量と気泡間隔係数の関係を示す。空気量が増加するほど、気泡間隔係数が小さくなっている。AE 剤を用いていない non-AE の空気量は4.5%、高性能 AE 減水剤 Y のみの場合の空気量は4.8%でほぼ同程度であった。また、AE 剤のみを用いた場合の空気量の範囲は4.9~7.9%と AE 剤種類による差は3%以内であるのに対して、高性能 AE 減水剤と AE 剤を併用した場合の空気量の範囲は7.2~17.3%と AE 剤種類によって10%程度の差があり、併用する AE 剤種類によって空気連行性が大きく異なることがわかる。

図3に浮力法で得られた気泡径分布の測定結果の一例を示す。なお、ここでは各気泡径範囲の空気量の全空気量に対する割合を示している。non-AE (N) の場合には直径500~2000  $\mu m$  以上の粗大気泡の量が70%以上ときわめて多いのに対し、AE 剤を用いた場合 (A) には直径1000~2000  $\mu m$  の粗大気泡の割合が大幅に減少し、直径100~125  $\mu m$  および500~1000  $\mu m$  の気泡量が卓越する双峰型の分布となる傾向が見られた。一方、高性能 AE 減水剤を用いた場合 (SP) には、空気量は non-AE (N) と同程度であるにもかかわらず、non-AE (N) でみられる直径1000~2000  $\mu m$  の粗大気泡が大幅に減少し、AE 剤を併用した場合 (SP-A) を含めて500  $\mu m$  以下の微細気泡の分布は均等化する傾向がある。ここで使用した高性能 AE 減水剤は、あらかじめ消泡成分が処方された低空気連行タイプ (Y) であるが、その界面活性作用の影響で粗大径の気泡割合が減少したものと考えられる。また、図3では AE 剤 (A) を用いた場合の結果を一例として示しているが、その他の AE 剤の場合にも同様の傾向であり、AE 剤種類が気泡組織に及ぼす影響に明確な違いは認められなかった。

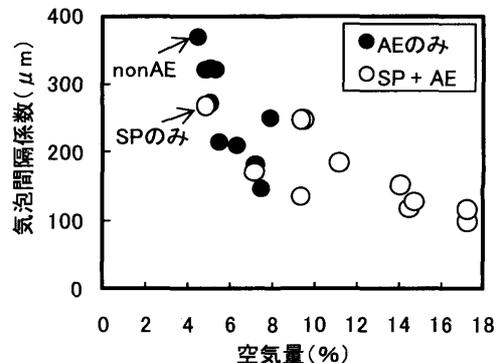


図2 空気量と気泡間隔係数の関係 (シリーズ1)

3.2 消泡剤が気泡組織に及ぼす影響 (シリーズ 2, シリーズ 3)

モルタル実験 (シリーズ 2) での消泡剤の使用量と浮力法による空気量の関係を図 4 に、消泡剤の使用量と浮力法による気泡間隔係数の関係を図 5 に示す。ここでは空気連行性の異なる 2 種類の高性能 AE 減水剤 (X, Z) を用いているが、高性能 AE 減水剤のみでの空気量は 4% と 10% と大きく異なっている。しかし、消泡剤の添加によって空気量は減少し、高性能 AE 減水剤による空気量の差は小さくなっており、C×0.02% の使用量では高性能 AE 剤による差はほとんどなくなっている。また、気泡間隔係数については消泡剤使用量の増加にともなう空気量の減少に対応して、直線的に大きくなっている。消泡剤使用による気泡径分布の変化を図 6 に示す。高性能 AE 減水剤 (X) の場合には、気泡径 125~300 μm の範囲にピークをもつ気泡径分布から、消泡剤使用量 C×0.004% では気泡径 125~500 μm の気泡が大幅に減少し、C×0.02% では 500~2000 μm の気泡がわずかに残っている状態となった。また、高性能 AE 減水剤 (Z) の場合には、気泡径 100~125 μm および 500~1000 μm の 2 つのピークをもつ気泡径分布から、消泡剤使用量 C×0.004% では微小径 100~125 μm の気泡のピークが消失し、C×0.02% ではほとんどの気泡が消失して X の場合とほぼ同じ分布となっている。

コンクリート実験 (シリーズ 3) での消泡剤と AE 剤の併用による気泡径分布の変化を図 7 に示す。高性能 AE 減水剤 (X) のみを用いた X-5%A では 500~1000 μm の空気量が最も多いもの、100~500 μm の微細な気泡も均等に分布している。X-5%A をベースに消泡剤を添加して空気量を 2% とした X-2% では、全気泡径範囲でほぼ均等に空気量が減少している。また、消泡剤と AE 剤を併用して空気量を 5% とした X-5%B では X-5%A とほぼ同じ気泡径分布となり、空気量を 7% とした X-7% では X-5%A と比べて 1000~2000 μm の粗大径の気泡と 75~200 μm の微細な気泡の両方が増加していることがわかる。一般に消泡作用には破泡と抑泡の二つの作用があるが<sup>13)</sup>、消泡剤は耐凍害性向上に寄与しない粗大径の気泡を消失させるよりも、AE 剤で連行されるような微細な気泡の発生を抑える抑泡効果の方が卓越していると考えられる。

これらのコンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図 8 に示す。ここでは凍結融解試験開始までの養生条件を 20℃ 水中養生・材齢 14 日としており、空気量 2% で気泡間隔係数が 600 μm でも耐久性指数が 95 と優れた耐凍害性を示した。低水セメント比のコンクリートでは、JIS A1148 (A 法) による標準条件での凍結融解試験では non-AE であっても優れた耐凍害性を示すという既往の研究<sup>6)</sup>と同様の結果となり、気泡組織が耐凍害性に及ぼす影響について検討することができなかった。しかし、凍結融解試験前の乾燥や乾湿繰返しによってコンクリートの耐凍害性が低下することは文献 7), 8), 14), 15) 等で検証されていることから、シリーズ 4 での凍結融解試験では凍結融解試験開始までの養生条件として、20℃ 水中養生後に乾湿繰返しを行うこととした。

3.3 気泡組織に及ぼす各種要因の影響と耐凍害性 (シリーズ 4)

ここでは、実験計画法 (L9)<sup>12)</sup> による割り付けを行った 9 種類のコンクリートについて、骨材および混練条件が気泡組織に及ぼす影響を検討することを目的としているが、同一調査のコンクリートであるにもかかわらず、細骨材粒度、粗骨材粒度、混練時間、練り上がり温度が異なることで空気量が 1.8~6.8% (圧力法では 4.1~

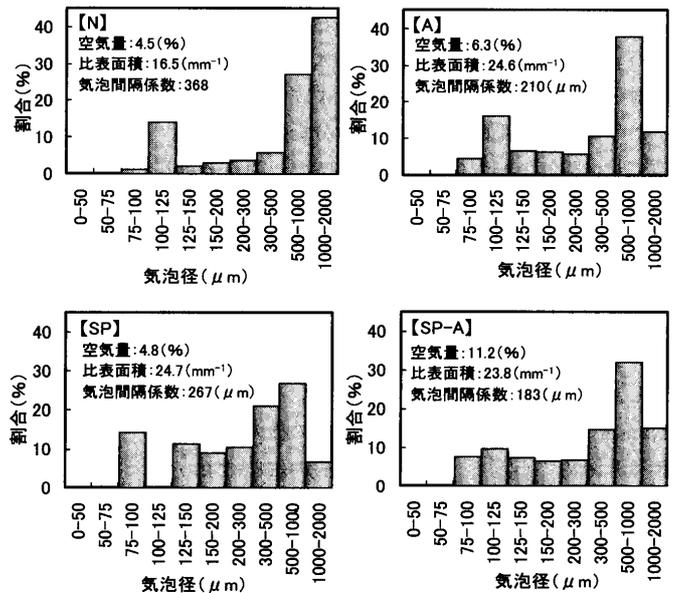


図 3 気泡径分布の一例 (シリーズ 1)

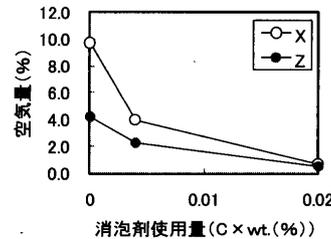


図 4 消泡剤使用量と空気量の関係 (シリーズ 2)

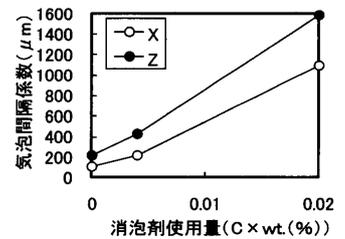


図 5 消泡剤使用量と気泡間隔係数の関係 (シリーズ 2)

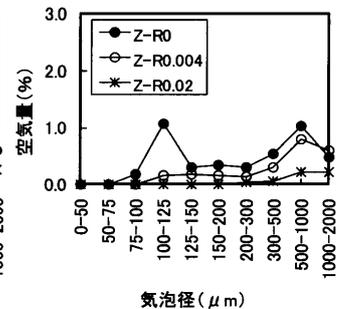
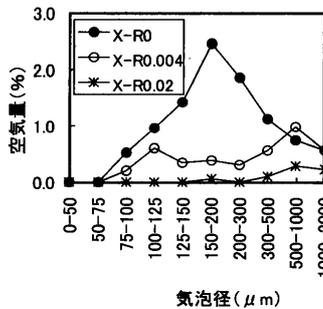


図 6 消泡剤使用による気泡径分布の変化 (シリーズ 2)

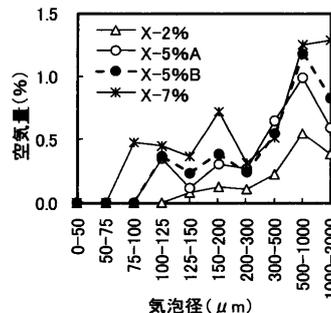


図 7 消泡剤と AE 剤の併用による気泡径分布の変化 (シリーズ 3)

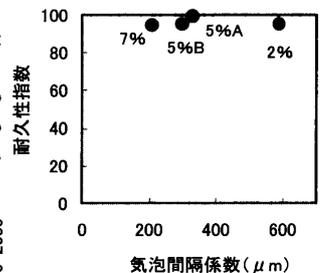


図 8 気泡間隔係数と耐久性指数の関係 (シリーズ 3)

10.8%), 気泡間隔係数が 239~577  $\mu\text{m}$  (リニアトラバース法では 234~573  $\mu\text{m}$ ) と大きく異なる気泡組織となった。図 11 に空気量および気泡間隔係数に対する要因効果図を示す。分散分析の結果では、空気量に対して細骨材粒度, 混練時間, 練り上がり温度が 1% 有意となり, 混練時間の寄与率が 67.9% と最も大きくなった。また, 気泡間隔係数に対してはいずれの要因も有意差は認められなかった。

細骨材の粒度分布が JIS 標準粒度分布曲線の上限, つまり粗粒率が小さく粒度が細かいほど空気量は増加し, 気泡間隔係数は小さくなっている。これは, 1.2mm 以上と 0.15mm 以下の粒径の砂の空気連行性はきわめて小さく, 0.15~0.6mm の細粒によってほとんどの空気が連行されるという結果<sup>1)</sup>と一致している。一方, 粗骨材の粒度分布については空気量, 気泡間隔係数のいずれに対しても影響はほとんど認められない。また, 混練時間が長いほど, 練り上がり温度が高いほど空気量が増加し, 気泡間隔係数が小さくなる傾向にある。一般には, コンクリート温度は高いほど空気量は減少し, コンクリート温度 10°C の差で空気量が 2~3 割増減するといわれているが<sup>1)</sup>, それとは異なる結果となった。その理由として, 計画上は 10°C さまみの練り上がり温度を目標としたが, 実際の練り上がり温度にはそれほどの差が得られなかったことがあげられる。また, 混練時間についても一般には 3~5 分で空気量が最大となり, それより長くても短くても空気量は少なくなるといわれているが<sup>1)</sup>, 本実験での 2~6 分の範囲では混練時間が長いほど空気量が多く, 気泡間隔係数が小さくなった。ミキサの練混ぜ性能や混練量などの影響も大きいと思われ, 良質な気泡を数多く連行する最適な条件が存在するものと考えられる。

図 12 に凍結融解試験結果を示す。30°C 乾湿, 50°C 乾湿のいずれの条件においても No.1, No.2, No.6, No.9 の試験体が 300 サイクルまでの凍結融解で相対動弾性係数 60% を下回った。50°C 乾湿の方がやや 30°C 乾湿よりも劣化程度が大きい傾向にあるが, 両者にはそれほど大きな差は認められなかった。

図 13 に空気量と耐久性指数の関係を, 図 14 に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。乾湿繰返しの条件によらず, 空気量が多いほど, また気泡間隔係数が小さいほど耐久性指数は大きくなっており, 耐凍害性に及ぼす空気量の影響は一般に知られている傾向と一致しており, 空気量 4% 以上, 気泡間隔係数 300  $\mu\text{m}$  以下で耐久性指数がほぼ 100 となっている。ただし, ここで示した空気量と気泡間隔係数の値は浮力法による測定値であることに注意が必要である。図 15 に浮力法と圧力法による空気量の関係を, 図 16 に浮力法とリニアトラバース法による気泡間隔係数の関係を示す。文献 10) でも示されているように, 浮力法による空気量は圧力法よりも小さめに, 気泡間隔係数はやや大きめに算出されることがわかる。上記の空気量および気泡間隔係数を圧力法による空気量とリニアトラバース法による気泡間隔係数に換算すると, それぞれ 6%, 250  $\mu\text{m}$  となる。また, 図 17 に直径 300  $\mu\text{m}$  以下の空気量と耐久性指数の関係を示すが, 直径 300  $\mu\text{m}$  以下の空気量が 1.8% 以上で耐久性指数が 100 となっており, 文献 3) で示されている値と一致した。

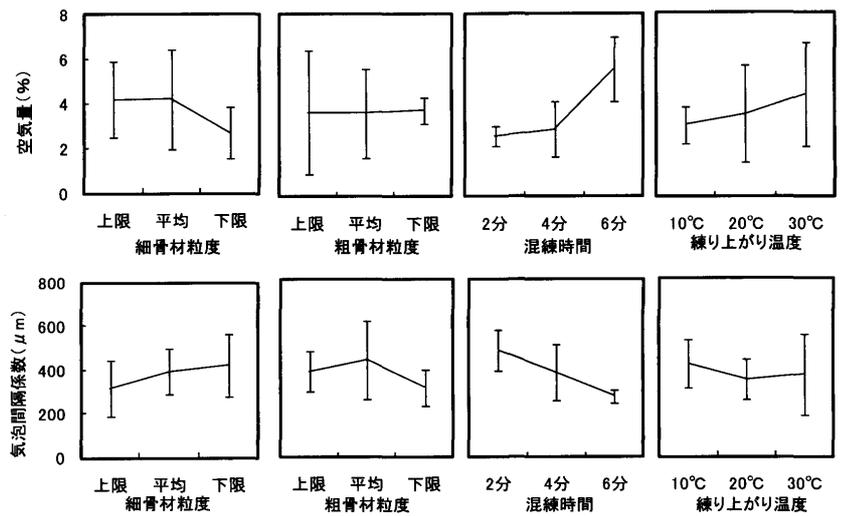


図 11 要因効果図 (シリーズ 4)

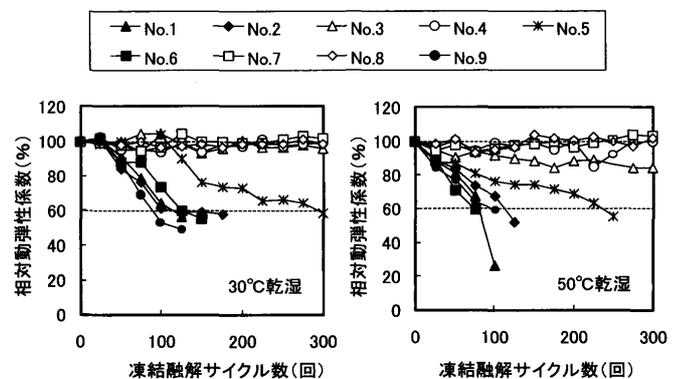


図 12 凍結融解試験結果 (シリーズ 4)

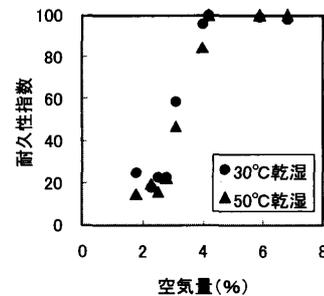


図 13 空気量と耐久性指数の関係 (シリーズ 4)

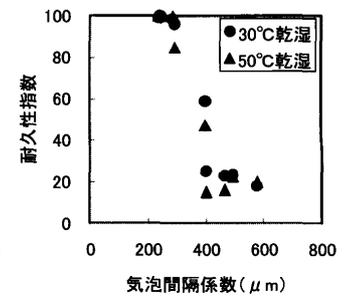


図 14 気泡間隔係数と耐久性指数の関係 (シリーズ 4)

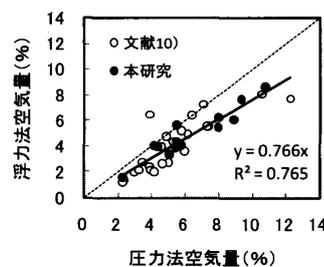


図 15 圧力法と浮力法による空気量の比較

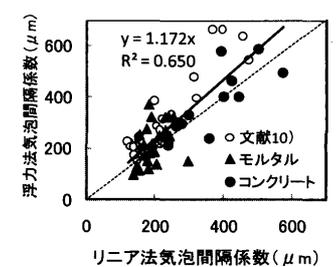


図 16 リニアトラバース法と浮力法による気泡間隔係数の比較

表 7 区間空気量と耐久性指数（オメガ変換値）の相関係数

直径 (μm)	2000	1000	500	300	200	150	125	100
75	.913	.965	.975	.975	.963	.941	.971	.465
100	.907	.973	<b>.984</b>	.974	.956	.941	.845	
125	.877	.947	.966	.967	.931	.967		
150	.852	.932	.968	.981	.970			
200	.812	.890	.913	.911				
300	.795	.879	.895					
500	.760	.863						
1000	.636							

直径 (μm)	2000	1000	500	300	200	150	125	100
75	.893	.953	.976	.980	.966	.945	.975	.432
100	.890	.965	<b>.993</b>	.989	.971	.963	.875	
125	.853	.931	.966	.972	.933	.972		
150	.826	.913	.967	.987	.970			
200	.784	.867	.911	.924				
300	.763	.850	.882					
500	.726	.829						
1000	.605							

さらに、コンクリートの耐凍害性に影響する気泡径の範囲を検討するために、気泡径の区間空気量と耐久性指数のオメガ変換値<sup>12)</sup>との単回帰分析を行った。オメガ変換は、耐久性指数のような0～100%の範囲に限定された値の算術的加法性を成立させるものである。表7に区間空気量と耐久性指数のオメガ変換値との相関係数を示す。乾湿繰返しの条件によらず、相関係数が最も高いのは100～500μmの区間空気量であった。図18に直径100～500μmの空気量と耐久性指数のオメガ変換値の関係を示す。両者は非常に良い対応を示している。以上の結果から、乾湿繰返しによる耐凍害性の低下に対しても適切な量と質の気泡を連行することで耐凍害性を確保することは可能であるが、一般的に推奨されているよりもやや大きめの気泡径の空気量が必要であり、特に直径100～500μmの区間空気量が多いほど有効といえる。

4. まとめ

本研究では、化学混和剤の種類および使用方法、混練条件などの各種要因がモルタルおよびコンクリートの気泡組織に及ぼす影響と硬化後の乾湿繰返しによる耐凍害性の低下に対する気泡組織の効果について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 本研究で用いた10種類のAE剤の空気連行性は、AE剤単独使用の場合には大きな差は認められず、直径1000～2000μmの粗大気泡の割合が大幅に減少し、直径100～125μmと500～1000μmの気泡量が卓越する双峰型の分布となる傾向が見られた。一方、高性能AE減水剤との組み合わせではAE剤種類によって空気連行性に大きな差が見られたものの、500μm以下の微細気泡の分布は均等化する傾向にある。
- (2) 消泡剤は耐凍害性向上に寄与しない粗大径の気泡を消失させるよりも、AE剤で連行されるような微細な気泡の発生を抑える抑泡効果の方が卓越している。
- (3) 本実験の範囲では混練時間が長いほど空気量が多く、気泡間隔係数が小さくなったが、ミキサの練混ぜ性能や混練量などの影響も大きいと思われ、良質な気泡を数多く連行する最適な条件が存在するものと考えられる。
- (4) 乾湿繰返しによる耐凍害性の低下に対しても適切な量と質の気泡を連行することで凍害劣化を抑制することは可能であ

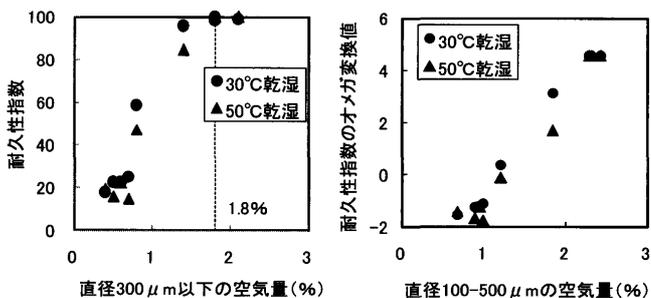


図 17 直径 300μm 以下の空気量と耐久性指数の関係 (シリーズ 4)      図 18 直径 100～500μm の空気量と耐久性指数(オメガ変換値)の関係 (シリーズ 4)

るが、一般的に推奨されているよりもやや大きめの気泡径の空気量が必要であり、特に直径100～500μmの区間空気量が多いほど有効といえる。

謝辞 本研究の一部は、Center for Concrete Corea (韓国)の支援を受けている韓国・延世大学の助成により行ったものである。記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) T.C.Powers : The air requirement frost-resistant concrete, Proceedings of Highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949
- 2) J.E.Backstrom, R.W.Burrows, R.C.Mielenz and V.E.Orgin : Evaluation and effects of the air void system in concrete. Part 2-Influence of type and amount of air-entraining agent, UJournal of the American Concrete Institute, 55, pp.261-272, 1958
- 3) J.Stark and B.Wicht (太田利隆, 佐伯昇訳) : コンクリートの耐久性[第2版], セメント協会, 2003
- 4) M.Pigion, R.Pleau and P.C.Aitcin : Freeze-thaw durability of concrete with and without silica fume in ASTM C 666(Procedure A) test method: Internal cracking versus scaling, Cement, Concrete and Aggregates, 8(2), pp.76-85, 1986
- 5) M.Pigion, J.Prevoist and J.M.Simard : Freeze-thaw durability vs freezing rate, Journal of American Concrete Institute, 82(5), pp.684-692, 1985
- 6) 浜幸雄, 濱田英介, 千歩修, 水澤史紀 : 高強度・高流動コンクリートの耐凍害性に及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, 2002
- 7) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄 : 乾湿繰返しに及ぼすコンクリートの耐凍害性への影響とその劣化メカニズムに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.607, pp.15-22, 2006
- 8) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄 : 乾燥による硬化セメントペーストのナノ構造変化と耐凍害性への影響, コンクリート工学論文集, Vol.19, No.12, pp.21-34, 2006
- 9) 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空隙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, No.487, pp.1-9, 1996
- 10) 浜幸雄, 太田宏平 : フレッシュコンクリートの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報告集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004
- 11) 笠井芳夫, 小林正几編著 : セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, pp.245-266, 1993
- 12) 田口玄一 : 実験計画法, 丸善, 1977
- 13) 鈴木四朗, 近藤保 : 入門コロイドと界面の科学, 三共出版, 1997
- 14) 濱幸雄, 小林和寛, 青野義道, 柴田純夫 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.845-850, 2006
- 15) 相川葉月, 千歩修, 長谷川拓哉, 酒井正樹 : 実環境を考慮した乾湿繰返しが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.28, No.1, pp.899-904, 2006

(2008年6月26日原稿受理, 2008年8月29日採用決定)