

コンクリートの耐凍害性および気泡組織制御に関する研究

1.材料施工-2.モルタル・コンクリートの物性-f.凍害  
気泡組織, 耐凍害性, 気泡間隔係数, 気泡径分布, 浮力法

正会員 ○太田宏平\*1 同 田畑雅幸\*3  
同 三高信吾\*1 同 浜 幸雄\*4  
同 平野彰彦\*2

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性の確保には AE 剤により連行される気泡の質が重要で、気泡間隔係数 (以下 SF) を 250 μm 以下とし、直径 300 μm 以下の微細気泡量が多いことが望ましいとされている<sup>1)</sup>。また最近の研究では高強度コンクリートにおいても気泡の質の重要性が指摘されている<sup>2)</sup>。空気量に影響を及ぼす要因については多くの研究がなされているが、気泡の質に影響を及ぼす要因についてはあまり研究がなされていない。

気泡組織の測定方法としては、硬化コンクリートを用いた ASTM C 457 に準じたリニアトラバース法が行われているが、多大な労力と時間を要することから、近年フレッシュコンクリートを用いた測定方法として浮力法が開発された。リニアトラバース法では気泡弦長を測定し、「全ての気泡は同じ大きさで、セメントペースト全域に等間隔の立体格子状に並んでいる」という仮定に基づいて SF を算出しているが、実際には様々な大きさの気泡が存在する。浮力法であれば個々の気泡直径を測定でき、新たな気泡組織パラメータとして気泡径分布を得ることができる。

本研究では高強度コンクリートを対象として、SF・気泡径分布などの気泡組織変動に影響を及ぼす要因について検討するとともに、耐凍害性に及ぼす SF の影響の重要性を確認し、気泡径分布の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験計画および方法

2.1 実験概要

表 1 に実験計画表を示す。実験 1～実験 4 ではモルタルで SF・気泡径分布などの気泡組織変動に及ぼす各種要因について検討した。実験 5 ではモルタルで、実験 6 ではコンクリートで耐凍害性を検討した。

セメントは OPC ( $\rho = 3.14\text{g/cm}^3$ )、細骨材は登別産陸砂 (表乾密度= $2.67\text{g/cm}^3$ 、粗粒率= $2.70$ 、吸水率= $1.52\%$ )、粗骨材は敷生川水系安山岩砕石 (表乾密度= $2.67\text{g/cm}^3$ 、粗粒率= $6.64$ 、吸水率= $1.83\%$ ) と

し、表 2 に示す化学混和剤を使用した。

2.2 モルタル実験

本実験では気泡組織を浮力法<sup>3)</sup>により測定した。なお実験 1 で既往のコンクリートによる実験結果<sup>3)</sup>をもとに、コンクリート調合から粗骨材を除いた調合のモルタルによる測定結果と、コンクリートによる実験結果を比較し、本実験では全てモルタルにより実験した。

表 1 実験計画表

備考	検討要因	水準など
Mor.	消泡剤使用量 [実験1]	・0.00、0.004、0.02% [C×wt.(%)] ※コンクリートとの比較も兼ねる
	練温 [実験2]	・10、15、20℃
	混練時間 [実験3]	・1、3、5分 (かき落し後の混練時間)
	細骨材粒度 [実験4]	・JIS標準粒度範囲の上限、平均、下限に 粒度を調整した骨材※ ・5.0-2.5、2.5-1.2、1.2-0.6、0.6-0.3、 0.3-0.15mmの単粒度骨材 ※粗粒率: 上限2.00、平均2.67、下限3.33
	耐凍害性 圧縮強度 [実験5]	・JIS標準粒度範囲の上限、平均、下限に 粒度を調整した骨材を用いたモルタル ・5.0-2.5、1.2-0.6、0.3-0.15mmの単粒度骨材で 目標空気量を4.0%としたモルタル
Con.	耐凍害性 [実験6]	・目標空気量を2.0、5.0、7.0%としたコンクリート

表 2 化学混和剤の種類および記号

記号	化学混和剤種類	主成分
SB	高性能AE減水剤	基本タイプ
SX		
X		低空気連行タイプ
XD		
A	AE剤	アルキルエーテル
R	消泡剤	ポリアルキレングリコール

表 3 モルタルの調合

備考・記号	W/C (%)	Air (%)	化学混和剤 [C×wt.(%)]				
			SB	SX	XD	A	R
実験1・2	35	4.0	0.9	-	-	-	-
			0.9	-	-	0.0005	0.02
		2.0	0.9	-	-	-	0.004
			0.9	-	-	-	0.008
			0.9	-	-	-	0.02
			-	0.9	-	-	-
		6.0	-	0.9	-	0.004	-
		4.0	-	0.8	-	0.001	0.02
		6.0	-	0.8	-	0.002	0.02
		2.0	-	0.9	-	-	0.004
-	-	-	0.9	0.002	-		
実験5	4.0	-	-	-	0.9	0.002	-
			-	-	0.9	0.002	-
			-	-	0.9	0.016	-
			-	-	0.9	0.0021	-
			-	-	0.9	-	0.025
			-	-	0.9	-	0.025

A Study on Frost Resistance and Control of Air Void System of Concrete

OTA Kohei et al.

混練は JIS R 5201 に準じて行い、JIS A 1148-2001A 法（水中凍結水中融解）に準じた凍結融解試験および圧縮強度試験を行った。凍結融解試験開始前の養生条件は、2週水中養生（以下 2w）および2週水中養生後4週 40℃乾燥（以下 2w4w）の2水準とした。表3にモルタルの調合を示す。

2. 3 コンクリート実験

混練は強制2軸練りミキサを用い、フレッシュコンクリートにおいて浮力法による気泡組織測定を行い、養生後に JIS A 1148-2001A に準じた凍結融解試験を行った。凍結融解試験開始前の養生条件は、標準条件の2週水中養生（以下 2W）および乾燥の影響を考慮した2週水中養生後4週 60℃乾燥（以下 2W4W）の2水準とした。

表4にコンクリートの調合表および練り上がり性状を示す。水セメント比は全て35%、目標空気量は2.0、5.0、7.0%の3水準とし図1のように化学混和剤を使用することで調整した。

3. 実験結果および考察

3. 1 モルタル実験

(1)コンクリートとの比較・消泡剤の影響[実験1]

図2にコンクリートとモルタルの気泡組織測定結

果を比較して示す。モルタルはコンクリートよりも空気量が小さく SF が大きい、相対的な傾向には差は見られない。図3に消泡剤使用量と直径 300 μ m 以下の気泡の割合（以下 A300）の関係を示す。使用量の増加に伴い A300 は減少し、混和剤の種類によっても A300 の程度に違いが見られる。

(2) 練温の影響 [実験2]

図4に練温 20℃と 10℃の気泡組織を比較して示す。10℃の温度上昇で空気量は 20~30%減少するといわれているが<sup>4)</sup>、本実験では気泡組織に差は見られなかった。

(3) 混練時間の影響 [実験3]

図5に混練時間と気泡組織の関係を示す。混練時間に伴い、空気量は増加し SF は小さくなっている。5分練りでは A300 も増加している。空気量は混練時間3分程度で最高となり、その後は減少するといわれているが<sup>4)</sup>、本実験ではその傾向は見られなかった。

(4) 細骨材粒度の影響 [実験4]

図6に標準粒度範囲内で粒度を調整した骨材および単粒度骨材を用いた場合の空気量と A300 の関係を示す。標準粒度範囲内においても、粗粒率が小さ

表4 コンクリートの調合および練り上がり性状

試験体記号	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	質量(kg/m <sup>3</sup> )			化学混和剤 [C×wt.(%)]				練り上がり性状					
					C	S	G	X	XD	A	R	練温(°C)	空気量(%)	スランプ(cm)	フロー(mm)		
X-2	35	2.0	44.3	172	489	725	913	0.90	—	—	0.005	21.7	2.3	24.6	530×455		
X-5a		5.0		177	504	747	941			—	—	22.0	5.1	24.9	480×480		
X-5b		5.0		177	504	747	941			0.002	0.005	23.6	5.4	24.0	430×405		
X-7		7.0		180	514	762	960			0.006	0.005	22.8	7.9	24.5	540×520		
XD-2		2.0		172	489	725	913			—	—	23.6	1.5	24.7	600×580		
XD-5a		5.0		177	504	747	941			—	0.90	0.002	—	23.8	4.6	24.6	510×480
XD-5b		5.0		177	504	747	941			0.004	0.004	21.8	4.7	25.1	615×520		
XD-7	7.0	180	514	762	960	0.004	—	22.2	7.1	24.9	505×515						

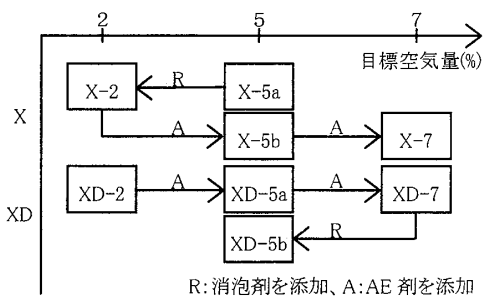


図1 化学混和剤の使用方法

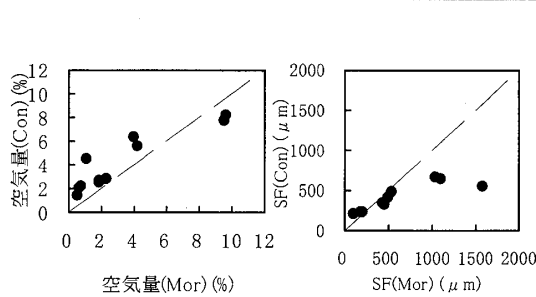


図2 コンクリートとモルタルの気泡組織の比較

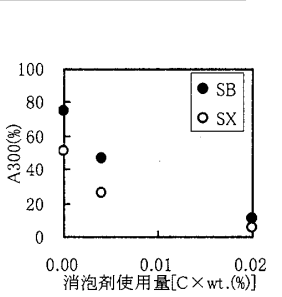


図3 消泡剤使用量と A300 の関係

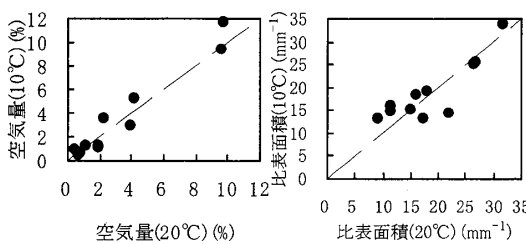


図4 練温 20℃と 10℃の気泡組織の比較

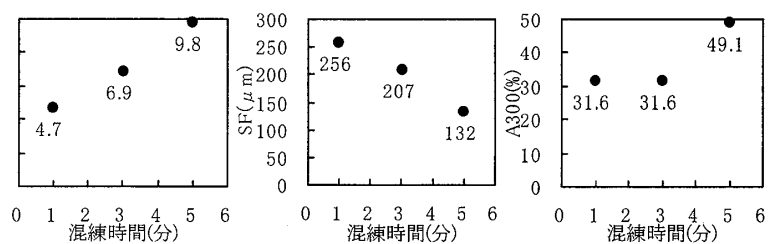


図5 混練時間と気泡組織の関係

くなるに連れて空気量連行性は高くなる。粒径 0.6 ~ 0.15mm の骨材の空気連行性が高く、0.6 ~ 0.15mm の骨材を用いた空気量の大きいモルタルは A300 が低いのに対し、5.0 ~ 1.2mm の骨材を用いた空気量の小さいモルタルは A300 が高い。図 7 に実験 1、4 のモルタルの空気量と A300、SF の関係を示す。空気量の減少に伴い A300 は、実験 1 では減少し、実験 4 では増加している。また実験 4 では、空気量の減少に伴う SF の増加幅が小さい。粗粒率を大きくして空気量を小さくした場合には、消泡剤で空気量を小さくした場合よりも微細気泡を多く保持している。

(5) 耐凍害性および圧縮強度の検討 [実験 5]

表 5 に凍結融解試験を行ったモルタル試験体の気泡組織測定結果および圧縮強度を、図 8 に凍結融解試験から得られる耐久性指数と SF の関係を示す。SF に関わらず、乾燥により全ての試験体が著しく劣化した。粒度調整骨材を使用したものでは、従来からいわれているように空気量が多く SF が小さいものほど劣化は抑制された。空気量が同程度で SF に差をもたせた単粒度骨材を使用したものでは、SF が大きいものほど劣化を免れた。調合一定で空気量が同程度であるにも関わらず圧縮強度に約 2 倍の差があることが原因と考えられる。練り上がり性状や写真 1 に示す劣化した試験体の様子からも、材料分離などの試験体作製時の問題によるものと考えられる。

3. 2 コンクリート実験

表 6 に浮力法による気泡組織の測定結果および耐久性指数 (以下 DF) を、図 9 に空気量および SF と DF の関係を示す。一般に耐凍害性が確保できるとされている、SF が 250 μm 以下の試験体であっても乾燥による劣化は免れず、気泡組織よりも凍融試験前の乾燥による影響の方が大きいことがわかる。2W において XD-2 のみが著しく劣化した。同程度の空気量および SF を有する X-2 は劣化せず、この原因を空気量および SF だけから説明することは困難である。

図 10 に浮力法によって得られた気泡径分布図を示す。XD-2、X-2 において気泡径分布に差があり、目標空気量が 5.0% と 7.0% の場合にも同様に差が確認できる。また耐凍害性の確保には直径 300 μm 以下の微細気泡量が多いことが望ましいとされていることから、気泡径分布が耐凍害性に及ぼす影響を明らかとするために、気泡径の範囲別に区間空気量を算出し単回帰分析を行った。なお直線回帰を行うため、DF はオメガ変換値 (以下 DF') を用いた。

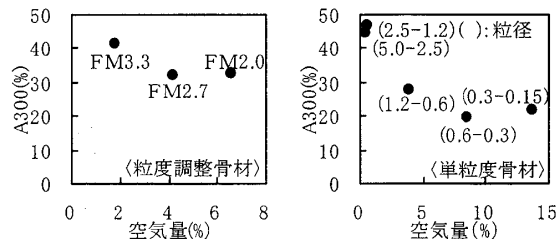


図 6 粒度調整骨材および単粒度骨材を用いた場合の空気量と A300 の関係

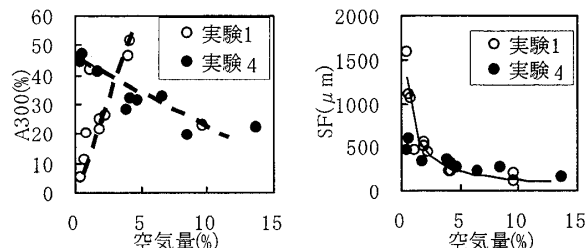


図 7 実験 1、4 モルタルの空気量と A300、SF の関係

表 5 凍融試験を行った試験体の気泡組織および圧縮強度

記号	気泡組織測定結果				圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	空気量 (%)	比表面積 (mm <sup>-1</sup> )	気泡間隔係数 (μm)	A300 (%)	
FM2.0	6.6	20.5	226	33.3	46.2
FM2.7	4.2	19.3	297	31.0	54.3
FM3.3	1.8	24.6	335	44.4	61.3
PS5.0	5.7	30.0	166	64.9	41.9
PS1.2	4.6	16.3	366	23.9	52.5
PS0.3	4.0	12.4	470	12.5	80.0

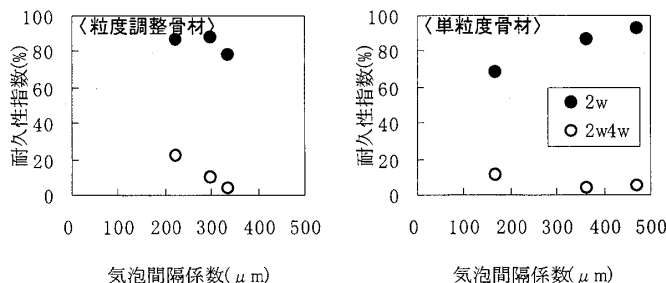


図 8 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

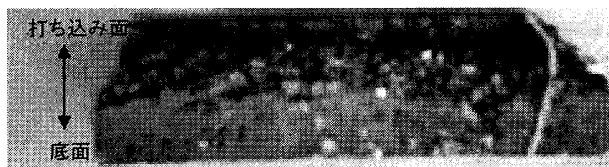


写真 1 深さ方向で劣化状況の異なる試験体(PS5.0、2w4w、120cy.)

表 6 浮力法による気泡組織の測定結果および耐久性指数

記号	空気量 (%)	300 μm 以下の空気量 (%)	比表面積 (mm <sup>-1</sup> )	気泡間隔係数 (μm)	耐久性指数 DF (%)	
					2W	2W4W
X-2	1.5	0.3	15.6	586	94.7	8.5
X-5a	3.3	1.1	19.3	331	104.0	22.1
X-5b	3.8	1.2	20.0	299	94.8	15.0
X-7	5.4	2.3	24.5	209	94.1	13.0
XD-2	1.0	0.3	18.9	569	48.7	8.5
XD-5a	3.3	1.0	19.0	338	95.9	9.3
XD-5b	3.2	1.4	23.8	274	97.0	12.3
XD-7	5.5	2.1	22.1	228	93.4	13.3

表7に2Wおよび2W4Wの区間空気量とDF'との相関係数を示す。両者ともに直径300~500 $\mu\text{m}$ の空気量との相関が最も高く、300~500 $\mu\text{m}$ の気泡量が多いほど耐凍害性に優れているといえる。このことから、空気量やSFの他に気泡径分布も耐凍害性に影響する一つの指標と成り得ると考えられ、今後更なる浮力法による気泡径分布データの蓄積により、耐凍害性に影響を及ぼす気泡径の範囲をより明確にしていく必要がある。

4. まとめ

- (1) 消泡剤使用量の増加に伴い、直径300 $\mu\text{m}$ 以下の微細気泡の割合は減少する。
- (2) 粗粒率の大きな細骨材を用いて空気量を小さくしたモルタルは、消泡剤で空気量を小さくしたモルタルよりも微細気泡を多く有する。
- (3) 乾燥によりモルタルの耐凍害性は著しく低下する。
- (4) JIS標準粒度範囲内の細骨材を用いたモルタルは気泡間隔係数が小さいものほど耐凍害性に優れる。
- (5) 同一調合のモルタルでも細骨材を単粒度で用いると圧縮強度に大きな差を生じる。
- (6) 高強度コンクリートは、気泡間隔係数が250 $\mu\text{m}$ 以下であっても乾燥により耐凍害性が著しく低下する。
- (7) 耐凍害性に及ぼす影響は、直径300~500 $\mu\text{m}$ の気泡量が最も大きく、気泡径分布も指標と成り得る。

【参考文献】

- 1) J. Stark, B. Wicht: コンクリートの耐久性、第2版、社団法人セメント協会 (2003)
- 2) 浜幸雄、濱田英介、千歩修、友澤史紀: 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 (2002)
- 3) 太田宏平、平野彰彦、浜幸雄: 浮力法によるフレッシュコンクリート中の気泡組織の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 609-610 (2004)
- 4) 日本材料学会: コンクリート混和材料 (2004)

【謝辞】

本実験を行うにあたり、北海道職業能力開発大学の平野ゼミの方々および本学卒論生の阿部君に多大な御協力を頂きました。ここに付記して感謝の意を表します。

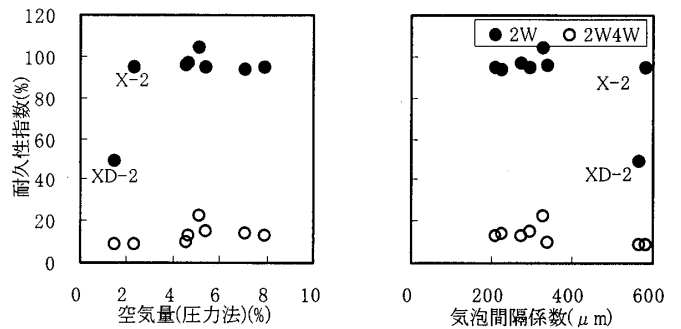


図9 空気量および気泡間隔係数と耐久性指数の関係

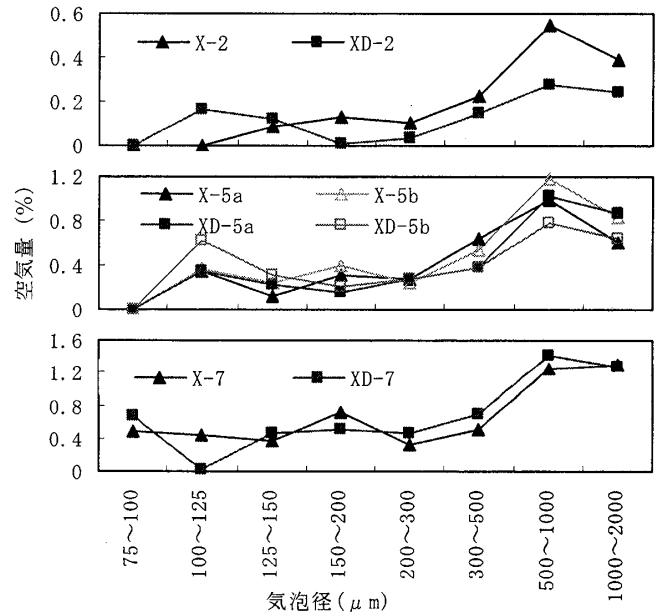


図10 浮力法によって得られた気泡径分布

表7 区間空気量と耐久性指数: DF' との相関係数

直径 (μm)	2000	1000	500	300	200	150	125
75	.409	.437	.388	.306	.244	.185	.219
100	.477	.531	.516	.442	.380	.337	.364
125	.437	.484	.450	.347	.257	.097	
150	.466	.528	.521	.437	.326		
200	.487	.572	.603	.537			
300	.474	.567	.617				
500	.420	.522					
1000	.299						

(2W)  
[表中の値は相関係数:R]

直径 (μm)	2000	1000	500	300	200	150	125
75	.504	.557	.540	.435	.401	.321	.377
100	.551	.625	.640	.527	.493	.364	.354
125	.516	.585	.591	.454	.405	.166	
150	.544	.631	.673	.544	.505		
200	.540	.644	.726	.522			
300	.538	.665	.825				
500	.444	.561					
1000	.315						

(2W4W)  
[表中の値は相関係数:R]

- |                         |   |
|-------------------------|---|
| *1 室蘭工業大学大学院            | *1 Graduate School, Muroran Institute of Technology     |
| *2 北海道職業能力開発大学校 教授      | *2 Prof., Hokkaido Polytechnic College                  |
| *3 北海道職業能力開発大学校 教授・工博   | *3 Prof., Hokkaido Polytechnic College, Dr.Eng          |
| *4 室蘭工業大学工学部 助教授・博士(工学) | *4 Assoc.Prof., Muroran Institute of Technology, Dr.Eng |