

論文 空気量調整剤の添加が超高強度コンクリート中の気泡の形状と寸法および流動性に与える影響

峯 竜一郎*1・松田 拓*2

要旨: 空気量調整剤の添加が超高強度コンクリートおよびモルタルの流動性に及ぼす影響の確認を目的とし、AE 剤と消泡剤の添加量を変化させ、空気量の異なる試料を作製し、フレッシュ試験を行った。その結果、コンクリートおよびモルタルのどちらも、空気量が同程度であっても、AE 剤と消泡剤のどちらも添加しない試料に比べ両方を添加した試料の流動性が低下する傾向を示した。そこで、空気量調整剤添加による気泡の形状と寸法の変化に着目し、光学顕微鏡を用いて硬化モルタル試料の断面観察を行った。その結果、AE 剤を添加したモルタルは、形状のいびつな気泡が増加しており、このことが流動性低下の要因の一つと考えられた。

キーワード: 超高強度コンクリート, 空気量, 流動性, 空気量調整剤, いびつな気泡

1. はじめに

高強度コンクリート中の空気量は、AE 剤や消泡剤といった空気量調整剤を添加もしくは両者を併用することで制御されている¹⁾。しかし、それらの添加による流動性への影響は、使用材料、調合条件によって異なり、とりわけ超低水結合材比条件のコンクリートに関する報告は少ない。そこで、本研究は水結合材比 (W/B) が 12% の超高強度コンクリートおよびモルタルを対象に、AE 剤と消泡剤の添加量を変える、もしくは両者を併用することで、空気量を変化させたコンクリートとモルタルのフレッシュ試験を行った。その結果、空気量が同程度の条件で「AE 剤と消泡剤を添加した試料」と「AE 剤と消泡剤どちらも無添加の試料」とを比較すると、流動性は前者が後者よりも低下する傾向となった。この原因を解明するため、光学顕微鏡を用いて硬化モルタル断面の画像解析を行い、気泡の形状と寸法の違いが流動性に与える影響について考察した。

2. 使用材料および調合

表-1 に使用材料、表-2 にコンクリートおよびモルタルの調合条件を示す。コンクリートは著者らが開発した $F_c=220\text{N/mm}^2$ 級超高強度コンクリート²⁾とした。

W/B=12%, 結合材 (B) としてシリカフェームプレミックスセメント (SFPC) とフライアッシュ (FA) (JIS I 種相当品)、細骨材はフェロニッケルスラグ (FNS)、粗骨材 (G) は最大粒径 20mm の硬質砂岩砕石とした。高性能減水剤 (SP) の添加量は、コンクリートは $B \times 1.9\%$ 、モルタルは $B \times 2.3\%$ にそれぞれ統一し、AE 剤 (AE) および消泡剤 (AF) の量を増減させることでコンクリートおよびモルタルの空気量を変化させた。なお、モルタル

の調合における V_s/V_p はコンクリートの調合における $V_s/V_p=44\%$ と同じとした。

表-1 使用材料

名称	種類	物性等	記号
セメント	シリカフェーム	密度: 3.04	SFPC
	プレミックスセメント	比表面積: $6690\text{cm}^2/\text{g}$	
細骨材	フェロニッケルスラグ細骨材	密度: 2.98 粗粒率: 2.60	FNS
粗骨材	砕石2005 (硬質砂岩)	密度: 2.62 実績率: 62.1%	G
水	工業用水	-	W
混和材	フライアッシュ (JIS I 種相当品)	密度: 2.40 比表面積: $5300\text{cm}^2/\text{g}$	FA
化学混和剤	高性能減水剤 (I 種)	ポリカルボン酸系	SP
	空気量調整剤	AE剤	アルキルエーテル系
		消泡剤	エステル脂肪酸系

表-2 コンクリートおよびモルタルの調合条件

種別	記号	W/B [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m^3]				目標空気量 [%]	目標スランプロー [cm]	
				W	B		FNS			G
					SFPC	FA				
コンクリート	CON-1	12	55	135	900	225	729	549	3.0	70
	CON-2									
	CON-3									
	CON-4									
	CON-5									
	CON-6									
	CON-7									
	CON-8									
モルタル	MOR-1	-	-	169	1127	282	905	-	-	-
	MOR-2									
	MOR-3									
	MOR-4									

*1 三井住友建設 技術本部 技術研究所 修士(工学) (正会員)

*2 三井住友建設 技術本部 技術研究所 博士(工学) (正会員)

3. 実験概要

3.1 コンクリート

コンクリートの練混ぜは強制2軸ミキサを使用し、水と化学混和剤以外の材料を投入して30秒攪拌後に水と化学混和剤を投入し、15分間練混ぜた。全調合において練混ぜ量は45Lとした。練混ぜ完了後、フレッシュ試験を行った。空気量の測定はJIS A 1128に準拠した。また、CON-8においてメーカーの推奨する添加量の範囲よりも多くAE剤を添加したところ、空気量を大幅に増大させたコンクリートを製造することができた。そのコンクリートをフレッシュ試験後にミキサに戻し、消泡剤を後から外割りに添加(20倍液に希釈)して3分間練り混ぜて作製したコンクリートをCON-8'とした。

3.2 モルタル

モルタルの練混ぜについてはモルタルミキサを用いた。SFPC、FAおよびFNSを投入し30秒空練りした。その後、水と化学混和剤を入れ低速で5分、高速で11分の計16分間練混ぜた。全調合において練混ぜ量は5Lとした。練混ぜ完了後、フレッシュ試験を行った。また、5章で後述する硬化後の断面観察用の円柱供試体(φ50×H=100mm)の採取を行った。モルタルフローは0打フローとし、空気量はモルタルエアメータを用いて測定を行った。円柱供試体は20℃封かん養生とした。

4. 実験結果

4.1 コンクリートのフレッシュ試験結果

表-3にフレッシュ性状試験結果を示す。CON-8の空気量については、空気量測定時にエアメータの検針が目盛り最大値である10%を超えたため、目盛りの間隔と目測から空気量を13%と読んだ。表中には硬化した円柱供試体(90℃封かん養生材齢7日)の密度から算出した空気量も併記した。硬化後の空気量はフレッシュ時の空気量と比較すると、おおむね同程度であった。図-1に空気量とスランプフローの関係、図-2に空気量と50cmスランプフロー到達時間の関係を示す。AE剤により空気量を13%まで大幅に増加させたCON-8および、CON-8に消泡剤を後添加することで空気量を減らしたCON-8'を除いたデータを見ると、空気量とスランプフローの関係と空気量と50cmスランプフロー到達時間の関係に相関は認められず、スランプフローは69.0~77.3cm、50cmスランプフロー到達時間は10秒以内となった。AE剤で空気量を大幅に増加させたCON-8を見ると、CON-1~CON-7に比べ、スランプフロー値は小さく50cmスランプフロー到達時間は長いことから、流動性が低下している。また、AE剤と消泡剤のどちらも添加していないCON-1とAE剤と消泡剤の両方を添加したCON-8'を比べると、両者の空気量は同程度だが、スランプフロー値

表-3 コンクリートのフレッシュ試験結果

記号	化学混和剤添加量			フレッシュ試験結果				硬化後密度から算出した空気量 [%]	
	SP [B×%]	AE [B×%]	AF [B×%]	練上がり温度 [°C]	スランプフロー [cm]	50cmスランプフロー到達時間 [sec]	空気量 [%]		
CON-1	1.90	-	-	30.0	76.8	5.17	4.8	5.1	
CON-2			0.0010	30.0	76.8	7.98	3.2	3.4	
CON-3			0.0004	29.0	75.3	8.32	4.1	4.5	
CON-4			0.0050	29.5	75.8	7.22	2.8	2.9	
CON-5			0.0500	30.9	76.3	8.04	2.4	2.9	
CON-6			0.0020	30.9	75.5	6.09	2.9	3.3	
CON-7			0.01	0.0500	30.3	77.3	6.87	2.6	-
CON-8			0.10	0.0050	28.5	69.0	11.97	13.0	10.6
CON-8'			0.10	0.0140	27.7	70.8	16.54	4.6	4.5

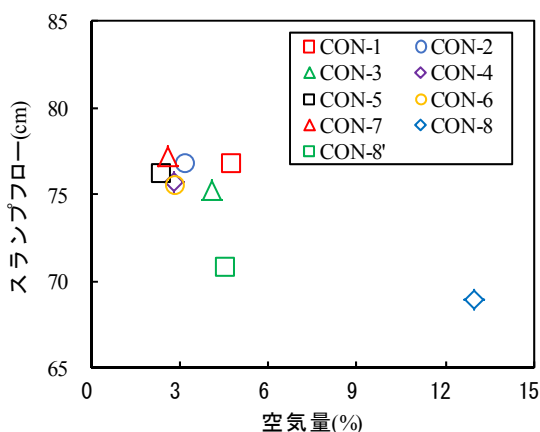


図-1 空気量とスランプフローの関係

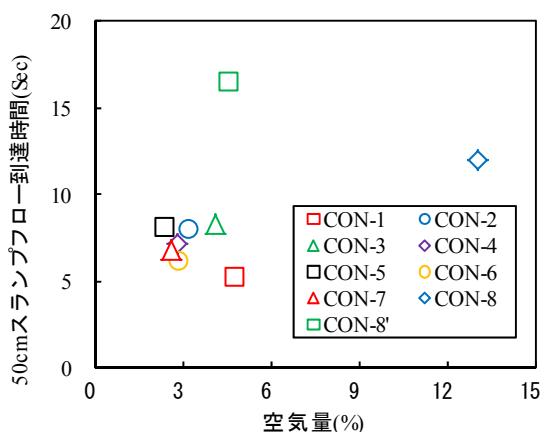


図-2 空気量と50cmスランプフロー到達時間の関係

は CON-8' の方が小さく、50cm スランプフロー到達時間は CON-8' の方が長い。すなわち、CON-8' は CON-1 よりも流動性が低い実験結果となった。

4.2 モルタルのフレッシュ試験結果

表-4 にモルタルのフレッシュ試験結果を、図-3 に空気量とモルタルフローおよびスランプフローの関係を示す。図-3 にはコンクリートのフレッシュ結果 (CON-1, CON-5, CON-8, CON-8') も併せてプロットした。AE 剤と消泡剤をどちらも添加していない MOR-1 と AE 剤と消泡剤を両方添加した MOR-4 を比較すると、空気量は同程度であったが、MOR-4 のフロー値が小さくなった。コンクリートと同様に空気量が同程度であっても、AE 剤と消泡剤を両方添加した試料の流動性が低下する結果となった。

一般に、AE 剤を添加するとコンクリート中に微細な気泡が連行され、これが流動性の向上に寄与するために、

ワーカビリティが改善されると言われている³⁾。そうであるならば、「AE 剤と消泡剤を添加した試料」は「AE 剤と消泡剤どちらも無添加の試料」に比べ、微細な気泡が多いために流動性が高くなると推察される。実際に、後述する図-7 に示すように、前者 (MOR-4) に比べ後者 (MOR-1) の微細な気泡 (25~250 μm) は少ない結果となっている。しかしながら、図-3 に示したように本研究の範囲では空気量が同程度でも、AE 剤と消泡剤を添加したほうがどちらも添加しないものに比べ流動性が低くなり、前述の通説のみではこの理由を説明できないと考えられた。この理由については AE 剤の添加量が多いために減水剤の減水効果が低下している可能性や、AE 剤や消泡剤を添加することで気泡形状が変化すること等が考えられる。本論文では、AE 剤と消泡剤の添加による気泡の形状と寸法の変化に着目し、次章において画像解析による検討を実施することとした。

表-4 モルタルのフレッシュ試験結果

記号	化学混和剤添加量			フレッシュ試験結果			
	SP [B×%]	AE [B×%]	AF [B×%]	モルタルフロー [cm]	空気量 [%]	単位容積質量 [t/m ³]	練上がり温度 [°C]
MOR-1	2.30	0.00	0.00	23.6	5.9	2.45	30.7
MOR-2		0.00	0.02	26.2	3.8	2.50	28.5
MOR-3		0.05	0.00	20.8	12.0	2.28	31.3
MOR-4		0.05	0.02	19.4	5.0	2.47	30.2

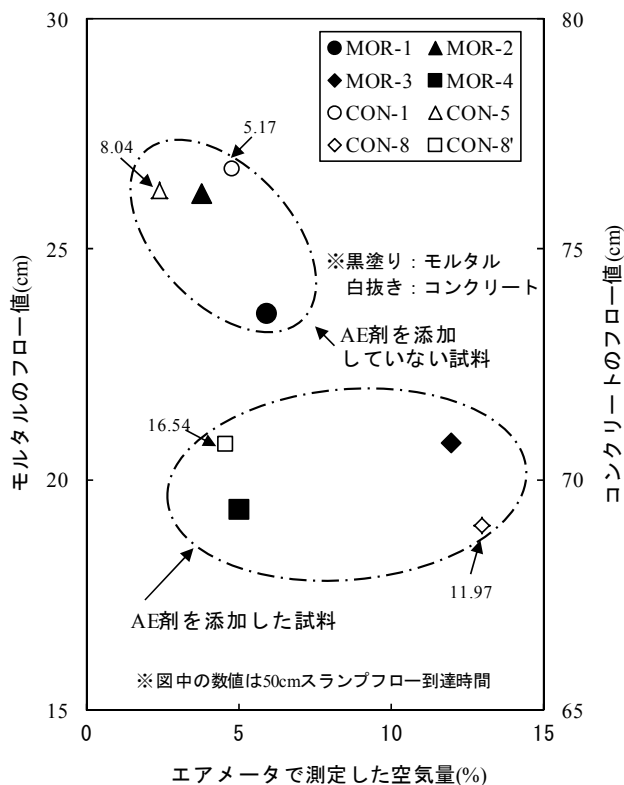


図-3 空気量とモルタルフローおよびスランプフローの関係

5. 光学顕微鏡を用いた硬化モルタル中の気泡観察

5.1 観察方法

画像解析には光学顕微鏡を用い、対象とした試料は4章で前述したモルタル円柱供試体である。観察は図-4 に示す光学顕微鏡 (キーエンス社製 VHX-5000) を用いた。観察画像に対して付属のソフトを用いて2値化処理を行い、各気泡の最大寸法、最小寸法、面積を個別データとして取得した。なお、各気泡の画像は1画素を最小単位とした画素の集合体である。また、最大寸法と最小寸法は、各気泡画像のそれぞれの輪郭画素の中心点から任意の2点間距離が最大および最小となる長さである。本実験においては倍率20倍で観察を行い、モルタル断面の画像 (約4cm×4cm) を得た。

一般に、硬化コンクリートの断面の気泡に着目した2値化画像を取得する場合、コンクリートの観察断面に黒色インキを含浸させ、白色微粉末を気泡空隙部分に充填し、2値化処理を行う⁴⁾。本実験で作製した超高強度モルタルはセメントペースト部が黒色に近いので、黄色のシーリング材 (1成分形変性シリコーン系) を気泡空隙部分に充填させ着色することで2値化画像を得た。観察用の試料は円柱供試体 (φ50×H=100mm) の中間部をコ



図-4 光学顕微鏡

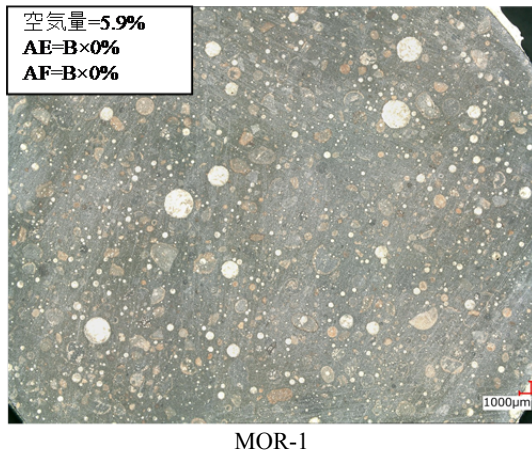


図-5 硬化モルタルの2値化処理前画像

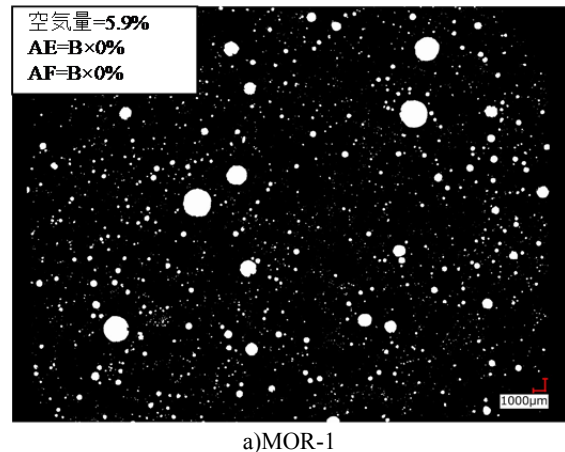
ンクリートカッターで厚さ 20~30mm に切断し、表面の研磨と洗浄を行った。次に、切り出した試料の観察面にシーリング材を塗布し、気泡空隙部分に充填させた。その後、サンドペーパーで研磨を行い、表面の気泡空隙以外に付着しているシーリング材を除去し、観察用試料とした。観察画像は 1600×1200 画素であり、1 画素は約 9.6 μm×9.6 μm とした。なお、2 値化のしきい値は測定者が目視で決定し、気泡以外の空隙と判断した部分については手動で除去した。

5.2 観察結果

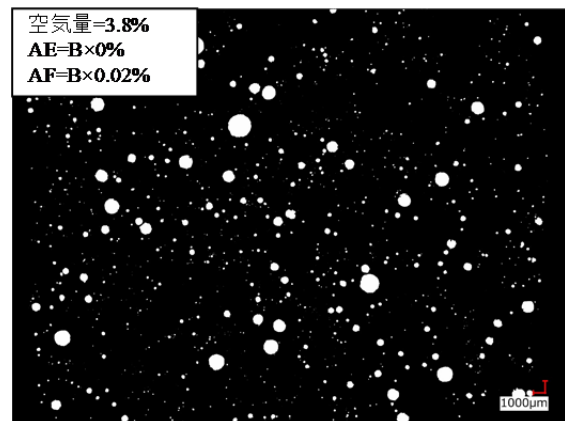
図-5 に示す MOR-1 の 2 値化前の画像を見ると、断面の空隙に充填されたシーリング材や骨材が明瞭に判別でき、かつ広範囲の画像が観察出来ている。図-6 に示す MOR-1~MOR-4 の 2 値化後の画像を比較すると、AE 剤と消泡剤の添加量の違いによる気泡の大きさや数が異なる様子を観察できる。なお MOR-1 と MOR-2 はどちらも AE 剤を添加していない（すなわち微細な気泡を連行させていない）にもかかわらず気泡は独立した球形で、粗大で不整なものは見当たらない。これは、本実験の調合が超低水結合材比であり、普通強度のコンクリートに比べ、比較的粘性が高いためであると推察されるが、今後調合の範囲を広げて確かめる予定である。

5.3 気泡径分布

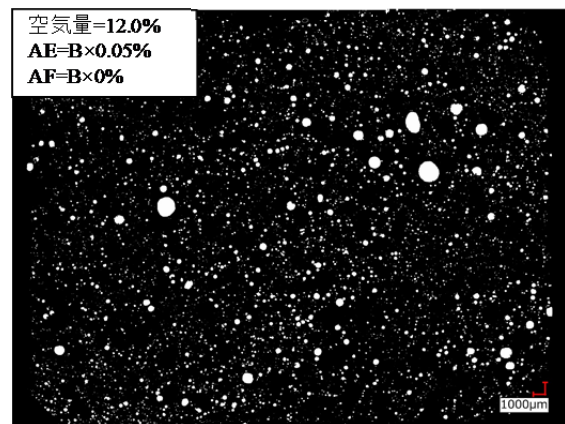
画像解析より取得した気泡データを整理した。図-7 に超高強度モルタルの気泡径分布を示す。各気泡径は最大寸法と最少寸法から算出した平均径とした。空気量は面積法¹⁾より算出した。なお、20 μm 以下の気泡は内圧が高まり溶解する²⁾と考えられていることから、検討時に除外した。図-7 横軸の各気泡径範囲の中心値は気泡径を 50 μm 単位で範囲を区切り、その範囲の空気量の総和を中心値にプロット（たとえば、気泡径 51~100 μm の場合、75 μm）している。MOR-3 は 25~250 μm の範囲の空気量が多いが、これは AE 剤の空気連行作用によるものと考えられる。また、AE 剤と消泡剤を添加していな



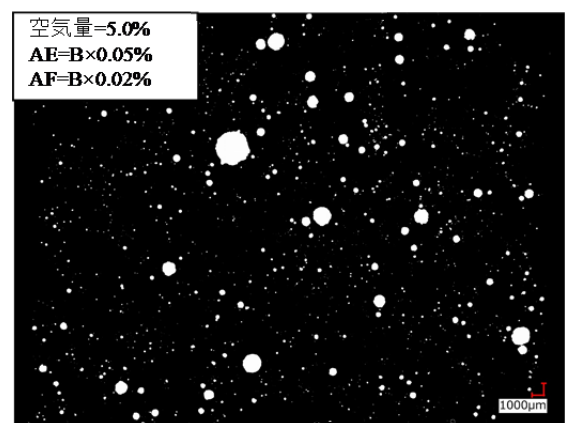
a)MOR-1



b)MOR-2



c)MOR-3



d)MOR-4

図-6 硬化モルタルの2値化処理後画像

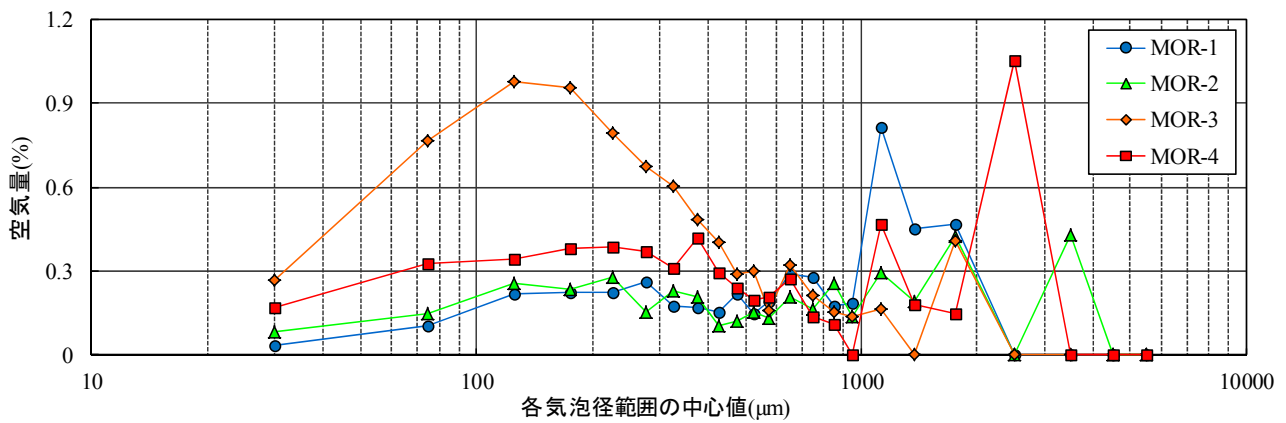


図-7 硬化モルタルの気泡径分布

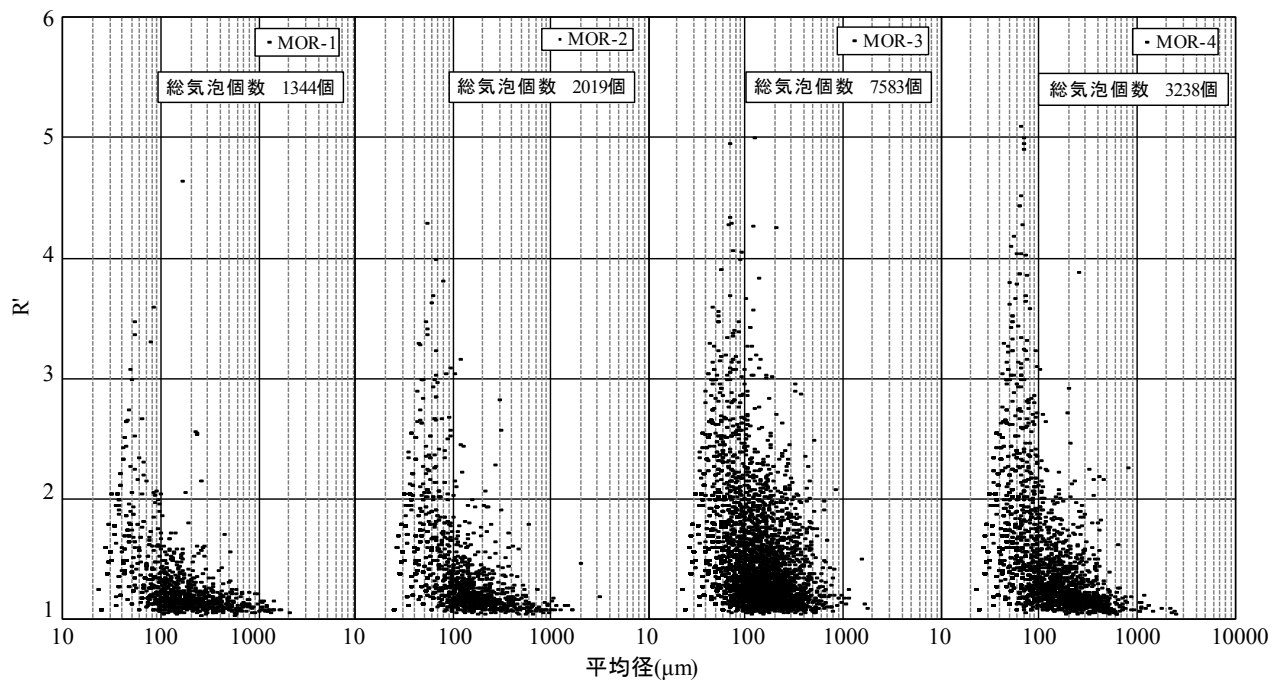


図-8 平均径とR'の関係

い MOR-1 とフレッシュ時の空気量は同程度だったが、MOR-4 の方が $250\ \mu\text{m}$ 以下の微細な気泡が若干ではあるが多い結果となった。

5.4 気泡形状のいびつさの評価

ここでは、空気量調整剤の影響による気泡形状の違いを確認するため、2 値化した各気泡の画像を用いて形状のいびつさの評価を試みた。西らは気泡形状のいびつさの評価に円形度を用いている⁹⁾が、本実験では 5.1 で前述した最大寸法および最小寸法を用いて以下に示す R' を定義した。

$$R' = \text{最大寸法} / \text{最小寸法} \quad (1)$$

R' は気泡形状のいびつさを表す指標である。すなわち、 R' の値が大きいほど気泡の形状がいびつであり、1 に近づくほど円形に近いと仮定した。図-8 に平均径と R' の関係を示す。一般的にエントレインドエアと言われている $25 \sim 250\ \mu\text{m}$ ¹⁾ の範囲に着目し、MOR-3 を見ると、

AE 剤を添加したことで $250\ \mu\text{m}$ 以下の気泡個数が増大しているが、 R' の値の大きいものが増える傾向が見られた。

次に、AE 剤と消泡剤を添加していない MOR-1 と、AE 剤と消泡剤を添加した MOR-4 を比較すると、MOR-4 は $250\ \mu\text{m}$ 以下の気泡個数が MOR-1 と比べ多いが、 R' の値が大きいものも多く、比較的形状のいびつな気泡が多い傾向が見られた。すなわち、AE 剤と消泡剤を両方添加した結果、 $250\ \mu\text{m}$ 以下の微細な気泡は増加したが、流動性の低下に寄与すると推察される形状のいびつな気泡も増加したため、流動性が低下したと考察する。

次に、気泡の中で流動性の向上に寄与する形状の丸さの度合い（すなわち、いびつでない度合い）、およびその寸法について、以下に示す手順で気泡径の範囲を区切って検討を行った。

- (1) 平均径の $20\ \mu\text{m}$ 以下の気泡データを除去する。
- (2) $20 \sim 250\ \mu\text{m}$ の気泡径の範囲で $50\ \mu\text{m}$ 単位で範囲を

区切り、各範囲の空気量（たとえば、 $Air_{20\sim50\mu m}$ ）の総和を算出する。

- (3) R' の範囲を1~1.10, 1~1.15, 1~1.20のように0.05単位で区切り、その範囲内の気泡面積の量の総和（たとえば、 $Air'_{20\sim50\mu m}$ ）を算出する。
- (4) 各気泡径の範囲における気泡面積の総和に対する(3)で求めた気泡面積の総和の比率（たとえば $Air'_{20\sim50\mu m}/Air_{20\sim50\mu m}$ ）を算出する。
- (5) 各気泡径の範囲ごとに、(4)で求めた比率とモルタルフローの関係を直線回帰し、寄与率 (R^2 値) を求める。

検討結果を表-9に示す。気泡径範囲が100 μm 以下では寄与率が低くなった。また、 R' の範囲を広げると、寄与率が低くなる傾向が見られた。気泡径151~200 μm の範囲で $1\leq R'\leq 1.15$ の場合の寄与率が0.923と最も高くなった。すなわち、気泡径151~250 μm の範囲で $1\leq R'\leq 1.15$ の気泡は流動性向上に寄与すると考えられる。図-10に最も相関性のあった $Air'_{151\sim200\mu m}/Air_{151\sim200\mu m}$ とモルタルフローの関係を示す。フレッシュ時の空気量が同程度だった MOR-1 と MOR-4 に着目すると、MOR-1はMOR-4に比べて151~200 μm の範囲の空気量中の $1\leq R'\leq 1.15$ の空気量の割合が10%程度大きくなった。

以上の結果から、少なくとも本研究で実施した実験の範囲において、気泡の形状は流動性に影響するものと考えられる。すなわち超高強度コンクリートでは、

- (1)形状が円形に近い気泡は流動性の向上に寄与する。
- (2)形状のいびつな気泡は流動性の低下に寄与する。
- (3)AE 剤を添加することで微細な気泡は増加するが、

形状のいびつな気泡も増加するものと考えられた。今後、調合条件の範囲や空気量調整剤の種類を広げて検討することで、本考察の一般性を確かめる予定である。

6. まとめ

空気量調整剤の添加が超高強度コンクリートの流動性に及ぼす影響について以下の知見を得た。

- (1)空気量が同程度であっても、AE 剤と消泡剤のどちらも添加しない試料に比べ AE 剤と消泡剤の両方を添加した試料の流動性が低下した。この傾向はコンクリートおよびモルタルのどちらも同様だった。
- (2)画像解析によって各気泡の最大寸法および最小寸法のデータを取得し、その比率を用いて気泡形状のいびつさを評価し、気泡形状の流動性への影響の評価を試みた。
- (3)AE 剤の添加により微細な気泡が増加したが、同時に形状のいびつな気泡が増加する傾向が見られた。このことから、形状のいびつな気泡の増加が流動性低下の要因の一つと考えられた。

表-9 気泡径と R' それぞれの範囲を区切ることで求めたモルタルフローの寄与率

R' の範囲	気泡径範囲 (μm)				
	20~50	51~100	101~150	151~200	201~250
$1\leq R'\leq 1.10$	0.706	0.377	0.232	0.751	0.482
$1\leq R'\leq 1.15$	0.148	0.325	0.558	0.923	0.636
$1\leq R'\leq 1.20$	0.133	0.108	0.671	0.695	0.640
$1\leq R'\leq 1.25$	0.068	0.227	0.550	0.748	0.543
$1\leq R'\leq 1.30$	0.099	0.196	0.649	0.684	0.603
$1\leq R'\leq 1.35$	0.106	0.215	0.670	0.567	0.499
$1\leq R'\leq 1.40$	0.133	0.165	0.625	0.625	0.572
$1\leq R'\leq 1.45$	0.188	0.132	0.625	0.600	0.471
$1\leq R'\leq 1.50$	0.325	0.142	0.639	0.551	0.447

※寄与率の高さ：緑→黄→赤

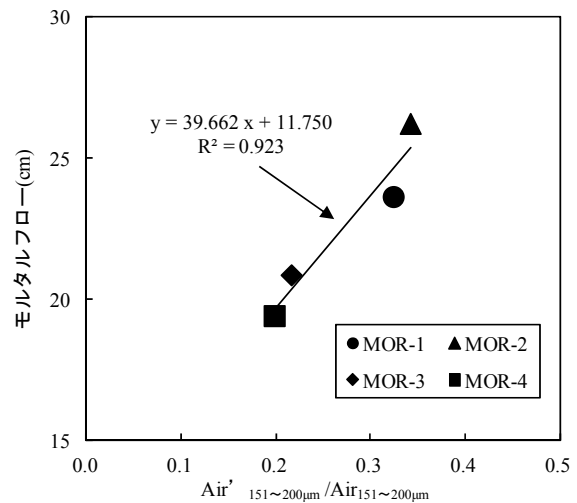


図-10 $Air'_{151\sim200\mu m}/Air_{151\sim200\mu m}$ とモルタルフローの関係 ($1\leq R'\leq 1.15$)

謝辞 本研究は太平洋セメント(株)、日本シーカ(株)、大太平洋金属(株)、SMC プレコンクリート(株)に協力頂きました。また、東京大学野口貴文教授、東京理科大学兼松学教授にご助言いただきました。感謝いたします。

参考文献

- 1)公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告集,2016,6
- 2)松田拓ほか：実機ミキサによる超低収縮・超高強度コンクリートの製造およびその品質に関する検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.38,No1,pp.1449-1454,2016
- 3)日本建築学会：高性能 AE 減水剤コンクリートの調査・製造および施工指針・同解説,1999,2
- 4)たとえば古東秀文ほか：モルタルの低倍率画像から得られる気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応,セメント・コンクリート論文集,Vol.69,2016,6
- 5)西祐宜ほか：凍結融解作用による劣化抵抗性を改善した疎水性化合物系乾燥収縮低減剤の諸特性,日本建築学会構造系論文集,第79巻,pp.191-200,2014,2