

粉体系高流動コンクリートの空気量や流動性評価指標が表面気泡性状に及ぼす影響

一宮一夫¹・出光隆²・山崎竹博³

¹正会員 博(工) 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科(〒870-0152 大分市大字牧 1666)

²フェロー会員 博(工) 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

³正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

本研究は、粉体系の高流動コンクリートの空気量ならびに流動性を表す指標が表面気泡の発生に及ぼす影響を解明するために行った。まず、空気連行性のないナフタリン系の高性能減水剤にAE剤を併用した場合と、空気連行性のあるポリカルボン酸系の高性能AE減水剤に消泡剤を併用した場合で、空気量と表面気泡の関係を比較した。次に、粗骨材ならびにコンクリート内部の気泡を球状の剛体と仮定し、それらに作用する流体抵抗にモルタル相のレオロジー一定数の影響を考慮し、各粒子に作用する浮力、重力、流体抵抗の力のつり合いから粗骨材の沈降と内部気泡の上昇の各現象を説明した。その結果から、表面気泡の型枠からの離脱現象が、上記の作用力と型枠との付着力のつり合いで説明できることを示した。

Key Words: self-compacting concrete, surface void, concrete product, air content, rheological constants

1. はじめに

コンクリート打設作業時の騒音・振動問題の解決や省力施工を実現する方法として、近年、高流動コンクリートの使用が注目されている¹⁾²⁾。それは、高流動コンクリートが、締固めを行わなくても鉄筋や鋼材が密に配置された型枠の隅々にまで運ばれる特徴を有しているからであるが、その一方で見掛けの粘性が高いために打設時などに巻き込んだ空気が抜けにくく、型枠面に気泡として現れる場合がある。このような気泡は表面気泡と呼ばれ、ある程度以上存在すると表面の美観を損ないコンクリート製品などでは商品価値を低下させたり、凍結融解作用下では劣化の始点となり耐久性にも影響する³⁾。

表面気泡の発生要因は、(a)コンクリート、(b)混和剤、(c)はく離剤、(d)製造法に大別でき、それぞれ(a)にはコンクリートの材料、配合、スランプフローや空気量などの物性、(b)には混和剤の表面張力、はく離剤との界面張力、消泡剤の使用量、(c)にははく離剤ならびに界面活性剤の種類、(d)には型枠の形状や材質、打込み高さや速度、微振動による締固めなどがある⁴⁾。

本研究では、上記の表面気泡の発生要因のうち、コンクリートの空気量ならびに流動性の評価指標に注目

し、それらと表面気泡の関係について検討した。

空気量と表面気泡の関係は、高性能減水剤や高性能AE減水剤(以下、ともにSPと略記する)の主成分の種類や空気連行方法の違いが表面気泡の大きさや量に及ぼす影響から検討した。

一方、流動性評価指標のスランプフローは、表面気泡の発生要因の中で最も影響が大きなものの一つで、スランプフローを大きくすると表面気泡は少なくなることが知られている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。しかし、工学量のスランプフローだけではコンクリート中の気泡の移動現象を十分に評価できないことから、降伏値と塑性粘度の2つのレオロジー一定数を用いた⁸⁾。まず、コンクリート中の粗骨材と内部気泡の移動現象がモルタルのレオロジー一定数で説明できることを確認した。次に、その結果からモルタルのレオロジー一定数を考慮した流体抵抗、浮力、コンクリートの液相の表面張力に起因する型枠との付着力などの表面気泡に作用する力のつり合いからコンクリートの流動性と表面気泡の大きさの関係を説明した。

なお、本論文ではコンクリートの液相の表面張力には骨材が影響しないことを考慮して、コンクリートの液相の表面張力をペーストの表面張力と表記した。ま

た、表面気泡の評価対象面は、理論値が水平型枠上面（型枠傾斜角度 0° ）、実験値が垂直型枠面（型枠傾斜角度 90° ）であるが、筆者らの既往の研究において、型枠傾斜角度が $0^\circ\sim 110^\circ$ であれば表面気泡性状はほぼ同じと考えてよいことを確認している⁹⁾。

2. 基礎理論

(1) SPの主成分ならびに空気量調整方法が表面気泡特性に与える影響

SPで最も多く使用されているポリカルボン酸系SPは¹⁰⁾、それ自体に空気連行性があり、空気量を少なくする際には消泡剤の添加量を増加させる。しかし、現在のところコンクリート用消泡剤の規格はなく、作用メカニズムにも不明な点がある。その添加量は、種類により異なり、セメント量に対して0.0001~0.1%と少量であるため、コンクリートの流動性および硬化後の強度や変形性能などの一般的な物性に与える影響はほとんどないと考えられるが、表面気泡に与える影響は明かでない¹¹⁾。

また、蒸気養生するコンクリート製品にはナフタリン系SPが使用される。それは、蒸気養生の際の熱でコンクリート内部の気泡が膨張する恐れがあり、空気連行性がない方が有利なためである。なお、耐凍害性が求められる場合は、AE剤を添加して空気量を3~6%とする。

以上のように、ペーストの特性はSPの主成分、空気量調整剤の種類、両者の組合せなどで異なり、それに伴い表面気泡性状も影響を受けると考えられる。

(2) ペーストの表面張力と内部気泡ならびに表面気泡の直径

図-1に、高流動コンクリート内部の気泡（以下、内部気泡という）とそれに作用する内力を示す。なお、図では気泡内外の圧力差を Δp （以下、内圧差という）、ペーストの表面張力を γ_L 、内部気泡の直径を d_v で示している。そして、内部気泡の直径 d_v は、内部気泡を図のa-aの位置で2分割したときの右半分に作用する内圧差の合力 $(\pi d_v^2/4)\Delta p$ と、切断面の円周に作用する表面張力の合力 $\pi d_v \gamma_L$ が等しいので式(1)で表すことができる¹²⁾。

$$d_v = \frac{4\gamma_L}{\Delta p} \quad (1)$$

ここに、 Δp : 内部気泡の内圧差(Pa)

γ_L : ペーストの表面張力(N/mm)

d_v : 内部気泡の直径(mm)

それに対して、表面気泡は、図-2のように接触角 θ_c 、

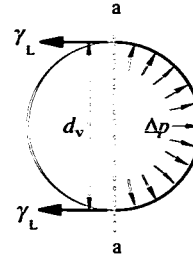


図-1 内部気泡の直径と作用する内力

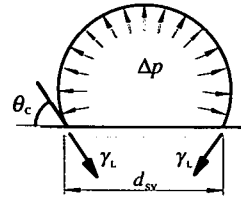


図-2 表面気泡の直径と作用する内力

表-1 表面気泡の直径と内圧差、表面張力
($\theta_c=90^\circ$ の場合)

Δp (Pa)	γ_L (N/mm)		
	73	55	35
5	$d_{sv}=60\text{mm}$	$d_{sv}=44\text{mm}$	$d_{sv}=28\text{mm}$
10	30	22	14
50	6	4.4	2.8
100	3	2.2	1.4
500	0.6	0.4	0.3
1000	0.3	0.2	0.1
2000	0.15	0.11	0.07
4000	0.08	0.06	0.04

で型枠に吸着されるために、表面気泡直径 d_{sv} は θ_c を考慮した内圧差の合力と表面張力の合力のつり合いから式(2)のように表される。すなわち、表面気泡の場合も γ_L が低いほど d_{sv} が小さくなる。

$$d_{sv} = \frac{4\gamma_L \sin \theta_c}{\Delta p} \quad (2)$$

表-1は、式(2)で d_{sv} を計算した結果である。計算は、蒸留水、ポリカルボン酸系SP、AE剤の各表面張力に相当する $\gamma_L=73, 55, 35\text{N/mm}$ の場合について $\theta_c=90^\circ$ として行った。表よりSPやAE剤を使用して γ_L が低下すると d_{sv} も小さくなり、特に、美観に影響すると考えられる直径の大きな表面気泡ほど d_{sv} の減少量が大きく、 γ_L の低下にともなう表面気泡の低減効果が大きいと言える。

(3) 高流動コンクリート中の粗骨材ならびに内部気泡の移動に関する一般条件

粗骨材を球状の剛体, 高流動コンクリートのモルタルをビンガム流体と仮定し, さらにブリーディングが生じない条件では, 粗骨材には図-3の左図に示すような力が作用し, その沈降現象は降伏値 τ_y と塑性粘度 η_p の2つのレオロジー定数で説明できる。

図中の粗骨材に作用する重力 F_G , 浮力 F_B , 流体抵抗 F_R は次の式(3)-(6)で計算した。

$$F_G = \frac{\pi \cdot d_g^3}{6} \rho_g g \quad (3)$$

$$F_B = \frac{\pi \cdot d_g^3}{6} \rho_m g \quad (4)$$

$$F_R = 3\pi d_g^2 \left(\frac{v_g \cdot \eta_p}{d_g} + \alpha \tau_y \right) \quad (5)$$

$$F_R = 3\pi d_g^2 \left(\frac{v_g \cdot \eta_p}{d_g} + \frac{7\pi \cdot \tau_y}{24} \right) \quad (6)$$

ここに, F_G : 重力 (N)

F_B : 浮力 (N)

F_R : 流体抵抗 (N)

d_g : 粗骨材の直径 (mm)

ρ_m : モルタルの密度 (g/mm^3)

ρ_g : 粗骨材の密度 (g/mm^3)

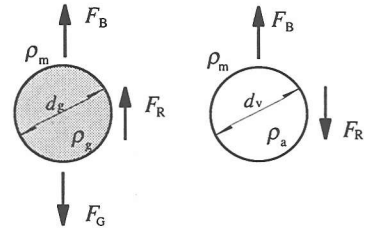
v_g : 粗骨材の沈降速度 (mm/s)

η_p : モルタルの塑性粘度 (Pas)

τ_y : モルタルの降伏値 (Pa)

式(5)は, 非圧縮性ビンガム流体中を直径 d_g の球体が速度 v_g で運動するときの流体抵抗を説明したもので, Ansley式と呼ばれる。式(5)中の α は, ビンガム数 $N_b = (d_g / \nu_g)(\tau_y / \eta_p)$ の関数で, 理想的なビンガム流体での平均的な実測値は $\alpha = 7\pi / 24$ である。これを式(5)に代入すると式(6)を得る。この関係は, 球引上げ式粘度計の測定原理としても用いられており, コンシステンシーが比較的小さいペースト, モルタル, コンクリートなどのレオロジー定数を精度良く算定できる¹³⁾。

一方, 内部気泡の上昇現象も, 式(3)(4)(6)の粗骨材直径 d_g を内部気泡直径 d_i に置き換えれば粗骨材と同じ仮定で説明できる。しかし, 空気の密度 ρ_a はモルタルの密度 ρ_m に比べて極めて小さいため重力 F_G を無視すると, 内部気泡に作用する力は図-3右図のように F_B と F_R となる。



粗骨材沈降時 内部気泡上昇時

図-3 粗骨材と内部気泡に作用する力

(4) モルタルの降伏値と粗骨材ならびに内部気泡の移動条件

粗骨材がコンクリート中で静止している時は, 式(6)中の沈降速度は $v_g = 0$ mm/s である。従って, F_R は, モルタルの降伏値 τ_y のみが影響するので式(7)で表すことができる。そして粗骨材とモルタルの材料分離は $F_G > F_B + F_R$ で生じる。

$$F_R = \frac{7\pi^2 d_g^2 \tau_y}{8} \quad (7)$$

高流動コンクリートのモルタルの降伏値は, 工学量であるスランプフローと強い相関関係にある。一般に高流動コンクリートのスランプフローは550mm~700mmであるので, モルタルの降伏値もある範囲に収まる。

スランプフローごとのモルタルの降伏値 τ_y は, コンクリートの降伏値 τ_{yc} から推定した。まず, 小門らの研究を参考に, コンクリートのスランプフロー S_f からコンクリートの降伏値 τ_{yc} を式(8)で計算した¹⁴⁾。

$$\tau_{yc} = \frac{15^2 \rho_c g V^2}{4\pi^2 S_f^5} \quad (8)$$

ここに, τ_{yc} : コンクリートの降伏値 (Pa)

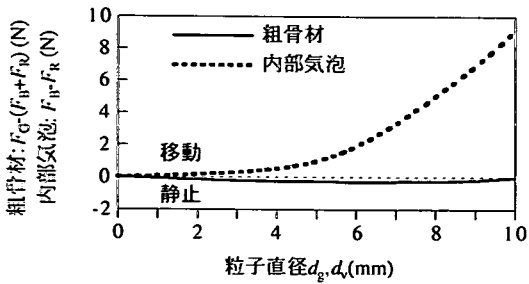
ρ_c : コンクリートの密度 (g/mm^3)

g : 重力加速度 (mm/s^2)

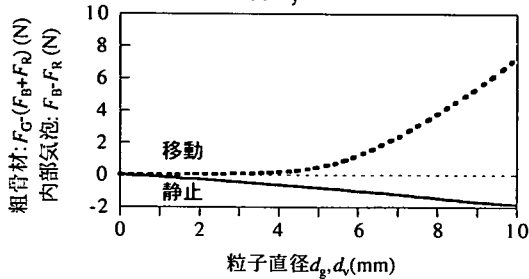
V : スランプコーンの容積 (mm^3)

S_f : スランプフロー (mm)

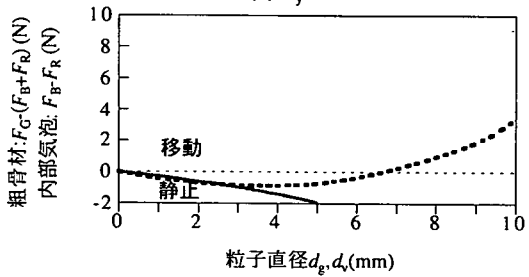
その結果, $S_f = 550, 630, 700$ mm に対するコンクリートの降伏値は $\tau_{yc} = 70.0, 35.0, 20.0$ Pa で, 各降伏値の比率は $S_f = 630$ mm を基準にすると 2:1:0.57 となる。さらに, スランプフロー $S_f = 630$ mm の高流動コンクリートのモルタルの降伏値を $\tau_y = 5.0$ Pa と仮定し, 上記のスランプフローごとのコンクリートの降伏値の比 2:1:0.57 から, $S_f = 550, 630, 700$ mm に対するモルタルの降伏値を



(a) $\tau_y = 2.9 \text{ Pa}$



(b) $\tau_y = 5.0 \text{ Pa}$



(c) $\tau_y = 10.0 \text{ Pa}$

図-4 粗骨材ならびに内部気泡の直径と作用力

$\tau_y = 10.0, 5.0, 2.9 \text{ Pa}$ と推定した。なお、既往の研究によると高流動コンクリートのモルタルの降伏値は $\tau_y = 2.2 \sim 22.0 \text{ Pa}$ であるが、それに比べると上記の推定値は低水準である¹⁹⁾。これは、既往のデータが回転粘度計等で測定した見掛けの降伏値であるのに対し、粗骨材や内部気泡の挙動の説明に必要な真の降伏値はさらに小さな値であることを考慮したためである¹⁹⁾。

計算の結果、モルタルの降伏値に対する粗骨材ならびに内部気泡の直径と作用力の関係は図-4のようになった。なお、モルタルの密度は $\rho_m = 2.3 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ 、粗骨材の密度は $\rho_g = 2.67 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ とした。

まず、図-4(a)のモルタルの降伏値 $\tau_y = 2.9 \text{ Pa}$ の場合は、粗骨材直径 $d_s < 10 \text{ mm}$ での作用力は $F_G - (F_B + F_R) \approx 0$ で、粗骨材はモルタル中で静止する。一方、 $d_s > 10 \text{ mm}$ では $F_G - (F_B + F_R) > 0$ であるため粗骨材はモルタル中を沈降する。また、図-4(b)の $\tau_y = 5.0 \text{ Pa}$ と図-4(c)の $\tau_y = 10.0 \text{ Pa}$ では、粗骨材はモルタル中で静止し、材料分離は生じない。一般に、高流動コンクリートはスランプフローが大きいと

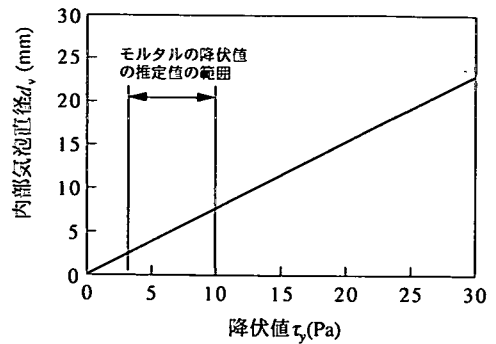


図-5 浮力で上昇可能な内部気泡の最小直径

粗骨材とモルタルが多少分離することもあるが、上記の計算結果はその現象を比較的良く表している。

一方の内部気泡は、 $d_s > 7 \text{ mm}$ であればどの降伏値でも上昇するが、 $d_s < 7 \text{ mm}$ の場合は τ_y により上昇する場合と静止する場合がある。図-5は浮力で上昇する d_s の最小値を示したものであり、 τ_y と d_s は比例関係にあることがわかる。前述のように見掛けの降伏値の範囲は、コンクリートが $\tau_y = 20.0 \sim 70.0 \text{ Pa}$ で、モルタルが $\tau_y = 2.2 \sim 22.0 \text{ Pa}$ である。筆者らがこれまでに種々の条件で製作した高流動コンクリート供試体の内部気泡の大きさは、最大でも $d_s = 10.0 \text{ mm}$ 程度でほとんどの場合はそれ以下であり、モルタルの降伏値の推定値 ($\tau_y = 2.9 \sim 10.0 \text{ Pa}$) での計算値とほぼ同じである。このように、モルタルの降伏値を $\tau_y = 2.9 \sim 10.0 \text{ Pa}$ に仮定すれば高流動コンクリート中の粗骨材や内部気泡の挙動を説明できる。

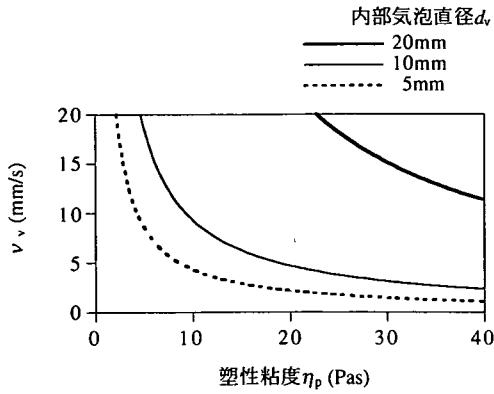
(5)モルタルの塑性粘度と内部気泡の移動速度

内部気泡は、 $F_B > F_R$ の場合にモルタル中を上昇し、その上昇速度 v_b は、式(4)と式(6)のつり合いから式(9)のようになる。

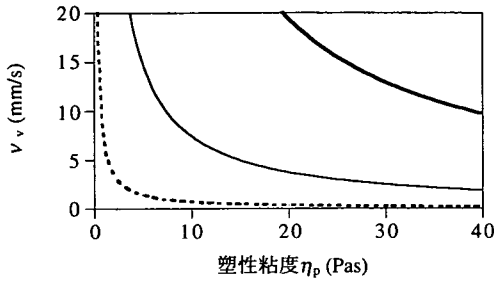
$$v_b = \frac{4d_b^2 \rho_m g - 21\pi d_b \tau_y}{72\eta_p} \quad (9)$$

図-6は、 τ_y ごとの η_p と v_b の関係を示したものであり、モルタルの標準的な塑性粘度に相当する $\eta_p = 1.5 \sim 12.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ では η_p の僅かの違いで v_b は大きく変化する¹⁹⁾。また、 η_p が同じでも τ_y や d_b が違うと v_b は大きく相違する。

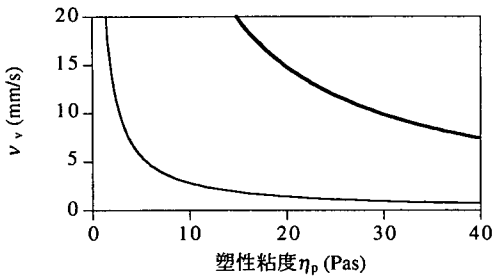
一般に、高流動コンクリート容積の30~35%は粗骨材であり、気泡は粗骨材を迂回して上昇するため、見掛けの上昇速度 v_s は図-6に示す値よりも小さい。つまり、高流動コンクリート中の気泡の量は、モルタルの粘性だけでなく、粗骨材の量や形状寸法などの影響も受ける。このような v_b を低下させる要因の影響を少なくし、気泡を放出しやすくするには、打込み面上昇速度 v_d が v_b より



(a) $\tau_y = 2.9\text{Pa}$



(b) $\tau_y = 5.0\text{Pa}$



(c) $\tau_y = 10.0\text{Pa}$

図-6 塑性粘度と内部気泡の上昇速度

も小さければ良い。図によると実際の製造工場での v_c の実績 $v_c=5.0\text{mm/s}$ では¹⁷⁾、一般的な高流動コンクリートであれば、 $d=10\text{mm}$ 以上の内部気泡は τ_y に関わらず放出され、さらに $\tau_y=2.9\text{Pa}$ 以下であれば $d=5\text{mm}$ の内部気泡でも放出される。また、 $d=5\text{mm}$ 以下の小さな内部気泡は η_p の水準で放出される場合と一端モルタル中に残存したうえで式(9)に従って上昇する場合がある。

(6) 型枠からの表面気泡の離脱条件

表面気泡は、ペーストの表面張力で型枠に吸着されており、図-7に示すように静止流体中の気泡に作用する浮力 F_b 、流体抵抗 F_r に加えて表面張力で付着力 F_s が作用し、さらに F_s は接触角 θ_c によっても異なる。なお、以下では表面気泡の断面形状を図-8に示す記号で表した。

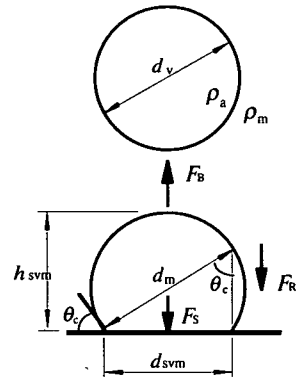


図-7 表面気泡と離脱気泡ならびに表面気泡に作用する力

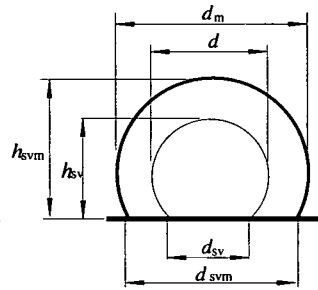


図-8 表面気泡の断面形状を表す記号

表面気泡が型枠から離脱する条件は、 $F_b > F_r + F_s$ であり、そのためには表面気泡はある容積以上でなければならない。つまり、表面気泡の容積にはモルタルの降伏値や接触角ごとに最大値があり、開口部の直径にも条件ごとに上限値がある。これを最大表面気泡直径 d_{svm} とすれば、 d_{svm} は離脱気泡の容積 V_v と離脱時の表面気泡の容積 V_{svm} は等しいこと($V_v = V_{svm}$)と、表面気泡に作用する力のつり合い式($F_b = F_r + F_s$)から求められる。

式(10)~(16)は、 d_{svm} の計算に使用した式である。式(10)は離脱気泡の容積 V_v 、式(11)は離脱時の表面気泡の容積 V_{svm} の計算式である。また、離脱時の表面気泡には、図-7に示すように $d_{svm} = d_m \sin \theta_c$ 、 $h_{svm} = d_m (1 + \cos \theta_c) / 2$ の関係があるので、 $V_v = V_{svm}$ における d_{svm} 、 d_m 、 θ_c の関係を式(12)で表現した。そして、前述のように、表面気泡は $F_b > F_r + F_s$ の時に型枠から離脱するが、 F_b 、 F_r 、 F_s は式(13)(14)(15)で求め、これらの3つの力のつり合いから式(16)を導いた。

図-9に、式(12)と式(16)で計算した θ_c ごとの d_{svm} と τ_y の関係を示す。計算では、モルタルの密度 $\rho_m = 2.3 \times 10^3 \text{g/mm}^3$ 、重力加速度 $g = 9800 \text{mm/s}^2$ 、ペーストの表面張力 $\chi = 73 \text{N/mm}$ とした。図のように、 d_{svm} は τ_y の増加とと

$$V_v = \frac{\pi \cdot d_v^3}{6} \quad (10)$$

$$V_{svm} = \pi \left(\frac{d_{svm} h_{svm}^2}{2} - \frac{h_{svm}^3}{3} \right) \quad (11)$$

$$\frac{d_v \sin^3 \theta_c}{2} - \frac{d_{svm}^3 (1 + \cos \theta_c)^2 (2 - \cos \theta_c)}{8} = 0 \quad (12)$$

$$F_B = \frac{\pi \cdot d_v^3}{6} \rho_m g \quad (13)$$

$$F_R = \frac{7\pi^2}{2} \left(\frac{d_m}{2 \sin \theta_c} \right)^2 \tau_y \quad (14)$$

$$F_S = \pi \cdot d_{svm} \sin \theta_c \gamma_L \quad (15)$$

$$\frac{\pi \cdot d_v^3}{6} \rho_m g - \frac{7\pi^2 \tau_y}{2} \left(\frac{d_m}{2 \sin \theta_c} \right)^2 - \pi \cdot d_{svm} \sin \theta_c \gamma_L = 0 \quad (16)$$

もに大きくなり、その傾向は θ_c が大きいほど顕著である。また、ニュートン流体に相当する $\tau_y = 0.0 \text{ Pa}$ においても $d_{svm} > 0$ となり、 τ_y を小さくしてもある大きさ以下の表面気泡は型枠に吸着されて残存する。

筆者らがこれまでに製作した供試体の表面気泡の接触角は $\theta_c < 90^\circ$ である。また、高流動コンクリートの自己充填性が確保できる最小のスランブフロー $S_f = 550 \text{ mm}$ のモルタルの降伏値を $\tau_y = 10.0 \text{ Pa}$ と仮定すると、高流動コンクリートの表面気泡は、図-9では最も大きなものでも $d_{svm} = 17.0 \text{ mm}$ となる。実際の表面気泡の最大値も同程度であることから、表面気泡の最大直径は、モルタルの降伏値を考慮した表面気泡に作用する力のつり合いで説明できると考えられる。

3. 実験概要

(1) 混和剤の濃度と表面張力

筆者らの研究では、ペーストの表面張力は、練混ぜ後の経過時間で変化しないことがわかっているが¹⁹⁾、混和剤自体の表面張力とペーストの表面張力の関係は不明である。そこでナフタリン系SP、ポリカルボン酸系SP、AE剤の3種類の混和剤を蒸留水で希釈し、濃度と表面張力の関係を調べた。なお、表面張力の測定にはディニューイ式表面張力計を用いた。

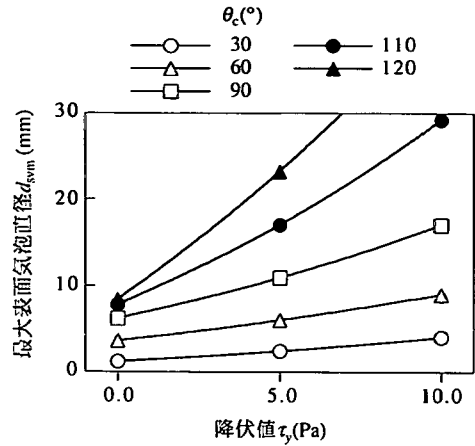


図-9 接触角ごとのモルタルの降伏値と最大表面気泡直径

(2) SPの主成分ならびに空気量調整方法と表面気泡性状

a) 使用材料と配合

高流動コンクリートの配合は粉体系で、粉体容積の60%を高炉スラグ微粉末で置換した。目標スランブフローは630mm、目標空気量はナフタリン系SPの場合は1.5%、5.0%、9.0%、ポリカルボン酸系SPの場合は5.0%と9.0%とした。表-2に使用材料を示す。コンクリートの配合は表-3に示す空気量1.5%を基準配合とし、空気量を増やす場合はナフタリン系SPではAE剤の添加量を増加させ、ポリカルボン酸系SPでは消泡剤添加量を減少させた。

b) 供試体の製作

コンクリートの練混ぜには容量55ℓの水平2軸強制練りミキサーを用い、1回の練混ぜ量は35ℓとした。練混ぜ方法は、骨材と粉体を投入して30秒間の空練りをした後、ミキサーを停止して水とSPを投入して再び120秒間攪拌した。

供試体寸法は、幅300×厚さ80×高さ500mmとし、鋼製型枠で製作した。

はく離剤は、ベースオイルの主成分がパラフィン系炭化水素の市販の油性はく離剤を使用し、コンクリート打設の1時間前に霧吹きと脱脂綿で型枠表面に均一に分布するように丁寧に塗布した。

コンクリートの打ち込みは、型枠の天端位置から行い、連続して90秒間で自己充填させた。

c) 表面気泡の数値化

表面気泡の評価は、300×500mmの面に対して行った。まず、表面気泡のコントラストを明瞭にするために、コンクリート表面をアセトンで洗浄して黒色油性インクを全面に塗布した。インク乾燥後に、図-10の左図

表-2 使用材料

種類	特性	
セメント	I, II	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm^3
高炉スラグ微粉末	I, II	ブレン値6000, 密度 2.91 g/cm^3
細骨材	I	海砂, 密度 2.58 g/cm^3 , FM2.80
	II	海砂, 密度 2.51 g/cm^3 , FM2.90
粗骨材	I	碎石, 最大寸法20mm, 密度 2.73 g/cm^3 , FM6.77
	II	碎石, 最大寸法20mm, 密度 2.67 g/cm^3 , FM7.01
高性能(A E)減水剤	I	ナフタリン系高性能減水剤
	II	ポリカルボン酸系高性能A E減水剤
空気量調整剤	I	A E剤
	II	消泡剤

※ Iはナフタリン系高性能減水剤, IIはポリカルボン酸系高性能A E減水剤を使用した場合

表-3 コンクリートの基準配合

最大寸法(mm)	スラブ厚(cm)	空気量(%)	水粉体比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m^3)					
					W	C	BS	S	G	SP
20	63±3	1.5±0.5	31.6	51.6	178	236	327	826	819	5.9
								804	816	

※ 単位量S,Gの上段はナフタリン系高性能減水剤, 下段はポリカルボン酸系高性能A E減水剤を使用した場合

のように表面気泡部に白色粉末の高炉スラグ微粉末を充填し、デジタルカメラで評価対象面の画像を撮影した。

表面気泡の数値化は、図-10の右図のような表面気泡の二値化画像から、コンクリート面積に対する円換算直径1mm以上の表面気泡の総面積の百分率（以下、表面気泡面積比 A_v という）、最大表面気泡直径 d_{vm} 、表面気泡数 N_v を測定した。

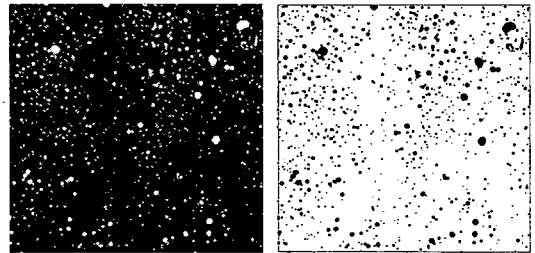


図-10 表面気泡と二値化画像

(3) コンクリートのスランブフローから推定したモルタルのレオロジー定数と表面気泡特性

a) 使用材料と配合

コンクリートには表-2のIに示す材料を使用した。配合は表-3の通りである。

b) 供試体の製作

練混ぜ方法や型枠寸法ならびに材質は、前節と同じである。表面気泡の接触角 θ_c は、はく離剤の種類を変えて調整した。はく離剤には、油性タイプ2種類（ベースオイルのみ、ベースオイルに各種の界面活性剤を添加したもの）と水性タイプの3種類を用いた。

また、打込み面の上昇速度 v_c が表面気泡性状に及ぼす影響を調べることを目的に充填時間90s, 180s, 240sで供試体を製作した。なお、これらの充填時間は、コンクリート打込み面の上昇速度に換算すると、 $v_c=5.6, 2.7, 2.1\text{mm/s}$ となる。

c) 表面気泡の数値化

表面気泡の評価は、前述のように画像解析で行った。表面気泡の接触角 θ_c は、表面気泡ごとの最大深さ h_v と円換算直径 d_v の比 h_v/d_v から表面気泡を球の一部と仮定して計算した。なお、 h_v の測定にはレーザー変位計、 d_v の測定には画像解析を使用した。

4. 実験結果および考察

(1) 混和剤の濃度と表面張力

図-11に混和剤濃度と表面張力の関係を示す。まず、ナフタリン系S Pの表面張力は、溶媒の蒸留水と同じ

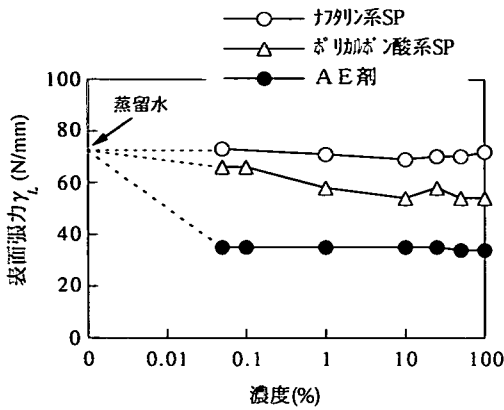


図-11 混和剤の濃度と表面張力

$\gamma_c=73\text{N/mm}$ であるため濃度に関わらず一定である。

一方のポリカルボン酸系 SP を添加した水溶液は、濃度 1% 未満では添加量の対数的な増加に対して表面張力は直線的に低下し、濃度 1% 以上では SP 自体の表面張力 $\gamma_c=54\text{N/mm}$ と同水準で一定である。

一般に、粉体系高流動コンクリートの SP 使用量は、粉体重量に対して 0.5~3.0% である¹⁹⁾。いま、単位粉体量を 550kg/m^3 、単位水量を 175kg/m^3 とすると単位水量に対する SP 濃度は 1.6~9.4% となる。図-11 ではこの範囲の濃度の SP 水溶液の表面張力は、SP 自体の表面張力と同水準であることから、ペーストの表面張力も、使用する SP の表面張力から推定できると考えられる。

また、AE 剤の表面張力は $\gamma_c=35\text{N/mm}$ で、3 種類の混和剤の中で最も小さい。その使用量は、SP よりも更に少なく SP の 10% 程度であるが、ごく少量の添加でペーストの表面張力を低下させる能力を有している。なお、図中には示していないが、SP に AE 剤を添加した場合の表面張力は、AE 剤の表面張力と同じであった。

(2) SP の主成分ならびに空気量調整方法と表面気泡性状

a) ナフタリン系 SP と AE 剤を併用した場合

図-12 に、空気量に対する表面気泡面積比 A_{sv} ならびに最大表面気泡直径 d_{svm} の関係を示す。

まず A_{sv} は、空気量 1.5% のプレーンコンクリートが $A_{sv}=3.8\%$ であるのに対し、AE 剤を添加して空気量を 5.0% にすると $A_{sv}=1.8\%$ に低下した。これは、 γ_c の低下で、表面気泡が小さくなったことが原因と考えられる。しかし、さらに AE 剤の使用量を多くして空気量を 9.0% にすると $A_{sv}=5.2\%$ に増加した。

また、 d_{svm} は空気量 1.5%、5.0%、9.0% に対して $d_{svm}=10.7\text{mm}$ 、 5.5mm 、 10.7mm となり、 A_{sv} 同様に空気量 5.0% で最小となった。このようにプレーンコンクリー

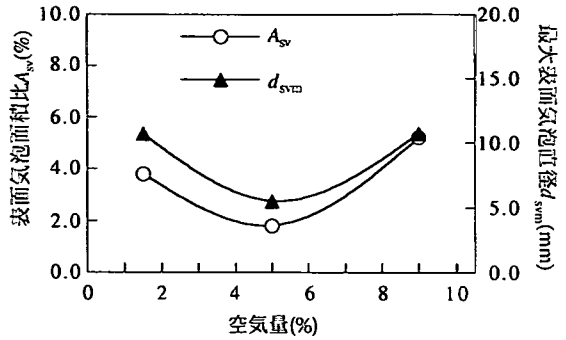


図-12 空気量に対する表面気泡面積比ならびに最大表面気泡直径 [ナフタリン系]

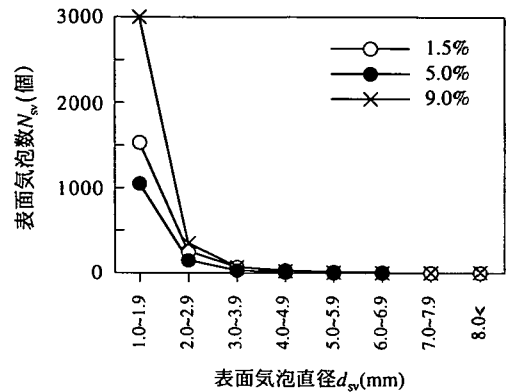


図-13 表面気泡直径ごとの気泡数の分布 [ナフタリン系]

トの $d_{svm}=10.7\text{mm}$ に対して、空気量 5.0% の AE コンクリートでは $d_{svm}=5.5\text{mm}$ に半減したが、ペーストの表面張力が $\gamma_c=73\text{N/mm}$ から $\gamma_c=35\text{N/mm}$ に低下したと一致する。このことより実際の表面気泡の大きさも式(2)で推定できることがわかる。なお、空気量 9.0% で d_{svm} が大きくなった原因は、1) 大量の微細な内部気泡の存在で、練混ぜや打込み時に巻き込んだ美観を損なうような粗大な気泡の上昇が阻害されたこと、2) 気泡相互の間隔が極端に狭くなり、気泡の合一が促進されたこと、3) モルタルの密度低下で気泡に作用する浮力が低下したことなどが考えられる。

図-13 に表面気泡直径 $d_{sv}=1.0\text{mm}$ ごとの表面気泡数 N_{sv} の分布を示す。同図によると、 $d_{sv}=3.0\text{mm}$ 以上の N_{sv} は僅かで、空気量による違いも見受けられない。一方、 $d_{sv}=3.0\text{mm}$ 以下では d_{sv} が小さいほど N_{sv} は増加し、特に空気量 9.0% の場合は $d_{sv}=1.0\text{--}1.9\text{mm}$ の N_{sv} の増加が顕著である。このように、AE 剤を使用して空気量が増えても $d_{sv}=2.0\text{mm}$ 以上の表面気泡数の変化は少ない。

以上のように、ナフタリン系 SP に AE 剤を添加して空気量を 5.0% 程度にすると、表面気泡の発生が抑えられることがわかった。なお、空気量が多いほど $d_{sv}=1.0\text{mm}$

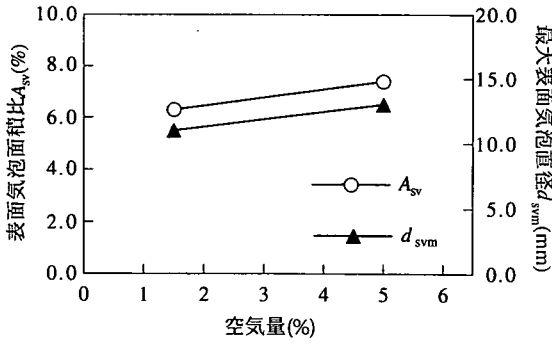


図-14 空気量に対する表面気泡面積比ならびに最大表面気泡直径 [ポリカルボン酸系]

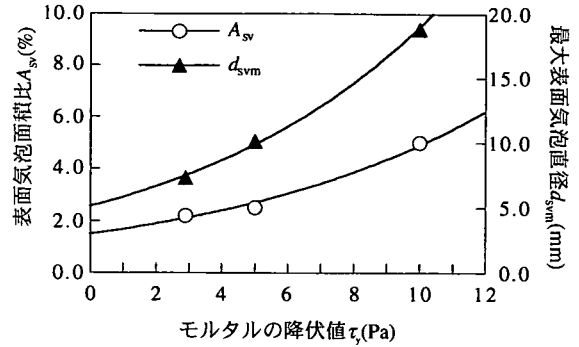


図-16 モルタルの降伏値に対する表面気泡面積比ならびに最大表面気泡直径

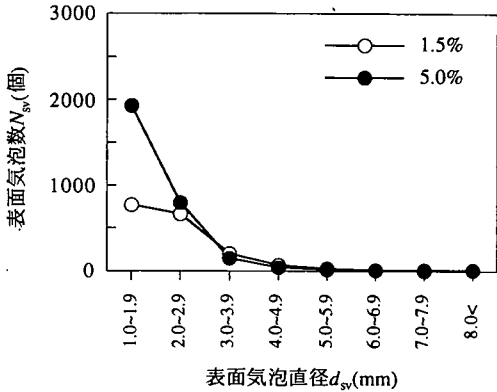


図-15 表面気泡直径ごとの気泡数の分布 [ポリカルボン酸系]

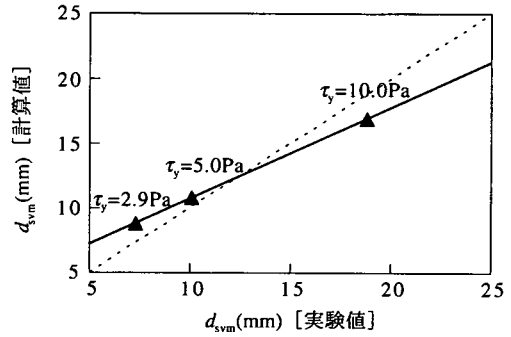


図-17 モルタルの降伏値での最大表面気泡直径の計算値と実験値の比較

以下の微細な表面気泡が多数発生するが、このような微細な表面気泡を美観評価でどのように取り扱うかは別に検討する必要がある。

b) ポリカルボン酸系 S P と消泡剤を併用した場合

図-14に空気量に対する A_{sv} ならびに d_{svm} を示す。図は、空気量1.5%と5.0%の2水準の結果のみであるが、 A_{sv} ならびに d_{svm} は、空気量の水準に関わらずほぼ同じであり、ナフタリン系 S P の場合と異なる。

図-15は直径 $d_{sv}=1.0\text{mm}$ ごとの N_{sv} を示したものであるが、消泡剤を添加して空気量を抑制した空気量1.5%で $d_{sv}=1.0\sim 1.9\text{mm}$ の小さな表面気泡数が減少した。しかし、美観を損なうと考えられる $d_{sv}=2.0\text{mm}$ 以上の表面気泡の発生状況に変化はなく、空気量調節を目的にポリカルボン酸系 S P に消泡剤を添加しても大きな表面気泡の発生を抑えることはできなかった。

以上のように、ナフタリン系 S P に A E 剤を、ポリカルボン酸系 S P に消泡剤を併用して空気量を調整し、空気量の水準と表面気泡の発生との関係を調べた。その結果、表面気泡性状は空気量に直接影響されることなく、ペーストの表面張力が低いほど表面気泡が小さくなるこ

とを確認した。

(3) コンクリートのスランプフローから推定したモルタルのレオロジー定数と表面気泡性状

a) モルタルの降伏値と表面気泡性状

図-16にモルタルの降伏値 τ_y に対する表面気泡面積比 A_{sv} ならびに最大表面気泡直径 d_{svm} を示す。図の横軸の $\tau_y=2.9, 5.0, 10.0\text{Pa}$ は、 $S_f=700, 630, 550\text{mm}$ のモルタルの降伏値の推定値で、 τ_y が小さく流動性が良いほど A_{sv} 、 d_{svm} ともに小さく表面気泡は発生しにくいことがわかる。

また、高流動コンクリートの施工実績によると、スランプフローの推奨値は $S_f=500\sim 700\text{mm}$ で、粉体系の配合の7割以上は $S_f=600\sim 700\text{mm}$ の高流動域にある¹⁶⁾。図によれば、一般的な高流動コンクリートはモルタルの降伏値の点からは表面気泡が発生しにくい配合に区分されるが、特に表面美観が要求される場合は $S_f=700\text{mm}$ 以上にするると良いことになる。

図-17は d_{svm} の計算値と実験値を比較したものである。ただし、表面気泡の接触角 θ は、表面気泡を球の一部と仮定して計算で求めたもので、横軸の実験値は表面気泡の深さ h_v と直径 d_v の比 $h_v/d_v=0.44$ から $\theta=97^\circ$ とな

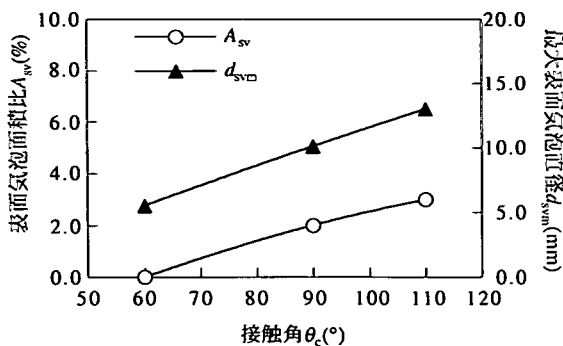


図-18 接触角に対する表面気泡面積比ならびに最大表面気泡直径
[スランブフロー $S_f=630\text{mm}(\tau_y=5.0\text{Pa})$]

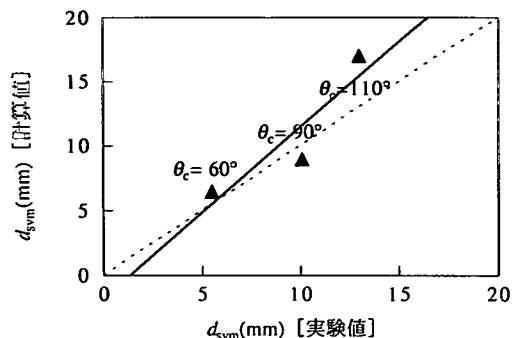


図-19 接触角での最大表面気泡直径の計算値と実験値の比較
[スランブフロー $S_f=630\text{mm}(\tau_y=5.0\text{Pa})$]

るが、一方の縦軸の計算値では計算を簡単にするために $\theta_c=90^\circ$ とした。

図より d_{svm} の実験値と計算値は強い相関関係にあり、 d_{svm} は表面気泡に作用する浮力 F_b 、付着力 F_s 、そしてモルタルの降伏値の影響を考慮した流体抵抗 F_R の3つの力のつり合いで説明できることがわかる。なお図-17において、 $\tau_y=2.9\text{Pa}$ 以下や $\tau_y=10.0\text{Pa}$ 以上では計算値と実験値の差が大きくなるが、前述のように高流動コンクリートのモルタルの降伏値の範囲を $\tau_y=2.9\text{--}10.0\text{Pa}$ と仮定したので、この範囲以外は検討対象ではなく本理論は実用的には十分な適用性があると言える。

その他、図-16の実験結果を指数関数近似で外挿して $\tau_y=0.0\text{Pa}$ での A_{sv} と d_{svm} を推定すると、 $A_{sv}=1.5\%$ 、 $d_{svm}=5.1\text{mm}$ となる。このことから、ニュートン流体のような降伏値がない場合でも、表面気泡は残存することがわかる。 $\tau_y=0.0\text{Pa}$ での d_{svm} の計算値と実測値からの推定値を比較すると、前者は $d_{svm}=6.2\text{mm}$ で、後者は $d_{svm}=5.1\text{mm}$ で両者はほぼ等しいので計算の仮定は正しいと考えられる。

図-18は、 θ_c が異なる場合の A_{sv} ならびに d_{svm} の実験結果である。図の横軸の接触角は $\theta_c=60^\circ$ が水性タイプ、 $\theta_c=90^\circ$ と 110° が油性タイプを使用した場合であり、 h_w/d_w を実測して計算で θ_c を求めた。図のように、 θ_c が小さいほど A_{sv} 、 d_{svm} ともに小さく美観が良い。それは、 θ_c が小さいと表面気泡はコンクリート内部に発生し、表面気泡の開口部が小さくなるためである。なお、水性タイプのはく離剤を使用するとほとんどの表面気泡が開口部がセメントペーストの薄膜で覆われた隠れ気泡となったが、図中の $\theta_c=60^\circ$ は隠れ気泡とはならず開口したものを対象に測定した結果である。

図-19は、 d_{svm} の計算値と実験値を θ_c ごとに比較したものである。この場合も両者には強い相関関係があり、 θ_c が異なる場合も、モルタルの降伏値を流体抵抗 F_R に考慮すれば、表面気泡に作用する力のつり合いで表面気泡の大きさを説明できることを表している。

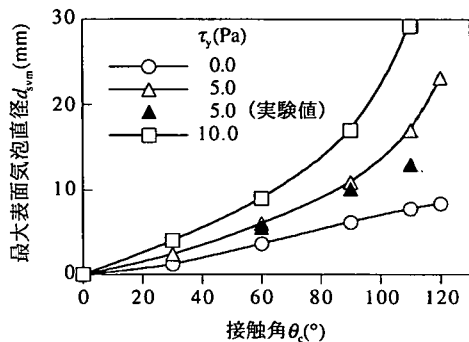


図-20 モルタルの降伏値ごとの最大表面気泡直径と接触角の関係

図-20は、 τ_y ごとの d_{svm} と θ_c の関係を示したものであり、図-9の計算結果に加えて図-18の実験結果を表している。この図からはモルタルの降伏値を小さくすると d_{svm} が小さくなること、 $\theta_c=60^\circ$ 以上では τ_y が大きいほど d_{svm} の増加率は大きいことがわかる。

b) モルタルの塑性粘度と表面気泡性状

表面気泡の離脱パターンには、水平型枠上面の表面気泡のように型枠から離脱直後に内部気泡となる場合と、垂直型枠面に発生する表面気泡などでは型枠面に沿って上昇してコンクリート打込み面に到達して大気中に放出される場合が考えられる。塑性粘度 η_p が表面気泡の離脱に関与するのは、水平型枠上下面もしくはそれに近い型枠傾斜角度を除く、ほとんどの型枠傾斜角度の場合が該当する。例えば、垂直型枠面では、表面気泡に作用する浮力 F_b が、流体抵抗 F_R ならびに型枠との付着力 βF_s (ただし、 β は型枠傾斜角度の影響を考慮するための係数) の合力よりも大きいと、表面気泡は型枠面に沿って上昇する。そのときの表面気泡の上昇速度 v_{sv} は式(9)に準じたものとなり、 η_p は小さいほど v_{sv} が大きく表面気泡は大気中に抜けやすい。実際にはコンクリートの打込み面の上昇速度 v_c が表面気泡の上昇速度 v_{sv} よりも小さけれ

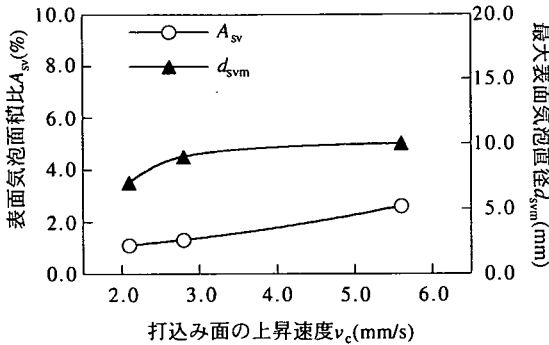


図-21 打込み面上昇速度に対する表面気泡面積比ならびに最大表面気泡直径

ば、美観に影響するような直径の大きな表面気泡は放出され、 η_p は表面気泡の発生にほとんど影響しないと考えられる。図-21は v_c に対する A_{sv} ならびに d_{svm} の実験結果である。図によると、 A_{sv} は v_c が大きくなると僅かに増加する。一方 d_{svm} は、 $v_c < 2.8$ mm/sでは v_c が小さいほど減少するが、 $v_c > 2.8$ mm/sではほぼ一定となった。

このように、 η_p が表面気泡の発生に及ぼす影響は、 v_c を適切に設定すれば前述の τ_v や θ_c ほどに大きくない。

その他にも、表面気泡の移動に η_p が影響する場合としては、表面気泡の除去を目的に20-30Hzの微振動を加えた時がある。振動を受けると、モルタルの降伏値が低下して流体抵抗 F_R が減少するために表面気泡は浮上しやすくなる。この場合の表面気泡の上昇現象も式(9)に準じたものとなり、 v_{sv} と放出までに必要な移動距離から最少の振動時間が決まる。その結果、施工時間を短縮したり、粗骨材とモルタルの分離や型枠面への内部気泡の集中などを最少にすることが可能となる。

5. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

(1) ナフタリン系高性能減水剤にAE剤を添加して空気量を5.0%程度にすると、ペーストの表面張力が低下して、表面気泡が全体的に小さくなるため美観向上に効果がある。また、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤に空気量調節を目的に消泡剤を使用しても大きな直径の表面気泡の発生量は変化しない。以上から、表面気泡の発生は、空気量の水準だけで推定することはできず、使用する混和剤の種類や組み合わせで異なる。

(2) 高流動コンクリートの内部気泡の最大直径 d_m は、内部気泡を球状の剛体と仮定し、気泡に作用する浮力 F_b 、重力 F_g 、そしてモルタルの降伏値を考慮した流体抵抗 F_R のつり合いから $d_m = 7.0$ mm程度と推定される。

また、粗骨材とモルタルの分離についても同様の理論

が適用できる。

(3) 最大表面気泡直径 d_{svm} は、上記(2)で述べた力のつり合いにペーストの表面張力に起因する型枠への付着力 F_R を考慮すると、スランブフロー $S = 550 \sim 700$ mmで接触角 $\theta_c = 30 \sim 90^\circ$ の場合、およそ $d_{svm} = 2.0 \sim 17.0$ mmである。

(4) 油性はく離剤を用いると、接触角 θ_c が大きいほど、付着力 F_R も大きくなるために d_{svm} が大きくなる。一方、水性はく離剤を使用すると $\theta_c \approx 0^\circ$ となり、ほとんどの表面気泡は開口部がペーストの薄膜で覆われた隠れ気泡となる。

(5) モルタルの塑性粘度 η_p は、表面気泡の上昇速度 v_{sv} に影響し、 η_p が小さいほど v_{sv} が大きくなり表面気泡は抜けやすい。また、コンクリート打込み面上昇速度 v_c が v_{sv} よりも小さければ、 η_p が表面気泡の大きさに及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

参考文献

- 1) 米倉敬一:コンクリート製品工場における高流動コンクリートの導入と展望, セメント・コンクリート, No.585, pp.9-14, 1995.11.
- 2) 川島満成, 金丸和光, 張日紅:高流動コンクリートによる工場製品の製造, コンクリート工学, Vol.38, No.5, pp.51-54, 2000.5.
- 3) 一宮一夫, 出光隆, 山崎竹博:高流動コンクリートの表面気泡状態が耐凍害性と中性化におよぼす影響, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, pp.408-409, 1998.9.
- 4) 倭富士桜, 辻彰敏, 国川憲三, 服部健一:コンクリートの表面気泡の低減について, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.253-256, 1986.
- 5) 一宮一夫, 出光隆, 山崎竹博, 渡辺明:高流動コンクリートの打設条件が表面気泡特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, pp.61-66, 1997.6.
- 6) 林志翔, 児玉明彦, 大竹淳一郎:粉体系高流動コンクリートの表面気泡に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.986-991, 1998.
- 7) 吉岡一弘, 中村朗, 牛山宏隆:高流動コンクリートの表面美観性に関する研究, 第50回セメント技術大会講演要旨, pp.258-259, 1996.
- 8) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和巳:コンクリートの科学と技術, 山海堂, pp.108-112, 1996.
- 9) 一宮一夫, 出光隆, 山崎竹博, 渡辺明:微振動下における高流動コンクリートの表面気泡の挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.955-960, 2001.7.
- 10) 土木学会:高流動コンクリート施工指針(コンクリートライブラリー93), pp.207-208, 1998.
- 11) 日本コンクリート工学協会九州支部:コンクリート用混和材料の規格と性能評価, pp.96, 1999.
- 12) 服部健一:洗剤の泡とコンクリートの泡, コンクリート技術者のためのセメント化学雑論, セメント協会, pp.75-81, 1985.

- 13) 土木学会：フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集, pp.190-192, 1986.
- 14) 小門 武, 宮川豊章：スランブフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.113-129, 1999.11.
- 15) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説, pp.135-144, 1997.
- 16) Powers, T.C. : The Properties of Fresh Concrete, John&Sons, Inc., pp.437-532, 1968.
- 17) 長尾之彦, 竹富昌之, 遠藤南志, 渡辺敬一：高流動コンクリートを使用したコンクリート製品の表面気泡に関する実験的検討, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp.656-657, 1996.9.
- 18) 一宮一夫, 出光 隆, 山崎竹博：粉体系高流動コンクリートの表面気泡に及ぼす型枠の濡れと傾斜角度の影響, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.143-150, 2002.5.
- 19) 土木学会：高流動コンクリート施工指針(コンクリートライブラリー93), pp.181-182, 1998.

(2001. 8. 27 受付)

THE INFLUENCE OF AIR CONTENT AND FLUIDITY OF MORTAR ON THE CHARACTERISTICS OF SURFACE VOIDS IN SELF-COMPACTING CONCRETE

Kazuo ICHIMIYA, Takashi IDEMITSU and Takehiro YAMASAKI

For the purpose to reduce the surface void of powder type self-compacting concrete, the effects of air content and fluidity, the types of form release agent are discussed in this paper.

Generally, the high-range water-reducing agents (SP) are classified for two types to adjust the air content. One of them is a type to annex the air entraining agent for Naphthalene type of SP, and another one is a type to annex the defoamer agent for Poly-carboxylic acid type of SP.

The behavior of sinking coarse aggregate and rising air void were explained by the equilibrium of the forces of buoyancy, gravity, and fluidity resistance. Coarse aggregate and internal void is assumed a spherical solid body. The fluidity resistance of mortar is expressed by rheological constants (yield value and plastic viscosity).

And, the separation of surface void from the form is shown to be possible to explain from the equilibrium of above-mentioned force and adhesion to the form.