

論文 粉体系および増粘剤系高流動コンクリートの表面気泡性状

一宮 一夫*¹・ 出光 隆*²・ 山崎 竹博*³・ 渡辺 明*⁴

要旨: 筆者らは, 高流動コンクリートのせき板面に発生する表面気泡の低減には微振動をかけることが有効であることを確認してきたが, 粘性の付与方法の違いが加振条件下の表面気泡性状に及ぼす影響については不明な点が多い. 本研究では同一の流動性を有する粉体系と増粘剤系の高流動コンクリートに微振動を加え, 両者の表面気泡性状を画像解析で数値化し, 配合の種類と表面気泡性状の関係を調べた. 更に, 効果的に表面気泡を除去する加振方法についても言及した.

キーワード: 高流動コンクリート, 表面気泡, 微振動, コンクリート製品, 付着性

1. はじめに

高流動コンクリートは, 優れた自己充填性と分離抵抗性を有していることが特徴であるが, せき板面に発生する表面気泡の低減および美観の向上, 打継ぎや合流部でのコールドジョイントの防止, 流動方向が偏った場合の補助や天端の仕上げ, 充填性の向上などを目的に軽微な振動を加える場合がある.

上記の加振の目的のうち, 表面気泡の低減のために微振動を加えた場合は, コンクリートの配合や加振条件によっては効果が得られなかったり, 逆に表面気泡が増加することもある. また, 粘性の付与方法の違いが加振条件下の表面気泡性状に及ぼす影響については不明な点が多い.

本研究では同一の流動性を有する粉体系と増粘剤系の高流動コンクリートに微振動を加え, 両者の表面気泡性状を画像解析で数値化し, 配合の種類と表面気泡性状の関係を調べた. 更に, 効果的に表面気泡を除去する加振方法についても言及した.

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

コンクリートは, セメント容積の60%を高炉スラグ微粉末で置換した粉体系と, セルロース系の増粘剤を添加した増粘剤系の2種類の配合の高流動コンクリートとした. スランブフローは63cm, 空気量は5.0%を目標値とし, 高性能AE減水剤と消泡剤ならびに増粘剤系は増粘剤の使用量を調整した.

使用材料を表-1, 配合を表-2に示す.

2.2 実験要因と水準

普通コンクリートで製品を製造する際は, コンクリートの充填性を良くするために振動を加えながら充填し, 更に充填完了後も密度を増すために加振をする. 高流動コンクリートに微振動を加える場合も同様であるが, 加振しながら

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランド, 比重3.15
高炉スラグ微粉末	ブレン値6000, 比重2.91
細骨材	海砂, 比重2.51, FM2.90, 実積率67.5%
粗骨材	碎石, 最大寸法20mm, 比重2.67, FM7.01, 実積率58.1%
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
増粘剤	セルロース系

*1 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科 (正会員)

*2 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科, 博士 (正会員)

*3 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科, 工博 (正会員)

*4 九州共立大学教授 工学部開発学科, 工博 (正会員)

表-2 高流動コンクリートの配合

	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	C	BS	S	G	SP	増粘剤
粉体系	20	63	5.0	30.6	50.0	172	236	327	804	801	5.9	—
増粘剤系	—	—	—	38.7	51.6	174	450	—	813	810	5.9	0.3

充填する場合と、充填後に加振する場合とではコンクリート自体の受ける振動エネルギーが異なり、表面気泡の除去効果も相違すると予想される。本研究では、テーブルバイブレータ上に型枠を固定し、無振動で充填する場合を Case I、加振しながら充填する場合を Case II、90秒間で充填した後に加振する場合を Case IIIとして供試体を製作し、表面気泡の性状を比較した。なお、充填及び加振時間は、製品製造時の打込み面上昇速度を参考に、60、90、120secの3水準（打込み面上昇速度はそれぞれ50、34、25cm/min）とした。図-1に型枠の設置状況を、図-2に充填及び加振条件を示す。

2.3 供試体の製作

コンクリートの練混ぜは容量55ℓの水平2軸強制練りミキサを用い、1回の練混ぜ量を35ℓとし、骨材と結合材を投入して30秒間のから練りを行った後に水（増粘剤系は増粘剤を溶解したもの）と高性能AE減水剤を投入して120秒間練混ぜた。型枠は、内寸法で高さ50cm、奥行き8cm、幅30cmの鋼製のものを使用し、打込みの1時間前に市販の油性離型剤を霧吹きと脱脂綿で丁寧に塗布した。コンクリートの充填は、型枠の天端（高さ50cm）から打込み面の中央に連続して自由落下させた。テーブルバイブレーターの加振条件は、振動数25Hz、変位振幅0.9mmであるが、普通コンクリートを使用した場合の一般的な加振条件は振動数50～90Hz、変位振幅0.5～1.0mmであるのに対し、本研究では振動数が半分以下であることから、このような低振動数の振動を微振動と定義した。

2.4 表面気泡の定量化の方法

表面気泡の面積、数、大きさの分布を画像解析で数値化した¹⁾。画像解析に先立ち、表面気泡の

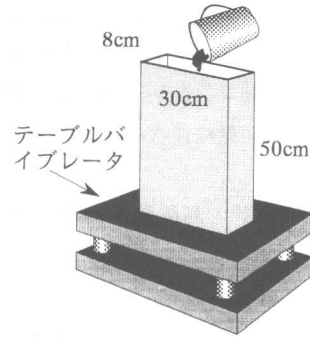


図-1 型枠の設置状況

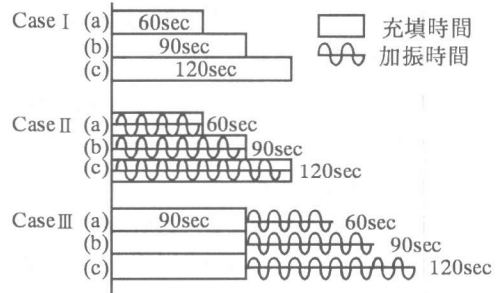


図-2 充填及び加振条件

コントラストを明瞭にするために、アセトンで洗浄したコンクリート表面に油性インクを塗布し、表面気泡部に高炉スラグ微粉末を充填した。その後デジタルカメラで対象面を撮影し、画像をパソコンに取り込んだ。表面気泡の面積は、全面積に対する表面気泡の面積比（以下、表面気泡面積比とする）で表示した。表面気泡の大きさの分布は、円換算径1～4mm、4～7mm、7mm以上の3水準について、各範囲の表面気泡面積比で評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 表面気泡面積比

粉体系と増粘剤系の表面気泡面積比を図-3に

示す。まず粉体系では、Case Iにおいて充填時間を長くすると表面気泡面積比が低下し、充填時間120secでは60secのおよそ半分まで減少した。これは、充填時間が長いほど打込み面の乱れによる巻き込み空気が少ないことや、打込み面の上昇速度が遅いほど浮力による気泡の放出効率が良いためと考えられる。

Case IIの表面気泡面積比は、加振充填時間60, 90secでCase Iよりも小さく、加振充填の効果があった。一方、加振充填時間が長いと表面気泡面積比は大きくなる傾向にあり、120secではCase Iを上回り加振充填が逆効果となった。この原因として、振動の影響が大きく見かけの粘性の低下率が高い型枠付近にコンクリート内部の気泡が集中することや、充填初期でコンクリート質量が少ない状態では、打込み面の乱れや型枠側面とコンクリートの剥離により空気が巻き込まれやすいことなどが考えられる。

Case IIIの場合は、加振時間90secではCase Iとほぼ同じであるが、60, 120secではCase Iを下回り、全体としては長く加振すると表面気泡面積比は減少すると考えられる。Case IIIの傾向は、Case IIとは逆であり、充填完了後に加振する場合と加振しながら充填する場合は加振の効果が異なった。いま、同じ加振時間におけるCase IIとCase IIIのコンクリート面を比較すると、Case IIは打込み面であるのでコンクリートは比較的自由に流動する。それに対し、Case IIIは上載コンクリートの質量の影響を受ける拘束面でありコンクリートの乱れが生じにくく、巻き込み空気量が少ないために上記のような傾向になると考えられる。

図-3の下図に示す増粘剤系の場合は粉体系とは異なる結果となった。Case Iの結果を粉体系と比較すると全体的に低水準であるとともに、充填時間の影響がほとんどないのが特徴である。このような増粘剤系の特徴は、粉体系に比べてモルタルと粗骨材の付着性が良いために、打設時や加振時でも両者は分離することなく一体で流動するのでモルタルと骨材の間に巻き込む空

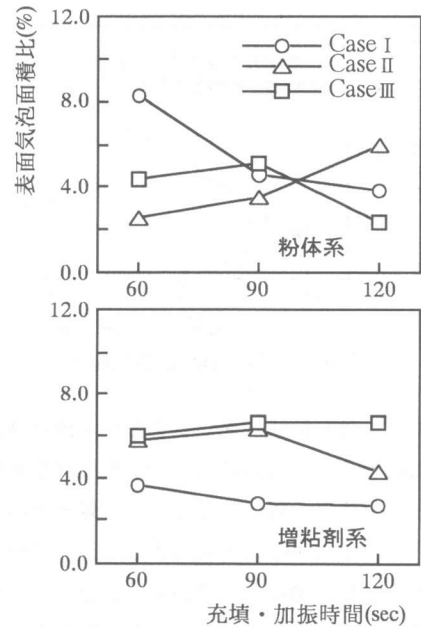


図-3 表面気泡面積比

気が少ないことも原因のひとつと考えられる。

Case IIでは、加振充填時間を長くすると表面気泡面積比は幾分減少するものの、Case Iの水準まで低下させるには120secよりも長くする必要があり効率的な方法とは言えない。また加振充填時間にもない表面気泡面積比は減少し、粉体系とは逆の傾向である。外力としての振動の影響は、増粘剤系も粉体系も同様であるが、増粘剤系ではモルタルと粗骨材の付着性が良いために巻き込み空気が少なく、加振充填することで新たに巻き込まれる空気量に比べて、見かけの粘性の低下による気泡の放出量の方が多く、加振充填時間が長いほど表面気泡面積比は小さくなると考えられる。

以上のことより、表面気泡を低減させるには、粉体系では無振動でゆっくり充填した後に微振動を長く加える方法が良く、増粘剤系では無振動でゆっくり充填する方法が効果的といえる。

高流動コンクリートの付着性とは、モルタル分が粗骨材、鉄筋、型枠などに付着しようとする性状であり、これらの境界面ですべりが生じる最小のずりせん断応力で定量化される材料性質である。既往の研究によると、塑性粘度がほぼ等

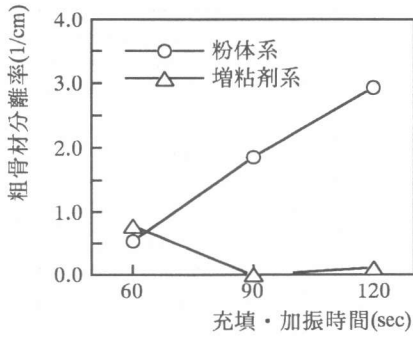


図-4 粗骨材分離率 (Case II)

しくても付着性状は異なることから両者は独立したパラメータであることや、増粘剤を添加すると付着強度が大きくなることが報告されている²⁾。また、モルタルの付着性とコンクリートの分離抵抗性は密接な関係があることが知られている。そこで本研究で使用した粉体系と増粘剤系のコンクリートのモルタルと粗骨材の付着性の違いを調べる目的で、それぞれのCase IIの供試体を打込み面から5, 18, 31, 44cmの位置で切断し、切断面ごとの粗骨材の面積比を測定した。粗骨材の分離状態を定量化するために、(粗骨材面積比/粗骨材面積比の平均値)と切断位置の関係を直線近似し、近似直線の傾きを100倍したものを粗骨材分離率とした。図-4は粗骨材分離率と加振充填時間の関係を表したものであるが、粉体系では加振充填時間を長くするとモルタルと粗骨材の分離が顕著となるのに対し、増粘剤系では分離現象はほとんど見受けられず良好な付着性を有していることを確認した。

増粘剤系高流動コンクリートの付着性は、型枠側面とコンクリートとの界面にも影響を及ぼし、加振時に型枠側面とコンクリートが剥離しにくく空気を巻き込みにくい反面、一旦発生した表面気泡は抜けにくいと考えられる。一般に、型枠表面には離型剤が塗布されており、型枠とコンクリートの間には離型剤の油層が存在するが、実験の結果、部分的に表面気泡が生じる傾向が見られ、加振することによっていわゆる油膜切れが起こった。離型剤の脱型能力を低下させる油膜切れは、大きな振動エネルギーで普通コンク

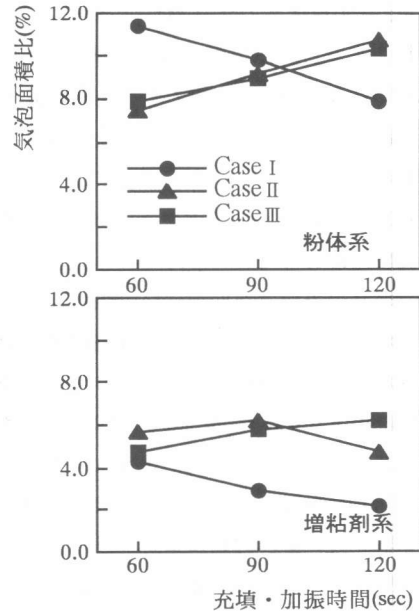


図-5 表面研磨後の気泡面積比

表-3 表面研磨後の気泡面積比の変化量 (単位%)

時間(sec)	粉体系			増粘剤系		
	60	90	120	60	90	120
Case I	3.1	5.2	4.1	0.6	0.1	-0.5
Case II	4.9	5.6	4.8	-0.1	-0.1	0.4
Case III	3.5	3.8	8.0	-1.3	-0.9	-0.4

リートを締め固める場合に発生する現象であるが、高流動コンクリートに微振動を加えた場合にも同様の現象が生じると考えられる。

3.2 表面研磨後の気泡面積比

高流動コンクリートには、表面気泡以外にもコンクリート表面近傍にはあるが脱型後に開口しない、いわゆる隠れ気泡が存在する。隠れ気泡は、コンクリート表面に触れるだけでペースト膜が破壊され開口するものが多いが、表面美観の点からは隠れ気泡の存在は問題とはならない。しかし、凍結融解作用下などでは劣化の始点となることが筆者らの研究から明らかとなっており、耐久性の点からは隠れ気泡も表面気泡同様に評価する必要がある³⁾。隠れ気泡の発生を確認するために、コンクリート表面をグラインダーで平均深さ0.24mm研磨して表面気泡と同様の方法で気泡面積比を測定した。その結果を図-

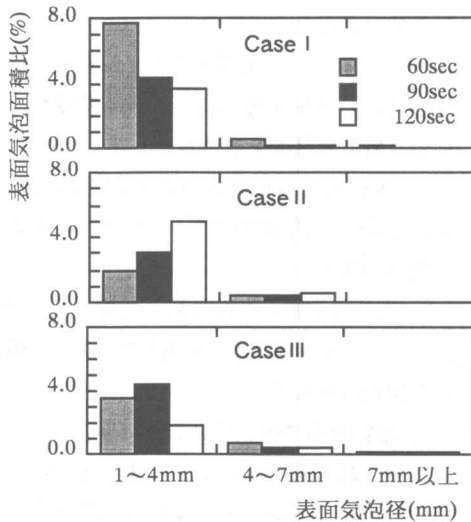


図-6 表面気泡面積比の分布 (粉体系)

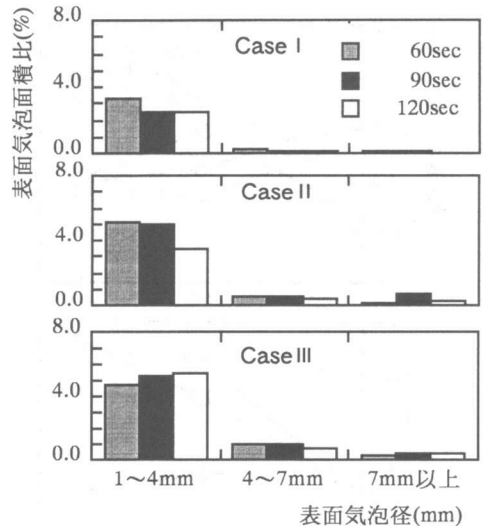


図-7 表面気泡面積比の分布 (増粘剤系)

5に、表面研磨後の気泡面積比の変化量を表-3に示す。

まず粉体系では、全ての場合において、研磨後の気泡面積比は増加しており、隠れ気泡の発生を確認した。一方、増粘剤系の場合は、表面研磨後の気泡面積比の増加はほとんどなく、隠れ気泡は発生していない。既往の研究から、表面気泡の状態は、離型剤とペーストの各表面張力、ならびに両者間の界面張力の影響を受けることが知られており、離型剤が同じ場合は、ペーストの表面張力あるいは界面張力が小さいと表面気泡がコンクリート内部に移動し隠れ気泡が発生しやすいと考えられる⁴⁾⁵⁾。このことを確認するために一定量の水を加えて薄めたペーストの上澄水の表面張力を測定した。その結果、粉体系が55mN/m、増粘剤系が60mN/mで両者は大差なく、隠れ気泡発生には、主として離型剤とペースト間の界面張力の影響が大きいと考えることができる。

3.3 表面気泡面積比の分布

コンクリート表面の美観評価の際には、大きな径の表面気泡の存在が重要な要因となる。そこで、表面気泡面積比の表面気泡径ごとの分布を調べた。その結果を図-6、図-7に示す。図-6の粉体系、図-7の増粘剤系ともに実験条件に関わらず、1~4mmの小さな径の表面気泡の割合

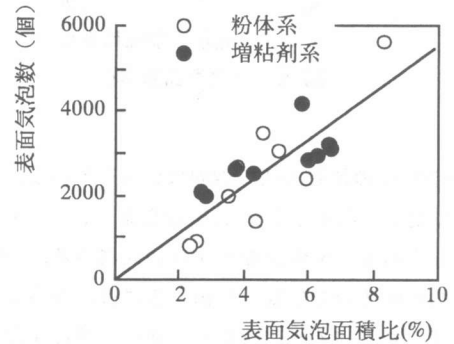


図-8 表面気泡数と表面気泡面積比

が高い。また、この範囲の表面気泡面積比の変化傾向が図-3に示す表面気泡面積比の結果と一致することから、表面気泡面積比は1~4mmの小さな径の表面気泡の発生量を表し、大きな径の表面気泡の評価には不向きと言える。

そこで表面気泡性状を表す他のパラメータとして表面気泡数ならびに最大表面気泡径による評価結果を次に示す。

3.4 表面気泡数

表面気泡数と表面気泡面積比の関係を図-8に示す。この図より、粉体系、増粘剤系の配合の種類に関わらず、表面気泡数と表面気泡面積比の間には強い正の相関関係がある。

3.5 最大表面気泡径

図-9に最大表面気泡径の測定結果を示す。粉体系の場合は、実験条件に関わらず、最大径は

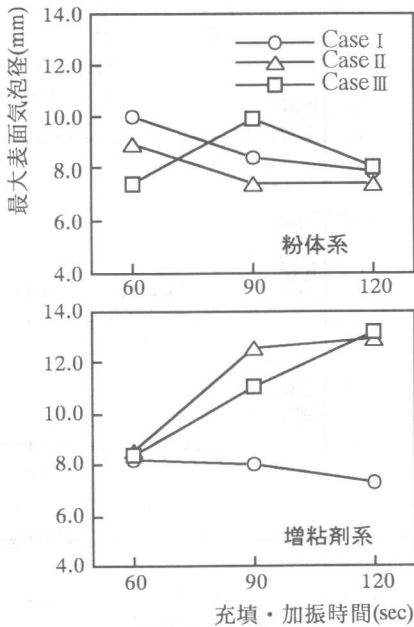


図-9 最大表面気泡径

7~10mmの比較的狭い範囲に分布している。それに対し、増粘剤系は、微振動を加えることで大きな径の表面気泡が発生する傾向にある。一般に粘性液体中の気泡が放出するには、浮力が粘性抵抗を上回る必要があり、液体の粘性が高い場合は大きな径の気泡が残存しやすいと考えられる。増粘剤系と粉体系のウェットスクリーニングモルタルの塑性粘度を回転粘度計で測定したところ、前者が2.3PaS、後者が1.5PaSであり増粘剤系の方が粘性が高いことを確認した。このことから、粘性が比較的高めに設定される傾向にある増粘剤系の場合は、モルタルと粗骨材が分離しない範囲内で、増粘剤の使用量をできるだけ少なくする必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

(1) 同一の流動性でも粉体系と増粘剤系では表面気泡性状は異なる。表面気泡を低減させる方法としては、粉体系の場合はゆっくり無振動で充填した後に微振動を長くかける方法が良く、増粘剤系では無振動でゆっくり充填する方法が

効果的であった。

(2) コンクリート表面をグラインダーで研磨し隠れ気泡の発生を調べたところ、粉体系の場合に隠れ気泡の発生を確認した。

(3) 表面気泡面積比の表面気泡径ごとの分布は、粉体系、増粘剤系ともに1~4mmの小さな径の割合が大きい。

(4) 表面気泡数と表面気泡面積比の間には、粉体系、増粘剤系の配合の種類に関わらず、強い正の相関関係がある。

(5) 増粘剤系に微振動を加えた場合、振動時間とともに最大表面気泡径が大きくなった。これは増粘剤系の方がモルタル分の粘性が高かったためで、モルタルと粗骨材が分離しない範囲内で、増粘剤の使用量はできるだけ少なくする必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 谷川恭雄, 森博嗣, 三輪正保: 低水セメント比のフレッシュコンクリートのすべり抵抗挙動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, A, pp.853-854, 1990.10
- 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: 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論文集, pp.253-256, 1986
- 5) 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と型枠の濡れ性の関係, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, pp.588-589, 1997.9