

# 論文 微細な空気泡によるフレッシュコンクリートの自己充填性向上

田中 一徳\*1・Sovannasathya RATH\*2・Anuwat ATTACHAIYAWUTH\*3・大内 雅博\*4

**要旨**：連行空気泡による摩擦低減効果を活用した気泡潤滑型自己充填コンクリートにおける、空気泡の径とその分布が自己充填性に及ぼす影響を明らかにした。同空気量の気泡潤滑型自己充填コンクリートでも材料配合と練混ぜ手順の違いにより自己充填性に差がみられた。コンクリートの硬化後の連行空気泡の径とその分布を測定し自己充填性との関係から、微細な空気泡が自己充填性向上に有効である可能性を得た。

**キーワード**：気泡潤滑型自己充填コンクリート, 連行空気, ボールベアリング効果, 空気泡径分布, 自己充填性

## 1. はじめに

日本での自己充填コンクリートの普及が進んでいない理由として、高強度が必要ないにもかかわらず自己充填性付与のための高いセメント量による高単価があげられる。それらの問題を解決するために、著者らは連行空気泡による摩擦低減効果(ボールベアリング効果)に着目した気泡潤滑型自己充填コンクリートの実用化に取り組んでいる。図-1に3種類のコンクリートの材料容積比を示す。気泡潤滑型自己充填コンクリートの特徴は、従来の自己充填コンクリート中のセメント量の一部を連行空気泡に置換し、普通コンクリートと同程度の単位セメント量で従来の自己充填コンクリートと同水準の自己充填性能を有するコンクリートである<sup>1)</sup>。

従来、空気連行剤によって空気を連行させる目的はコンクリートの凍結融解抵抗性向上であった。フレッシュコンクリートの自己充填性向上のための研究はなされておらず、連行空気の質や量と自己充填性との関係は明らかになっていない。

本研究の目的は連行空気の質と量がフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響を明らかにすることである。フレッシュに同じ空気量であっても気泡潤滑型自己充填コンクリートの自己充填性に差がみられたことから、空気量のみならず空気泡の径とその分布により自己充填性に差が生じたと仮定した。そこで、硬化後のコンクリートの気泡測定システムを用いて空気泡の径と分布を測定し、自己充填性能との関係を明らかにした。

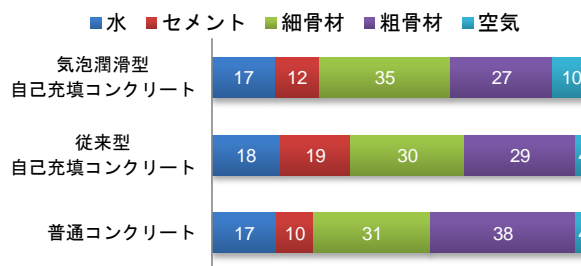


図-1 コンクリート中の材料容積比 (%)

## 2. 試験方法及び諸条件

### 2.1 試験方法

スランブフロー試験, 空気量試験(質量法), 漏斗試験, ボックス試験により気泡潤滑型自己充填コンクリートのフレッシュ性状の試験を行った。そして、硬化後の供試体の空気泡の径とその分布を測定した。

本研究の目的はコンクリート中の連行空気泡の質や量と自己充填性の関係を明らかにすることであるため、その他の影響を排除するために、スランブフローの値が600±50mmの範囲になるように高性能 AE 減水剤の添加量を調整した。粘性は V 型漏斗試験器により測定し、自己充填性はボックス試験器(障害物 R1)により測定を行った。

また、気泡潤滑型自己充填コンクリートの空気量は10%程度であり、エアメータによる圧力法での測定は困難であるため、フレッシュ時の空気量はエアメータの容器を用いた質量法による測定を行った。

尚、これらのフレッシュ時の試験は練上がり直後から同時進行で行った。

\*1 高知工科大学大学院修士課程 工学研究科基盤工学専攻 (学生会員)  
 \*2 高知工科大学大学院博士課程 工学研究科基盤工学専攻 (学生会員)  
 \*3 高知工科大学大学院博士課程 工学研究科基盤工学専攻 (学生会員)  
 \*4 高知工科大学 教授 システム工学群 (正会員)

表-1 使用材料

材料	概要
セメント	普通ポルトランドセメント(3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	高知県白木谷産 石灰石砕砂(2.68g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	高知県白木谷産 石灰砕石(2.70g/cm <sup>3</sup> )
高性能 AE 減水剤	増粘剤一液型高性能 AE 減水剤
空気連行剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-2 気泡潤滑型自己充填コンクリートの配合

W/C	45%
s/m	55%
単位粗骨材量	27%(空気量 10%) 30%(空気量 0%)
高性能 AE 剤添加量	スランブフロー-600mm 前後になるように調整
空気連行剤添加量	セメント質量 × 0.005~0.15%

表-3 気泡潤滑型自己充填コンクリートの示方配合

	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
	W	C	S	G
空気量 0%時	185	410	1032	810
空気量 10%時	166	369	929	729

ASTM 規格 C 457-71 に準じたリニアトラバース法による測定を自動的に行う硬化コンクリート気泡計測装置により空気泡の粒径分布を求めた。また、供試体は直径 150 mm 高さ 300 mm の円柱供試体を使用した。上面と底面の約 10 mm 内側から厚さ約 50 mm 切り取ったものと中心部から厚さ 50 mm 分を切り取ったものを順に上, 下, 中段とし, それらの平均を 1 ケース分とした。測定は上中下段それぞれ表・裏の 2 面とも行った。配合 1 ケースにつき合計で 6 面の計測を行った。

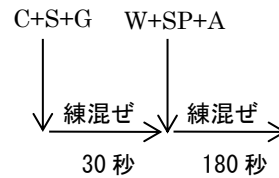
## 2.2 使用材料

本研究の使用材料を表-1 に示す。粉体は普通セメントのみを用いた。また, 本研究で使用する空気連行剤は, モルタルによる模擬粗骨材を使用した漏斗流下時間の比による自己充填性の評価実験で, コンクリート中の空気量 10% 程度で自己充填性向上効果の高かった空気連行剤である<sup>2)</sup>。

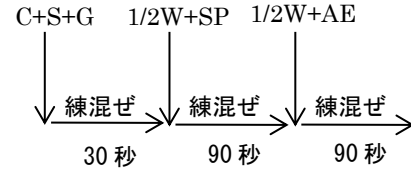
## 2.3 気泡潤滑型自己充填コンクリートの配合

表-2 に示すように単位粗骨材量が増えることは自己充填性には明らかに不利なため, 気泡潤滑型自己充填コンクリートでも従来の自己充填コンクリートと同程度の単位粗骨材量に設定した。一方, モルタル中の細骨材

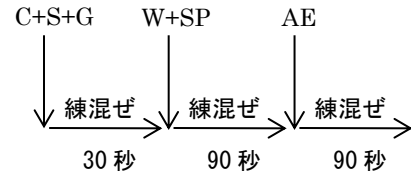
### 一括練り



### 分割練り (1)



### 分割練り (2)



C: 普通ポルトランドセメント S: 細骨材 G: 粗骨材  
W: 水 SP: 高性能 AE 減水剤 AE: 空気連行剤

図-2 練混ぜ方法

容積比 (s/m) は気泡によるボールベアリング効果を見込んで 55% と従来型自己充填コンクリートよりも高くした。水セメント比 (W/C) は, 高強度を必要としないことから 45% と高めた。高めの水セメント比による材料分離抵抗性の低下を抑制するため, 増粘成分を含んだ高性能 AE 減水剤を用いた。示方配合を表-3 に示す。

## 2.4 練混ぜ方法

本研究では二軸強制練りミキサーを使用し, 練混ぜ量は 40 リットルとした。

まず, セメント+細骨材+粗骨材で 30 秒間空練りを行う。その後, 空気連行剤添加前のコンクリートの状態が空気連行性能に及ぼす影響を観察するため図-2 の様な 3 種類の練混ぜ方法を比較した。

1 種類目は水・高性能 AE 減水剤・空気連行剤を一括投入して 180 秒間練混ぜるもの, 2 種類目は水を半分に分割し, 水と高性能 AE 減水剤を入れて 90 秒間練混ぜた後に残りの水と空気連行剤を入れて 90 秒間練混ぜるもの, 3 種類目は水と高性能 AE 減水剤を入れて 90 秒間練混ぜた後に空気連行剤を入れて 90 秒間練混ぜるもの, であった。

本論文では 1 種類目の練混ぜ方法を一括練り, 2 種類目の練混ぜ方法を分割練り (1), 3 種類目の練混ぜ方法を分割練り (2) と記した。

表-4 コンクリート試験結果

番号	練混ぜ方法	AE 剤 添加量 (Cに対す る質量 比)	空気量(%)		ボックス 上昇高 さ(mm)
			練上がり 直後	硬化 後	
1	一括練り	0.150%	15.0	9.9	185
2	分割練り(1)	0.150%	10.4	10.9	250
3	一括練り	0.005%	9.4	4.8	140
4	分割練り(1)	0.005%	6.1	5.4	108
5	分割練り(1)	0.050%	7.5	7.9	215
6	分割練り(1)	0.100%	9.8	9.7	225
7	分割練り(1)	0.150%	12.6	11.4	185
8	分割練り(2)	0.020%	8.3	8.2	225
9	分割練り(2)	0.020%	9.5	9.0	252
10	分割練り(2)	0.030%	9.3	7.8	210

※番号 7 は増粘成分が 2 倍の高性能 AE 減水剤を使用

※番号 9,10 は AE 添加後の練混ぜ時間は 180 秒,その他は 90 秒

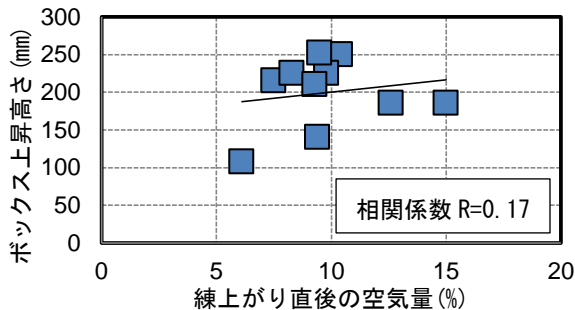


図-3 練上がり直後の空気量とボックス上昇高さの関係

### 3. フレッシュ性状の試験結果と考察

表-4 に本研究で用いたコンクリートの試験結果を示す。コンクリートの空気量は、空気連行剤の添加量のみならず、練混ぜ方法・時間にも影響を受ける。本研究では、それらの影響を比較するため、空気連行剤の添加量・練混ぜ手順・練混ぜ時間をそれぞれ変化させた合計 10 ケースのコンクリート試験を行った。

図-3 は練上がり直後の空気量とボックス上昇高さとの関係を示したものである。練混ぜ方法や空気連行剤の添加量の違いにより、同空気量でもボックス上昇高さが異なる結果となった。

空気量そのものではなく連行空気の質によって自己充填性に変化が見られること、すなわち、空気連行剤の添加量や練混ぜ方法により連行空気泡の質が変化している可能性が得られた。そこで、連行空気泡の質を解明するために硬化コンクリート気泡測定システムを用いてこれら 10 種類のコンクリートの連行空気泡の気泡径

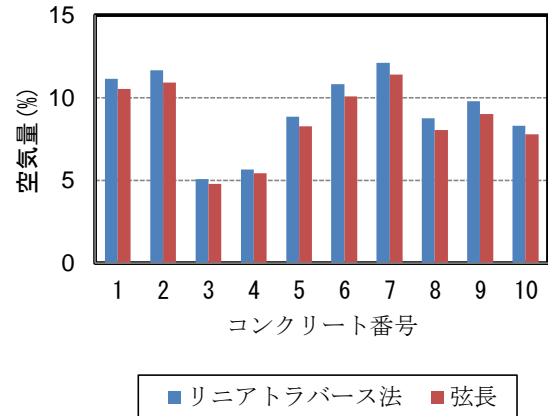


図-4 2種類の算出方法による空気量の違い

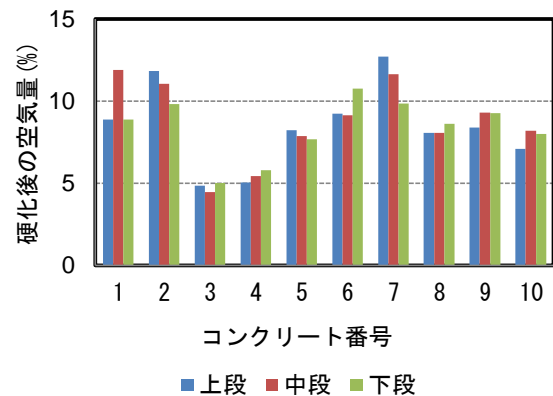


図-5 それぞれの供試体の空気量と上中下段のバラツキ

ごとの分布を測定した。ここでいう気泡径は、空気泡の弦長を表す。

### 4. 気泡測定の結果

#### 4.1 気泡径分布の演算方法

気泡径分布は、硬化コンクリート気泡計測装置により測定された空気泡を粒径 0.05mm 毎の範囲に分け、それぞれの範囲の平均径とその範囲にある空気泡の個数から各範囲のトラバース長を算出し、全トラバース長との比から各空気量を算出する。上記の方法で算出した空気量の合計とリニアトラバース法で算出した空気量との比較を図-4 に示す。両空気量に大きな差が見られないことから、空気泡の弦長が各空気泡の大小関係を表すと仮定した。

#### 4.2 上中下のバラツキ

図-5 は 10 ケースの供試体の上中下段での空気量を表

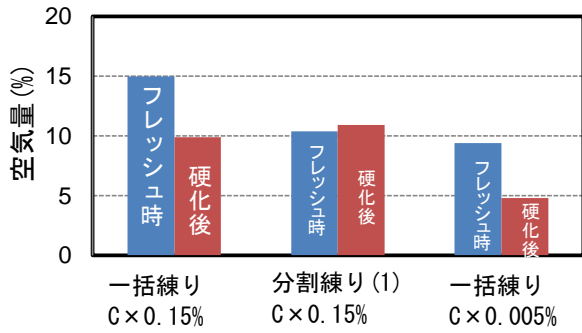


図-6 練上がり直後の空気量と硬化後の空気量

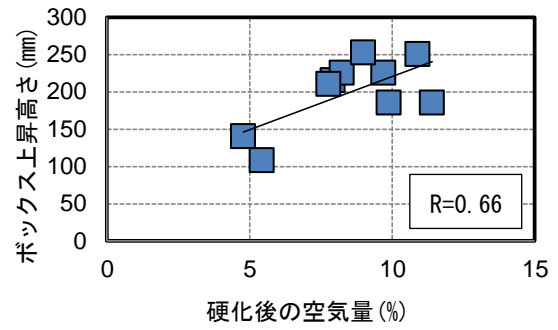


図-8 硬化後の空気量とボックス上昇高さの関係

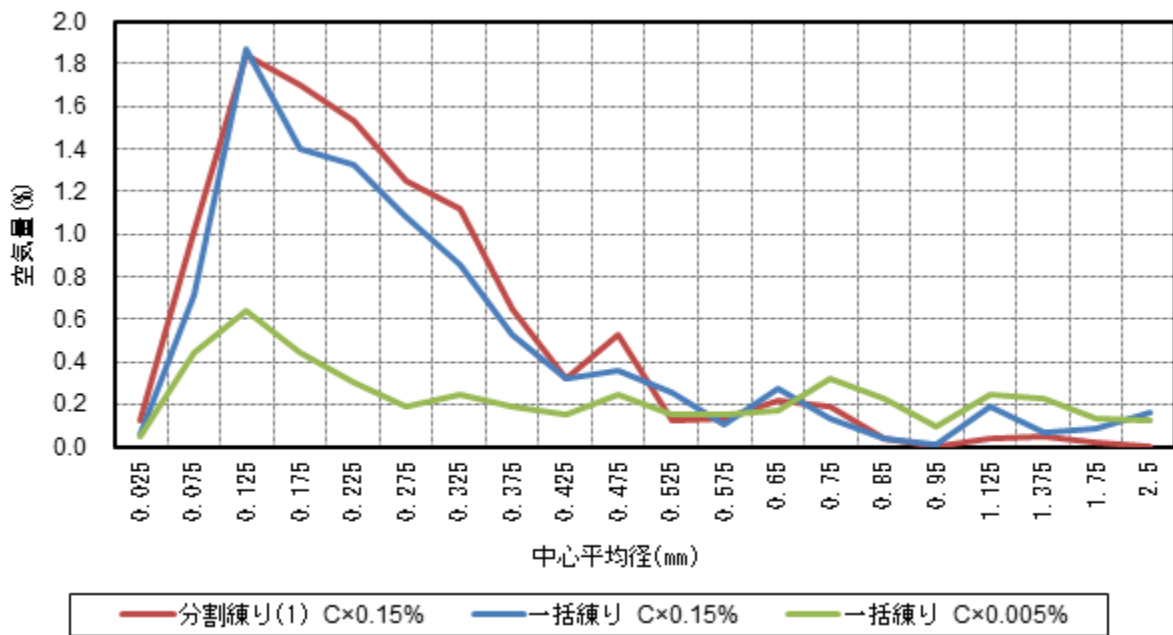


図-7 各空気泡径ごとの空気容積

したものである。バラツキの大きいものでは約 3%の違いがあったが、必ずしも上段の空気量が多く、下段の空気量が少ないわけではなかった。上中下段のバラツキに関してはさらに観察が必要であるが、本研究では先に記述した通り上中下段の平均値を用いた。

### 4.3 空気泡の抜け

コンクリートと空気の密度の差から、練混ぜからの時間の経過により連行空気泡が抜ける現象が指摘されている。そこで、どのような気泡径の空気泡が抜けているのかを調べるため、フレッシュ時と硬化後とで空気量に差が出たものと出なかったものの空気泡の分布を調べたものを図-6 に示す。一括練りの 2 ケースでは空気量が約 5%減少したのに対し、分割練り(1)は空気量の変化がほぼゼロであった。図-7 の中心平均径とは 4.1 で述べた

各範囲の気泡径の平均値を示したものであり、空気量が減少しなかった分割練り(1)はフレッシュ時にもこの粒径分布であったと仮定し、分割練り(1)を基準に考察した。

基準となる分割練り(1)は気泡径 0.80mm 以上の空気泡がほとんど 0%であり、一括練りの 2 ケースとは異なった。一括練りの 2 ケースではフレッシュ時にはさらに 5%の空気が存在していたはずであるが、硬化後の分割練り(1)のケースには無かった、気泡径 0.80mm 以上の空気泡が抜けたと考えた。

### 4.4 空気泡径と自己充填性との関係

前章で示したように、同空気量でもボックス上昇高さに違いが見られた。単に空気量が自己充填性に影響しているとは考えにくい。つまり、自己充填性向上に有効な

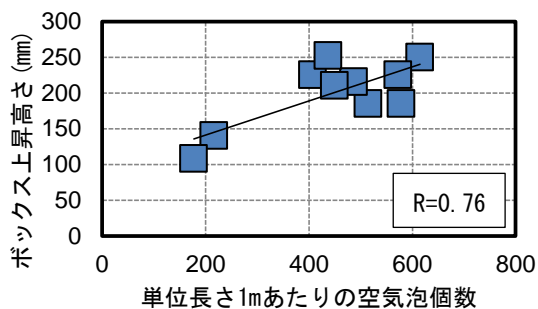


図-9 空気泡の個数とボックス上昇高さの関係

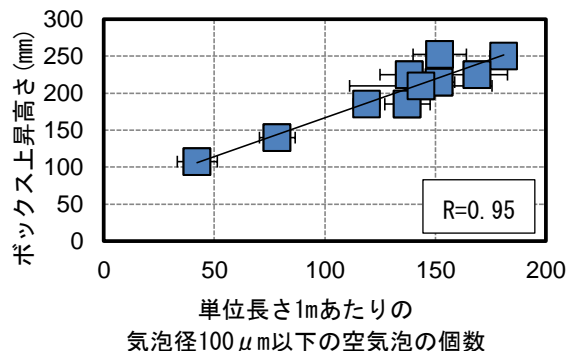


図-12 気泡径 100 μm 以下の空気泡の個数とボックス上昇高さの関係

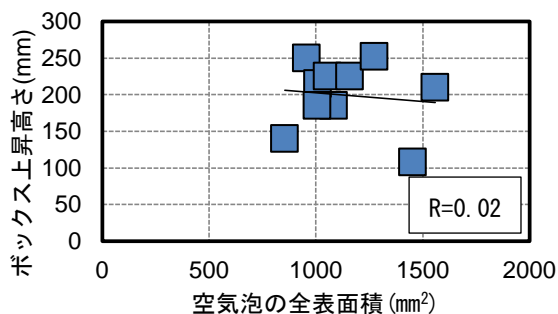


図-10 空気泡の表面積とボックス上昇高さの関係

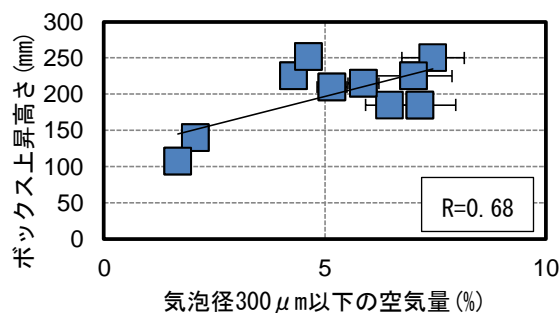


図-13 気泡径 300 μm 以下の空気量とボックス上昇高さの関係

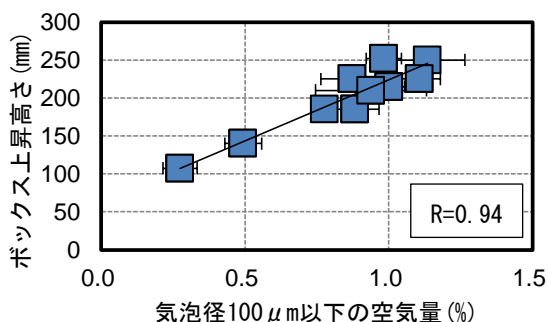


図-11 気泡径 100 μm 以下の空気量とボックス上昇高さの関係

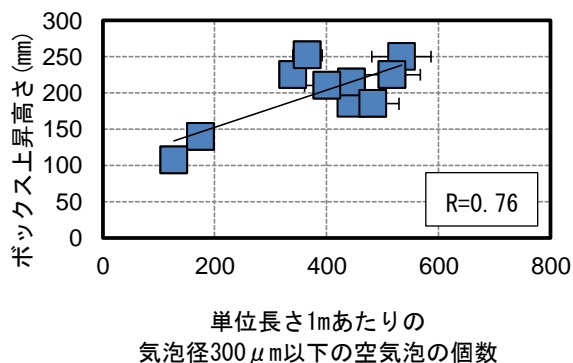


図-14 気泡径 300 μm 以下の空気泡の個数とボックス上昇高さの関係

空気泡と、そうではない空気泡に区別できるのではと推測した。図-8 は気泡測定で得られた硬化後の空気量とフレッシュ時のボックス上昇高さの関係を表したものである。フレッシュ時の空気量(図-3)と比べて相関関係が高くなった。このことから、硬化までに抜けてしまう空気泡は自己充填性に寄与する可能性が低いと考えた。

次に、自己充填性向上に有効な空気泡の性質を考察するために、空気泡の容積(図-8)、個数(図-9) (トラバース長単位長さあたりの空気泡個数)、表面積(図-10) (空気泡の中心平均径と個数から算出)、3つの指標とボックス

上昇高さとの関係の比較を行った。

#### 4.4 自己充填性向上に有効な空気泡径の考察

気泡径 0.80mm 以上の空気泡が硬化にかけて抜けていく可能性が高いことと、空気量が減少していないコンクリートほど自己充填性が高いことから、気泡径の小さな空気泡が自己充填性に有効であると仮定し、各大きさの気泡径に着目した。図-11~14 は空気量(コンクリート中の容積比)または個数と自己充填性との関係を示している。供試体上中下段で誤差があり、また空気泡の直径

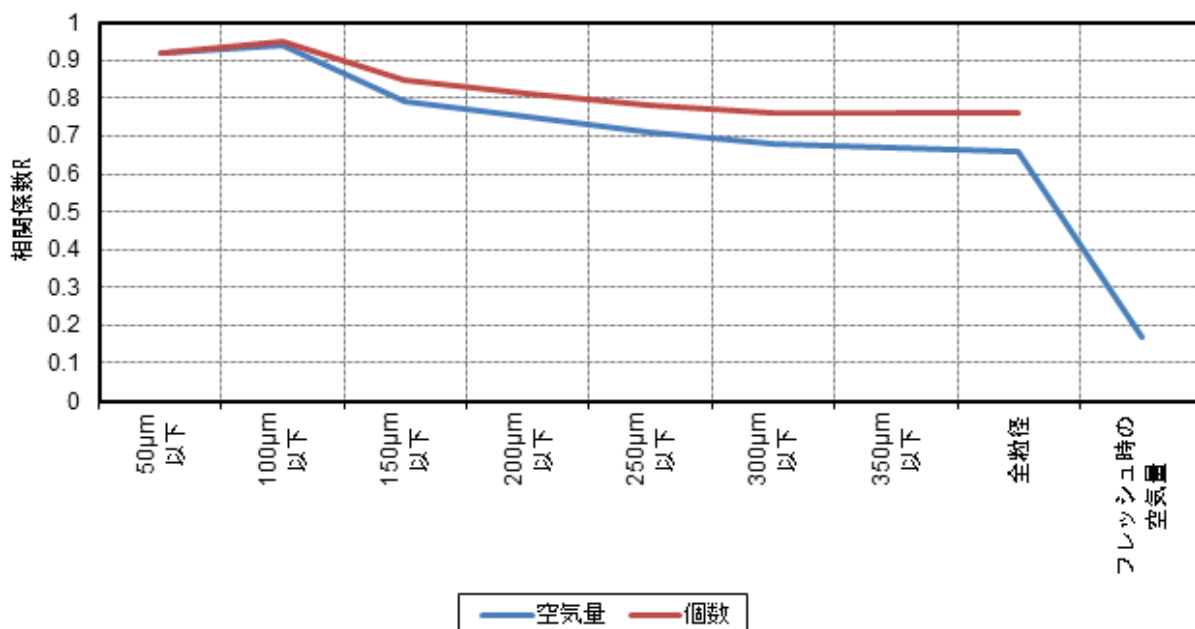


図-15 それぞれの空気泡径以下の空気量または個数とボックス上昇高さの相関係数 (n=10)

ではなく弦長を用いての算出であるが、空気量・個数ともに気泡径の小さい100 $\mu\text{m}$ の相関係数が高く、細かい空気泡を連行させる方が自己充填性向上に有効であると考えられるが、さらに検討が必要である。

併せて、図-15に各指標とボックス上昇高さとの関係を一次式で近似し、相関係数を求めたものを示す。この図から少なくともフレッシュ時の空気量が自己充填性向上のために寄与しているとは言えない。

空気量や空気泡の個数のいずれを指標にした場合でも、空気泡の気泡径が大きくなるほど、ボックス上昇高さとの関係との相関が低くなった。気泡径が大きくなるほど空気泡は自己充填性に寄与しなくなる可能性を得た

## 5. 結論

本研究では、連行空気の質と量がフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、気泡潤滑型自己充填コンクリートの自己充填性と、硬化後の気泡径分布との関係を明らかにした。以下に結論を示す。

- (1) 構成材料の割合とスランプフローを一定にし、練混ぜや空気連行剤の添加量を変えたところ、フレッシュ時の空気量と自己充填性との間に相関関係はなかった。

- (2) 空気泡の体積や個数には誤差があり、一概には言えないが、気泡径が小さくなるほど高い相関関係になった。気泡径の小さい空気泡が多い気泡径分布であるほど自己充填性に有利となる可能性があり、さらなる検討が必要である。

- (3) 気泡径が800 $\mu\text{m}$ 以下の空気泡のみで構成されているコンクリートの、フレッシュ時から硬化にかけての空気量変化がほぼゼロであった。この粒径が、硬化中における空気泡の抜ける・抜けないの境界である可能性がある。

**謝辞** 本研究の気泡測定には、BASF ジャパン株式会社及び株式会社八洋コンサルタントに大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 岡村 甫：新しいコンクリート技術の開発の方向-自己充填コンクリートの開発と実用化-, 財団法人先端建設技術センター, pp. 17-19, 2005年9月
- 2) Attachaiyawuth, A. and Ouchi, M.: Effect of entrained air on mitigation of reduction in interaction between coarse aggregate and mortar during deformation of self-compacting concrete at Fresh Stage, Pro, JCI, pp5-6, July, 2014.