

論文 フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究

浜 幸雄^{*1}・太田 宏平^{*2}

要旨：本研究ではフレッシュコンクリートを用いてコンクリート中に含まれる空気泡の気泡径分布，空気量，比表面積，気泡間隔係数を浮力法により測定し，ASTM C457 のリニアトラバース法による硬化コンクリート中の気泡組織の測定結果と比較検討するとともに，混和剤種類および使用量が気泡組織に及ぼす影響について検討した。

キーワード：フレッシュコンクリート，気泡組織，リニアトラバース法，浮力法

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性を確保するためには適切なエントレインドエアの連行が必要であり，一般にはフレッシュコンクリートの空気量を測定することによって品質管理を行っている。しかし，厳密には耐凍害性に重要な気泡特性はその空気の絶対量ではなく，気泡と気泡との間の距離（気泡間隔係数）であるといわれている。著者らの最近の研究において，図 - 1 に示すように，気泡間隔係数が大きいにもかかわらず標準条件での凍結融解試験で優れた耐凍害性を示す高強度コンクリートが，10 年前後の屋外暴露後に実施した凍結融解試験ではきわめて耐凍害性が劣る結果を示した。この理由として，暴露期間中に生じる微細ひび割れの影響が考えられるが，一方で暴露後の耐凍害性と気泡間隔係数の関係は普通強度の場合と同様となることから，供用中においても所要の耐凍害性を確保するためには，気泡間隔係数に代表される連行空気の状態の管理が重要であることが確認された¹⁾。

硬化コンクリート中の気泡組織の測定には，ASTM C457「顕微鏡によるリニアトラバース法または修正ポイントカウント法」が一般に用いられているが，測定に多大な労力と時間を要する欠点があることから，画像解析技術の発展を背景として 1980 年代後半から画像解析装置を用いて自動的に気泡組織を観察する方法が検討さ

れ，気泡表面間距離，累積気泡容積分布などの新しい指標の提案もなされているが^{2), 3), 4)}，試験体の前処理や気泡の識別精度の問題もあり広く普及するには至っていない。

また，1990 年代にはフレッシュコンクリートで光ファイバーセンサーを用いて気泡組織を測定する技術⁵⁾や気泡の浮力の変化を測定しストークスの法則を用いて気泡組織を解析する方法（浮力法）が開発されているが⁶⁾，わが国での検討事例は見られない。

本研究では，レディミクストコンクリートの品質管理への適用を考慮し，装置および測定方法の簡便さの点から浮力法に着目し，浮力法とリニアトラバース法で気泡組織を測定し，両者

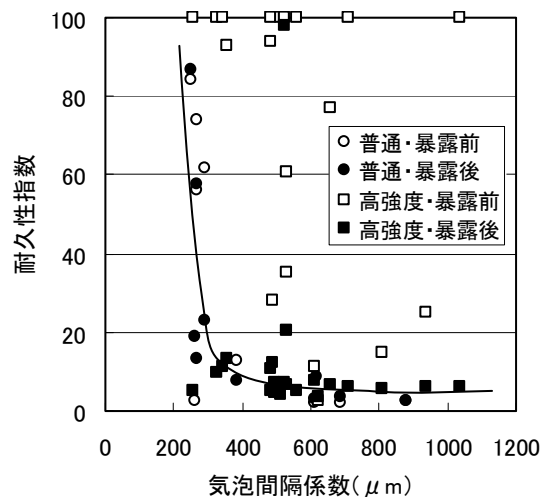


図 - 1 気泡間隔係数と耐久性指数の関係¹⁾

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻

の対応を比較検討することを目的としている。

2. 浮力法の装置と原理

2.1 測定装置

浮力法の基本原理は、フレッシュコンクリート試料中の全気泡を粘性係数の大きな溶液中で結合、分解することなく分散し、その径を維持したまま水中を上昇した気泡による浮力の経時変化を測定することにより、ストークスの法則を適用して気泡径分布、空気量、比表面積、気泡間隔係数などの気泡パラメータを解析するもので、粉体の粒度分布測定で用いられている沈降天秤法を気泡に応用したものである。浮力法の測定装置の概要を図 - 2 および写真 - 1 に示す。装置は電子天秤、ホットスターラー、ライザーコラム、ペトリ皿からなっており、ライザーコラム中にはグリセリン水溶液（密度 1.206 g/cm³、粘性係数 4.0Pa・sec）を沈めた脱気水を満たし、ウェットスクリーニングしたモルタル 15

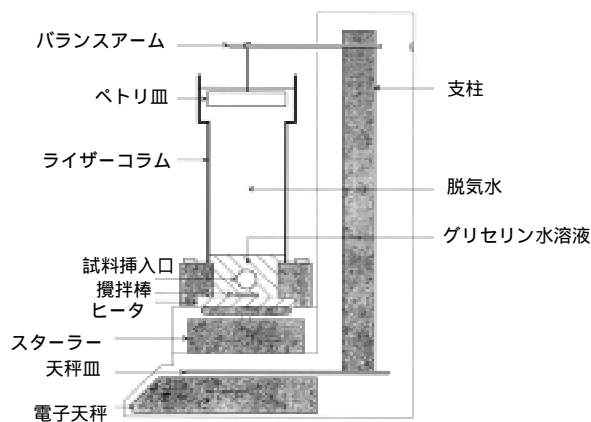


図 - 2 浮力法測定装置の概要



写真 - 1
浮力法測定装置



写真 - 2
気泡上昇時の状況

～20cc を試料として採取し、ライザーコラム下部のグリセリン水溶液中に注入後、温度を 20～25 に保持して、30 秒間スターラーで攪拌しグリセリン水溶液中にモルタルを分散させると、モルタル中に含まれている気泡が写真 - 2 のように水中を上昇し、ライザーコラム上部に取り付けたペトリ皿で上昇した気泡を捕捉して浮力の経時変化を 25 分間測定する。

2.2 気泡パラメータの算出

浮力法によって測定された浮力の経時変化の一例を図 - 3 に示す。水中を上昇する気泡は径の大きなものほどその上昇速度は早く、気泡径と上昇速度はストークスの法則により式(1)で関連付けられる⁷⁾。

$$v = \frac{g(a - \rho_a)}{18\mu} \cdot D_a^2 \quad (1)$$

ここに、 v ：気泡の上昇速度 (m/sec)

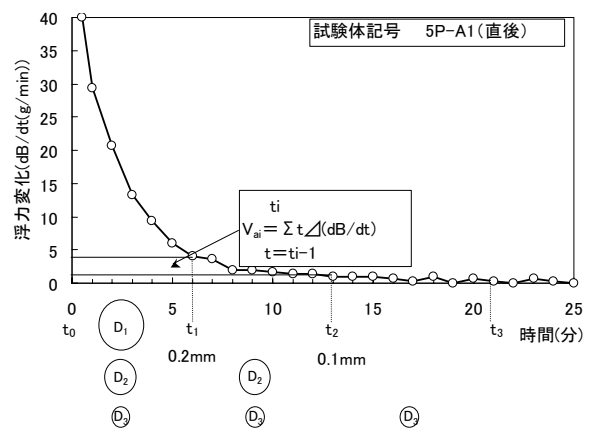


図 - 3 浮力法による浮力の経時変化

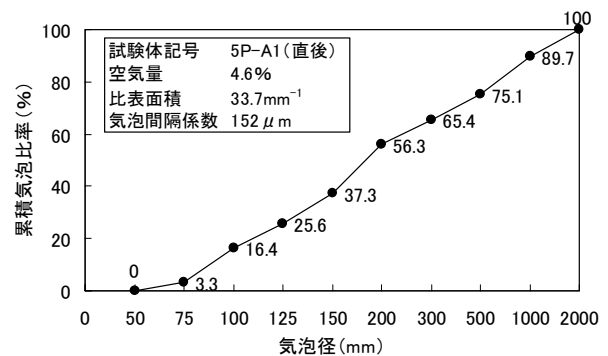


図 - 4 浮力法による測定結果の一例
(気泡径分布)

g : 重力加速度 (m/sec²)
 ρ_a : 気泡の密度 (kg/m³)
 ρ_m : 媒質の密度 (kg/m³)
 μ : 媒質の粘性係数 (Pa・sec)
 D_a : 気泡径 (m)

したがって、ある気泡径 D_i に対応する気泡量 V_{ai} は図 - 3 の結果から浮力の経時変化として式(2)で求めることができる。

$$V_{ai} = \frac{t_i}{t - t_{i-1}} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (dB/dt) dt \quad (2)$$

ここに、 V_{ai} : 直径 D_i の気泡の容積 (cc)
 t : 時間 (min)
 B : 浮力 (g)

さらに、試料中の全気泡量 V_a はそれぞれの径の気泡量の合計で式(3)となり、気泡組織の比表面積は式(4)で、コンクリート全体の空気量 A は式(5)で算出され、これらの結果から ASTM C457 で定義される気泡間隔係数を算出することができる。

$$V_a = \sum V_{ai} \quad (3)$$

$$= \frac{\sum S_{ai} V_{ai}}{V_a} \quad (4)$$

ここに、 V_a : 全気泡の容積 (cc)
 V_{ai} : 直径 D_i の気泡の容積 (cc)
 S_{ai} : 比表面積 (mm⁻¹)
 S_i : 直径 D_i の気泡の比表面積 (mm⁻¹)

$$A = \frac{M_0 \frac{V_a}{V_0}}{M_0 \frac{V_a}{V_0} + 100} \cdot 100 \quad (5)$$

ただし、 $M_0 = M / (100 - A_e) \times 100$ (%)

$$V_0 = V_s - V_a$$

ここに、 A : 空気量 (%)

M : コンクリート中のモルタルの容積率 (%)

A_e : 目標空気量 (%)

V_s : 試料の容積 (cc)

図 - 4 に浮力法による気泡径分布の測定結果の一例を示す。リニアトラバース法で得られる結果は測線を横断した気泡の弦長の分布であるのに対して、浮力法では気泡径自体の分布が得られることに特徴がある。

3. 実験計画および方法

3.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.15 g/cm³) を、細骨材は登別産陸砂 (表乾密度 2.69 g/cm³, 吸水率 1.52%, 粗粒率 2.70) を、粗骨材は敷生川水系安山岩碎石 (最大寸法 20mm, 表乾密度 2.67 g/cm³, 吸水率 1.83%) を用いた。また、化学混和剤として表 - 1 に示す AE 減水剤、高性能 AE 減水剤、AE 剤、消泡剤を用いた。

3.2 コンクリートの調合

表 - 2 にコンクリートの調合を示す。水セメント比を 35, 45, 55, 65% の 4 水準、目標空気量を 1.0 から 6.0% の範囲とし、水セメント比、目標空気量に応じて化学混和剤の種類および用量を調整した。

3.3 測定項目と方法

(1) 練り上がり性状

コンクリートの混練は強制二軸式ミキサを用いた 3 分練りとし、練り上がり性状として、スランプ、スランプフロー、空気量 (圧力法)、単位容積質量、練り上がり温度を測定した。

表 - 1 化学混和剤の種類

記号	化学混和剤種類		主成分
N	AE減水剤標準形		リゲニンスルホン酸系
SP-B	高性能AE減水剤標準形	基本タイプ	ポリカルボン酸エーテル系
SP-X		低空気連行タイプ	
A	AE剤		アルキルエーテル系
R	空気量調整剤 (消泡剤)		ポリアルキレングリコール誘導体

表 - 2 コンクリートの調合

記号	W/C (%)	目標 空気量 (%)	s/a (%)	単位水 量 (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)			混和剤種類・使用量 (C×%)							
					セメント	細骨材	粗骨材	N	SP-B	SP-X	A	R			
3SB	35	4.0	44.3	175	500	746	932		0.90						
3SB-R1												0.90			0.004
3SB-R2		2.0	46.0						800			0.90			0.008
3SB-R3												0.90			0.02
3SB-AR		4.0	44.3						746			0.90		0.0005	0.02
3SX		2.0	46.0						800				0.90		
3SX-A		6.0	42.4						692				0.90	0.004	
3SX-R1		2.0	46.0						800				0.90		0.004
3SX-R2													0.80		0.02
3SX-AR1		4.0	46.0						746				0.80	0.001	0.02
3SX-AR2	6.0	42.4		692				0.80	0.002	0.02					
4N	45	4.0	43.9	191	424	749	952	0.25							
4N-A		6.0	43.3	201	446	695	905	0.25			0.002				
4P-A1		4.0	44.7	185	411	776	952				0.003				
4P-A2		6.0	45.0	190	422	745	905				0.005				
5N	55	4.0	47.1	181	330	854	952	0.25							
5N-A		6.0	46.9	192	348	804	905	0.25			0.002				
5P		1.0	49.0	190	375	878									
5P-A1		4.0	47.2	180	328	858	952				0.003				
5P-A2		6.0	48.2	181	330	848	905				0.005				
6N-A1	65	4.0	49.7	177	272	932	936	0.25							
6N-A2		6.0	49.6	188	289	881	889	0.25			0.002				
6P-A1		4.0	49.8	176	271	935	936				0.003				
6P-A2		6.0	50.7	178	273	921	889				0.005				

(2) 浮力法による測定

10×20cmの円柱型枠にコンクリートを打設し、コンクリートがまだ固まらない段階で、先端に試料採取用のシリンジとウェットスクリーニング用の6mm間隔のケージを取り付けた振動ドリルをコンクリート中に深さ10cmまで挿入し、15ccのモルタル試料を採取して、浮力法による気泡組織の測定を行った。なお、試料の採取および測定は、試料採取時間が結果に及ぼす影響を把握するためにコンクリート打設直後と1時間後の2回行った。

(3) リニアトラバース法による測定

10×20cmの円柱型枠にコンクリートを打設し、材齢2週まで養生後、コンクリートカッターで打込み面から60mmの位置で切断し、切断面を#80、#320、#800のカーボランダムで順次研磨を行い、超音波洗浄機で洗浄後、乾燥した供試体を、倍率175倍のCCDカメラを搭載した顕微鏡でASTM C457のリニアトラバース法に準拠して測定し、空気量、比表面積、気泡間隔係数を算出した。

表 - 3 コンクリートの練り上がり性状

記号	空気量 (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	単位容積質量 (kg/m ³)	練温 ()
3SB	10.6	24.1	430×420	2211	20.0
3SB-R1	6.4	22.2	370×370	2323	20.5
3SB-R2	5.4	22.4	340×340	2363	20.5
3SB-R3	3.0	18.5		2429	19.8
3SB-AR	3.3	20.5		2420	18.8
3SX	7.4	22.1	350×330	2311	21.0
3SX-A	12.2	22.3	370×400	2160	21.0
3SX-R1	5.0	21.9	340×330	2369	22.0
3SX-R2	2.4	7.2		2463	22.0
3SX-AR1	3.9	18.5		2411	22.0
3SX-AR2	4.7	22.4	330×320	2371	21.5
4N	4.0	16.4		2389	21.3
4N-A	6.1	20.0		2320	20.5
4P-A1	3.9	15.7		2334	21.5
4P-A2	5.8	20.0		2297	19.5
5N	4.2	7.2		2369	22.3
5N-A	4.6	18.1		2334	20.0
5P	2.3	14.5		2394	19.5
5P-A1	4.9	7.0		2317	21.5
5P-A2	7.3	19.9		2291	19.5
6N-A1	3.5	4.1		2366	23.0
6N-A2	5.3	19.0		2297	19.0
6P-A1	6.0	4.1		2291	21.5
6P-A2	7.1	19.0		2260	18.5

4. 結果および考察

4.1 練り上がり性状

コンクリートの練り上がり時の性状を表-3に示す。水セメント比45、55、65%の普通強度

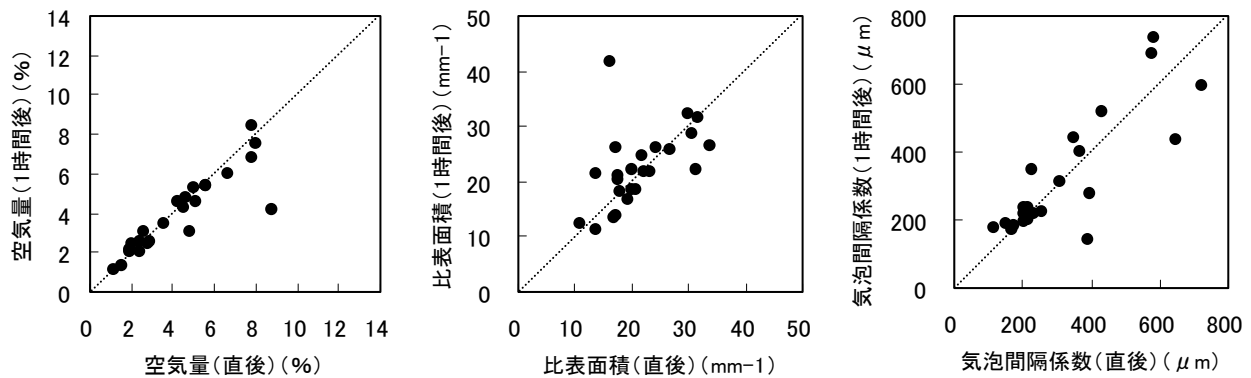


図 - 5 練り上がり直後と1時間後における浮力法による測定結果の比較

コンクリートではほぼ目標とした空気量のコンクリートが得られたが、水セメント比 35% の高強度コンクリートでは高性能 AE 減水剤のみの場合に 10% を超える過剰な空気量のコンクリートとなり、消泡剤または消泡剤と AE 剤を併用することによって目標空気量とした。

4.2 浮力法における試料採取時間の影響

練り上がり直後と 1 時間後における浮力法による空気量、比表面積、気泡間隔係数の測定結果を比較して図 - 5 に示す。両者は多少のばらつきはあるものの良好な対応を示しており、浮力法ではグリセリン水溶液中でのモルタルの分散が可能な範囲であれば、試料採取時間が結果に及ぼす影響は小さいといえる。なお、以下の考察では練り上がり直後と 1 時間後の 2 回の測定値の平均を浮力法の結果として用いることとする。

4.3 浮力法とリニアトラバース法の比較

図 - 6 にリニアトラバース法および浮力法による空気量と圧力法による空気量とを比較して示す。圧力法による空気量に対して、リニアトラバース法ではやや大きめの空気量となり、浮力法では小さめの空気量となっている。

図 - 7 にリニアトラバース法と浮力法による比表面積を比較して示す。両者はばらつきはあるものの比較的良く対応している。

図 - 8 にリニアトラバース法と浮力法に気泡間隔係数を比較して示す。浮力法の気泡間隔係数がやや大きめの値を示している。これは、浮力法では直径 3 mm 未満の気泡を測定対象とし

ているために⁶⁾、空気量がやや小さめに算出されるためである。また、リニアトラバース法では硬化コンクリートの切断面における気泡の弦長から平均気泡径を求め、全ての気泡が同じ大きさで等間隔の立体格子状に分布しているという仮定の下で気泡パラメータを算出しているが、浮力法では気泡径を直接測定しその分布を把握できることから、従来の方法では得られない情報も得ることができると考えられ、今後の検討課題としたい。

4.4 気泡組織に及ぼす混和剤の影響

化学混和剤の種類が気泡組織に及ぼす影響として、図 - 7 に示すように高性能 AE 減水剤を用いた高強度コンクリートの比表面積が普通強度コンクリートに比べて小さい傾向にあり、高強度コンクリートの気泡径が大きいことを意味している。また、図 - 8 に示すように混和剤を用いていない nonAE の普通強度コンクリート(5P)と消泡剤を用いて空気量を調整した高強度コンクリートで、リニアトラバース法による気泡間隔係数が 300 μm 以上の大きな値を示しており、4.1 で述べたように高性能 AE 減水剤のみでは過剰に空気が連行され、消泡剤を用いて空気量を調整することによって径の小さい良質の気泡が減少して、気泡間隔係数が大きくなるものと考えられる。

5. まとめ

フレッシュコンクリートを用いて浮力法により気泡組織を測定し、以下の結論を得た。

- (1) 浮力法ではグリセリン水溶液中でのモルタルの分散が可能な範囲であれば, 試料採取時間が結果に及ぼす影響は小さい
- (2) 浮力法で得られる空気量は圧力法, リニアトラバース法よりも小さめの値となる。
- (3) 浮力法による比表面積はリニアトラバース法による値と比較的良好に対応する。
- (4) 浮力法の気泡間隔係数はリニアトラバース法による値よりやや大きめの値を示す。
- (5) 高性能 AE 減水剤を用いた高強度コンクリートでは比表面積が小さくなる傾向にあり, 消泡剤により空気量を調整すると気泡間隔係数が大きくなる。

参考文献

- 1) 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およ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, pp.425-430, 2003.2
- 2) 原田克己, 地頭蘭博, 仁木孟伯: 画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法, セメント・コンクリート, No.471, pp.22-28, 1986.5
- 3) 西川孝, 前川慎喜, 日下部吉彦, 中野綿一: シアノアクリレートによる硬化コンクリート中の気泡組織の染色と観察, セメント技術年報, No.42, pp.65-67, 1988.5
- 4) 山宮浩信, 児玉和巳: 硬化コンクリート中の気泡分布測定方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.48, pp.168-173, 1994.12
- 5) Ansari, F.: Rapid In-Place Air Content Determination in Fresh Concrete, Concrete International, Vol.13, No.1, pp.39-43, 1991.1
- 6) Donald D.Magura: Evaluation of the Air Void Analyzer, Concrete International, Vol.18, No.8, pp.55-59, 1996.8
- 7) 粉体工学研究会編: 粒度測定技術, 日刊工業新聞社, 1975.8

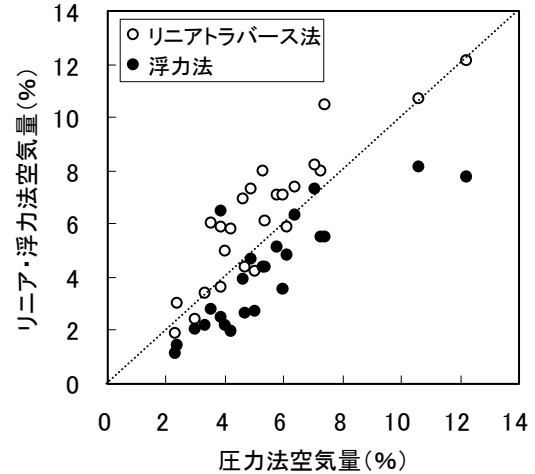


図 - 6 リニアトラバース法および浮力法による空気量と圧力法による空気量の比較

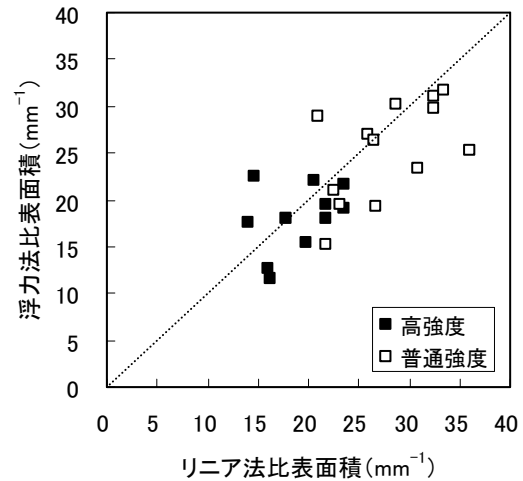


図 - 7 浮力法とリニアトラバース法による比表面積の比較

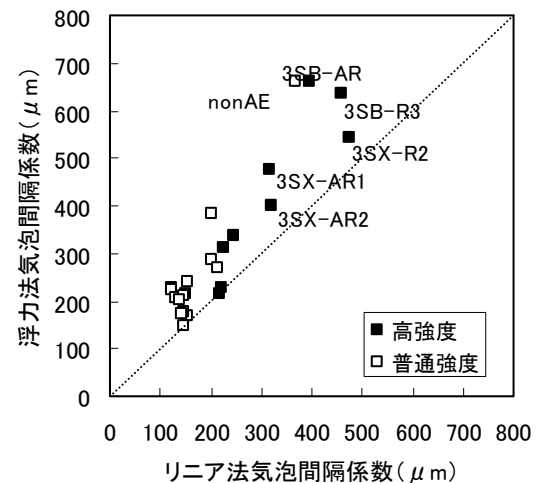


図 - 8 浮力法とリニアトラバース法による気泡間隔係数の比較