

論文 中空微小球を用いたコンクリートのフレッシュ性状および凍結融解抵抗性に及ぼす影響

橋本 学*1・林 大介*2・水野浩平*3・五十嵐数馬*4

要旨：中空微小球を用いたコンクリートについてフレッシュ性状を把握するとともに、凍結融解抵抗性に及ぼす影響について検討した。その結果、中空微小球を添加することで、条件によってはベースコンクリートのフレッシュ時の空気量が減少する場合があります、その減少量とスランプの増減には相関があること、コンクリート中の空気量が少ない場合でも中空微小球の添加によって高い凍結融解抵抗性を示すこと、コンクリートの気泡分布より、気泡径 0.15mm 未満の中空微小球による微細気泡が確実に混和できることが確認された。
キーワード：中空微小球, 空気量, 凍結融解抵抗性, 気泡分布, 気泡間隔係数

1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物では、コンクリート中に含まれる水分が凍結（膨張）と融解を繰り返すことによって、ひび割れや骨材自体のポップアウト、スケーリング等の凍害劣化が問題となっている。コンクリート構造物の凍結融解抵抗性を確保するためには、コンクリート中に存在する微細な気泡が重要とされており、一般的には AE 剤により微細な独立気泡（25～250 μm）を連行することで、凍結作用によって発生する圧力を緩和することが有効とされている。一方で、施工時のバイブレータによる過剰な締固めなどによって気泡が消失することが考えられ、AE 剤を適正量用いた場合でも、凍結融解抵抗性に有効な気泡が確保されない場合がある¹⁾。また、既往の研究では、コンクリートの硬化過程で連行された微細気泡がブリーディング水などによって、気泡同士が合泡や破泡することで消失すること²⁾や、フライアッシュに含まれる未燃炭素に AE 剤が吸着されることで AE 剤の効果が低下し、凍結融解抵抗性が確保できない場合がある³⁾ことが明らかとされている。

本検討では、コンクリート中において消失することのない中空微小球に着目し、中空微小球を用いたコンクリートについてスランプおよび空気量といったフレッシュ性状を把握するとともに、凍結融解抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 中空微小球

中空微小球はアクリロニトリル系の樹脂からなる空気を内包した混和材料で、平均粒径が 40 μm および 80 μm、みかけ密度で 0.16g/cm³ および 0.13g/cm³ と非常

に微小かつ軽量である。(写真-1)。また、AE 剤によって連行された気泡とは異なり、コンクリート中で消失することのない微細な独立気泡であることが特長の一つである。中空微小球の SEM 画像を写真-2 に示す。



写真-1 中空微小球 写真-2 SEMによる画像

表-1 使用材料

材料名	記号	適用
水	W	上水道水または上澄水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度:2.63g/cm ³ , 粗粒率:2.97 山砂, 表乾密度:2.60g/cm ³ , 粗粒率:1.67
	S2	砕砂, 表乾密度:2.65g/cm ³ , 粗粒率:3.00 砕砂, 表乾密度:2.65g/cm ³ , 粗粒率:3.00 山砂, 表乾密度:2.58g/cm ³ , 粗粒率:2.00
粗骨材	G1	砕石 2010, 表乾密度:2.65g/cm ³ , 実積率:62.9 砕石 1005, 表乾密度:2.65g/cm ³ , 実積率:62.4
	G2	砕石 2005, 表乾密度:2.66g/cm ³ , 実積率:60.0
混和剤	Ad1	AE 減水剤, リンゴンスルホン酸化合物
	Ad2	AE 減水剤, リンゴンスルホン酸化合物, 枝シカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物
	Ad3	空気調整剤, 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	Ad4	空気調整剤, ポリアルキレングリコール誘導体
中空微小球	D40	密度:0.16g/cm ³ , 粒径:35~55 μm, アクリロニトリル系樹脂
	D80	密度:0.13g/cm ³ , 粒径:50~90 μm, アクリロニトリル系樹脂

*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修
 *2 鹿島建設(株)技術研究所 土木構造グループ 上席研究員 博士(工学)
 *3 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 研究員 工修
 *4 デンカ(株)インフラ・ソーシャルソリューション部門 特殊混和材部 工修

表-2 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単体量 (kg/m ³)						Ad1 C× (%)	Ad2 C× (%)	Ad3 C× (%)	Ad4 C× (%)	D40 vol (%)	D80 vol (%)
					W	C	S1	S2	G1	G2						
SL8-50-4.5	50.0	44.6	8.0	4.5	168	336	799	—	999	—	0.25	—	0.0045	—	— 0.5 1.0 1.5	—
SL8-55-4.5	55.0	48.0	8.0	4.5	170	310	—	868	—	950	—	1.10	0.0020	—	— — —	— 1.0
SL10-50-4.5	50.0	44.6	10.0	4.5	175	350	785	—	983	—	0.25	—	0.0045	—	— 0.5 1.0 1.5	—
SL12-55-4.5	55.0	45.7	12.0	4.5	172	312	822	—	984	—	0.25	—	0.0030	—	— — 0.5	—
SL8-55-1.5	55.0	45.2	8.0	1.5	170	310	817	—	998	—	0.25	—	—	0.0400	1.0 — 0.5 1.5 — 0.75	— — 1.0 0.5 — 1.5 0.75

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-1に示す。細骨材 S2 および粗骨材 G2 はレディーミクストコンクリート工場の実機ミキサにて製造したため、工場が保有する常用の材料を使用した。化学混和剤は表に標記されているものを使用し、中空微小球については、平均粒径 40μm および 80μm の 2 種類のもの（以降、D40、D80 と称す。）を使用した。

コンクリートの配合を表-2に示す。配合名で「SL8-50-4.5」は、目標スランブ 8cm、水セメント比 50%、中空微小球を添加していないベースコンクリートの設計空気量 4.5%を表している。設計空気量 4.5%を満足するために AE 剤 (Ad3) を使用した。また、設計空気量が 1.5%となる SL-8-55-1.5 については、消泡剤 (Ad4) を使用することで所定の空気量を確保することとした。中空微小球はコンクリート 1m³ に対し外割で添加し、添加量は体積換算で 0.5vol%、1.0vol%および 1.5vol% の 3 種類とした。D40 および D80 の添加量については表に示すとおりで、SL8-55-1.5 の配合で中空微小球を 1.5vol% 添加したケースについては、D40 および D80 の単体のケースと、それぞれを 0.75vol% ずつ混合したケースについて検討した。

2.3 コンクリートの試験項目および実験水準

コンクリートの試験項目を表-3に、試験水準を表-4に示す。コンクリートのフレッシュ性状（練上がり温度、スランブ、空気量）は全ての配合で実施し、空気量については JIS A 1128 の圧力法および JIS A 1116 の質量法の 2 種類の方法で実施した。圧縮強度は JIS A 1108 に従い、材齢 28 日で SL-8-50-4.5 のみの配合について、凍結融解試験については JIS A 1148 (A 法) に従い、SL-12-55-4.5 および SL8-55-1.5 の配合のうち D40、D80 を 1.0vol% 添加したケースについて実施した。硬化後の空気量および

表-3 コンクリートの試験項目

試験項目	試験方法	備考
練上がり温度	温度計による測定	目標:20℃
スランブ	JIS A 1101 「コンクリートのスランブ試験方法」	目標: 8.0,10.0, 12.0cm
フレッシュコンクリートの空気量(圧力法)	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」	目標: 1.5,4.5%
フレッシュコンクリートの空気量(質量法)	JIS A 1116 「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法および質量試験による試験方法(質量方法)」	目標: 1.5,4.5%
圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」	材齢28日
凍結融解試験	JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験方法」	
硬化後の空気量および気泡間隔係数	ASTM C 457 「リニアトラバース法」	—

表-4 試験水準

試験項目 配合名	練上がり温度	スランブ	空気量		圧縮強度	凍結融解(法)	気泡間隔係数
			圧力法	質量法			
SL8-50-4.5	○	○	○	○	○	—	—
SL8-55-4.5	○	○	○	○	—	—	○
SL10-50-4.5	○	○	○	○	—	—	—
SL12-55-4.5	○	○	○	○	—	○	—
SL8-55-1.5	○	○	○	○	—	○*	—

※凍結融解試験については、D40、D80 を 1.0vol% 添加したケースのみについて実施

気泡間隔係数の測定は SL-8-55-4.5 のケースのみで ASTM C 457 に従い、φ 150mm の円柱供試体を作製後、材齢 14 日にて中央部を厚さ 2cm でスライスし、測定表面を鏡面研磨した後に測定した。

2.4 実験方法

コンクリートの練混ぜは容量 50ℓの強制二軸練りミキサを用い、SL8-55-4.5%の配合については、中空微小球が実機においても室内試験と同様に扱えることを確認するために、工場保有の強制二軸練りミキサ（容量 5.0m³）を用いた。練混ぜ時の中空微小球の添加方法について、容量 50ℓの強制二軸練りミキサでは骨材の投入と同時に中空微小球を添加し、練混ぜ時間を 180 秒とした。また、SL8-55-4.5%の配合については、はじめにベースコンクリート 4.0m³を実機ミキサにて 90 秒で練り混ぜ、ベースコンクリートをアジテータ車に積み替えた後、アジテートした状態で 30 分間待機し、30 分経過した時点でのベースコンクリートのフレッシュ性状を確認した。その後、水溶性の袋に入れた中空微小球をアジテータ車内に直接投入し、高速攪拌にて 120 秒間中空微小球を練り混ぜ、中空微小球を添加した試料について各種フレッシュ性状を確認し、気泡間隔係数測定用の供試体を作製した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状の結果一覧を表-5 に、スランブの比較、圧力法および質量法の空気量の比較を図-1、図-2 のそれぞれに示す。図に示す棒グラフは圧力法の結果を示し、プロットについては質量法の結果を示した。測定 SL-8-55-1.5 の配合については、中空微小球の添加量が 1.0vol%と 1.5vol%にて実験した日時が異なるため、ベースコンクリートの結果を 2 つに分けて記載

した。ベースコンクリートのスランブは、目標スランブに対して全てのケースで±1.5cm の範囲に収まる結果であった。中空微小球を添加することで設計空気量 4.5%および 1.5%のケースともに、SL12-55-4.5、SL8-55-1.5①の配合のようにスランブが増加する場合と、SL8-50-4.5、SL8-55-1.5②の配合のように減少する場合の両方の結果が認められた。この結果の考察については後述することとする。

ベースコンクリートのフレッシュ時の空気量において、圧力法と質量法の結果の比較では、SL8-55-4.5 の配合を除く全てのケースでそれぞれの測定差が 0.6%以内に収まっており、両者の測定結果は同等であることが確認された。一方で、中空微小球を用いたケースでは、圧力法と質量法の測定差は大きくなる傾向が認めれ、SL-10-50-4.5 の配合において、最大で 1.4%であった。この理由として、圧力法による空気量の測定では、中空微小球によって圧力伝達が抑制されることから、中空微小球を含む実際に混和された空気量よりも小さい値として測定されるものと考えられた。中空微小球を用いたコンクリートについて、SL8-50-4.5 の配合のようにベースコンクリートの質量法での空気量が 4.8%に対し、中空微小球を 1.0vol%添加しているにもかかわらず 4.5%となり、ベースコンクリートよりも空気量が減少する場合があることが認められた。この理由に関しても後述することとする。

D40 および D80 の中空微小球の径の違いについて、同一配合での比較では、SL8-55-1.5①の配合で D40、D80 のそれぞれを 1.0vol%に添加したケースと、SL8-55-1.5

表-5 コンクリートのフレッシュ性状結果一覧

配合名	中空微小球添加量(%)		目標スランブ(cm)	目標空気量(ベース)(%)	練上がり温度(°C)	スランブ(cm)	フレッシュ時の空気量(%)		単位容積質量(kg/m ³)
	D40	D80					圧力法	質量法	
SL8-50-4.5	—	—	8.0	4.5	20	8.0	4.9	4.8	2,280
	0.5	—			20	8.0	4.5	4.8	2,280
	1.0	—			19	6.0	4.0	4.5	2,287
	1.5	—			20	6.0	4.2	5.0	2,276
SL8-55-4.5	—	—	8.0	4.5	20	9.5	4.8	3.8	2,314
	—	1.0			20	9.5	5.7	5.4	2,277
SL10-50-4.5	—	—	10.0	4.5	20	10.0	4.9	5.3	2,274
	0.5	—			21	9.5	4.5	5.2	2,277
	1.0	—			20	9.5	4.4	5.4	2,271
	1.5	—			20	8.5	4.4	5.8	2,261
SL12-55-4.5	—	—	12.0	4.5	19	11.0	4.8	4.7	2,286
	0.5	—			19	12.0	4.7	4.9	2,281
SL8-55-1.5①	—	—	8.0	1.5	20	7.5	1.7	2.3	2,348
	1.0	—			21	10.5	1.8	3.0	2,330
	—	1.0			21	9.5	1.8	2.9	2,332
	0.5	0.5			21	11.5	1.9	3.2	2,326
SL8-55-1.5②	—	—	8.0	1.5	18	7.0	1.8	2.0	2,361
	1.5	—			19	6.0	1.8	3.1	2,335
	—	1.5			19	6.0	1.8	2.6	2,346
	0.75	0.75			19	5.0	1.9	2.8	2,342

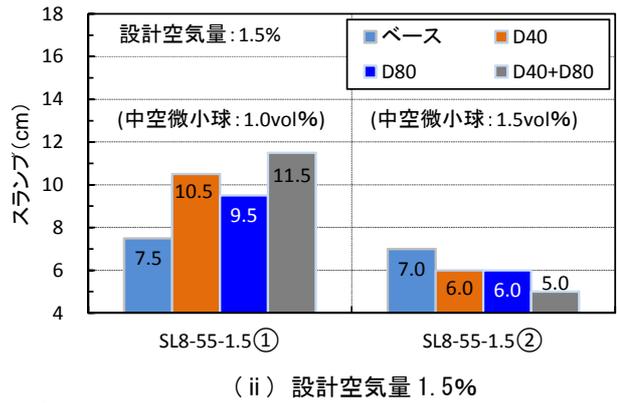
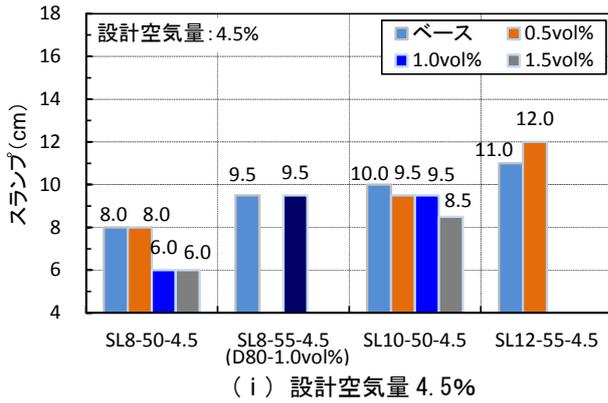


図-1 スランプの比較

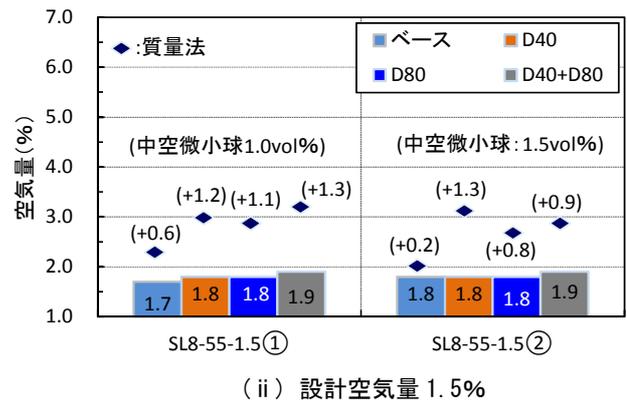
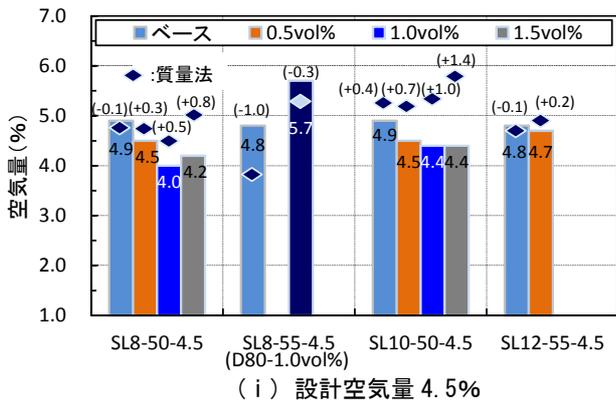


図-2 フレッシュコンクリートの空気量の比較 (圧力法と質量法)

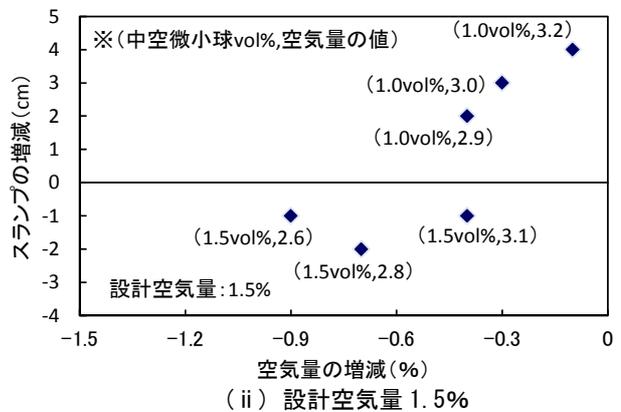
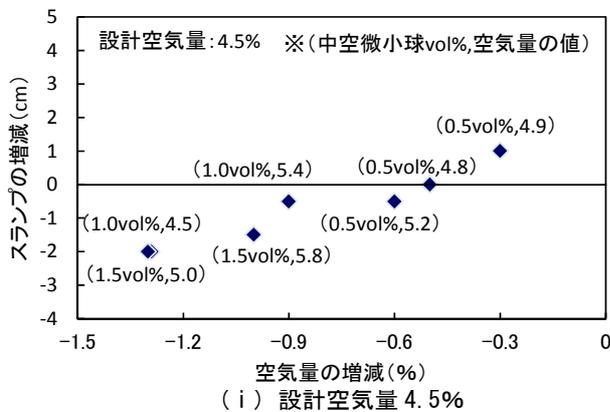


図-3 空気量の増減とスランプ増減

②の配合で D40, D80 のそれぞれを 1.5vol% 添加した 2 つのケースがあるが、スランプおよび空気量のそれぞれの結果が同程度であったことから、径の違いがフレッシュ性状に与える影響は小さいものと考えられた。

ベースコンクリートのスランプに対し、中空微小球を添加することでスランプが増減した理由について、ベースコンクリートに対する中空微小球を添加したときの空気量の増減に着目して考察することとした。図-3 に空気量の増減とスランプの増減の関係を示す。ここで、空気量の増減とは、質量法で測定した空気量の値から中空微小球の添加量を差し引いたものを、中空微小球を除く空気量として計算で求め、ベースコンクリートに対す

る中空微小球を除く空気量の増減を示したものである。例えば、SL-8-50-4.5 の配合において、ベースコンクリートの質量法での空気量が 4.8%、スランプが 8cm であり、D40 を 0.5vol% 添加したケースでは、中空微小球を除く空気量は 4.3% ($4.8\% - 0.5\% = 4.3\%$)、スランプ 8cm となる。空気量の増減とスランプは、それぞれ -0.5% ($4.8\% - 4.3\%$) と 0cm ($8\text{cm} - 8\text{cm}$) として図にプロットされる。なお、SL8-55-4.5 の配合については、圧力法と質量法の差が大きかったため空気量の測定が適切に計測できていない可能性があったと判断し除外することとした。

図より、設計空気量 4.5% の場合では、中空微小球の添加量が多くなるに従い、中空微小球を除く空気量が減

少する傾向が認められ、空気量の減少に伴いスランプも減少する傾向が認められる。一方で、設計空気量 1.5% の場合では、中空微小球の添加量が 1.0vol% のケースで中空微小球を除く空気量の減少は 0.3% 程度であり、スランプも増加する傾向にあることが認められる。この理由については定かではないが、既往の研究⁴⁾より、0.15mm 以下の細骨材が多くなると空気が連行しにくくなるとの報告もあり、中空微小球を添加することで中空微小球を除く空気量が減少し、スランプが小さくなったものと考えられた。一方で、設計空気量 1.5% では消泡剤によって空気がほとんど連行されていない状態にあるものと考えられ、中空微小球を添加しても中空微小球を除く空気量の減少は少なく、中空微小球のボールベアリング効果が卓越することでスランプが増加したものと考えられた。

3.2 強度特性

図-4 にの圧縮強度の比較を示す。図より、中空微小球の添加量が多くなるに従い、強度は低下する傾向にあり、ベースコンクリートに対する強度の比率で、0.5vol% の場合では 97%、1.0vol% で 94%、1.5vol% で 90% となった。今回の実験では、圧力法による空気量の測定結果が 4.5% から 5.0% の範囲と同程度であったにもかかわらず、強度が低下した理由については引き続き検討していく。

3.3 凍結融解抵抗性

図-5 に設計空気量 4.5% の場合と 1.5% の場合に中空微小球を添加したときの凍結融解試験の結果を示す。設計空気量 4.5% の場合、中空微小球を添加していないベースコンクリートでは、1000 サイクルを超えた時点で相対動弾性係数が 60% 以下となったが、中空微小球を 0.5vol% 添加したケースでは 1200 サイクルを超えた時点でも相対動弾性係数が 80% 以上で高い凍結融解抵抗性を示した。一方で、空気量が 1.5% の場合では、ベースコンクリートでは、72 サイクル時点で相対動弾性係数が 36% まで低下したが、中空微小球を 1.0vol% 添加したケースでは、D40 と D80 ともに 450 サイクルを超える高い凍結融解抵抗性を示す結果であった。今回の実験の範囲では中空微小球の径の違いが凍結融解抵抗性に与える影響は認められなかった。

また、質量減少率について、設計空気量 1.5% 場合では中空微小球の有無による違いは認められなかったものの、4.5% の場合は、中空微小球を添加することで中空微小球を添加しないベースコンクリートに対し、質量減少率が小さくなっていることから、スケージングに対しても高い抵抗性を示すものと考えられた。

3.4 硬化後の空気量および気泡分布

3.3 において、中空微小球を用いたことで高い凍結融解抵抗性を示す結果が得られたが、そのメカニズムを解

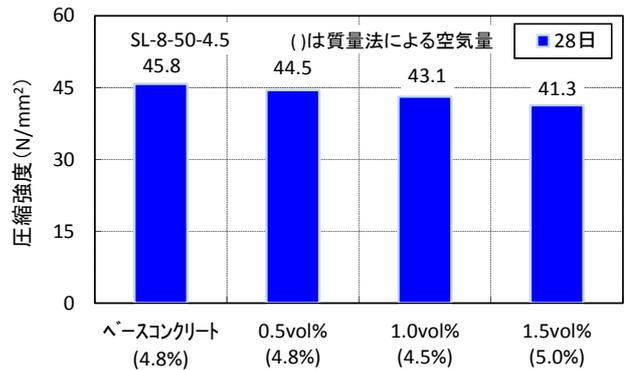
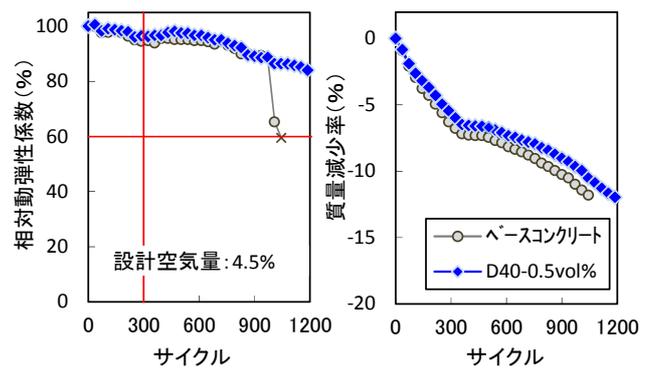
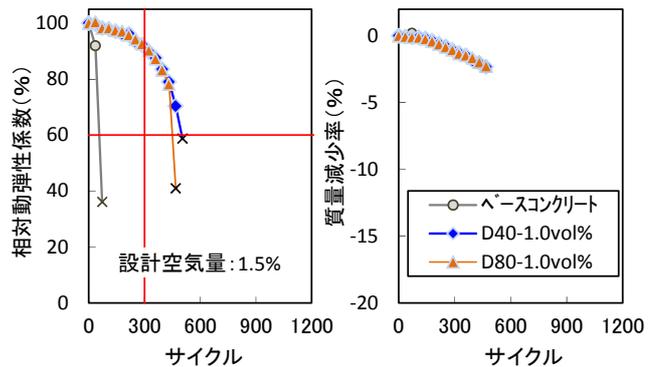


図-4 圧縮強度 (材齢 28 日)



(i) 設計空気量 4.5%



(ii) 設計空気量 1.5%

図-5 凍結融解試験結果

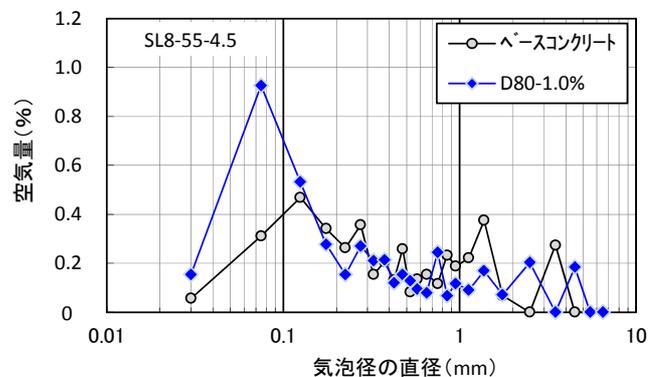


図-6 気泡分布

釈するために気泡分布から考察することとした。

図-6 に SL8-55-4.5 の硬化後の気泡分布を、表-6 に

硬化後の空気量と気泡間隔係数を示す。ベースコンクリートと D80 を 1.0vol% 添加したケース (D80-1.0%) の比較では、硬化後の空気量はベースコンクリートの 4.4% に対し、D80-1.0% では 4.5% と同程度であった。一方で、気泡分布において、D80-1.0% は気泡径 0.075mm 付近でピークが顕著となっており、このピークは中空微小球を添加したことによるものと考えられた。

図-7 に各気泡径での硬化後の空気量の比較を示す。硬化後の空気量を全気泡とし、既往の研究⁶⁾において、凍結融解抵抗性と非常に相関が高いとされる気泡径 0.15mm 未満の空気量と、目視にて確認可能な気泡径 1mm 以上をエントラップトエアとして示した。上述したように、全気泡の比較ではベースコンクリートと D80-1.0vol% はそれぞれ 4.4% と 4.5% で同程度であったが、0.15mm 未満の空気量はベースコンクリートで 0.84%、D80-1.0vol% で 1.61% と中空微小球を添加することで 0.77% 多くなる結果が得られた。一方で、1mm 以上の空気量については、ベースコンクリートの方が 0.22% 多くなる傾向が認められた。今回の実験ではベースコンクリートに対し、D80-1.0vol% のケースで 0.15mm 未満の空気量が 0.8% 程度多くなっており、D80 の径の大きさのばらつきを考慮したときに、硬化後においても中空微小球が微細気泡としてコンクリート中に確実に混和されていることが確認された。

図-8 に既往の研究⁵⁾より得られた 0.15mm 未満の空気量と気泡間隔係数の関係から今回得られた結果をプロットしたものを示す。既往の研究では耐久性指数のデータについても分類されており、0.15mm 未満の空気量を 0.45% 以上連行することで、耐久性指数 60% 以上を確保できるとされている。今回の実験結果においても既往の研究と高い相関が認められ、ベースコンクリートおよび D80-1.0vol% とともに、0.15mm 未満の空気量が 0.45% 以上確保されていることから、凍結融解抵抗性が確実に確保されているものと考えられる。また、中空微小球を用いることで凍結融解抵抗性がさらに向上することが既往の研究との関係からも示される結果となった。

4. まとめ

中空微小球を用いたコンクリートに関して、今回の検討において以下の知見を得た。

- (1) 中空微小球を添加することで、条件によってはベースコンクリートのフレッシュ時の空気量が減少する場合があります、その減少量とスランプの増減には相関が認められた。
- (2) ベースコンクリートの空気量が少ない場合でも、中空微小球を添加することで高い凍結融解抵抗性を示すことが確認された。

表-6 硬化後の空気量と気泡間隔係数

SL8-55-4.5	空気量(%)	気泡間隔係数(μm)
ベースコンクリート	4.4	319
D80-1.0%	4.5	207

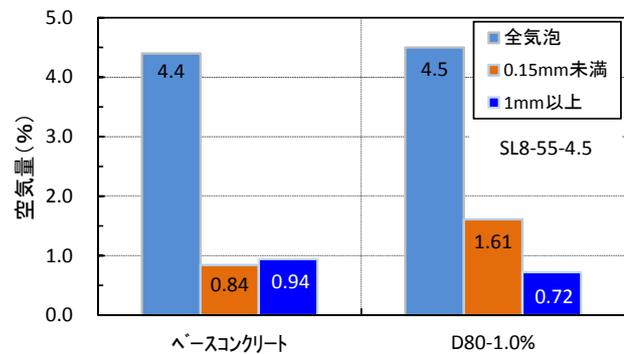


図-7 硬化後の空気量の比較

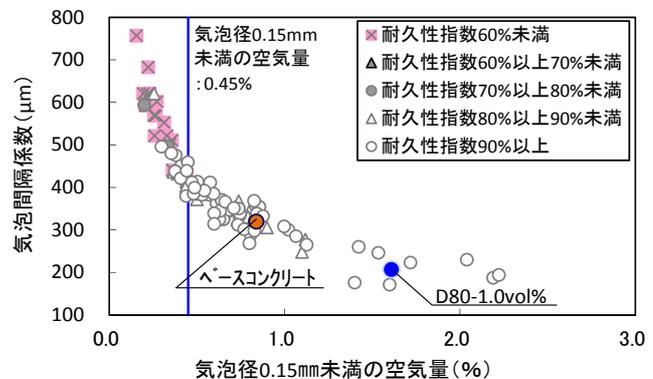


図-8 0.15mm 未満の空気量と気泡間隔係数の関係⁶⁾

- (3) コンクリートの気泡分布より、気泡径 0.15mm 未満の中空微小球による微細気泡が確実に混和できることが確認された。

参考文献

- 1) 橋本学, 湯浅昇, 緒方英彦, 林大介: コンクリートの配(調)合および打込み・締固めが硬化後の気泡分布に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1557-1562, 2016
- 2) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮二郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69, 2012
- 3) 長瀧重義, 大賀宏行, 嶋田久俊: フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価, セメント技術年報, No.41, pp.371-374, 1987
- 4) 山下嘉治: ダムコンクリート用骨材の問題点について(その2), 骨材資源通巻 No.44, 1980
- 5) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012