

論文 中空微小球が圧送および締固め前後におけるコンクリートの空気量の変化に及ぼす影響

水野浩平*1・林 大介*2・橋本 学*3・五十嵐数馬*4

要旨：アクリロニトリル系樹脂製の微細な中空球体である「中空微小球」を添加することで、コンクリートの凍結融解抵抗性は向上することが明らかにされている。本検討では、中空微小球が圧送、打込みおよび締固め前後におけるコンクリートの空気量の変化に及ぼす影響を評価した。その結果、硬化後の気泡径分布より、圧送、打込みおよび締固め前後において、AE 剤により連行された空気泡は 0.15 mm 未満の耐凍害性の確保に有効な空気量が減少した。一方、中空微小球を添加した場合は、直径 0.075 mm 付近の空気量に明瞭なピークが認められ、0.15 mm 未満の空気量が保持される結果が得られた。

キーワード：中空微小球、凍結融解抵抗性、気泡径分布、気泡間隔係数、圧送、締固め

1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物では、コンクリートに含まれる水分が凍結と融解を繰り返すことによって、ひび割れや、骨材のポップアウトなどといった凍害が問題となる場合がある。また、塩化物イオンを含む凍結防止剤が散布される環境では、コンクリート表面に激しいスケーリングや鉄筋腐食を伴う凍害と塩害の複合劣化の様相を示すこともある¹⁾。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、凍結作用によって発生するコンクリート内部の圧力を緩和することが有効であり、一般的には、AE 剤や AE 減水剤により所定の空気量を確保する対策が施されている。例えば、東北地方においては、これらの化学混和剤の調整によって荷卸し時の空気量を 6.0% とすることが標準的な対策とされている¹⁾。しかし、フレッシュコンクリートの空気量を確保しても、コンクリートポンプによる圧送、施工時の棒状パイプレタによる締固めなどによって空気泡が消失することも考えられ、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²⁾。また、コンクリートが硬化に至るまでの間に、フレッシュ時に連行された空気泡がブリーディング水などの影響を受け、合泡や破泡して消失すること³⁾が明らかとされている。このため、凍害劣化が生じた構造物において、硬化後の空気量が 1% 台にまで減少した事例もある⁴⁾ など、確実にコンクリート中に空気泡を残存させる気泡制御技術が望まれている。

上記の問題を背景に、所要の空気泡を確保する技術として樹脂系の中空微小球を用いる方法が提案されている^{5)~13)}。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中空球体の混和材料で、平均直径 0.08

mm (80 μm)、密度 0.13 g/cm³ と非常に微小かつ軽量である (Photo 1)。AE 剤によって連行される空気泡とは異なり、消失することのない微細な独立気泡としてコンクリート中に混和することができる。中空微小球の SEM 画像を Photo 2 に示す。

これまでに著者らは、中空微小球による凍結融解抵抗性の向上効果について、硬化後の気泡径分布に着目し、凍結融解抵抗性に影響を及ぼす 0.15 mm 未満の空気泡⁴⁾ が確保されることによって、凍結融解抵抗性が向上することを明らかにしてきた⁶⁾。また、バッチャープラントのミキサやアジテータ車に積載したコンクリートに中空微小球を添加し練混ぜや攪拌を行うことで、中空微小球を適切にコンクリート中に分散し、確実に凍結融解抵抗性が向上することを確認してきた⁷⁾。しかし、実施工を想定した場合に、圧送、打込みおよび締固めの前後で、中空微小球自体の密度が軽いため、中空微小球が分離してコンクリート表面に浮いてしまうことなどの懸念事項が考えられる。

そこで、本検討では、圧送、打込みおよび締固めに着目し、中空微小球がその前後における空気量の変化に及ぼす影響について評価した。

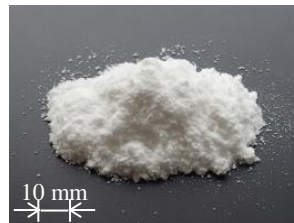


Photo 1 Micro sphere

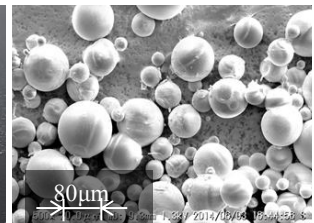


Photo 2 Picture by SEM

*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 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 主任研究員 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

Table 1 Properties of material

Materials	Symbol	Remarks
Water	W	Groundwater
Cement	C	Blast-furnace slag blended cement ,Density:3.04 g/cm ³
Fine aggregate	S	①Sand, Density in saturated surface-dry condition:2.59 g/cm ³ ,F.M.:2.80 ②Crushed sand, Density in saturated surface-dry condition:2.72 g/cm ³ ,F.M.:2.80 (Blend,①:②=60:40)
Coarse aggregate	G	①2005Crushed stone, Density in saturated surface-dry condition:2.80 g/cm ³ ,Solid volume:58.0% ②2005Crushed stone, Density in saturated surface-dry condition:2.90 g/cm ³ , Solid volume:58.0% (Blend,①:②=50:50)
Admixture	Ad	Air-entraining and water-reducing agent , Modified lignosulfonate compound
	AE	Air-entraining agent ,Modified rosin base anionic surface active agent
Micro Sphere	MS	Density:0.13 g/cm ³ ,Particle size:80 μm, Acrylonitrile resin

Table 2 Mix proportion of concrete

Symbol	W/C (%)	s/a (%)	SL (cm)	Air (%)	Unit content (kg/m ³)				Ad (C×%)	AE (C×%)	MS (vol%)
					W	C	S	G			
Base	55.0	47.5	12.0	5.5	166	302	853	1017	1.0	0.0020	—
MS	55.0	47.5	12.0	4.0(5.5 [*])	166	302	853	1017	1.0	0.0010	1.5

*Air content included Micro sphere

Table 3 Test item

Item	Test method	Remarks
Concrete temperature	Thermometer	Target:20°C
Slump	JIS A 1101	Target: 12.0±2.5 cm
Fresh concrete air	JIS A 1128	Target: 5.5±1.5%
Unit volume mass	JIS A 1116	—
Air void diameter	ASTM C 457	—
Freezing and thawing	JIS A 1148	—

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を **Table 1** に示す。レディーミクストコンクリート工場が保有する材料を使用した。中空微小球は平均粒径 0.08 mm (80 μm) のものを使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を **Table 2** に示す。コンクリートの配合は中空微小球を添加しない配合 (以下 Base) と、中空微小球を 1.5vol% 添加した配合 (以下 MS) の 2 配合とした。Base については、東北地方の寒冷地であることを考慮して空気量を 5.5% とした。また、スランブは 12.0 cm とした。MS については Base と同様に、空気量の設計値を 5.5% とした配合に対し、現着時の空気量が 4.0% となるように AE 剤量を調整して製造し、実験ヤードで 1.5vol% の中空微小球を添加した。水セメント比は一般的な RC 構造物を想定し、耐久性の観点から 55% とした。

2.3 試験項目

コンクリートの試験項目を **Table 3** に示す。空気量については、中空微小球の圧力伝達が気泡の場合と異なるため、圧力法によって測定された空気量の値は、実際に混入された空気量よりも小さい値として測定される⁵⁾。そこで、本検討では JIS A 1116 (質量法) で測定した。硬化後の空気量および気泡間隔係数は ASTM C 457 に準拠し、φ100 mm の円柱供試体を作製後、材齢 14 日にて中央部を厚さ 20 mm でスライスし、1 μm のダイヤモンドペーストを用いて測定面の鏡面研磨を施した後にリニアトランス法により測定を行った。

2.4 実験方法および水準

本実験は実施工を想定して、圧送、打込みおよび締固めの各施工段階でスランブ、空気量試験および試料採取を実施した。試験および試料採取の順序を **Table 4** に示す。圧送前は、スランブおよび空気量の測定、気泡径分布および凍結融解試験の供試体を採取した。圧送後につ

Table 4 Procedure of test and sampling

Item	Symbol	Before Pumping	After Pumping (Before placing)	After placing and compaction (hardened core)		
				Upper	Center	Under
Slump/Air	Base	○	○	—	—	—
	MS	○	○	—	—	—
Air Void Diameter	Base	○	○	○	○	○
	MS	○	○	○	○	○
Freezing and thawing	Base	○	—	—	—	—
	MS	○	—	—	—	—

いては、スランブおよび空気量の測定ならびに気泡径分布の供試体を採取した。また、打込みおよび締固め後の測定については、硬化後のマスブロック試験体よりコアを採取した。以下にその詳細を示す。

(1) コンクリートの製造および場外運搬

レディーミクストコンクリート工場にて強制二軸式ミキサを用いて 3 m³ のコンクリートを 30 秒間練り混ぜた。その後、コンクリートをアジテータ車に積載し、実験ヤードまで 45 分間運搬した。なお、MS のコンクリートについては、実験ヤードに到着後、アジテータ車のホップより 1.5vol% の中空微小球を投入し、120 秒間高速攪拌させた。中空微小球はパルプ製の水溶紙に梱包し、手で投入しやすいように 1 袋あたり 0.25 m³ 分に分割して合計 12 袋を投入した。水溶紙に梱包した中空微小球を **Photo 3** に、中空微小球の投入状況を **Photo 4** に示す。

(2) コンクリートポンプによる圧送

圧送は、理論最大吐出量=160 m³/h、理論最大吐出圧

=8.5 MPa のコンクリートポンプ車により行った。圧送前にアジテータ車のシュートよりコンクリートを採取し、スランプおよび空気量の測定を行った後に、ポンプ車ブームと地面からの高さが 16 m となるように設置して圧送を行った。なお、各配合の圧送前に先送りモルタルを圧送した。圧送状況を **Photo 5** に示す。圧送後に筒先より試料を採取し、スランプおよび空気量の測定を行った。

(3) 打込みおよび締め

コンクリートは、幅 0.5 m、奥行き 0.5 m、高さ 1.0 m の型枠内に打ち込んだ。打込みおよび締めは、1 層あたり 0.5 m の合計 2 層で行い、φ50 mm の棒状バイブレータにより Fig. 1 に示す位置にて 1 層あたり 10 秒間締めを行った。締めめ状況を **Photo 6** に示す。

(4) 硬化後のマスブロックからのコア採取

材齢 14 日以上経過した硬化後のマスブロックより、**Fig. 1** に示す位置にて鉛直方向のコアを採取した。採取したコアは、**Fig. 1** に示す位置にて上部、中部、下部の 3 水準で厚さ 20 mm 程度にカットし、硬化後の気泡径分布を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 中空微小球投入前後における空気量の変化

MS における中空微小球投入前後の空気量を **Fig. 2** に示す。なお、圧送は実験準備の都合上、現着より 30 分経時の段階で実施したため、フレッシュ時の空気量については現着および 30 分経時の結果を示す。フレッシュ時の空気量は投入前の 3.9% に対し投入後で 5.9% に増加し、経時 30 分で 4.4% に減少した。経時により空気量が減少した理由として、AE 剤や AE 減水剤により連行された空気泡の減少やエントラップトエアの減少が考えられる。硬化後の空気量は投入前の 3.8% に対し、投入後で 4.3% と 0.5% 増加した。また、0.15 mm 未満の空気量は投入前の 1.1% に対し、投入後は 1.9% で投入前と比較して 0.8% 増加した。中空微小球の粒径が 0.05 mm~0.09 mm (50~90 μm) であることから、0.15 mm 未満に含まれる空気量のうち 1.5% は中空微小球によるものと考えられる。投入された中空微小球は、アジテータ車の高速攪拌によりコンクリート中に偏りなく適切に分散することが実験的に明らかにされている⁷⁾。また、中空微小球は凍結時など数百 MPa の高压に晒される場合にも、その樹脂膜の変形などを生じることが水銀圧入試験の結果より推察される¹³⁾。そのため、中空微小球を 1.5vol% 添加したにも関わらず硬化後の空気量の増分が 0.8% に留まった理由として、中空微小球を除く AE 剤や AE 減水剤により連行される空気量の減少が影響したものと考えられる。

3.2 圧送前後における空気量の変化

Base における圧送前後の空気量を **Fig. 3** に、気泡径分

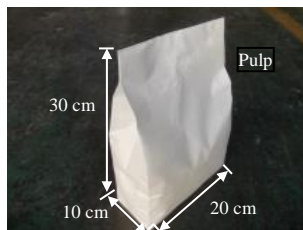


Photo 3
Water-soluble paper



Photo 4
The throwing situation of the micro spheres to a blender

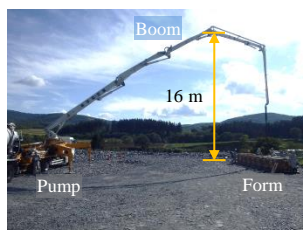


Photo 5
Situation of pumping



Photo 6
Situation of compaction

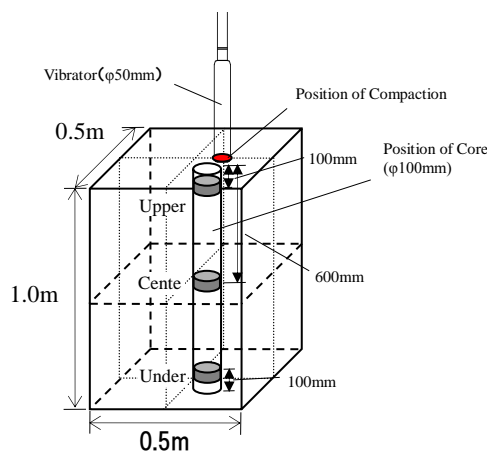


Fig. 1 Position of compaction and core

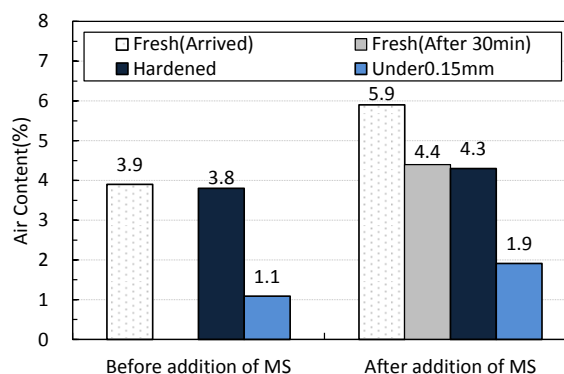


Fig. 2 Air content in before and after addition of MS

布を **Fig. 4** に示す。フレッシュ時の空気量は、現着の 5.7% から経時 30 分で 4.4% に減少し、圧送後で 3.0% まで減少した。硬化後の空気量についても、圧送前の 5.7% に対し、圧送後で 4.0% と 1.7% 減少した。また、0.15 mm 未満の空気量は、圧送前の 1.9% に対し、圧送後は 1.2% と 0.7% 減

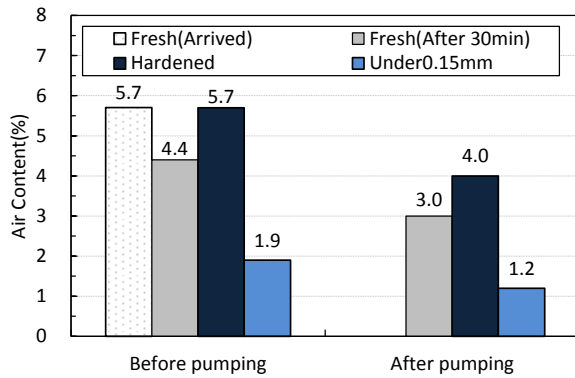


Fig.3 Air content in before and after pumping (Base)

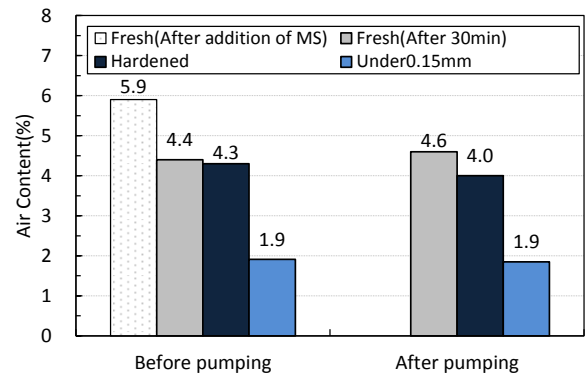


Fig.5 Air content in before and after pumping (MS)

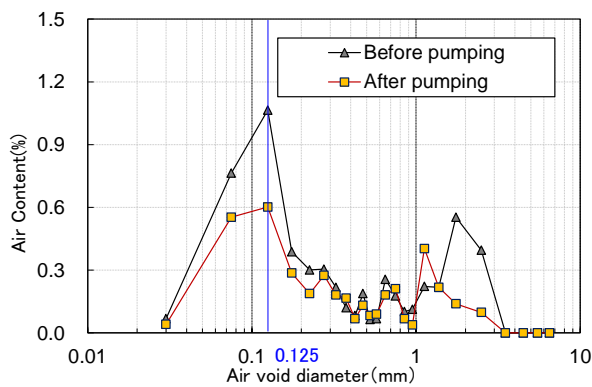


Fig.4 Air void distribution in before and after pumping (Base)

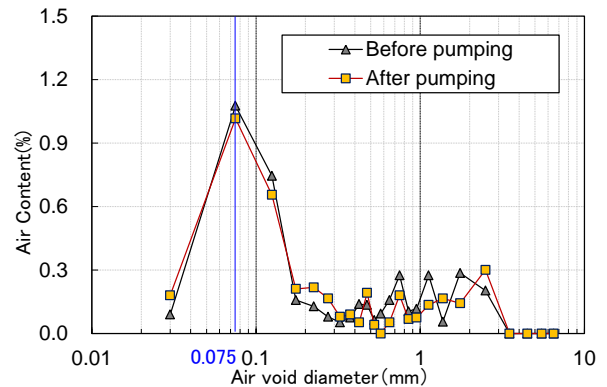


Fig.6 Air void distribution in before and after pumping (MS)

少した。硬化後の気泡径分布に着目すると、圧送前については0.125 mm 付近に空気量 1.0%とピークが認められるのに対し、圧送後では直径 0.125 mm 付近の空気量が 0.6%程度まで減少した。また、圧送前において 1 mm 以上の粗大な気泡が多く連行されており、このことが圧送前におけるフレッシュ時と硬化後の空気量の差に影響したものと考えられる。これらの結果より、AE 剤や AE 減水剤により連行された微細な気泡や、エントラップトエアは、圧送により減少することが認められた。

一方、MS における圧送前後の空気量を Fig. 5 に、気泡径分布を Fig. 6 に示す。フレッシュ時は、圧送前の 4.4% に対し、圧送後で 4.6%と空気量の減少は認められなかった。硬化後の空気量について、圧送前の 4.3% に対し、圧送後で 4.0%と 0.3%の減少に留まった。また、0.15 mm 未満の空気量についても、圧送前の 1.9% に対し、圧送後でも 1.9%と空気量の減少は認められなかった。硬化後の気泡径分布に着目すると、圧送前は 0.075 mm 付近に空気量 1.1%とピークが認められるのに対し、圧送後でも直径 0.075 mm 付近の空気量が 1.0%程度確保されており、圧送前後で気泡径分布がほぼ一致することが認められた。これらの結果より、コンクリートに中空微小球を添加することで、圧送による空気量の減少を抑制し、凍結融解抵抗性の確保に有効な気泡を確実に確保できることが

示された。圧送などでコンクリートが加圧された場合に、空気量は減少することが実験的に明らかにされている¹⁴⁾。ポンプの圧送圧力により、AE 剤や AE 減水剤で連行された気泡や、エントラップトエアが消失する一方で、中空微小球は樹脂膜の破損が生じない限り消失することなくコンクリート中に残留することから、空気量の減少が抑制されたものと考えられる。

3.3 打込みおよび締固め前後における空気量の変化

Base における打込みおよび締固め前後の空気量を Fig. 7 に、気泡径分布を Fig. 8 に示す。硬化後の空気量は、打込み前の 4.0% に対し、コア供試体の上部、中部および下部でそれぞれ 2.9%、1.8%および 2.9%と 1.5%程度減少した。また、0.15 mm 未満の空気量については、打込み前の 1.2% に対し、コア供試体の上部、中部および下部でそれぞれ 1.2%、1.0%および 1.0%と空気量の減少は認められなかった。硬化後の気泡径分布に着目すると、打込み前は 0.125 mm 付近に空気量 0.6%とピークが認められるのに対し、コア供試体の中部および下部では直径 0.125 mm 付近の空気量が 0.4%以下まで減少したものの、圧送による減少量と比較すると少ない結果であった。0.15 mm から 0.40 mm 程度の気泡や 1 mm 以上の粗大な気泡は、打込みおよび締固めにより減少していることが認められ、AE 剤や AE 減水剤で連行される気泡のうち

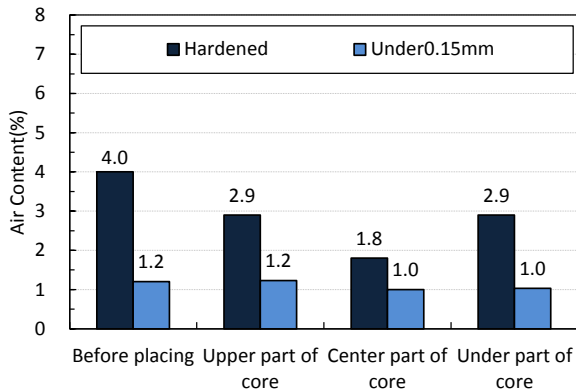


Fig.7 Air content in before and after placing and compaction (Base)

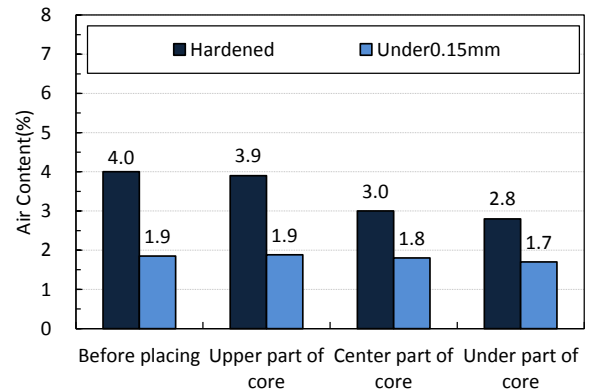


Fig.9 Air content in before and after placing and compaction (MS)

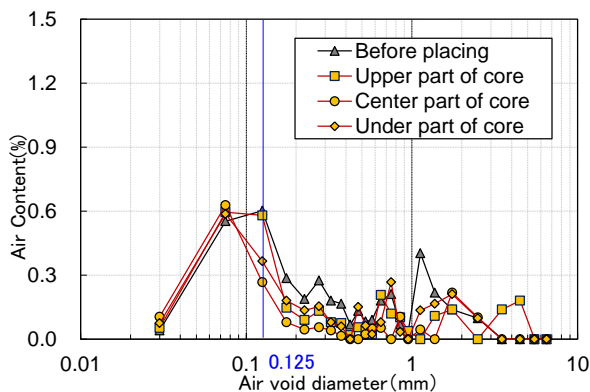


Fig.8 Air void distribution in before and after placing and compaction (Base)

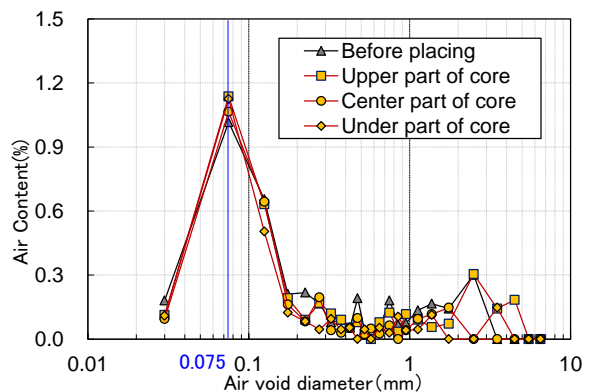


Fig.10 Air void distribution in before and after placing and compaction (MS)

比較的径の大きいものや、エントラップトエアが減少したものと考えられる。ただし、凍結融解抵抗性を確保するためには0.15 mm未満の空気量を0.45%以上確保することが有効であると既往の研究により報告されており⁴⁾、圧送や、打込みおよび締固めによる空気量の減少を考慮した場合においても、空気量の設計値を5.5%とすることで、凍結融解抵抗性を確保できるものと考えられる。

一方、MSにおける、打込みおよび締固め前後の空気量をFig.9に、気泡径分布をFig.10に示す。硬化後の空気量は、打込み前の4.0%に対し、コア供試体の上部、中部および下部でそれぞれ3.9%、3.0%および2.8%と1.0%程度減少した。0.15 mm未満の空気量については、打込み前の1.9%に対し、コア供試体の上部、中部および下部でそれぞれ1.9%、1.8%および1.7%と空気量の減少は認められなかった。硬化後の気泡径分布に着目すると、打込みおよび締固め前は0.075 mm付近に空気量1.1%とピークが認められるのに対し、コア供試体の上部、中部および下部では直径0.075 mm付近の空気量が1.0%程度確保されている。0.15 mm未満の空気量が同程度であることから、打込みおよび締固め前後における1.0%程度の硬化後の空気量の減少分の大半は、エントラップトエアによるものと考えられる。

コンクリートを非圧縮性のビンガム流体と仮定した

場合に、AE剤やAE減水剤により連行された微細な空気泡は浮力により浮上し消失することなくコンクリート中に留まるものと考えられる¹⁵⁾。一般に、液中に発生した空気泡は、気-液界面で泡沫と呼ばれる気泡の集合体を形成し、空気泡の膜表面への液体の作用により空気泡を維持する力が減少し空気泡同士が合わさる合一や破泡に至る。AE剤やAE減水剤により連行された比較的径の大きい空気泡は、パイプレータの振動締固めにより、コンクリート中で空気泡と自由水との接着面の増加が促された場合に、合一や破泡を生じ、空気量の減少に至ったものと考えられる³⁾。一方、中空微小球は樹脂膜で形成されるため、振動締固めが行われた場合にも、合一や破泡が生じることなく独立気泡としてコンクリート中に残留することが示唆される。以上より、コンクリートに中空微小球を添加することで、圧送や打込みおよび締固めによる空気泡の減少を抑制し、凍結融解抵抗性の確保に有効な空気泡を確実に確保できることが確認された。

3.4 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果をFig.11に示す。300サイクルを超えて試験を継続した場合、432サイクルにおいて、相対動弾性係数がBaseは90%にまで低下する一方、MSでは97%と高い値を保持する結果が得られた。300サイクルではBaseも相対動弾性係数が95%を保持しており、空

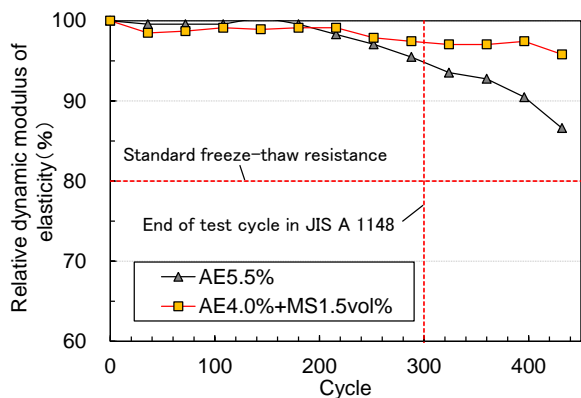


Fig. 11 Test result of freezing and thawing

気量の設計値を 5.5%とすることで高い凍結融解抵抗性を確保できるが、中空微小球を添加することで、より確実に高い凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。

4. まとめ

本論文では、気泡径分布に着目し、中空微小球が圧送、打込みおよび締固め前後におけるコンクリートの空気量の変化に及ぼす影響を評価し、以下について確認した。

- (1) 圧送前後における硬化後の気泡径分布より、AE 剤や AE 減水剤により連行された空気泡は減少するが、中空微小球の添加した場合は、凍結融解抵抗性の確保に有効な空気泡が消失することなく確実に確保できることが確認された。
- (2) 打込みおよび締固め前後における硬化後の気泡径分布より、AE 剤や AE 減水剤により連行された比較的大径の大きい空気泡は減少するが、中空微小球の添加した場合は、凍結融解抵抗性の確保に有効な空気泡が消失することなく確実に確保できることが確認された。
- (3) 同水準の空気量において、中空微小球を添加することにより、コンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる効果があることが確認された。

謝辞：本研究の遂行に際し、岩手大学の羽原俊祐教授、小山田哲也准教授に多大なご指導を頂きました。紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 東北コンクリート耐久性向上委員会：東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン(案)，2009
- 2) 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, 2016.7

- 3) 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, 2012.5
- 4) 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, 2012.1
- 5) 林大介，高木英知，橋本学，樋口隆行，寺崎聖一，五十嵐数馬：中空微小球を用いたコンクリートのフレッシュ性状及び凍結融解抵抗性に関する一考察，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-265, 2016.9
- 6) 橋本学，林大介，水野浩平，五十嵐数馬：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp.2143-2148, 2017.7
- 7) 水野浩平，林大介，橋本学，五十嵐数馬：実機ミキサにおけるコンクリート練混ぜ時の中空微小球の分散性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp.2149-2154, 2017.7
- 8) 渡辺宏，堺孝司：中空微小球を用いたコンクリートの耐凍害性，コンクリート工学年次論文報告集，vol.15, No.1, pp.899-904, 1993
- 9) 渡辺宏，堺孝司，鮎田耕一：中空微小球による水中不分離性コンクリートの耐凍害性改善効果，コンクリート工学年次論文報告集，vol.16, No.1, pp.567-572, 1994
- 10) 鮎田耕一，堺孝司，山川勉：中空微小球添加水中不分離性 AE コンクリートの耐凍害性，セメント・コンクリート論文集，No.50, pp.450-455, 1996
- 11) 千歩修，藤本貴，浜幸雄，友澤史紀：中空微小球を用いたフライアッシュコンクリートの耐凍害性，セメント・コンクリート論文集，No.58, pp.313-318, 2004
- 12) 栖原健太郎ほか：中空微小球を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性，土木学会年次学術講演会概要集，Vol. 69, pp.943-944, 2014.9
- 13) 宇城将貴，樋口隆行，盛岡実，岸利治：中空微小球の添加による耐凍害性の向上メカニズムの検討，セメント・コンクリート論文集，No.69, pp.490-495, 2016.3
- 14) 羽原俊祐，田中館悠登：コンクリート連行空気泡についての新しい知見，日本材料学会会誌，Vol. 65, pp.767-772, 2016.10
- 15) 一宮一夫，出光隆，山崎竹博：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，土木学会論文集 No.711/V-5, pp.135-146, 2002.8