

論文 外部からの圧力がコンクリート中の空気量に及ぼす影響

田中 悠登*1・羽原 俊祐*2・小山田 哲也*3・林 大介*4

要旨: レディーミクストコンクリートの圧送時の空気量の減少現象に着目し、フレッシュコンクリートに圧力をかけた場合の空気量について検討を行った。0.45MPa までのゲージ圧の範囲では、加圧する圧力が高いほど、加圧する時間が長いほど、空気量は減少する。モルタル（空気量 8.5%）の場合には、1.5%程度減少する。空気量の減少は、外圧により、気泡径が小さくなり、内部圧力の高い小径気泡から混練水へ溶解したと考えられる。気体-液体界面での気体の移動（溶解）を阻害するため、薄膜をもつ中空微小球を使用すると、気泡内の気体が液体になることを抑制するため、加圧がおこっても、空気量の減少を低減することができる。

キーワード: 空気量, 圧力, 凍結融解抵抗性, AE コンクリート, フレッシュコンクリート

1. はじめに

積雪寒冷地域のコンクリートには、凍結融解抵抗性が求められ、空気量の確保が重要な課題である。レディーミクストコンクリートの製造から運搬、圧送、締固め等の各施工段階でのフレッシュ時の空気量を測定した研究¹⁾によると、製造時に空気量約 6.5%だったコンクリートが、圧送後に著しく低下すると報告されている。そこで、筆者らは、この現象に注目し、圧送時に圧送管内で、コンクリートに与える圧力が、コンクリート中の空気に何らかの影響を与えているのではないかと仮定し検討を行うこととした。鮎田らは地下構造物等の高圧下で打設されるコンクリートを考慮し、圧力容器を用い、高圧下で硬化させ、硬化コンクリート中の空気量を測定しており、その結果によると圧力が高いほど空気量は減少すると報告している²⁾。ただし、レディーミクストコンクリートに圧送の圧力を想定した加圧を行い、空気量の変化について調べた研究は少ない。

本研究は、圧送の際の圧力がフレッシュコンクリートの空気量に及ぼす影響を明らかにするために、モルタルに圧送を模擬した加圧を行い、加圧圧力と空気量との関係について検討を行ったものである。

2. 実験概要

実験では、コンクリートから粗骨材を除いたモルタルを対象として行った。フレッシュなモルタルを加圧し、練混ぜ直後のモルタルと加圧直後のモルタルの空気量を比較することで、空気量の変化について定量化し、加圧圧力と空気量との関係について調べた。

2.1 試験装置および加圧方法

本研究では、図-1 に示すステンレス製加圧容器（内径：208mm、容量：10.1L、鋼厚：4mm、最大使用圧力：0.49MPa）に、モルタルを充填したモルタル用エアメータ容器（内径：110mm、容量：約 1.05L）およびφ5cm×ℓ10cm の円柱型枠を、加圧容器内に収納し、加圧容器のふたを閉め加圧を行った。加圧気体として不活性な窒素ガスを使用し容器内を高圧環境にすることで、モルタルの加圧を行った。加圧圧力（ゲージ圧）は、加圧容器の圧力計の値をもとに、窒素ガスの封入量でコントロールした。ゲージ圧は大気圧を 0 とする相対的な圧力であり、



図-1 加圧容器

表-1 モルタルの加圧条件

試験手順	加圧圧力(MPa)	加圧時間(Min)
1	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45	10
2	0.3	2,4,6,8,10,20

*1 岩手大学 大学院工学研究科 博士前期課程 社会環境工学専攻 (学生会員)

*2 岩手大学 工学部社会環境工学科 教授 博(工) (正会員)

*3 岩手大学 工学部社会環境工学科 准教授 博(工) (正会員)

*4 鹿島建設株式会社 技術研究所 上席研究員 博(工) (正会員)

ゲージ圧の0.1MPaは、絶対圧で0.2MPa(2気圧)となる。表-1に示す加圧圧力および加圧時間によって加圧試験を行った。試験手順1では、圧力の影響を検討するため、加圧時間を10分で一定にし、加圧圧力を5段階に設定した。加圧圧力は、コンクリートの密度を約2.5kg/Lとし、圧送で20m上昇させるのに必要な圧力約0.49MPa(5気圧)と加圧容器の最大使用圧力0.49MPaを考慮し、ゲージ圧0.1-0.45(MPa)の範囲で設定した。試験手順1は、各圧力において、異なる試料で2回行った。試験手順2では、加圧時間の影響を検討するため、ゲージ圧を0.3MPaで一定にし、加圧時間を2-20分の範囲で6段階に設定した。

空気量測定時の加圧が測定結果に及ぼす影響については、空気量測定時の加圧は加圧時間が短いことと、後述する加圧時間による空気の変化を調べた結果より、測定時の加圧は、加圧容器内での加圧と異なり結果に影響がないと考えられる。

2.2 空気量および気泡組織の測定方法

フレッシュ時の空気量は、空気室圧力法のモルタル用エアメータを用いて、練混ぜ直後および加圧直後の空気量を測定した。圧力がモルタル内部に伝わり易くするため、広口のエアメータ用容器を直接、圧力容器内に収納し、減圧後、加圧直後の空気量の測定を行った。また、加圧によってモルタルが沈下することを考慮し、モルタルを充填する際に、モルタルをエアメータ用容器の上端よりも高く充填させ加圧を行った。そのため、練混ぜ直後と加圧直後の空気量の比較は、同じ体積のモルタルに含まれる空気量の比較である。

硬化後の気泡組織の測定は、西山らの方法³⁾を参考に、面積比法による画像処理を行った。φ5cm×ℓ10cmのモルタル供試体を、φ5cm×ℓ2cmの試験片となるように、下端から高さ2cmのところをダイヤモンドカッターで切断し、切断面を測定面とした。測定面を研磨および塗料の塗布を行い、面積比法による画像処理によって気泡組織を測定した。

2.3 モルタル試料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³)を使用し、細骨材は、粒度が2.5mm以下の岩手県盛岡市黒川産砕砂(表乾密度:2.80g/cm³)を使用した。水:セメント:細骨材比は0.55:1:2.8とした。空気量については、練混ぜ直後が8.0±0.5%となるようにAE剤の添加量で調節した。また、比較のために混和剤を添加しないプレーンについても試験を行った。モルタルの流動性を評価するため、JIS R 5201のモルタルのフロー試験を行った。1日型枠内で初期養生した後、27日間水中養生を行った。

3. 実験結果および考察

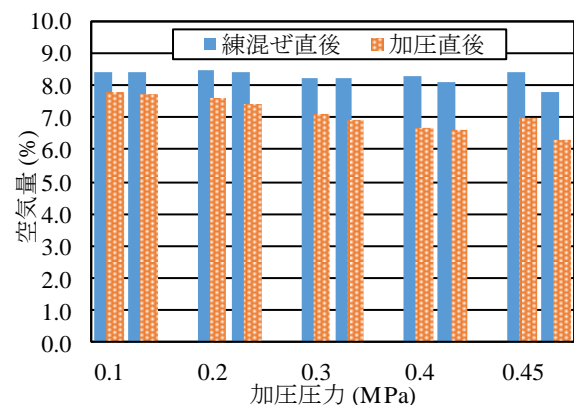
3.1 加圧によるフレッシュ時の空気量の変化

(1) フレッシュモルタルの性状

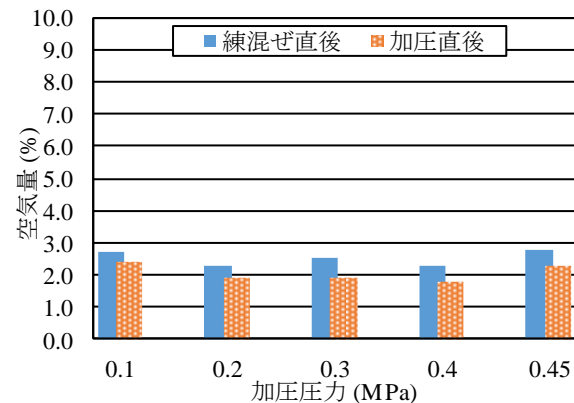
フレッシュモルタルの空気量の経時変化およびフロー値を表-2に示す。本研究の加圧試験では、練混ぜ後から加圧直後の空気量の測定まで、最長で30分程度要するため、空気量の変化に加圧だけでなく経時による影響も考慮する必要がある。そのため、30および60分間の空気量の経時変化を測定した。モルタル試料は、測定時間まで、大気圧下で静置させた。練混ぜ直後とそれぞれの時間の空気量を比べると、30分間で変化がなく、60分間で0.1%減少したことから、経時による空気量の変化は小さく、加圧試験での空気量の変化は加圧操作に係ると思われる。

表-2 モルタルの空気量とフロー値

種類	空気量(%)			フロー値 (mm)
	0分	30分	60分	
AE	8.4	8.4	8.3	204
Plain	2.7	-	-	185



(a) AE モルタル



(b) Plain モルタル

図-2 加圧圧力とフレッシュモルタルの空気量の関係

(2) 加圧圧力による影響

加圧圧力がモルタルの空気量に与える影響について検討するため、試験手順1の実験を行った。大気圧下ではゲージ圧は0MPaを示し、0.1MPaは約2気圧に相当する。練混ぜ直後の加圧前の空気量と加圧直後の空気量の測定結果を図-2に示す。練混ぜ直後の加圧前の空気量と加圧直後の空気量の差を減少空気量とし、加圧圧力との関係性を求めた結果について図-3に示す。PlainとAEモルタルのどちらにおいても、練混ぜ直後の加圧前の空気量よりも加圧直後の空気量が小さい値を示した。加圧

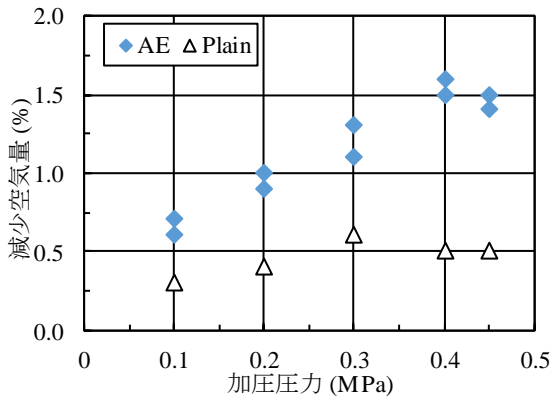


図-3 加圧圧力による空気量の減少量

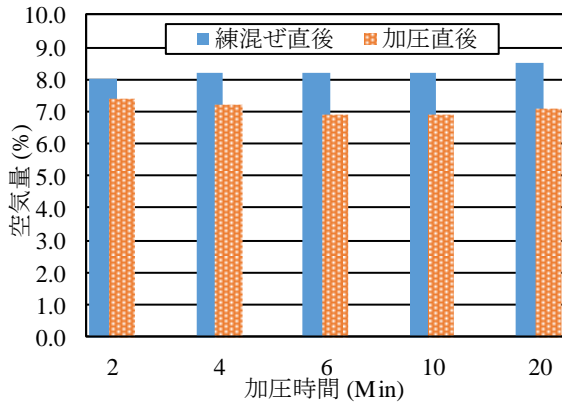


図-4 加圧時間とフレッシュモルタルの空気量の関係

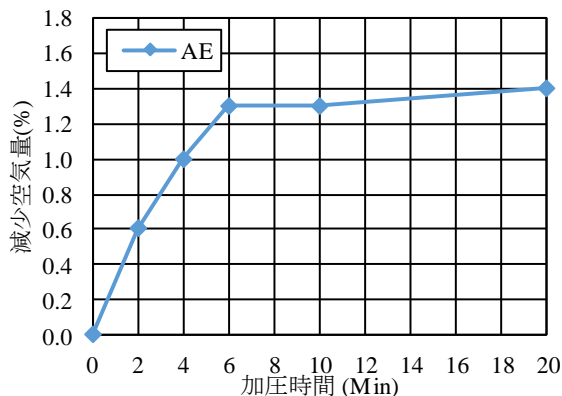


図-5 加圧時間による空気量の減少量

する圧力が高くなるにつれて、加圧後の空気量は減少する。Plainの場合、減少量は0.3-0.6%で、0.3MPaまでの範囲では加圧する圧力に比例して大きくなるが、0.3MPa以上では0.5-0.6%の低下となった。AEモルタルでは、Plainと比べて練混ぜ直後の空気量が多いため、加圧による減少は大きく、0.1MPaで0.6%、0.2MPaで0.8%、0.3MPaで1.2%、0.4MPaおよび0.45MPaで1.5-1.6%程度の減少となる。このように、10分間程度の加圧においても、フレッシュなモルタルに圧力を加えると空気量が減少することがわかる。外部からの加圧する圧力が高いほど、フレッシュなモルタルの空気量の減少は多くなる傾向を示している。

(2) 加圧時間による影響

加圧時間が空気量に与える影響について検討するため、試験手順2の実験を行った。加圧圧力を0.3MPaとし、加圧時間を2-20分の範囲で変化させた。練混ぜ直後の加圧前と加圧直後の空気量の測定結果を図-4に示す。練混ぜ直後と加圧直後の空気量の差から求めた減少空気量と加圧時間との関係について図-5に示す。加圧時間が2-6分の間では、加圧時間が長くなるにつれ、低下する空気量の大きさは大きくなる。6-20分の間では低下量が約1.3%と、加圧時間10分と同程度である結果となった。

以上の実験結果より、加圧する圧力、加圧時間に応じて空気量が減少することが明らかになった。

3.2 圧力による空気量が低下する現象についての考察

加圧実験により、モルタルに外部から圧力が加わると、空気量が減少することが明らかになった。外部からの圧力による空気量の減少について考えてみる。コンクリート中には、AE剤等により連行された小さな空気泡が含まれる。泡についてどのような挙動を示すかを考察する。

気泡に働く力について服部は解説している⁴⁾。気泡内部の空気の圧力は、表面張力の影響を受け外部の圧力よりも常に高い。内部の圧力と外部の圧力との関係は、Young-Laplaceの式(1)により表すことができる。

$$P = P_0 + \frac{4\gamma}{R} \quad (1)$$

表-3 気泡径と圧力差の関係⁴⁾

気泡径 (μm)	圧力差 (MPa)	
	$\gamma=73$	$\gamma=45$
10	0.029	0.018
20	0.014	0.009
30	0.010	0.006
50	0.006	0.004
100	0.003	0.002

γ : 表面張力 (10^{-3}N/m)

P : 内圧 (Pa), P₀ : 外圧 (Pa), γ : 表面張力 (N/m), R : 気泡の直径 (m)

式(1)から、内部の圧力は、外部の圧力よりも大きく、外部との圧力の差は気泡の径と反比例の関係にあることがわかる。気泡の径と内部と外部の圧力の差を表-3に示す。水の表面張力は $73 \times 10^{-3} \text{N/m}$ であるから Plain 内の気泡は、径が $100 \mu\text{m}$ 以上の場合には圧力の差が無視できるが、気泡の径が $20 \mu\text{m}$ 程度での場合、圧力の差が 0.014MPa と 0.01MPa (0.1 気圧) 以上になると気泡は不安定になり、気泡どうしの合一か、接する周囲の水に溶解するかの過程を経て、微細な気泡は消滅すると考えられる。Plain では $20 \mu\text{m}$ 以下の気泡は存在しないことになる。AE 剤は界面活性剤であるので、水の表面張力を低減させる。シャボン玉が石鹼水で生成されるように、小径の気泡が安定化される。AE モルタルにおける混練水の表面張力を $45 \times 10^{-3} \text{N/m}$ とすると、 $20 \mu\text{m}$ の空気泡における内外圧差は約 0.009MPa であり、気泡として存在できることとなる。

次に、加圧がコンクリート中の気泡に及ぼす影響について考察する。気体と圧力の関係は以下に示す2つの法則に従うため、加圧時の気泡は加圧の影響を受ける。

圧力による気体の体積変化

気体の体積と外圧との間には、ボイルの法則がある。
 $PV = \text{一定}$ (2)

P : 気体の圧力 (Pa), V : 気体の体積 (m^3)

圧力による気体の溶解度

気体の溶解度は、気体圧力に比例するとするヘンリーの法則⁹⁾がある。

$$P = \frac{C}{K_c} \quad (3)$$

C : 溶液中のモル濃度 (mol/m^3), P : 気体の圧力 (Pa), K_c : 平衡定数

ゲージ圧 0.3MPa の加圧を行った場合、ボイルの法則式(2)より、気泡の体積は大気圧下の 0.25 倍になり、径は約 0.63 倍になる。大気圧下でモルタル中に径が $30 \mu\text{m}$ の気泡径が存在すると、加圧状態で、径が約 $18.9 \mu\text{m}$ にな

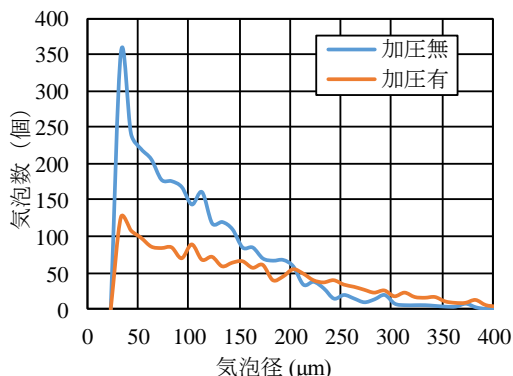


図-6 加圧圧力(0.3MPa)の気泡径分布

り、内外圧差は約 0.009MPa と大気圧下よりも圧力差が大きくなり、不安定な状態になる。このように気泡径の分布は、気泡が小さくなる方向に平行移動するため、大気圧下よりも不安定な気泡が増大する。ヘンリーの法則式(3)より、圧力が高いほど気体の溶解度は高くなるため、内圧が高くなった微細な気泡から接する周囲の水に溶解すると考えられる。そのため、加圧時に微細な気泡から溶解し、空気量が減少したと考えられる。これらの法則に基づくと、鮎田らの研究²⁾で、高圧下で硬化させたコンクリートの硬化後の空気量の減少は説明できると考えられる。

次に、加圧状態から大気圧下に戻る減圧過程について考察すると、加圧状態から大気圧に戻る過程では、ヘンリーの法則に従い、気体の溶解度が小さくなるため、溶解している気体分子の飽和度が重要になる。通常の場合には不飽和であるので、溶解した気体は、水の中に溶解したままである。したがって、加圧時に溶解した空気量分だけ低下する。飽和および過飽和状態の場合、溶解していた空気の一部は気体に戻るが、ヒステリシスをたどり、時間が経過してから戻ると考えられる。

ゲージ圧 0.3MPa 、加圧時間 10 分で加圧したモルタルおよび非加圧モルタルの硬化後の気泡径分布を測定した結果を図-6に示す。測定した気泡径の範囲は、約 $22-1500 \mu\text{m}$ であった。エントレインドエアについて検討するため、気泡径の範囲 $22-400 \mu\text{m}$ に限定し気泡径分布を示した。 $150 \mu\text{m}$ 以下の気泡において、加圧有は加圧無に比べ、気泡数が半分程度であることから、加圧により小径気泡が減少したと考えられる。 $150 \mu\text{m}$ 以下の気泡は、凍結融解抵抗性を向上させるエントレインドエアであり、これに該当する径の気泡が減少することは、凍結融解抵抗性の低下が懸念される。

以上の考察より、フレッシュコンクリートの空気量が加圧により、減少する現象が説明できる。

3.3 加圧による空気量減少の抑制方法について

AE 剤を添加したモルタルの加圧実験結果より、気泡内部の空気が加圧によって高圧になり、周囲の水に溶解

表-4 SBD の性状

種類	成分	粒度範囲 (μm)	平均粒径 (μm)	高密度 (g/L)
SBD	塩化ビニル	10-100	40	20

表-5 SBD モルタルの空気量とフロー値

種類	空気量(%)			フロー値 (mm)
	0分	30分	60分	
SBD	8.5	8.6	8.4	203

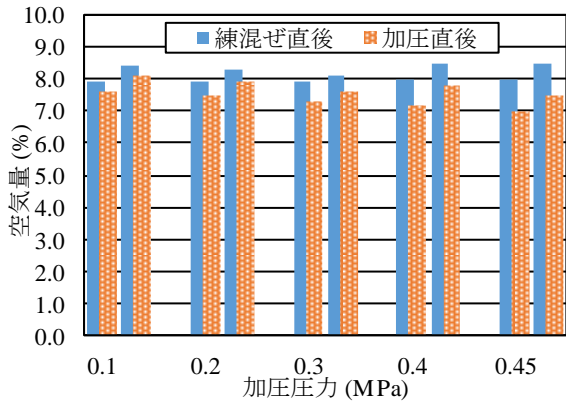


図-7 SBDモルタル加圧圧力と空気量の関係

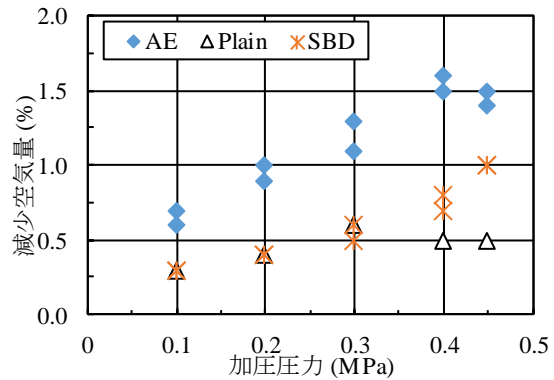


図-8 モルタルの加圧圧力と空気量減少の関係

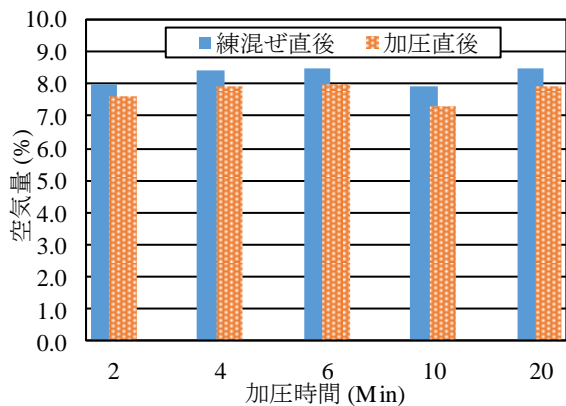


図-9 SBDモルタルの加圧時間と空気量の減少量の関係

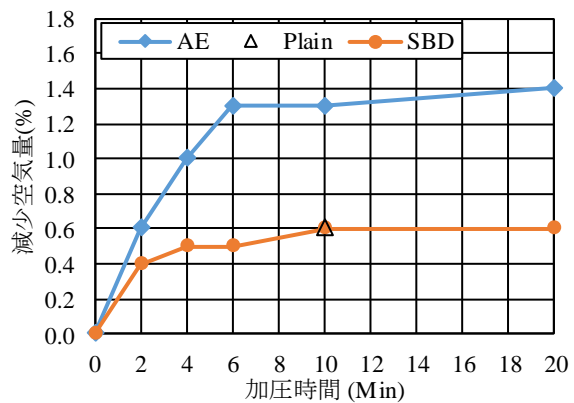


図-10 AE,SBDモルタルの加圧時間と空気量の減少量

したことが、モルタルの加圧実験における空気量の減少の原因であると考えた。空気の溶解は、気体-液体界面を通して発生すると考えられる。そのため、空気を薄い膜で包み、気体-液体界面が存在しない中空微小球は、空気量の減少を抑制するのに有効であると考えられる。中空微小球によりモルタルに空気を導入し、AEモルタルと同様の加圧試験を行い、中空微小球の有効性について検討を行った。中空微小球は、塩化ビニルアクリリトンを発泡させたSBDを使用した。筆者らの既報⁶⁾の研究において、SBDについて弾性を持つ塩化ビニルの薄い膜により空気を包む球体で、凍害のスケリング抵抗性向上にエントレインドエアと同等の効果があることを報告した。表-4にSBDの性状を示す。SBDは、エントレインドエアよりも平均径が小さく微細な球体である。空気量が $8.0\pm 0.5\%$ となるように、モルタル1L当たり5gのSBDを添加し、試料を作製した。AEモルタルと同様に、空気量の経時変化およびフロー値を測定した結果を表-5に示す。空気量の経時変化は、AEモルタルと同様に30および60分間ともに空気量の大きな変化が見られないことから、SBDについても空気量の変化は加圧にのみ影響を受けると考えられる。フロー値もAEモルタ

ルと同程度であることから、AEモルタルの流動性と同程度である。

(2)加圧圧力による影響

加圧圧力が空気量に与える影響について検討するため、試験手順1の実験を行った。練混ぜ直後と加圧直後の空気量測定結果を図-7に示す。また、練混ぜ直後の空気量から加圧直後の空気量の差と加圧圧力との関係について図-8に示す。SBDの場合でも、練混ぜ直後の空気量よりも加圧直後の空気量が小さい値を示した。また、加圧圧力が大きくなるほど、空気量の減少量は大きくなる。減少量は、0.1MPaで0.3%、0.2MPaで0.4%、0.3MPaで0.6%、0.4MPaで0.8%、0.45MPaで1.0%を示し、加圧圧力の増加に伴い増加する傾向を示した。空気量の減少量についてAE剤およびPlainと比較すると、全ての加圧圧力で、AE剤よりも小さいことから、加圧による影響はAE剤よりも小さいことがわかる。また、0.1-0.3MPaの範囲内では、Plainと同じ減少量であることから、SBD内の空気量の低下ではないと考えられる。このことから、加圧圧力0.1-0.3MPaの範囲で、SBDは気体-液体界面がないため、SBD内部の空気が高圧状態になっても溶解することなく弾性変形をすることで加圧の影響を受けな

ったと考えられる。0.4, 0.45MPa では、SBD が圧力によって破れたため、空気と水が接する界面が発生し、空気が水の中に溶解したと考えられる。

(3) 加圧時間による影響

加圧時間が空気量に与える影響について検討するため、試験手順 2 の実験を行った。練混ぜ直後と加圧直後の空気量測定結果を図-9 に示す。また、練混ぜ直後の空気量から加圧直後の空気量の差と加圧時間との関係について図-10 に示す。0-4 分の間では減少量が 0.4, 0.5 と徐々に増加するような傾向を示す。4-20 分の間では、減少量が約 0.6%と加圧時間 10 分と同程度である。

このように、中空微小球は気体-液体界面が存在しないため、加圧により不安定になった内部の空気の溶解を妨げる。そのため、中空微小球は、エントレインドエアと比べて空気量の安定保持ができる。また、この実験を通して、提案している仮説が正しいことが説明できる。

4. まとめ

コンクリートの圧送を模擬した加圧試験をモルタルを用いて行い、加圧による空気量の変化について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) フレッシュなモルタル(コンクリート)は、外部からの圧力(0.1-0.45MPa)が作用すると、空気量が減少する。作用する圧力が高いほど、減少量は大きい。8.5%の空気量が、0.3MPaで1.5%程度減少する。加圧時間については6分程度までは時間に比例して減少量が多いが、それ以上ではほぼ変わらない。
- (2) 加圧により空気量が減少する現象は、気泡内部にはたらく Young-Laplace 則、圧力と気泡体積に関する Boyle 則、圧力による気体の溶解に関するヘンリー則に従い説明できる。小径の気泡ほど内部の圧力が高くなり、気泡として存在できる気泡の最小径が存在する。外部から加圧されると、気泡はその径より小さくなり、内部の圧力が高くなることから、気泡は液体に溶解する。

- (3) 気体-液体界面での空気の溶解を阻害するため、膜をもつ中空微小球(SBD)を使用すると、気泡内の気体が液体に溶解することを抑制するため、加圧がおこっても、空気量の減少を低減することができる。

謝辞：本研究の実施にあたり、デンカ株式会社、五十嵐数馬氏より、中空微小球試料の提供および共同研究の実施など多方面からの協力がありましたことに、ここに謹んで感謝の意を表すものです。

参考文献

- 1) 小山田哲也, 羽原俊祐, 樊小義, 高橋慧: 新区界トンネル覆工コンクリートの耐凍害性確保の検討, 第42回セメント・コンクリート研究討論会論文集(郡山), pp. 89-94, 2015
- 2) 清野和徳, 菅田紀之, 尾崎詔, 鮎田耕一: 圧力環境下で養生されたコンクリートの気泡組織と細孔構造について, 土木学会北海道支部論文報告集, 55A, V-1, pp.428-436, 1999
- 3) 西山孝, 前川慎喜, 日下部吉彦, 中野錦一: 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, vol.42, pp. 212-214, 1988
- 4) 服部健一: 洗剤の泡とコンクリートの泡, コンクリート技術者のためのセメント化学雑論, セメント協会, pp. 75-81, 1985
- 5) 大野惇吉: 大学生の化学 第2版, 三共出版, pp.121-123, 2005
- 6) 羽原俊祐, 小山田哲也, 田中館悠登, 五十嵐数馬: コンクリートのソルトスケーリング抵抗性に及ぼす連行空気及び小径空気泡混和材の導入効果, 「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会」シンポジウム JCI-86, pp. 65-70, 2015