

# 論文 空気量の変動が蒸気養生したフライアッシュ高流動コンクリートの耐凍害性に与える影響について

坂本 久宣\*1・笹岡 満\*2・齋藤 敏樹\*3・石塚 浩章\*4

**要旨**：本研究は、空気量 2%未満、3%、4.5%および 6%の 4 水準、蒸気養生条件 2 水準としたフライアッシュ高流動コンクリートの凍結融解試験、気泡間隔係数測定などを実施し、空気量と蒸気養生条件が耐凍害性に与える影響について検討を行った。その結果、蒸気養生条件に関わらず、フレッシュ空気量 3%以上において耐久性指数 85 以上の耐凍害性に優れた結果が得られた。また、蒸気養生後の空気量はフレッシュ空気量より減少し、蒸気養生時間が短い場合、50~250 $\mu\text{m}$  以下の微細な空気量の減少傾向が認められた。

**キーワード**：フライアッシュ、耐久性指数、空気量、気泡間隔係数、凍結融解、蒸気養生

## 1. はじめに

近年、北海道のプレキャストコンクリート(以下、PCa という)製品工場では、締固め作業による振動・騒音の防止や作業の省力化などの利点からフライアッシュを用いた高流動コンクリートの採用が増加している。フライアッシュは一般的に粒子が球状であり、コンクリートのワーカビリティの向上が期待される。一方で、フライアッシュ内に残留する未燃カーボンが空気量を減少させてしまうことがあり、空気量管理が難しいとされている。寒冷地において、この空気量管理はコンクリートの耐凍害性を確保するためにきわめて重要である。

これまで、耐凍害性に関する高流動コンクリートについて様々な研究がされてきており、成田ら<sup>1)</sup>はフライアッシュ置換率30%~60%の範囲におけるフライアッシュ高流動コンクリートにおいて、様々なAE剤を用いた場合の耐凍害性について検討を行い、AE剤やフライアッシュ置換率に関わらず、気泡間隔係数の増加に伴い耐凍害性は低下傾向であることを報告している。コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告<sup>2)</sup>では、耐凍害性の確保には、混和材料、曝露条件の影響および長期的な耐凍害性を考慮した場合において、空気量3%以上、気泡間隔係数を200~250 $\mu\text{m}$ 以下にすることや100 $\mu\text{m}$ 以下の微細な気泡組織や細孔構造の把握・評価が重要であるとの報告がされている。また、浜ら<sup>3)</sup>は凍結融解試験前の養生条件が耐凍害性に及ぼす影響について検討しており、曝露後の高強度・高流動コンクリートでは凍結融解中の吸水による質量増加が大きく、曝露中の自己収縮や乾燥収縮に起因して発生した微細なひび割れが耐凍害性に悪影響を及ぼすと報告している。しかし、蒸気養生を行った高流動コンクリートの耐凍害性についての報告は少ない。そこで、本研究は蒸気養生したフライアッシュ

高流動コンクリートの空気量の変動が耐凍害性に及ぼす影響を検討した。併せて圧縮強度試験および乾燥収縮試験も実施し、これらに与える影響を検討した。

PCa製品工場では、一般的に常圧蒸気養生(以下、蒸気養生という)が実施されており、蒸気養生方法については、コンクリート標準示方書【施工編】2017年制定<sup>4)</sup>に記述された解説に基づき、製品の寸法や形状に適した蒸気養生方法を行っている。本実験では、一般的に用いられる蒸気養生方法に加え、生産効率向上を目的とした蒸気養生時間を短縮した条件についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および実験ケース

本研究で使用した材料を表-1に、配(調)合条件を表-2に示す。表-1より、セメントは普通ポルトランドセメント、フライアッシュはJIS II 種灰、細骨材は陸砂、粗骨材は砕石を使用した。表-2より、コンクリートの配(調)合ケースは、フレッシュ空気量の変化による耐凍害性の影響を比較するため、目標空気量を2%未満、3%、4.5%および6%の4水準とした。なお、スランプフローおよび空気量は、高性能AE減水剤および空気量連行助剤によりそれぞれ調整した。また、蒸気養生条件の違いによる耐凍害性への影響を検討するため、蒸気養生パターンは図-1に示す2水準とした。蒸気養生方法は高温高湿蒸気養生を採用し、養生蒸気Aは一般的に採用されている条件であり、前養生2時間、温度上昇速度20 $^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ 、最高温度60 $^{\circ}\text{C}$ 、最高温度保持時間2時間、温度下降時間を12時間とし、型枠に打込み後18時間で脱型した。他方、蒸気養生Bは生産効率向上を目的とした養生時間短縮条件であり、前養生1時間、温度上昇速度40 $^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ 、最高温度60 $^{\circ}\text{C}$ 、最高温度保持時間2時間、温度下降時間2時間とし、型枠に

\*1 北電興業(株) 土木環境部 石炭灰事業室 石炭灰技術営業グループ 修士(工学) (正会員)

\*2 北海道電力(株) 火力部 石炭灰リサイクル推進室

\*3 北電総合設計(株) 技術研究所 次長(正会員)

\*4 (株)上田商会 取締役常務執行役員 (正会員)

打込み後6時間で脱型した。

## 2.2 実験項目および方法

### (1) フレッシュコンクリート性状

コンクリートは強制練り二軸ミキサ(公称容積 55L)を使用して、JIS A 1138 に準拠し練り混ぜた。練混ぜは、セメント、フライアッシュおよび細骨材を投入後 30 秒練り混ぜ、次いで、一次水(単位水量の 80%)を投入し、90 秒練り混ぜ、掻き落としを行った。その後、粗骨材、二次水(単位水量の 20%)および混和剤を投入し、90 秒練り混ぜ後練り板に排出した。排出後、練り板で手練りを行い、直ちにスランプフローおよび空気量を測定した。スランプフローは JIS A 1150, 空気量は JSCE-F 513 に準拠した。

### (2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠し、脱型直後、材齢 7 日、14 日および 28 日で強度を測定した。なお、供試体は直径 100mm, 高さ 200mm の円柱とし、蒸気養生終了直後に脱型し所定の材齢まで水中養生(温度 20±2℃)した。

### (3) 凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148 の A 法(水中凍結水中融解試験方法)に準拠した。供試体は、幅 100mm, 高さ 100mm, 長さ 400mm の角柱とし、蒸気養生終了直後に脱型し材齢 28 日まで水中養生(温度 20±2℃)した。測定は凍結融解 30 サイクル毎に、一次共振振動数および質量を測定した。

### (4) 気泡間隔係数測定

気泡間隔係数は ASTM C 457 に準拠し、リニアトラバース法により測定した。供試体は、幅 100mm, 高さ 100mm, 長さ 400mm の角柱とし、蒸気養生終了直後に脱型し材齢

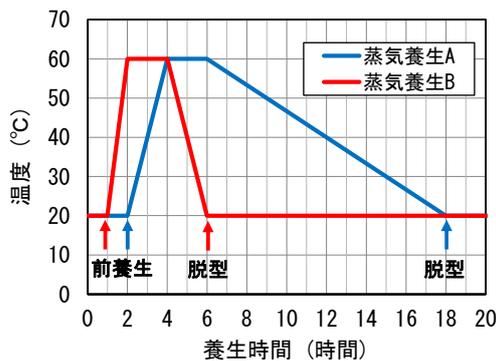


図-1 蒸気養生パターン

28日まで水中養生(温度 20±2℃)した。材齢 28 日で幅 100mm, 高さ 100mm, 長さ 20mm に切断し、切断面を研磨した後、気泡間隔係数および気泡分布を測定した。なお、気泡間隔係数測定のための気泡弦長の測定範囲は 15μm ~ 1500μm とした。

### (5) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は JIS A 1129-1 に準拠した。供試体は、幅 100mm, 高さ 100mm, 長さ 400mm の角柱とし、蒸気養生終了直後に脱型し材齢 28 日まで水中養生(20±2℃)した。なお、脱型直後に幅 15mm, 長さ 15mm, 厚さ 2mm の標線用ガラス板を供試体側面の中心線上の両端に貼付し、標線用ガラス板の表面に基長を刻線した。測定は温度 20±2℃, 相対湿度 60±5% の恒温恒湿養生室にて、コンパレータ法により長さ変化率を測定した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 配(調)合およびフレッシュ性状

配(調)合およびフレッシュ性状を表-3 に示す。

### 3.2 圧縮強度試験

圧縮強度の結果を図-2 に、フレッシュ空気量と圧縮強度の関係を図-3 および図-4 に示す。図-2 より、蒸気

表-1 使用材料

種類	諸元
普通セメント	OPC 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3260cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	FA 強熱減量: 2.0%, SiO <sub>2</sub> : 61.7% 密度: 2.30g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 4020cm <sup>2</sup> /g 45μm ふるい残分: 8%, フロー値比: 108% 活性度(28日): 94%, 活性度(91日): 98% MB 吸着量(電発法): 0.61mg/g
細骨材	陸砂 粗粒率: 2.59, 表乾密度: 2.68g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.53%
粗骨材	碎石 粗粒率: 6.65, 表乾密度: 2.71g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 0.52%
混和剤	高性能 AE 減水剤 主成分: ポリカルボン酸系化合物
	AE 剤 主成分: 樹脂酸系界面活性剤
練混ぜ水	上水道水

表-2 配(調)合条件

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプフロー (cm)	水粉体比 (%)	フライアッシュ置換率 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)
20	70±10	30.9	30.9	52.6	2.0未満 3.0±0.5 4.5±0.5 6.0±0.5

表-3 配(調)合表およびフレッシュ性状

実験ケース	蒸気養生条件	空気量 (%)	水粉体比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						フレッシュ性状			
						水 W	粉体		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤		スランプフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
							セメント C	フライアッシュ F			高性能減水剤	AE 剤 (g/m <sup>3</sup> )			
No. 1	A	2.0未満	30.9	30.9	52.6	170	380	170	833	759	2.26 (0.41%)	0.0 (0.000%)	78.5	0.8	19.3
No. 2		3.0±0.5				170	380	170	833	759	2.31 (0.42%)	137.5 (0.025%)	70.0	3.4	22.3
No. 3		4.5±0.5				170	380	170	833	759	2.31 (0.42%)	192.5 (0.035%)	72.0	4.7	22.0
No. 4		6.0±0.5				170	380	170	833	759	2.31 (0.42%)	247.5 (0.045%)	73.5	5.8	20.8
No. 5	B	2.0未満	30.9	30.9	52.6	170	380	170	833	759	2.20 (0.40%)	0.0 (0.000%)	79.8	0.8	18.3
No. 6		3.0±0.5				170	380	170	833	759	2.20 (0.40%)	137.5 (0.025%)	78.2	2.8	19.8
No. 7		4.5±0.5				170	380	170	833	759	2.31 (0.42%)	198.0 (0.036%)	76.8	4.7	20.6
No. 8		6.0±0.5				170	380	170	833	759	2.15 (0.39%)	247.5 (0.045%)	75.0	6.4	18.9

養生Bの圧縮強度は蒸気養生Aに比べて小さく、その傾向はフレッシュ空気量が多いほど顕著であり、フレッシュ空気量が4.5%および6%では蒸気養生Bの圧縮強度は25%程度小さいことが分かった。図-3および図-4より、圧縮強度はフレッシュ空気量が多くなるほど小さくなる傾向を示しているが、その減少率は養生条件により違いが認められる。ここで減少率はフレッシュ空気量2.0%未満の圧縮強度(材齢28日)と他の圧縮強度を比較したものをフレッシュ空気量の増加分で割ったものとする。図-3および図-4より、蒸気養生Aの減少率は2.6%~5.2%、蒸気養生Bは3.4%~7.0%であり、概ね一般的な傾向<sup>2)</sup>にほぼ一致しているものの、蒸気養生Bの方の減少率が大きく、また、減少傾向も蒸気養生Aに比べて直線的な傾向を示した。

### 3.3 凍結融解試験

凍結融解試験結果より、各蒸気養生方法におけるフレッシュ空気量と相対動弾性係数の関係を図-5 および図-6に、フレッシュ空気量と耐久性指数の関係を図-7に示す。フレッシュ空気量が2%未満のケース No.1 および No.5 の相対動弾性係数は、90 サイクル未満で60%以下、耐久性指数が20以下であった。他方、フレッシュ空気量が3%以上のケースは、蒸気養生条件に関わらず耐久性指数が85以上と優れた耐凍害性であった。これは、前述の委員会報告<sup>2)</sup>に示されている耐凍害性確保のフレッシュ空気量は3%以上必要との知見と一致している。

### 3.4 気泡間隔係数測定

各蒸気養生における硬化後空気量とフレッシュ空気量の関係を図-8に示す。蒸気養生したコンクリートの硬化後空気量は、フレッシュ時に比べて8~9割程度を示していた。また、養生条件の違いについて、養生時間を短縮した蒸気養生Bの方が少なかった。各蒸気養生条件における硬化後空気量の気泡分布を図-9および図-10に示す。フレッシュ空気量2%未満のケース(No.1, No.5)は気泡弦長500 $\mu$ m以上の粗大な空気量が2.5割、気泡弦長250 $\mu$ m以下の微細な空気が4割であった。他方、フレッシュ空気量3%、4.5%および6%のケースは気泡弦長500 $\mu$ m以上の粗大な空気が1割、気泡弦長250 $\mu$ m以下の微細な空気が6割以上を占めており、フレッシュ空気量が多いケースほど気泡弦長50 $\mu$ m~250 $\mu$ m間の微細な空気が多く含まれている。蒸気養生Aと蒸気養生Bにおいて耐凍害性に

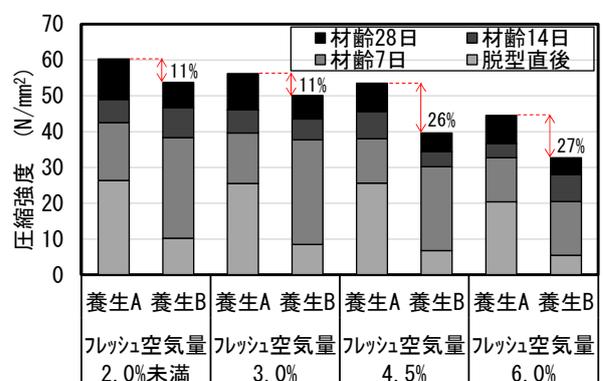


図-2 圧縮強度試験結果

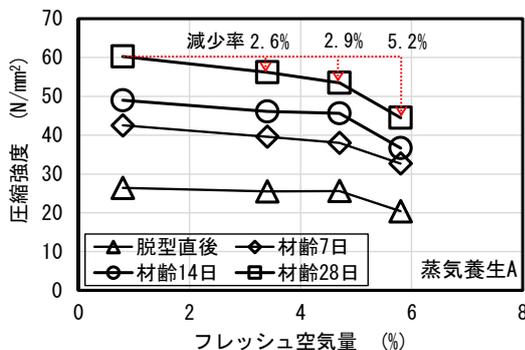


図-3 フレッシュ空気量と圧縮強度の関係(蒸気養生 A)

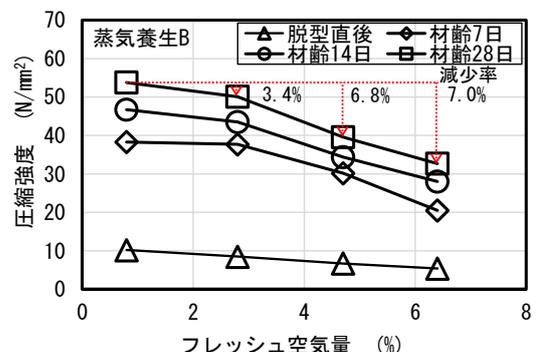


図-4 フレッシュ空気量と圧縮強度の関係(蒸気養生 B)

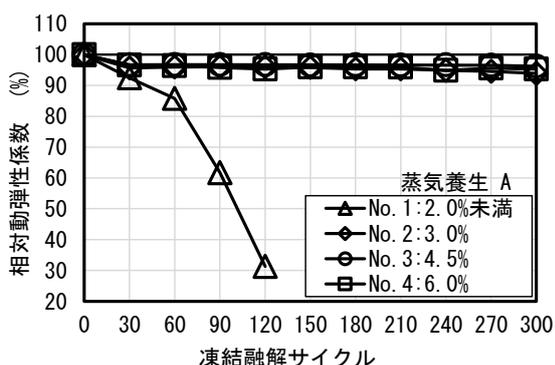


図-5 フレッシュ空気量と相対動弾性係数(蒸気養生 A)

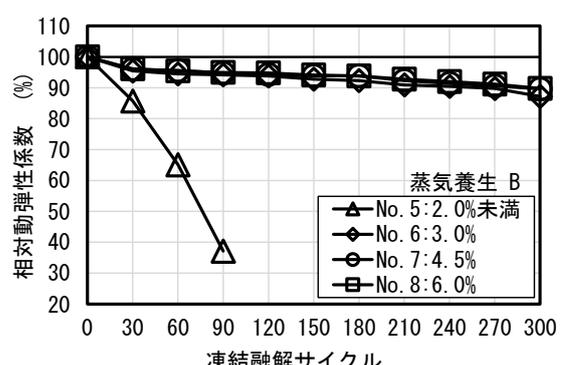


図-6 フレッシュ空気量と相対動弾性係数(蒸気養生 B)

有効とされている気泡弦長50 $\mu\text{m}$ ~250 $\mu\text{m}$ における硬化後空気量の減少度を比較するため、気泡弦長および養生条件毎に分けた硬化後空気量を図-11に示す。図-11より、フレッシュ空気量3%(No.2とNo.6)および4.5%(No.3とNo.7)のケースの硬化後空気量は全体的に減少傾向が認められた。他方、フレッシュ空気量が6%(No.4とNo.8)のケースでは、気泡弦長50 $\mu\text{m}$ ~100 $\mu\text{m}$ における硬化後空気量の減少は認められたものの、気泡弦長100 $\mu\text{m}$ 以上の硬化後空気量の減少は認められなかった。一般的に気泡が温められることで膨張するという観点から、コンクリ

ートの練混ぜ後、セメントの水和反応の経過時間が短いほど、ペーストの粘性は小さいと考えられ、急激な温度上昇によって温められた気泡が膨張し、気泡径が大きくなることで隣り合う気泡径範囲の大きい方へ移り、気泡分布が変化するとともに、硬化後空気量が減少したとも考えられるが、要因については不明確なため今後の検討課題としたい。

気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-12に、硬化後空気量と耐久性指数の関係を図-13に示す。耐久性指数85以上となる気泡間隔係数は350 $\mu\text{m}$ 程度以下であり、硬

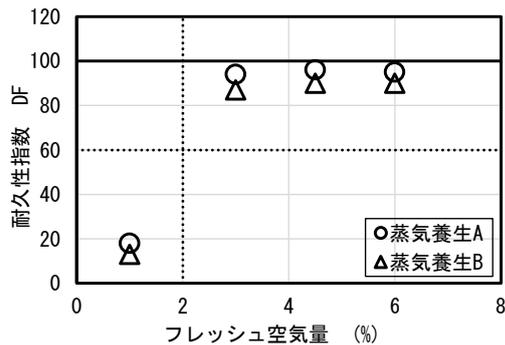


図-7 フレッシュ空気量と耐久性指数の関係

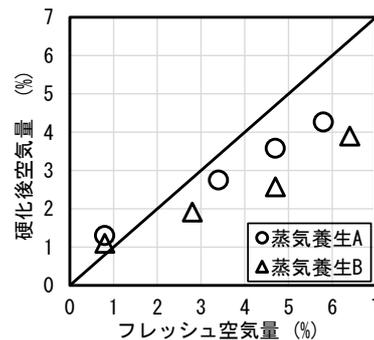


図-8 フレッシュ空気量と硬化後空気量の関係

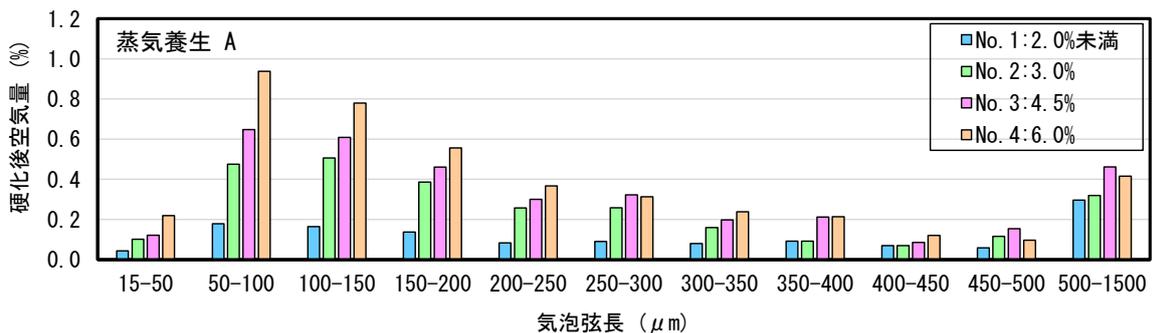


図-9 蒸気養生 A における硬化後空気量の気泡分布

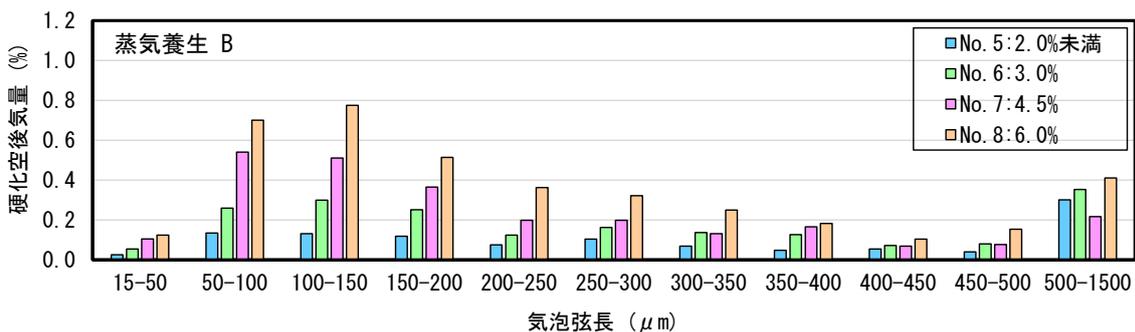


図-10 蒸気養生 B における硬化後空気量の気泡分布

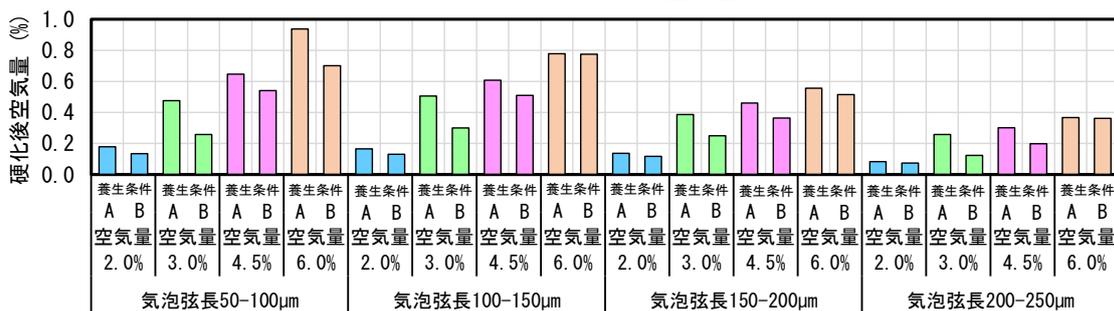


図-11 各養生条件における気泡弦長別の硬化空気量(50 $\mu\text{m}$ ~250 $\mu\text{m}$ )

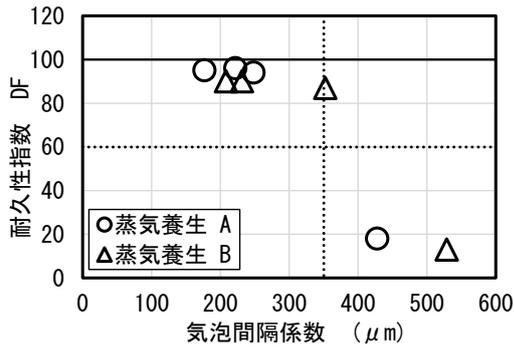


図-12 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

化後空気量は2%以上であることが分かった。前述の委員会報告<sup>2)</sup>によると耐凍害性を確保するには気泡間隔係数を250μm以下にすることが重要と報告されているが、本実験における気泡間隔係数は350μm程度とやや大きな結果であった。また、坂田ら<sup>5)</sup>の気泡径毎の硬化後空気量と気泡間隔係数の関係を調査した既往研究を参考に、本実験結果においても同様に着目した。気泡弦長15μm～150μmの硬化後空気量と気泡間隔係数の関係を図-14に示す。図-14より、蒸気養生条件に関わらず、硬化後空気量と気泡間隔係数に高い相関が認められ、耐久性指数85以上であった気泡間隔係数350μmに対応する気泡弦長15μm～150μmの硬化後空気量は0.6%であった。また、一般的に言及されている気泡間隔係数250μmに対応する硬化後空気量は1.1%であった。坂田ら<sup>5)</sup>は、普通ポルトランドセメントの配合について耐凍害性を得られる気泡径150μm未満の空気量は0.45%以上と指摘しており、本実験において150μm未満の微細な空気が多く含まれていたことが耐凍害性を満足する気泡間隔係数が350μm程度と一般的な知見<sup>2)</sup>よりやや高かった理由の一つと考えられるが、詳細については今後の検討課題と考える。

気泡弦長毎の硬化後空気量と材齢28日の圧縮強度の関係の一部を図-15および図-16に示す。図-15は気泡弦長50μm～100μmの硬化後空気量との関係を、図-16は気泡弦長500μm～1500μmの硬化後空気量との関係を示した。図-15および図-16より、硬化後空気量が多いほど、圧縮強度はほぼ直線的に小さくなる傾向が認められた。他方、気泡弦長が大きい場合は圧縮強度と硬化後空気量の相関性は不明瞭であった。一般的に圧縮強度は細孔量との関係が深く、森本ら<sup>6)</sup>は高温養生を行ったセメント硬化体の圧縮強度は細孔半径10nm以上の細孔量が増加することで減少すると言及している。本実験では細孔分布の測定を行っていないが、気泡弦長に着目すると小さい気泡弦長の硬化後空気量の方が圧縮強度に影響を及ぼしている要因と考えられる。

### 3.5 乾燥収縮試験

フレッシュ空気量と蒸気養生AおよびBにおける長さ

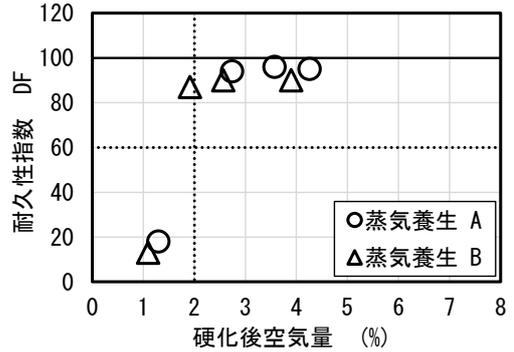


図-13 硬化後空気量と耐久性指数の関係

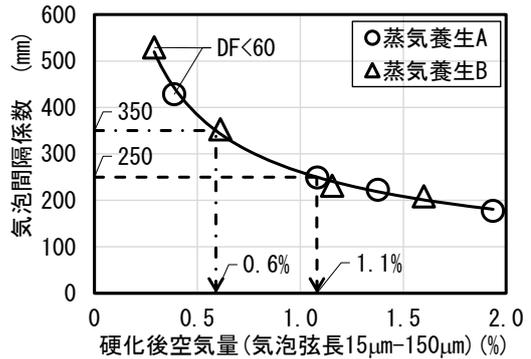


図-14 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

変化率の関係を図-17に、硬化後空気量と蒸気養生Aおよび蒸気養生Bにおける長さ変化率の関係を図-18に示す。空気量の多少および蒸気養生条件の違いによる乾燥収縮への影響は認められなかった。なお、図-17および図-18の網掛け部分は鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説<sup>7)</sup>より、収縮ひび割れに関して要求されるコンクリートの級を色別(標準:橙, 高級:緑, 特級:青)で表している。すべての条件における長さ変化率は $550 \times 10^{-6}$ 程度の結果であり、収縮ひび割れに関するコンクリートの級は高級となった。

一般的に「コンクリートの乾燥収縮の発生要因は材料、配(調)合、施工、構造等様々である中で、潜在的にセメントペースト中の細孔やゲル空隙などの極めて小さい空隙内の水分(水分子)が、乾燥や蒸発などによって失われる過程で乾燥収縮が生じる」<sup>8)</sup>といわれているが、本実験ではそれらの細孔分布を測定しておらず、詳細については今後の課題である。

## 4. まとめ

フライアッシュ高流動コンクリートについて、空気量2%未満、3%、4.5%および6%の4水準、蒸気養生A(養生時間:18時間)および蒸気養生B(養生時間:6時間)の2水準とした条件で検討した結果を以下にまとめる。

- 1) 蒸気養生Bの圧縮強度は、蒸気養生Aに比べて小さく、その傾向はフレッシュ空気量が多いほど顕著であった。蒸気養生Aの圧縮強度の減少率は2.6%～5.2%、蒸

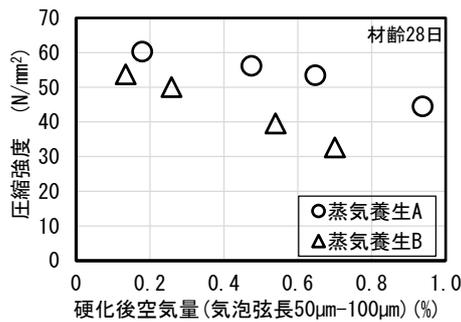


図-15 気泡弦長 50 $\mu$ m-100 $\mu$ m と圧縮強度の関係

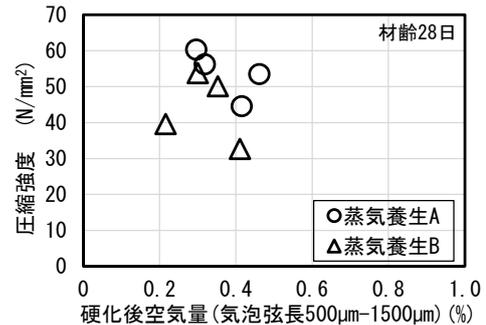


図-16 気泡弦長 500 $\mu$ m-1500 $\mu$ m と圧縮強度の関係

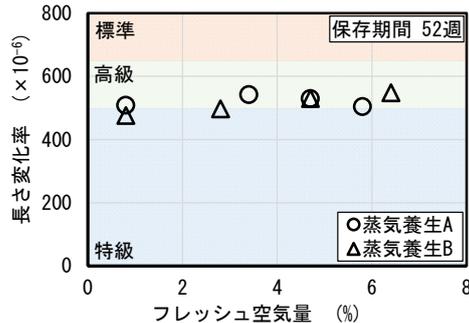


図-17 フレッシュ空気量と長さ変化率の関係

気養生Bは、3.4%~7.0%であり、概ね一般的な傾向にほぼ一致しているものの、蒸気養生Bの方の減少率が大きいことが示唆された。

- 2) 耐凍害性は、蒸気養生条件に関わらずフレッシュ空気量が2%未満のケースは耐久性指数20以下であり、3%以上のケースは、耐久性指数85以上の優れた耐凍害性であった。
- 3) 硬化後空気量とフレッシュ空気量は、蒸気養生条件に関わらず硬化後空気量は減少する傾向を示した。蒸気養生Bの硬化後空気量は気泡分布より、気泡弦長50 $\mu$ m~250 $\mu$ m間の微細な空気が減少していることが示唆された。耐久性指数85以上であったケースの気泡間隔係数は、蒸気養生条件にかかわらず350 $\mu$ m程度とやや大きな結果であった。
- 4) 長さ変化率は空気量の多少および蒸気養生条件の違いによる影響は認められなかった。また、長さ変化率は550 $\times$ 10<sup>-6</sup>程度の結果となり、収縮ひび割れに関するコンクリートの級は高級であった。

#### 謝辞：

本研究の気泡間隔係数試験において、(株)フローリックの西氏、猪瀬氏にご協力を頂いた。ここに記して、謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 成田 賢, 大高 昌彦, 関野 一男, 片柳 学：フラ

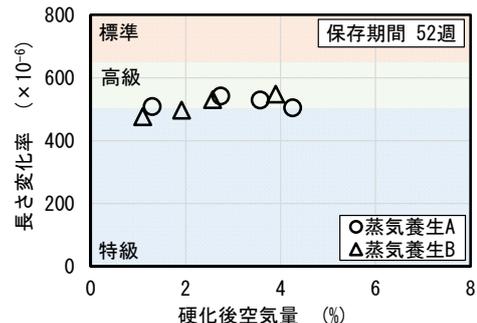


図-18 硬化後空気量と長さ変化率の関係

イアッシュ高流動コンクリートの凍結融解抵抗に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1281-1286, 2004

- 2) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会 報告書, 2016.6
- 3) 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及ぼす凍結融解試験前の養生方法の影響, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.425-430, 2002
- 4) 公益社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】2017制定
- 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, 第23巻第1号, pp.35-47, 2012.1
- 6) 森本 丈太郎, 魚本 健人：初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.7, No.1, pp.153-159, 1990
- 7) 一般社団法人 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 8) 一般社団法人 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ-メカニズムと対策技術の現状-, 2003