

空気量の調整方法が収縮低減剤を用いた コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響 —耐凍害性確保のための留意事項—

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○吉田 行
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 安中 新太郎

コンクリート構造物の設計段階で行う耐久性や安全性等の照査は、所要の性能に影響するような初期ひび割れが生じていないことを前提に行われる。これまで、初期ひび割れ低減対策として収縮低減剤が有用であり、併せて微細な空気量を適量確保することで耐凍害性を確保できることを確認してきた。本研究では、収縮低減剤を用いたコンクリートの適切な空気量確保のために留意すべき事項の整理を目的として、空気量の調整方法が耐凍害性に及ぼす影響について検討した。

キーワード：長寿命化、ひび割れ、収縮低減剤、耐凍害性

1. はじめに

コンクリート構造物の設計段階で行う耐久性や安全性等の照査は、所要の性能に影響するような初期のひび割れ等の不具合が生じていないことを前提に行われる。コンクリート構造物に初期ひび割れが生じた場合、水分や塩分等の劣化因子が侵入しやすくなるため、凍害、塩害、アルカリシリカ反応やそれらの複合による劣化を促進してコンクリート構造物の耐久性を低下させる可能性が高まる。写真-1は凍結防止剤の散布量が比較的多い峠部における橋梁の地覆コンクリートであるが、約2m間隔で生じた初期ひび割れから施工後3年程度で凍害が進行した事例である。コンクリート構造物の長寿命化のためには、この様なひび割れやひび割れ幅を抑制することが重要である。

著者らは、これまで収縮ひび割れ抑制対策の一つとして、コンクリートの収縮そのものを小さくする収縮低減剤の活用に関する検討^{1,2)}を進めてきた。収縮低減剤は、現在JIS規格が無く、その使用により耐凍害性が低下するとの報告³⁾もあるが、検討の結果、消泡剤とAE剤を適切に組み合わせ、微細な空気量を適量確保することにより耐凍害性を確保しながらひび割れを低減することが可能であることを確認している。

コンクリート中の空気には、形状が不規則で粗大な気泡のエントラップトエアと独立した微細な気泡のエントレインドエア(AE)があり、JIS A 1128に準じて測定したフレッシュコンクリートの空気量には両者が含まれている。上述のように、収縮低減剤を用いたコンクリートの耐凍害性の確保にはAEを適量確保する必要があるが、



写真-1 初期ひび割れから凍害が進行した事例

フレッシュコンクリートの空気量だけではこのような気泡の質を判断できないと考えられる。

本研究では、収縮低減剤を用いたコンクリートで良質な空気量を適量確保するために留意すべき事項を整理することを目的として、空気量の調整方法が耐凍害性に及ぼす影響について既報データと対比するなどし検討した。

2. 実験概要

既報^{1,2)}においては、各混和剤メーカーが推奨する消泡剤とAE剤を併用することによりコンクリートの空気量を調整した。本研究では、収縮低減剤とは異なるメーカーのAE剤1種類のみを使用し、一般的なコンクリートと同様に消泡剤を使用しないで空気量を調整した場合の強度や耐凍害性に及ぼす影響を評価した。以下に、実験の概要を示す。

(1) 使用材料および配合

セメントは、土木で一般的に使用されている普通ポ

ルトランドセメント（密度3.16g/cm³、比表面積3,420cm²/g、以下、普通セメント（記号N））と、高炉セメントB種（密度3.05g/cm³、比表面積3,750cm²/g、以下、高炉セメント（記号B））を使用した。細骨材は苫小牧樽前産の除塩された海砂（密度2.67g/cm³、吸水率1.17%）を、粗骨材は小樽市見晴産の碎石（密度2.68g/cm³、吸水率1.65%、粗骨材最大寸法25mm）を用いた。

収縮低減剤は、既報^{1,2)}で検討したものの中から、従来型のアルコール系として主成分がポリエーテル誘導体（SR1）のもの1種類と、耐凍害性を改善したものとして炭化水素系化合物とグリコールエーテル系誘導体を主成分とする鉱物油系収縮低減剤（SR4）と、特殊ポリオキシアルキシレングリコールを主成分とする保水系収縮低減剤（SR5）の2種類、計3種類を用いた。収縮低減剤の使用量については、従来型のSR1は3kg/m³と6kg/m³の2水準を、耐凍害性を改善したものはメーカー推奨量を基本として、SR4は6kg/m³、SR5は23kg/m³とした。

コンクリートの配合を表-1に示す。比較するパラメータの絞り込みのため、水セメント比は55%の1水準とし、単位水量は全配合155kg/m³に統一した。目標空気量は、空気量の多少による耐凍害性への影響を出来るだけ排除し、空気量の調整方法の影響を明確にするため、一律に5.0±1.0%とした。目標スランプは8.0~12.0cmとしたが、単位水量を固定し目標空気量の確保を優先したため、一部の配合でスランプが15cmを超えた。しかし、材料分離はなかったため、そのまま供試体を作製した。なお、比較として示した収縮低減剤を使用しないベース配合（配合記号NおよびB）は既報から抜粋したものである。また、ベース配合で消泡剤とAE剤を併用して空気量を調整したケース（N-tおよびB-t）も加えた。表には実測のスランプと空気量も示している。

空気量の調整について、既報^{1,2)}では、空気量を適切に確保する観点から、収縮低減剤と同じメーカーの消泡剤とAE剤を併用した。一方、本実験においては、JIS A 1128に準じて測定したフレッシュコンクリートの空気量

が同等でも空気量の調整方法が異なる場合の影響を確認する観点から、収縮低減剤とは異なるメーカーのAE剤（樹脂酸塩系）1種類のみを使用し、一般的なコンクリートと同様に消泡剤は使用しないで空気量を調整して既報の試験結果と比較した。

(2) 実験項目と供試体

a) 圧縮強度試験および静弾性係数の測定

空気量の調整方法の違いが圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響を把握するため、20℃で水中養生を行ったφ10×20cm円柱供試体を用いて、材齢7、28、91日に試験を実施した。なお、静弾性係数の測定にはコンプレッソメーターを用いた。

b) 耐凍害性試験

本研究では、一般的なJIS A 1148 A法による水中凍結融解試験と、ASTM C672に準じたスケーリング試験を実施した。

JIS A 1148 A法に準じた水中凍結融解試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用い、28日間の20℃水中養生の後試験を開始し、相対動弾性係数と質量変化率により評価を行った。

スケーリング試験は、-18℃を16時間、23℃を8時間の1日1サイクルで凍結融解作用を与えた。供試体は、220×220×100mmの角柱供試体を用い、1配合当たり3供試体で評価した。供試体の養生は、材齢7日まで水中養生後、材齢28日まで温度20±2℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室内で気中養生を行い、材齢28日から試験を開始した。試験面は打設面（220×220mm）とし、試験面には土手を設けて3%NaCl水溶液を湛水した。

c) 気泡分布測定

硬化コンクリートの気泡組織を把握するため、ASTM C457に準じてリニアトラバース法による気泡分布測定を行った。気泡分布測定用の試料は、水中養生材齢28日の100×100×400mm角柱供試体より採取して測定した。

表-1 コンクリートの配合

配合記号	セメントの種類	収縮低減剤の種類	水セメント比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE減水剤 C×%	AE剤 C×%	消泡剤 C×%	実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	収縮低減剤 SR					
N (※)	N	-	55	45	155	282	864	1049	-	0.05	0.00750	-	10.4	4.8
N-t		-					858	1040	-	-	0.00500	0.004	10.2	5.7
NSR1-3		SR1		3.0			867	1021	6.0	-	0.00250	-	15.2	5.7
NSR1-6				6.0					-	0.00125	-	12.2	5.6	
NSR4-6				23.0					-	0.00175	-	10.6	5.3	
NSR5-23				-					-	-	-	-	-	-
B (※)	B	-	55	45	155	282	860	1045	-	0.05	0.01000	-	8.8	4.6
B-t		-					854	1035	-	-	0.01000	0.004	12.0	5.9
BSR1-3		SR1		3.0			863	1016	6.0	-	0.00125	-	13.2	5.2
BSR1-6				6.0					-	0.00200	-	7.8	4.9	
BSR4-6				6.0					-	0.00250	-	8.6	6.0	
BSR5-23				23.0					-	0.00125	-	9.5	4.8	

※既往の研究から抜粋

3. 試験結果および考察

(1) 圧縮強度および静弾性係数

図-1 に各コンクリートの圧縮強度を、図-2 に収縮低減剤および消泡剤を使用していないベース配合 (N または B) に対する圧縮強度比を示す。なお、凡例の記号は、セメントの種類 (N、B)、収縮低減剤の種類 (SR1、4、5)、ハイフンの後の数値は収縮低減剤使用量 (3、6、23kg/m³) を表している。また、末尾に付した記号 t は空気量の調整に消泡剤を使用したことを表しており、それらのうち Nt と Bt 以外の配合については、既報^{1,2)}の試験結果を示している。

各コンクリートの圧縮強度は、収縮低減剤使用の有無によらず、いずれも材齢の経過に伴い増加し、セメント種別では、材齢 28 日までは普通セメントの方が高炉セメントよりも高かったが、それ以降は逆転した。

空気量の調整方法の違いに着目すると、普通セメントでは、消泡剤を用いて空気量を調整した配合 (末尾記号 t の配合) は消泡剤を使用せず空気量を調整した場合と

比較して概ね圧縮強度は大きかった。一方、高炉セメントでは、消泡剤使用の有無による一様な傾向はみられず、ベース配合と収縮低減剤 SR5 を用いた配合は消泡剤を用いて空気量を調整した方が圧縮強度は小さかった。

表-2 に各コンクリートの実測空気量を示す。消泡剤使用の有無によらず、配合によって実測空気量は異なっており、これらの違いが圧縮強度に影響を及ぼしていると考えられる。図-3 に各材齢における圧縮強度とフレッシュコンクリートの実測空気量の関係を示す。普通セメントでばらつきが比較的大きいものの、概ね空気量が多いほど圧縮強度は小さくなる右肩下がり傾向があり、消泡剤使用の有無による影響は AE 剤等も含め実際に導

表-2 各コンクリートの実測空気量

配合	消泡剤		配合	消泡剤	
	無し	有り (t)		無し	有り (t)
N	4.8	5.7	B	4.6	5.9
NSR1-3	5.8	4.5	BSR1-3	5.2	4.7
NSR1-6	5.7	-	BSR1-6	4.9	-
NSR4-6	5.6	4.7	BSR4-6	6.0	4.8
NSR5-23	5.3	5.3	BSR5-23	4.8	5.8

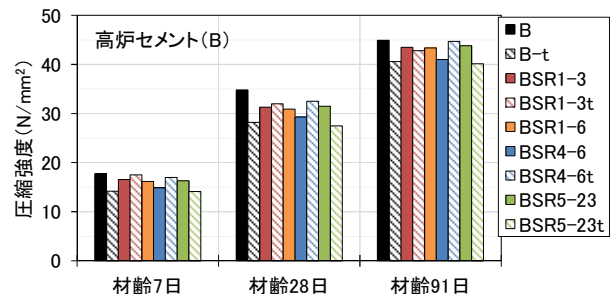
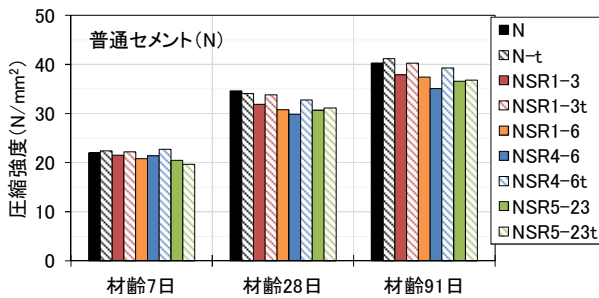


図-1 コンクリートの圧縮強度

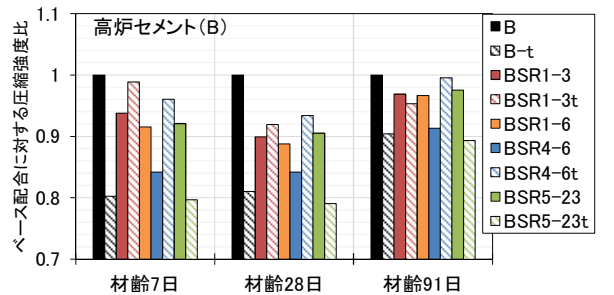
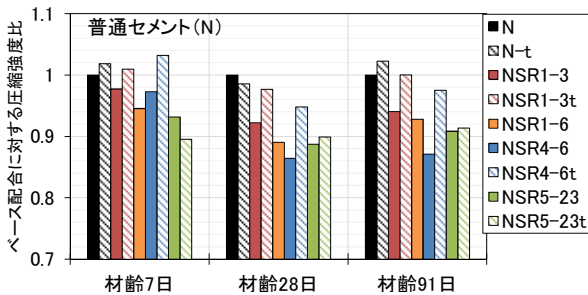
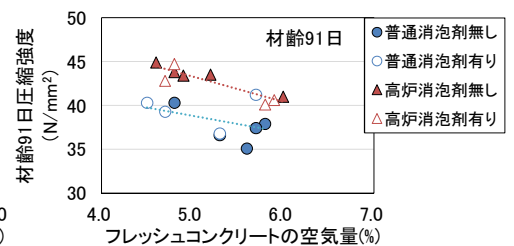
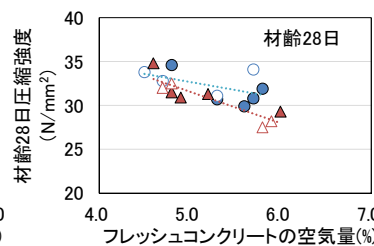
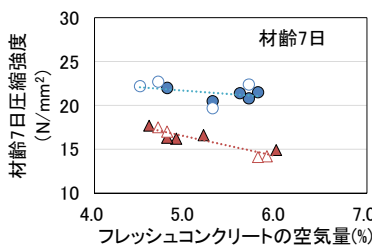


図-2 ベースコンクリートに対する圧縮強度比



(a) 材齢 7 日強度

(b) 材齢 28 日強度

(c) 材齢 91 日強度

図-3 各材齢における圧縮強度とフレッシュコンクリートの実測空気量の関係

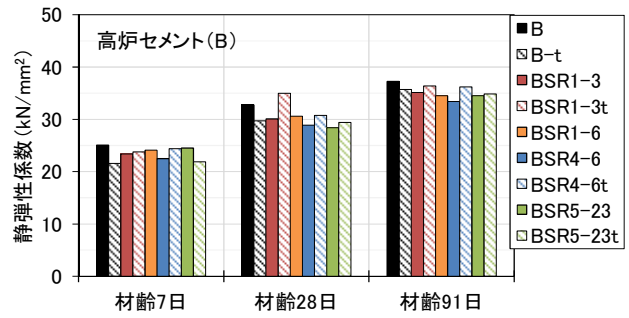
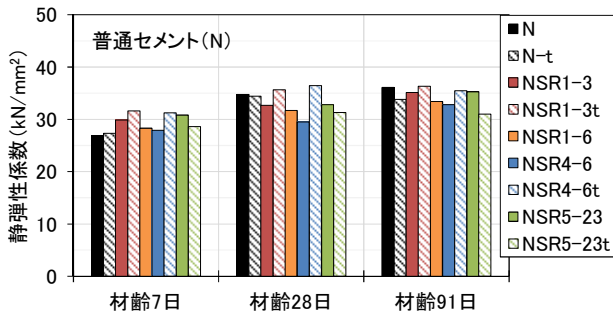


図-4 コンクリートの静弾性係数

入された空気量の違いとして現れるものと考えられる。なお、収縮低減剤を用いた場合や収縮低減剤使用量を増加した場合にベース配合より圧縮強度が低下する傾向は消泡剤を用いない配合において既報と同様であり、消泡剤使用の有無による違いは特にはない。

図-4 に各コンクリートの静弾性係数を示す。多少のばらつきはあるものの、全体として概ね圧縮強度と同様の傾向を示した

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5 に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、いずれも土木学会式⁴⁾より算出した値よりも上側にあり、収縮低減剤や消泡剤の有無によらず、通常的设计と同様に扱えることを確認した。

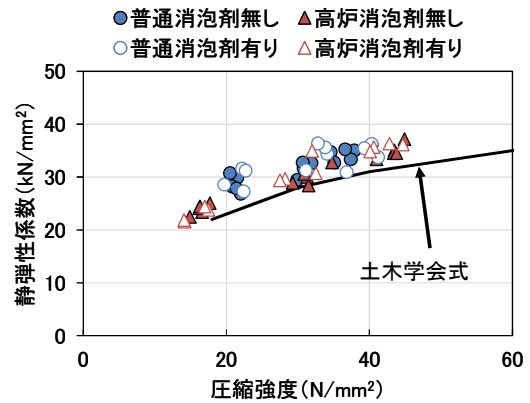


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

(2) 耐凍害性

a) 水中凍結融解試験による耐凍害性の評価

図-6 に真水による水中凍結融解試験結果を示す。上段は相対動弾性係数を、下段は凍結融解による供試体の質量変化率を示している。

いずれのセメントにおいても、消泡剤を用いて空気量を調整した配合（末尾記号 t の配合）は、相対動弾性の低下や質量減少が極めて小さく、高い耐凍害性を示した。これに対して、消泡剤を使用せずに空気量を調整した場

合、従来型収縮低減剤 SR1 と耐凍害性を改善した保水系収縮低減剤 SR5 を用いた配合の耐凍害性が著しく低下し、特に普通セメントは質量減少も大きかった。一方、耐凍害性を改善した鉱物油系収縮低減剤 SR4 は、普通セメントでは凍結融解 300 サイクルで相対動弾性係数が 60% を下回ったが、高炉セメントでは極めて高い耐凍害性を示した。消泡剤使用の有無によらず、フレッシュコンクリートの実測空気量はいずれも 4.5% 以上確保されていることから、コンクリートに実際に導入された気泡の大き

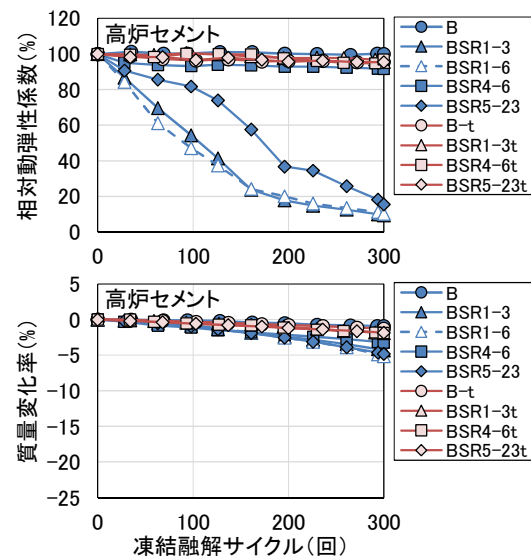
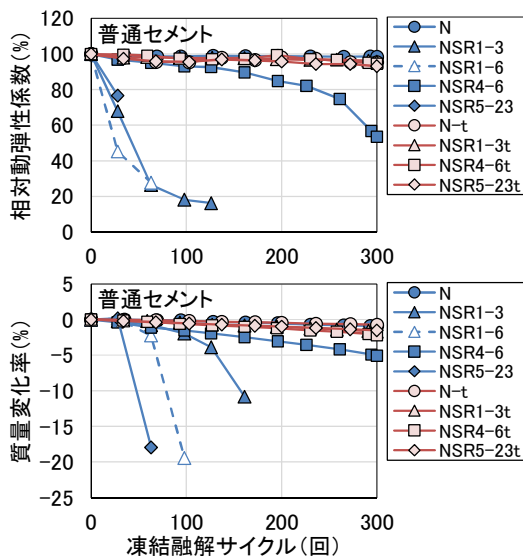


図-6 真水による水中凍結融解試験結果 (JIS A 1148 A 法)

さや微細な気泡の量が耐凍害性に影響していると推察される。

b) 塩水凍結融解によるスケーリング抵抗性

図-7に塩水によるスケーリング試験結果を示す。

真水による水中凍結融解試験と同様、いずれのセメントでも消泡剤を使用せずに空気量を調整した配合はスケーリング量が増加した。また、耐凍害性を改善した鉱物油系収縮低減剤SR4は他の収縮低減剤を用いた場合よりスケーリング量は抑制された。

(3) 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数

図-8に各コンクリートの気泡径分布を示す。

いずれの配合も気泡は気泡弦長200 μm 以下の範囲に集中しており、ピークは気泡弦長50 μm 程度だった。普通セメントでは、ベース配合と収縮低減剤SR1は消泡剤を用いた方が気泡数は多かったが、SR4とSR5では消泡剤使用の有無による差はなかった。また、高炉セメントでは、収縮低減剤SR4を除くと、消泡剤を用いた方が気泡数は多かった。なお、気泡数は測定した試料毎の総数であり、試料間で比較するには試料毎の総測線長や硬化コンクリートの空気量、試料から骨材を除いたセメントペ

ースト率を考慮して導入された気泡を評価する必要がある。

図-9に気泡径分布の測定結果から算出した硬化コンクリートの空気量とフレッシュコンクリートの空気量の関係を示す。硬化コンクリートの空気量はフレッシュコンクリートよりも1~2%程度減少している。コンクリートの締固め等による合泡、破泡の影響が考えられるが、収縮低減剤を用いた場合、安定性が劣る気泡が連行され硬化後の気泡数が減少するとの報告もある³⁾。なお、消泡剤有りの方が減少の程度が大きい傾向も確認された。

図-10に気泡径分布の測定結果から算出した気泡間隔係数とフレッシュコンクリートの空気量の関係を示す。一般に、微細な空気量が多く混入するほど気泡間隔係数は小さくなり耐凍害性の向上に寄与するが、収縮低減剤を用いた場合、消泡剤無しの配合ではフレッシュコンクリートの空気量が4.5~6.0%程度あっても気泡間隔係数が大きいものもみられ、フレッシュコンクリートの空気量だけでは耐凍害性を確保可能か判定できないことがわかる。また、消泡剤を用いた配合はいずれも気泡間隔係数が200 μm 以下と小さく、良質な気泡が導入されていることが確認できる。

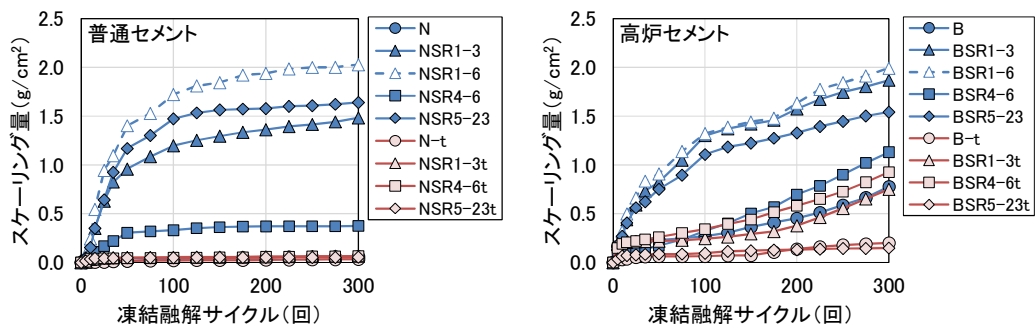


図-7 塩水によるスケーリング試験結果 (ASTM C672)

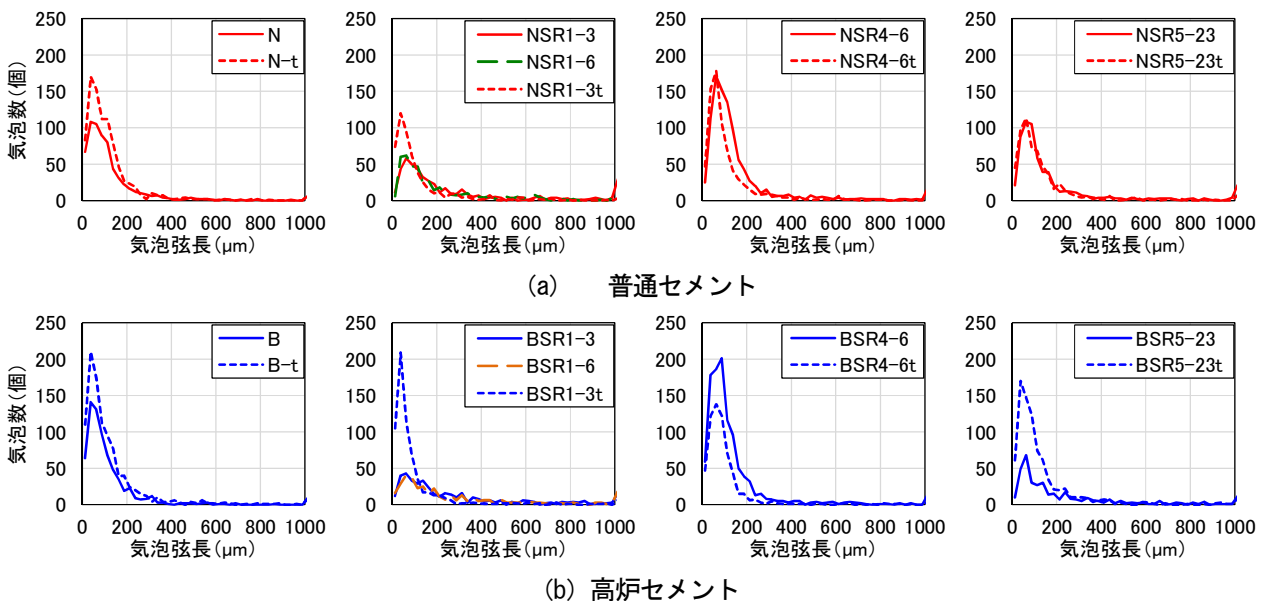


図-8 各コンクリートの気泡径分布

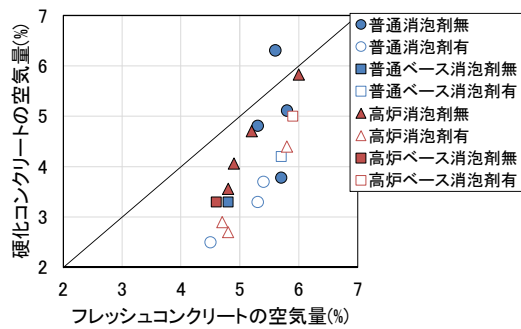


図-9 硬化コンクリートの空気量とフレッシュコンクリートの空気量の関係

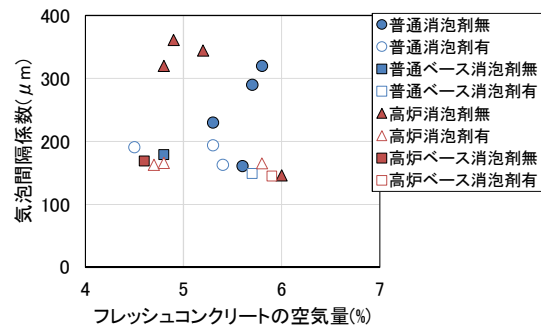


図-10 気泡間隔係数とフレッシュコンクリートの空気量の関係

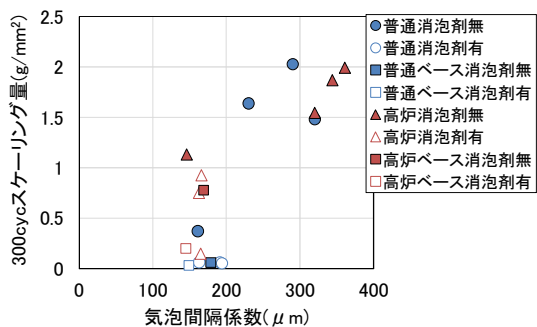


図-11 気泡間隔係数とスケール量の関係 (ASTM C672 300サイクル後)

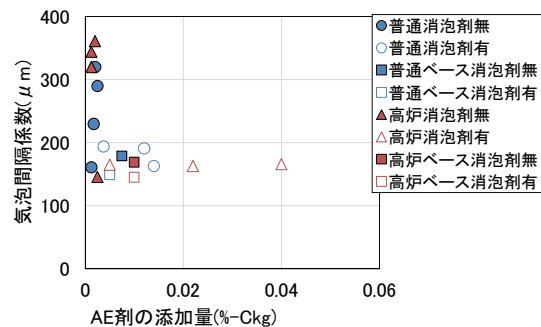


図-12 気泡間隔係数と AE 剤添加量の関係

図-11に気泡間隔係数と凍結融解300サイクル後のスケール量の関係を示す。気泡間隔係数が200 μm 以下ではスケール量が減少しており、微細で安定した空気量が耐凍害性の確保に重要なことがわかる。

図-12に気泡間隔係数とAE剤の添加量の関係を示す。明確な相関は確認できないが、消泡剤無しの配合は添加量が少なく済むが、気泡間隔係数が大きくなる場合があることが確認できる。一方、消泡剤を用いたものはAE剤の添加量が比較的多く必要となるが、気泡間隔係数は小さいことがわかる。図-9において、消泡剤を用いた場合、硬化コンクリートの空気量は減少する傾向がみられたが、その場合でも気泡間隔係数は小さいことが確認できたわけであり、AE剤を適量用いて十分な量のAEを導入し、かつ消泡剤を使用することで比較的粗大な気泡を減少させて空気量を調整することで、安定した微細な気泡を確保することが可能になると考えられる。

4. 適切な空気量確保のための留意事項

以上から、収縮低減剤を用いたコンクリートで耐凍害性を確保するには、微細な空気量を適量確保することが重要であることが再確認されたが、さらに適切な空気量の確保にあたっては、フレッシュコンクリートの空気量による管理だけでは不十分であり、AE剤の添加量を一定程度確保するとともに、消泡剤を併用して空気量を調

整する必要がある。AE剤の適切な添加量については、収縮低減剤の種類のほか、セメントの種類や骨材の物性等によっても異なるため都度確認するのが原則であるが、ベースとなるコンクリート配合のAE剤添加量に対し極端に少なくとも目標空気量が得られる場合には、微細な気泡の量が不十分となり、耐凍害性が低下することも考えられる。このような場合には、AE剤添加量をベース配合と同程度以上確保するとともに、消泡剤により空気量を調整するのが望ましい。なお、既報²⁾で示したが、消泡剤があらかじめ添加されている収縮低減剤を用いる場合も同様であり、この場合消泡剤の添加量は調整できないため、目標空気量を高めに設定することにより、AE剤の添加量を十分確保する必要がある。

参考文献

- 1) 吉田行ら：収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮抑制効果と凍結融解抵抗性、第61回(平成29年度)北海道開発技術研究発表会、管10(道)、2018.2
- 2) 吉田行ら：種々の収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と耐凍害性、第62回(平成30年度)北海道開発技術研究発表会、管5(道)、2019.2
- 3) 張友海ら：コンクリートの耐凍害性に及ぼす収縮低減剤の影響、セメント・コンクリート論文集、No.63、pp.458-465、2009
- 4) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕、p.39、2013.3