

# 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

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

収縮低減剤は、コンクリート構造物の収縮ひび割れ抑制対策の一つとして有用と考えられる。しかし、現状ではJIS規格が無く、耐凍害性の低下も報告されており、これまで寒冷地で積極的に利用される状況にはなかった。一方、近年、耐凍害性が向上した収縮低減剤が開発されてきていることから、本研究では、寒冷地での適用性を把握するため、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について検討した。

キーワード：ひび割れ、乾燥収縮、養生、質量変化

## 1. はじめに

コンクリート構造物の施工段階で発生する初期ひび割れには、沈みひび割れ、コールドジョイント、水和熱による温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れ等がある。また、コンクリート構造物の設計段階で行う、耐久性、安全性、使用性、復旧性の照査は、構造物の所要の性能に影響するような初期ひび割れが発生していないことを前提としている。初期ひび割れが発生した場合には、水分や塩分等の劣化因子の侵入を容易にし、凍害、塩害、アルカリ骨材反応等による劣化を促進してコンクリート構造物の諸性能を想定より早く低下させる可能性が高まるため、初期ひび割れは可能な限り抑制する必要がある。

初期ひび割れを抑制するには、施工段階におけるコンクリートの運搬、打込み、締固め、養生等の施工の基本事項を定められた通りに実施することで相当程度防ぐことが可能である。現在国土交通省全体の取り組みとして、コンクリートの施工状況把握チェックシートや表層目視評価シートを用いてコンクリートの品質向上に向けた試行工事が行われているのもその一環である。

一方、コンクリートは温度や湿度の変化により膨張したり収縮したりする。コンクリートが収縮する際にその動きが拘束されるとコンクリート内部に引張応力が発生し、コンクリートの引張強度以上となればひび割れが生じる。これを防止するためには、強度発現が十分ではないコンクリート打込み初期から、乾燥や温度変化を防止するための適切な養生を確実に行う必要がある。しかし、標準的に定められている養生を行った場合でも、構造物が置かれる環境や構造条件等により有害なひび割れが生じることもある。このような場合には、より積極的な対策を講じる必要があり、温度ひび割れに対しては、低発

熱型のセメント材料を用いたり、パイプクーリングなどによりコンクリート温度を下げる等の対策がとられる。また、自己収縮や乾燥収縮等の収縮ひび割れに対しては、膨張材や収縮低減剤などの混和材料の利用によるひび割れ抑制効果が確認されている。

膨張材はJIS規格があり、既に実務でも使用実績が多く、コンクリートを膨張させて、温度収縮、自己収縮、乾燥収縮等によりコンクリートが収縮する分を補償するように使うのが一般的である。実際のコンクリートにおいては、内部に鉄筋が配置されコンクリートの伸縮は拘束されるため、膨張作用が拘束されたコンクリートに圧縮応力を生じさせ、収縮時に生じる引張応力を打ち消すように働く。

これに対して、収縮低減剤は、コンクリート内部の水分が乾燥等により逸散する際に、水の表面張力に起因して発生するコンクリート内部の毛細管内壁を引き寄せようとする引張応力を小さくするように作用するもので、直接的には誘因となる毛細管内の水の表面張力を低下させる。これにより、コンクリートの収縮そのものを小さくする混和剤である。しかし、現状ではJIS規格が無いことに加え、収縮低減剤の使用により毛細管内の水の表面張力が小さくなると、AE剤によるエントレインドエアの形成を阻害する作用が生じるため、凍結融解抵抗性が低下するとの報告<sup>1)</sup>もあり、特に寒冷地で積極的に利用される状況にはない。他方、最近では耐凍害性を向上させた収縮低減剤も開発されている。

本研究では、寒冷地での収縮ひび割れ制御技術の提案を目的として、昨年度の報告<sup>2)</sup>に続いて収縮低減剤の種類を追加し、収縮低減剤使用による乾燥収縮抑制効果と耐凍害性について基礎的な検討を行った。

## 2. 実験概要

収縮低減剤の使用効果を確認するために、従来型の収縮低減剤3種類と、凍結融解抵抗性を改善した収縮低減剤2種類を選定して、強度、収縮、凍結融解試験を実施し、その効果を評価した。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 $3.16\text{g/cm}^3$ 、比表面積 $3,420\text{cm}^2/\text{g}$ 、以下、普通セメント（記号N））と、高炉セメントB種（密度 $3.05\text{g/cm}^3$ 、比表面積 $3,770\text{cm}^2/\text{g}$ 、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を、粗骨材は小樽市見晴産の砕石を用いたが、配合により骨材のロットが異なっている。細骨材ロット1は、密度 $2.70\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $0.90\%$ 、ロット2は密度 $2.67\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.24\%$ 、粗骨材ロット1は、密度 $2.68\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.72\%$ 、ロット2は密度 $2.68\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.65\%$ を用いた（粗骨材最大寸法は $25\text{mm}$ ）。

収縮低減剤は、従来型のアルコール系収縮低減剤として、日本建築学会の「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」<sup>3)</sup>に掲載されている代表的な市販の収縮低減剤の中から、主成分がポリエーテル誘導体（SR1）、グリコールエーテル系（SR2）、低級アルコールのアルキレンオキシド付加物（SR3）の3種類を選定した。また、凍結融解抵抗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）、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種類を用いた。

収縮低減剤の使用量については、基本的な性質の把握を目的として、収縮低減効果と凍結融解抵抗性確保の観点から混和剤メーカーが推奨する量を基本とし、SR3とSR5については比較のため2水準設定した。

目標空気量は、凍結融解抵抗性に関し、空気量の多少による影響を排除し、収縮低減剤の影響を明確にするため、一律に $5.0\pm 0.5\%$ とした。目標スランプは $8.0\pm 2.5\text{cm}$ とした。

空気量の調整は、良質な空気を確保することを目的として、消泡剤とAE助剤を併用した。なお、これらの空気量調整剤は、収縮低減剤との相性を考慮し、収縮低減剤と同じメーカーのものと組み合わせて使用した。なお、SR3については特にメーカー指定が無く、SR5についてはエントレインドエアの形成に影響しない収縮低減剤とのことから、収縮低減剤を使用していないベースコンクリートで用いた空気量調整剤と同じものを（消泡剤も同じメーカーのもの）を用いた。ただし、SR3は消泡剤が添加されているタイプのため別途消泡剤は用いなかった。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 $155\text{kg/m}^3$ に統一した。このため、一部の配合でスランプ調整を目的としてAE減水剤（リグニンスルホン酸塩系）を用いた。

コンクリートの配合を表-1に示す。表には実測のスランプと空気量も併記しているが、結果として、実測の空気量は $4.5\%$ 以上となったが、配合により最大で $1.3\%$ の差が生じた。

### (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

収縮低減剤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、 $20^\circ\text{C}$ で水中養生を行った $\phi 10\times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用いて、材齢7、14、28、56、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) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、JIS A 1129-3に準拠したダイヤルゲージ法で行った。供試体は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用い、供試体両端面の中央にゲージブラグが配置さ

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	収縮低減剤の種類	骨材のロット	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )			AE減水剤 C×%	AE助剤 C×%	消泡剤 C×%	実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)					
						水 W	セメント C	収縮低減剤 SR										
N	-	1	55	5.0	45	155	282	-	0.05	0.00750	-	10.4	4.8					
	SR1	1						864	1049	3.0	0.05	0.01200	0.002	10.6	4.5			
	SR2	1								6.0	-	0.01000	0.002	8.6	5.6			
	SR3	2						858	1040	3.0	-	0.00500	※	8.0	4.5			
		2								6.0	-	0.00925	※	8.8	4.7			
	SR4	1						864	1049	6.0	-	0.01400	0.001	8.6	5.4			
	SR5	2						858	1040	11.5	-	0.00325	0.004	10.0	5.3			
		2								23.0	-	0.00375	0.004	10.0	5.3			
	B	-						1					-	0.05	0.01000	-	8.8	4.6
		SR1						1	860	1045	3.0	-	0.02200	0.002	8.7	4.7		
SR2		1			6.0	-	0.01200	0.002	8.5	5.7								
SR3		2	854	1035	3.0	-	0.00375	※	9.5	4.4								
		2			6.0	-	0.01125	※	9.6	4.7								
SR4		1	860	1045	6.0	0.15	0.04000	0.001	9.1	4.8								
SR5		2	854	1035	11.5	0.02	0.00350	0.004	9.4	5.1								
		2			23.0	0.02	0.00500	0.004	10.3	5.8								

※収縮低減剤に消泡剤を含んでいる

れるようにあらかじめゲージプラグを型枠に設置し、コンクリートを打ち込んで成形した。材齢1日で脱型して材齢7日まで20℃水中養生を行った後に基長を測定し、温度20±2℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室に静置して、乾燥開始後7、28、56、91、182日にひずみと質量変化を測定した。

### c) 凍結融解試験

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。

### d) 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。

## 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に収縮低減剤を使用していないベースコンクリートに対する圧縮強度比を示す。なお、凡例の収縮低減剤記号の後の数値は、収縮低減剤の使用量(kg/m<sup>3</sup>)である。

収縮低減剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、一般的なコンクリートと同様、いずれも材齢の経過に伴い増加し、セメントの種類では、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。

また、強度発現の傾向は、セメントの種類や収縮低減剤の種類により若干異なり、普通セメントでは従来型の収縮低減剤を用いた場合、ベースコンクリートと概ね同程度以上だったが、耐凍害性が改善された収縮低減剤SR4やSR5についてはベースコンクリートを下回るケースがみられ、特に使用量を増やしたSR5-23では、ベースコンクリートよりも10%程度強度が低くなった。

一方、高炉セメントでは、従来型の収縮低減剤を用いた場合でも、SR1-3では材齢28日以降の増加がベースコンクリートより小さく、使用量を増やした場合(SR3-6)はいずれの材齢でもベースコンクリートより圧縮強度は低かった。耐凍害性が改善された収縮低減剤SR4とSR5を用いたケースは、ベースコンクリートより強度は低く推移し、特に使用量を増やしたSR5-23では、材齢28日まではベースコンクリートから最大で20%以上の強度の

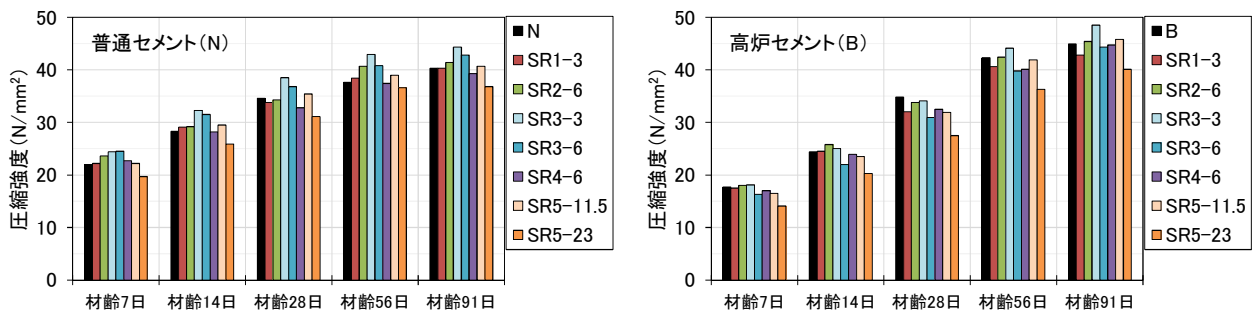


図-1 コンクリートの圧縮強度

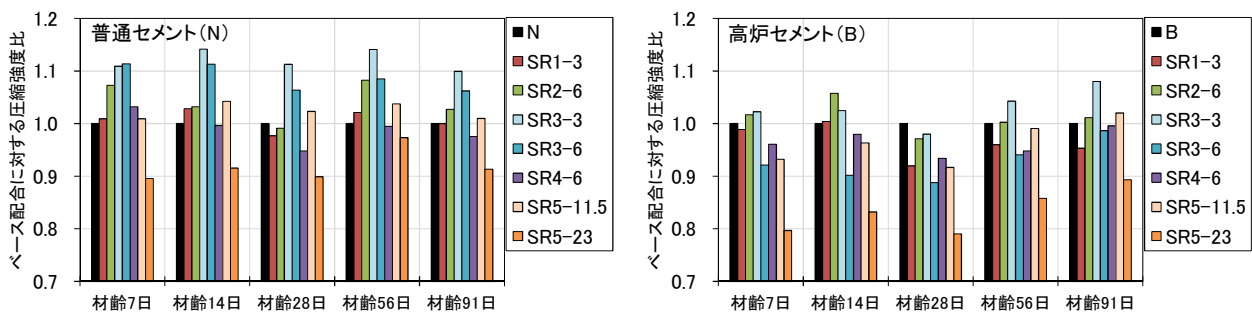


図-2 ベースコンクリートに対する圧縮強度比

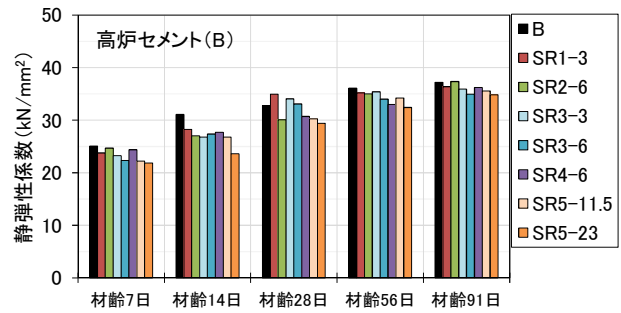
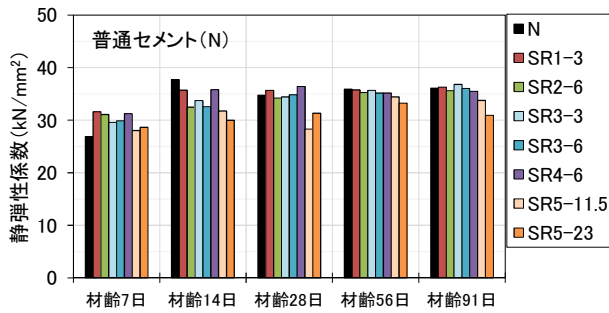


図-3 コンクリートの静弾性係数

差が生じた。なお、SR3とSR5については、その使用量を増やした場合、いずれのセメントでも強度は低下した。

以上から、収縮低減剤を用いた場合、その種類や使用量により収縮低減剤を用いないコンクリートよりも圧縮強度が大きく低下する場合があるため留意が必要である。

図-3に各コンクリートの静弾性係数を示す。収縮低減剤を用いたコンクリートの静弾性係数は、普通セメントでは、材齢28日以降は概ねベースコンクリートと同程度でほとんど増加しなかったが、SR5を用いた場合には、圧縮強度と同様、ベースコンクリートよりも小さかった。一方、高炉セメントでは、収縮低減剤を用いた場合、ベースコンクリートよりも概ね小さくなる傾向があり、特にSR5を用いた場合は小さかった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4に示す。収縮低減剤を用いた場合、強度や静弾性係数の低下が見られたものの、圧縮強度と静弾性係数の関係は、いずれも土木学会式<sup>9)</sup>より算出した値よりも上側にあり、収縮低減剤を用いた場合でも、通常的设计と同様に扱えることを確認した。

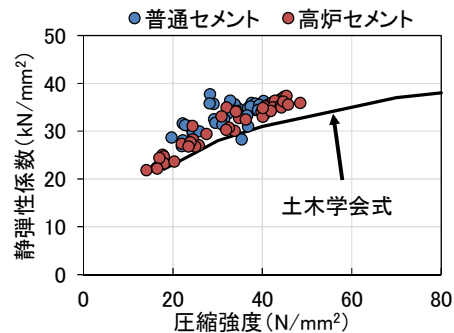


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

## (2) 乾燥収縮特性

図-5に乾燥期間とひずみの関係を示す。マイナスは収縮ひずみを意味する。

収縮低減剤を使用していないベースコンクリートでは、高炉セメントの方が普通セメントよりも乾燥初期の収縮量の増加が大きく、その差は乾燥28日において50 $\mu$ 程度だったが、それ以降は両者の差が小さくなり、乾燥182日ではほぼ同程度となった。

収縮低減剤を使用したコンクリートは、収縮低減剤の

種類によらず、ベースコンクリートに比べいずれも収縮量が小さかった。しかし、セメントの種類により収縮抑制効果は異なり、乾燥182日で普通セメントで100~200 $\mu$ 程度、高炉セメントで80~180 $\mu$ 程度と、高炉セメントよりも普通セメントで収縮抑制効果が大きかった。なお、耐凍害性が改善された収縮低減剤は、比較的収縮低減効果が高い傾向がみられた。また、収縮低減剤の使用量を増やしたSR3-6やSR5-23は、収縮量の低減効果は大きくなったが、逆に使用量が少ないSR3-3やSR5-11.5は乾燥初期の収縮量がベースコンクリートと同程度となることも確認され、使用量が少ない場合にはその効果を十分に得られない可能性が示唆された。

図-6に乾燥期間と質量変化率の関係を示す。

乾燥に伴う質量変化率はいずれも差は小さく、収縮低減剤を用いた場合、ベースコンクリートとほぼ同じか、若干質量変化が小さかった。

次に、質量変化率とひずみの関係を確認した(図-7)。なお、横軸の質量変化率は原点から右側をマイナス

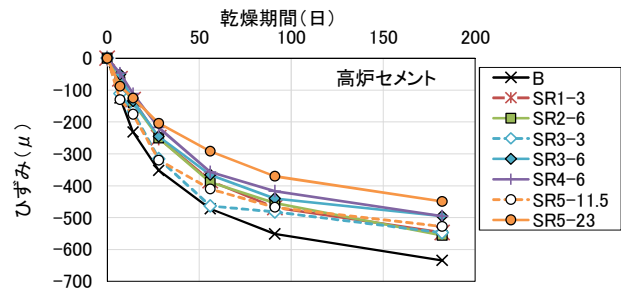
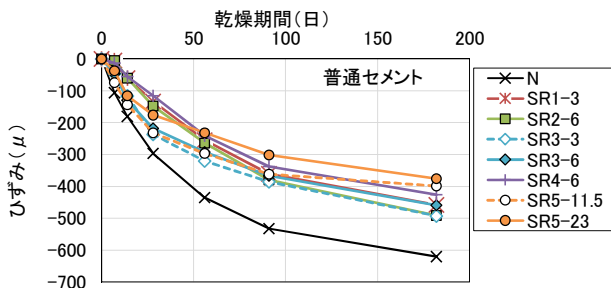


図-5 乾燥期間とひずみの関係

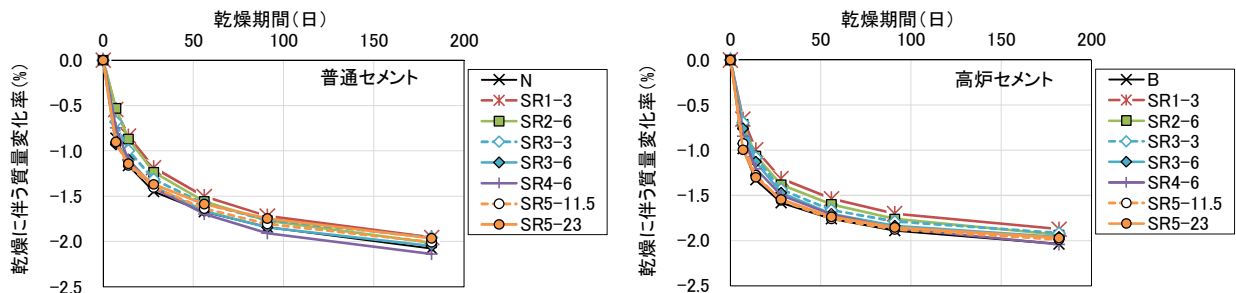


図-6 乾燥期間と質量変化率の関係

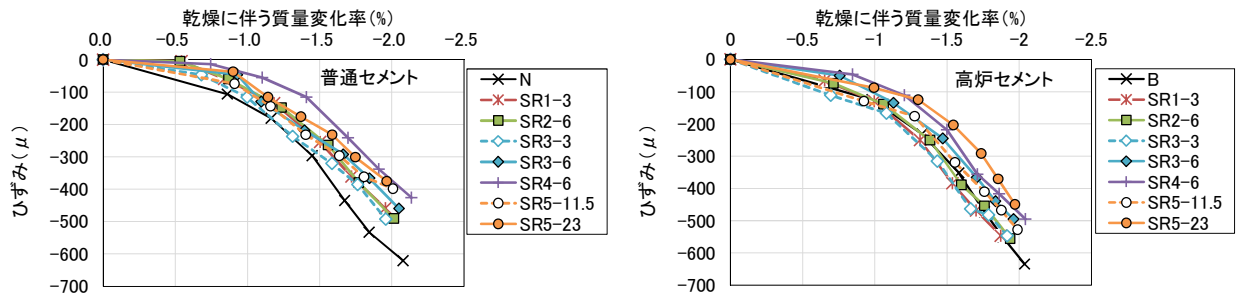


図-7 乾燥に伴う質量変化率とひずみの関係

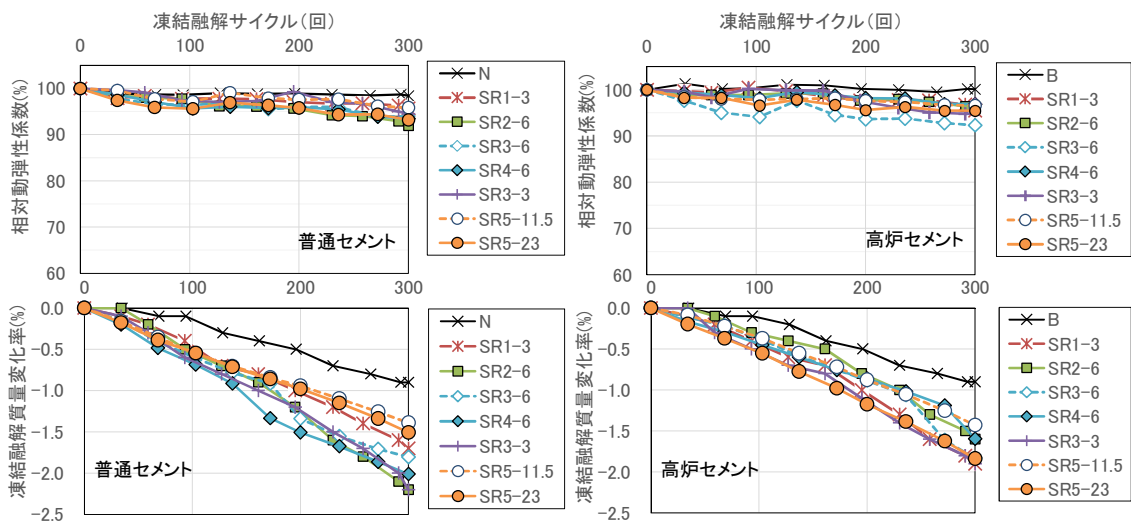


図-8 真水による水中凍結融解試験結果 (JIS A 1148 A 法)

ス側として表示しており、右に行くほど乾燥期間が長く質量減少が大きい。

収縮低減剤を用いた場合、普通セメントでは、ベースコンクリートよりも質量変化率あたりのひずみが小さく、特にSR4や使用量を増やしたSR3-6やSR5-23は小さい傾向がみられた。一方、高炉セメントでは、従来型のSR1-3、SR2-6、SR3-3はベースコンクリートとほぼ同様であった。

以上から、乾燥収縮特性について、収縮低減剤により乾燥収縮ひずみは低減するが、その低減効果はセメントや収縮低減剤の種類、および収縮低減剤の使用量により異なることを確認した。

### (3) 凍結融解抵抗性

#### a) 水中凍結融解による凍結融解抵抗性

図-8に真水による水中凍結融解試験結果を示す。

収縮低減剤を用いたコンクリートはいずれもベースコンクリートより相対動弾性係数は低下し、表面剥離に伴う質量減少も大きかった。しかし、いずれのケースにおいても、凍結融解300サイクル後の相対動弾性係数は90%以上と極めて高い凍結融解抵抗性を示しており、今回検討した混和材メーカーが推奨する収縮低減剤の添加量やAE剤の種類等を適切に選定した場合には、凍結融解抵抗性を確保できることを確認した。

#### b) 塩水凍結融解によるスケーリング抵抗性

図-9に塩水によるスケーリング試験結果を示す。

塩水での凍結融解作用によるスケーリング量は、セメ



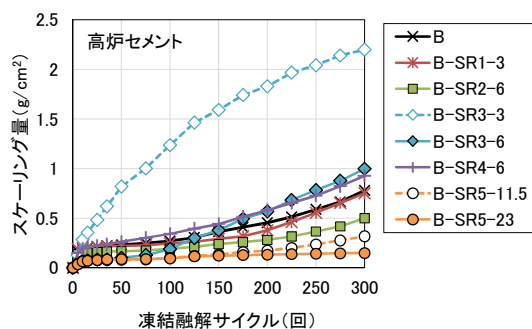
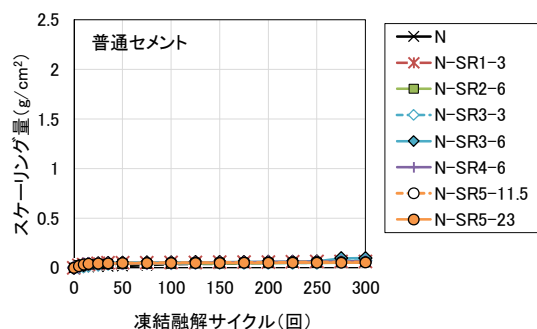


図-9 塩水によるスケーリング試験結果 (ASTM C672)

ントの種類により大きく差が生じた。普通セメントでは、収縮低減剤を用いた場合でもベースコンクリートと同程度で、300 サイクル後のスケーリング量はいずれも  $0.1\text{g}/\text{cm}^2$  以下と極めて少なかった。

一方、高炉セメントを用いたコンクリートは、全てのケースで普通セメントに比べてスケーリング量が多くなった。一般的なコンクリートにおいても、高炉セメントを用いたものは普通セメントよりスケーリング量が増加することは、既往の研究<sup>9)</sup>で報告されており、本研究でも同様の傾向を示した。高炉セメントで収縮低減剤を使用した場合、スケーリング量はベースコンクリートと概ね同程度以下だったが、SR3-3 はスケーリング量が著しく多かった。また、耐凍害性が改善された収縮低減剤 SR4 を用いたものは、ベースコンクリートよりも若干スケーリング量が多かったが、SR5 はスケーリング量が少なかった。以上から、JISA 1148 A 法による凍結融解抵抗性を確保できた場合でも、スケーリング量が著しく増加する可能性があることがわかった。

#### (4) 気泡間隔係数

図-10に各コンクリートの気泡間隔係数を示す。気泡間隔係数は、概ね凍結融解抵抗性が向上するとされる  $250\ \mu\text{m}$  以下だったが、高炉セメントを用いた場合でスケーリング量が著しく多かったSR3-3は、比較的気泡間隔係数が大きかった。表-1に示したように、SR3-3はフレッシュコンクリートの空気量も4.4%と全体の中では低めであり、スケーリング量が多くなった要因として、微細な空気量を十分に確保できなかったためと考えられる。SR3-3は消泡剤があらかじめ添加されているものだが、実際の添加量等は不明であり、このようなタイプの収縮低減剤を用いる場合には、フレッシュコンクリートの空気量を高めに設定するなどの配慮が必要と思われる。

#### 4. まとめ

収縮低減剤の使用量や配合条件が限定された範囲ではあるが、収縮低減剤の種類や使用量を適切に選定することにより、コンクリートの乾燥収縮を  $100\sim 200\ \mu$  程度低

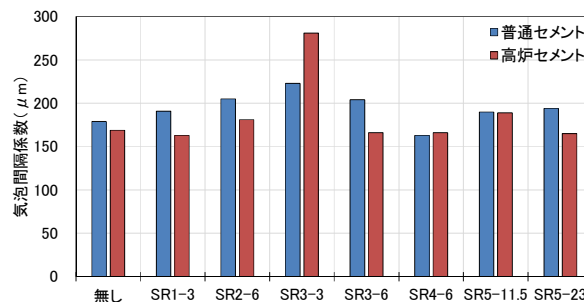


図-10 各コンクリートの気泡間隔係数

減することが可能なこと、圧縮強度は収縮低減剤の種類や使用量の増加により  $10\sim 20\%$  程度低下する可能性があることに留意する必要があることを確認した。また、微細な空気量を十分確保することにより従来型の収縮低減剤を用いた場合でも、高い凍結融解抵抗性が確保可能なことを確認した。今後は、適切な空気量を確保する方法について検討を行い、留意すべき点を整理するとともに、寒冷地でのひび割れ抑制対策として提案する予定である。

#### 謝辞

本研究では、収縮低減剤の使用にあたり、混和剤メーカー各社から技術的な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 張友海ら：収縮低減剤を用いた各種配合コンクリートの収縮特性および耐凍害性、セメント・コンクリート論文集、No.64、pp.413-420、2010
- 2) 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
- 3) 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状、pp.186-195、2013.7
- 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
- 5) 遠藤裕丈ら：スケーリング劣化の予測に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.733-738、2005