

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

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 嶋田 久俊
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に生じるひび割れは、水分や塩分等の侵入を容易にし、凍害や塩害等を促進させるため、ひび割れ抑制対策が必要となる。その対策の一つに収縮低減剤の使用が考えられるが、JIS規格が無く、強度や凍結融解抵抗性への影響など寒冷地での利用にあたり留意すべき事項が多いため積極的に利用される状況にはない。本研究では、収縮低減剤によるコンクリートの乾燥収縮抑制効果と凍結融解抵抗性に関する基礎的な検討を行った。

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ひび割れは、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ため、長寿命化のためにはひび割れを抑制する対策が必要となる。

収縮ひび割れ抑制対策の一つとして収縮低減剤の使用が考えられるが、JIS規格が策定されておらず、またコンクリートの強度や凍結融解抵抗性への影響など、寒冷地での利用にあたり留意すべき事項が多いため、特に寒冷地で積極的に利用される状況にはない。

本研究では、コンクリート構造物のひび割れにより促進される劣化を抑制し、長寿命化を図るため、収縮低減剤材料によるひび割れ抑制効果を検証し、寒冷地での収縮ひび割れ制御技術を提案することを目的として、収縮低減剤の使用による乾燥収縮抑制効果と凍結融解抵抗性についての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2種類と、凍結融解抵抗性を高めた収縮低減剤1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 3.16g/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 3.05g/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（密度 2.70g/cm^3 、吸水率 0.90% 、粗粒率 2.82 ）を、粗骨材は、小樽市見晴産の碎石（密度 2.68g/cm^3 、吸水率 1.72% 、粗骨材最大寸法 25mm ）を用いた。

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」¹⁾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）のもの、グリコールエーテル系（SR2）の2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系収縮低減剤（SR3）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に設定した。

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 $5.0\pm 0.5\%$ に設定した。目標スランプは土木部門で一般的な $8.0\pm 2.5\text{cm}$ に設定した。

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使用した。また、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 155kg/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

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	水セメント比 (%)	s/a (%)	単位量(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	細骨材 S	粗骨材 G						
N	-	55	45	155	282	864	1049	-	0.05	0.0075	-	10.4	4.8
	SR1							3.0	0.05	0.012	0.002	10.6	4.5
	SR2							6.0	-	0.010	0.002	8.6	5.6
	SR3							6.0	-	0.014	0.001	8.6	5.4
B	-	55	45	155	282	860	1045	-	0.05	0.010	-	8.8	4.6
	SR1							3.0	-	0.022	0.002	8.7	4.7
	SR2							6.0	-	0.012	0.002	8.5	5.7
	SR3							6.0	0.15	0.040	0.001	9.1	4.8

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%程度の差が生じた。

(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℃で水中養生を行ったφ10×20cm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) 乾燥収縮試験と拘束ひび割れ試験

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、100×100×400mmの角柱供試体を用い、供試体両端面の中央にゲージプラグが配置されるよう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。

また、乾燥収縮によるコンクリートのひび割れ抵抗性を把握するために、鉄筋拘束によるひび割れ試験を行った。図-1 に供試体の概要を示す。試験は、日本コンクリート工学会の JCI-SAS2 コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）²⁾に準拠し、旋盤部に防水型ひずみゲージを貼り付けた鉄筋を型枠内に配置してコンクリートを打ち込み、供試体を作製した。なお、恒温恒湿室のスペースの関係から、JCI の試験法で示されている供試体寸法より、コンクリートと鉄筋との定着を図る異形部分の長さを 300mm と短くして実施した。

供試体は、材齢 7日まで型枠のまま温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室内で封緘養生を行い、脱型後、そのまま恒温恒湿室に静置した。なお、ひずみはデータロガーによりコンクリート打ち込み時より計測を行った。ひずみの基点は、実際のひずみ挙動データと過去に収縮低減剤を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性に関する試験³⁾において実施した凝結試験の始発時間を参照して判定した。

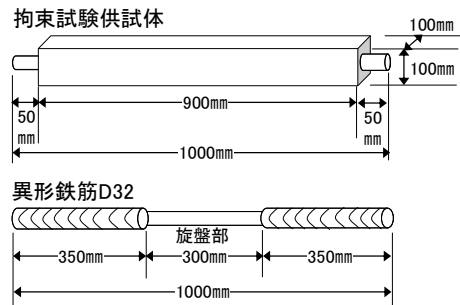


図-1 鉄筋拘束試験用供試体の概要

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-2 に各コンクリートの圧縮強度を示す。いずれも材齢の経過に伴い圧縮強度は増加し、セメントの種別では、材齢 28日までは普通セメントの方が高炉セメント

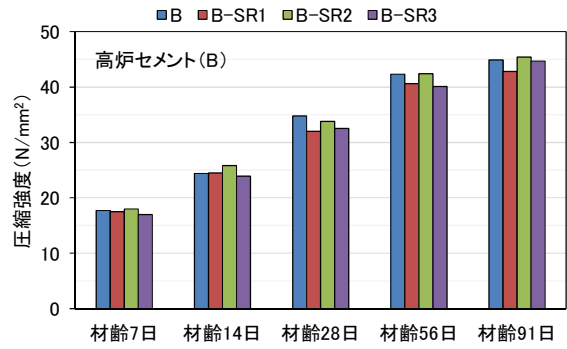
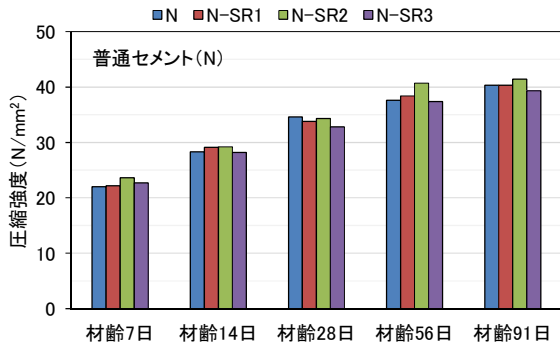


図-2 コンクリートの圧縮強度

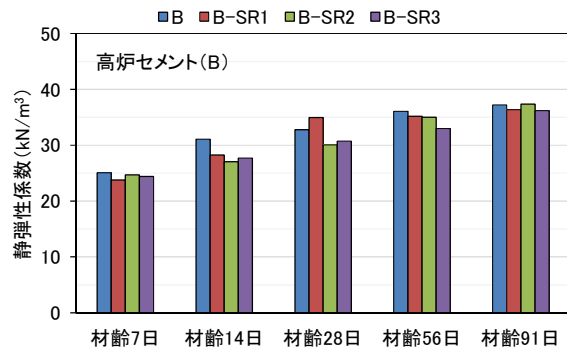
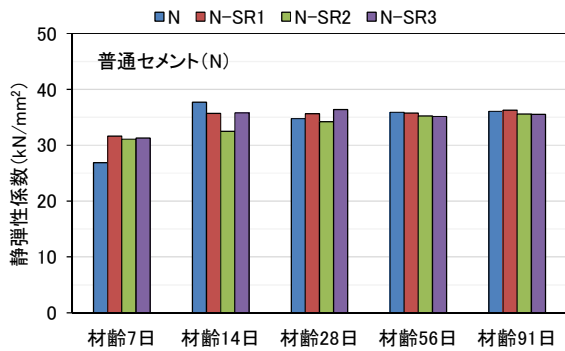


図-3 コンクリートの静弾性係数

よりも圧縮強度は大きかったが、それ以降は逆転した。

収縮低減剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、セメントの種類や収縮低減剤の種類により若干異なり、普通セメントでは材齢 14 日までは収縮低減剤を用いないベースコンクリートと同等以上だったが、材齢 28 日以降は耐凍害性が改善された収縮低減剤 SR3 を用いたコンクリートの圧縮強度がベースコンクリートを若干下回った。

これに対して、高炉セメントでは、収縮低減剤 SR2 を用いたコンクリートの圧縮強度は、材齢によらず概ねベースコンクリートと同等だったが、SR1 を用いたコンクリートは材齢 28 日以降、SR3 を用いたコンクリートは材齢 7 日からベースコンクリートよりも強度は小さく、最大で 8% 程度の低下がみられた。

図-3 に各コンクリートの静弾性係数を示す。普通セメントを用いたコンクリートの静弾性係数は材齢 14 日以降ほとんど変化がなく、収縮低減剤を用いたコンクリートの静弾性係数は、ベースコンクリートとほぼ同程度だった。一方、高炉セメントでは、材齢の経過とともに静弾性係数は微増したが、収縮低減剤を用いた場合、圧縮強度と同様に、ベースコンクリートよりも概ね小さくなる傾向があった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4 に示す。いずれも土木学会式⁹⁾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。

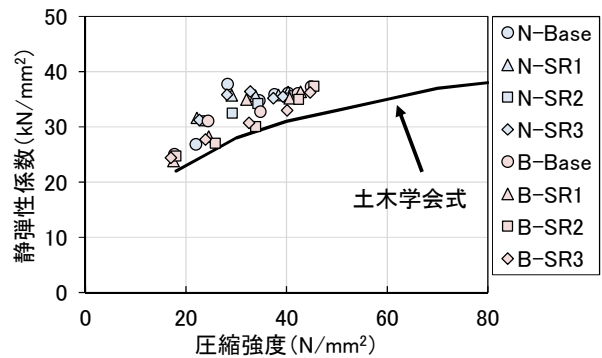


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

(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において、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 μ 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抑制され、SR3 の収縮ひずみが若干小さかった。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 100~190 μ 程度、高炉セメントで 80~130 μ 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。

図-6に乾燥期間と質量変化率の関係を示す。

質量変化率はいずれも差は小さいものの、従来型収縮低減剤のSR1とSR2は同程度で質量減少が若干少なく、SR3はベースコンクリートと同程度だった。

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率が大きい。

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SR3は小さくなった。一方、高炉セメントでは、SR3で質量変化率あたりのひずみは小さくなったが、従来型のSR1とSR2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の種類により異なることを確認した。

(3) 乾燥収縮によるひび割れ抵抗性

図-8に鉄筋拘束供試体による拘束ひずみの経時変化を示す。左列は普通セメントを用いた供試体、右列は高炉セメントを用いた供試体の拘束ひずみを示しており、マイナス側は収縮ひずみである。急激にひずみがプラス側に転じた点は、供試体にひび割れが生じたことを意味している。試験は、1配合につき供試体3個で実施したが、ひび割れの発生は確率的に生じるため、ひび割れ発生日数にばらつきがみられる。

セメントの種類で比較すると、図-5に示した鉄筋による拘束がない自由収縮ひずみが大きかった高炉セメントを用いたコンクリートは、普通セメントを用いた場合よりひび割れが発生する日数が短い傾向がみられた。

また、ベースコンクリートBは30日以内で3供試体ともひび割れが生じた。これに対して、収縮低減剤を用いたものは、収縮低減剤の種類による差はなく、30~45日程度でひび割れが発生し、ベース配合よりひび割れ発生までにかかる日数は増加した。

一方、普通セメントを用いたコンクリートは、ベースコンクリートNで35~45日程度でひび割れが発生した。これに対して、収縮低減剤を用いたものは、収縮低減剤の種類により多少差があり、SR2は40~50日程度でひび割れが発生したが、SR1は50日以降でひび割れが生じ、1供試体は70日を超えてひび割れが生じた。SR3は1供試体が40日程度でひび割れが生じたが、残り2供試体は60日程度でひび割れが生じた。

以上から、収縮低減剤のひび割れ抑制効果について、セメントの種類や収縮低減剤の種類によりその効果は異なることを確認した。なお、無拘束の乾燥収縮試験では、収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮ひずみ量は収縮低減剤の種類によらずほぼ同じひずみを示したが、特に

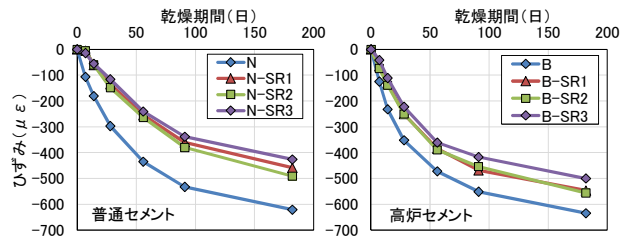


図-5 乾燥期間とひずみの関係

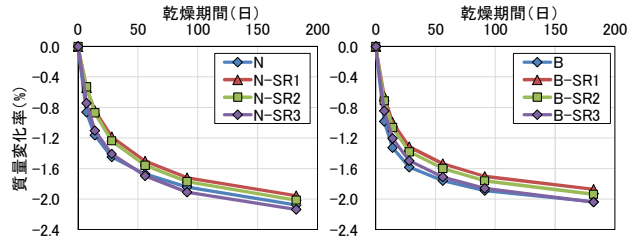


図-6 乾燥期間と質量変化率の関係

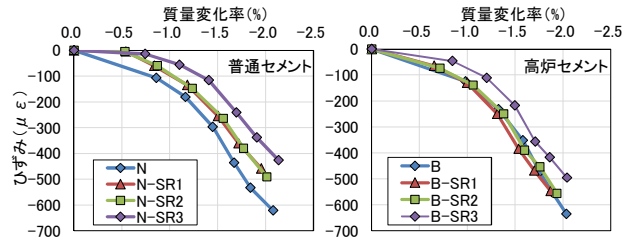


図-7 質量変化率とひずみの関係

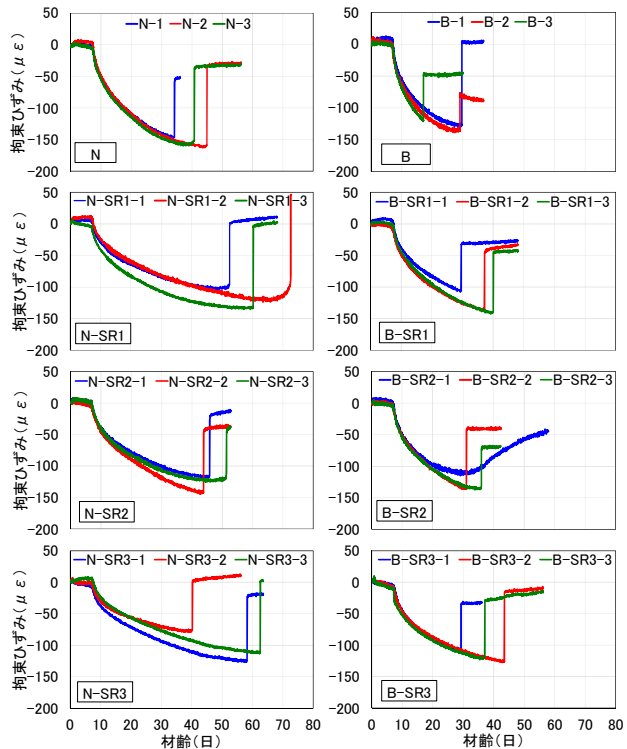


図-8 鉄筋による内部拘束ひずみの経時変化

普通セメントにおいては、収縮低減剤の種類によりひび割れ発生日数に多少の差が生じており、ひび割れが発生する際のひずみ量も異なっていた。このため、ひび抑制効果を定量的に評価するには、今後、ひび割れ発生時の応力とコンクリートの強度、弾性係数を併せて詳細に分析する必要がある。

(4) 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-9に真水による水中凍結融解試験結果を示す。

全体的に高炉セメントを用いたコンクリートは普通セメントを用いたものより凍結融解抵抗性は高く、収縮低減剤の使用によりベースコンクリートよりも相対動弾性係数は低下し、質量減少量は増加した。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剤の種類を選定した場合には、凍結融解抵抗性を確保することが可能なことを確認した。

b) 塩水凍結融解によるスケーリング抵抗性

図-10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、セメントの種類により大きく差が生じた。

普通セメントを用いたコンクリートは、収縮低減剤を使用した場合でもスケーリング量は変わらず少なかった。

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初期サイクルで急激にスケーリングが生じ、その後もスケーリング量が増加した。なお、高炉セメントを用いたコンクリートの方が普通セメントよりもスケーリング量が増加することは、既往の研究⁹⁾でも報告されている。

また、高炉セメントで収縮低減剤を使用した場合、凍結融解 25 サイクル程度までは、スケーリング量は概ねベースコンクリートと同程度以下だったが、それ以降は耐凍害性を改善した SR3 のスケーリング量がベースコンクリートを上回る結果となった。既往の研究⁹⁾によると、コンクリート表層の強度が低いほどスケーリング量が増加することが報告されている。本研究では、図-2 に示したように、SR3 を用いたコンクリートの水中養生後の圧縮強度は材齢 7 日以降最も小さい。また、スケーリング試験用の供試体は、材齢 7 日まで水中養生した後、材齢 28 日までは気中養生を行っており、コンクリート表層は乾燥の影響を大きく受けるため、材齢 7 日以降の表層強度の増加は低いと考えられる。これらを考慮すれば、SR3 でスケーリング量が増加したのは、コンクリート表層部の強度が比較的低かったことが影響したとも考えられる。

以上から、メーカーが推奨する収縮低減剤の使用範囲において、凍結融解抵抗性を確保することが可能なこと

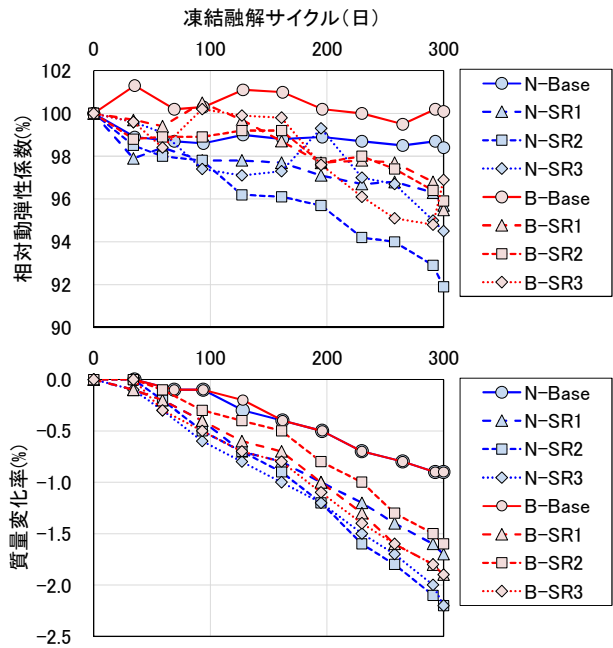


図-9 水中凍結融解試験結果

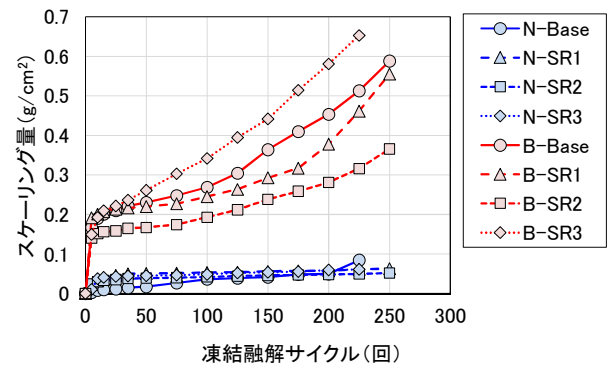


図-10 塩水によるスケーリング試験結果

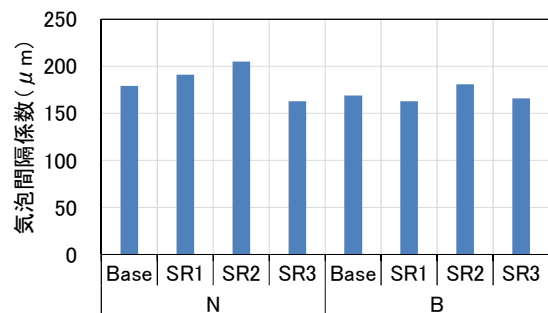


図-11 各コンクリートの気泡間隔係数

を確認した。しかし、スケーリング抵抗性については、収縮低減剤を用いた場合、種類によっては表層強度が低くなりスケーリング量が増加する可能性があることが示唆された。

(5) 気泡間隔係数

図-11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、いずれも凍結融解抵抗性が向上するとされる250 μ m以下となっており、今回検討した範囲においては、良質な空気量が確保されたことにより、高い凍結融解抵抗性が確保されたとも考えられる。

4. まとめ

収縮低減剤の種類や配合条件が限定された範囲ではあるが、収縮低減剤の使用により8%程度強度が低下する場合がある。また、弾性係数には影響がないことを確認した。

ひび割れ抑制効果については、収縮低減剤の使用により乾燥収縮が抑制され、鉄筋による拘束条件下においても、ひび割れが生じる日数が増加するなどの一定のひび割れ抑制効果を確認した。ただし、セメントの種類によりその効果は異なり、普通セメントに比べ高炉セメントでは効果が小さい傾向がみられた。

凍結融解抵抗性については、良質な空気を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。しかし、塩

水によるスケーリング抵抗性については、表層強度の影響から、スケーリング量が増加する可能性があることが示唆された。

今後は、収縮低減剤の種類拡大に加え、その添加量や凍結融解抵抗性を確保するために必要となる諸条件について検討を行い、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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集（1977～2002年度）、pp.459-461、2004
- 3) 吉田行、安中新太郎：収縮低減材料による乾燥収縮ひび割れ低減効果と凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、No.1、pp.811-816、2017
- 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、田口史雄、嶋田久俊：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