

寒冷環境下におけるコンクリートのひび割れ抑制に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 2

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、
吉田行、山内稜

【要旨】

コンクリートの長寿命化を図るには、コンクリート構造物の劣化を助長するひび割れを抑制する必要がある。本研究では、寒冷地でのひび割れ制御技術の提案を目的として、収縮低減材料によるひび割れ抑制対策の効果と各種混和材による自己治癒性について評価を行った。

その結果、高炉スラグ微粉末等の混和材利用によるひび割れの自己治癒性と自己治癒可能なひび割れ形態を確認し、自己治癒性の評価法を提案した。また、収縮低減剤による収縮抑制効果を確認し、使用にあたっての留意事項を整理するとともに、収縮低減剤を用いた場合の耐凍害性を確保するための空気量の調整方法を提案した。

キーワード：ひび割れ、乾燥収縮、収縮低減剤、耐凍害性、自己修復、混和材

1. はじめに

コンクリートの施工段階で生じる初期ひび割れは、水分や塩分等の劣化因子の侵入を容易にし、構造物が想定以上に早期に劣化する可能性が高まる。図-1.1は電子線マイクロアナライザ (EPMA) によるコンクリート中の塩化物イオンの元素マッピング事例であるが、コンクリートに生じた収縮ひび割れに沿って表面から内部に塩化物イオンが侵入していることが確認できる。また、写真-1.1は、打換えた地覆に生じた収縮ひび割れから供用後3年程度で凍害劣化が進行し、その後内部鉄筋が露出した事例である。このように、設計段階で考慮されていないコンクリート構造物の初期の不具合は、長期的な耐久性確保の観点からできるだけ抑制するのが望ましい。

施工段階で生じ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が、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確実に実施することで相当程度防ぐことが可能である。特に、乾燥や温度変化に伴う収縮ひび割れ防止には適切な養生の確実な実施が重要となるが、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。この場合、より積極的な対策を講じる必要があり、自己収縮や乾燥収縮によるひび割れに対しては、コンクリートの収縮そのものを小さくする効果がある収縮低減剤の利用が考えられる。しかし、現状においては JIS 規格が策定されておらず、コンク

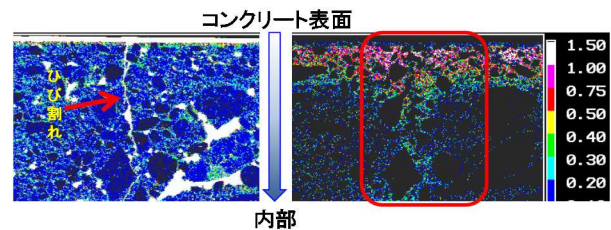


図-1.1 ひび割れ部から侵入する塩化物イオン
EPMA マッピング画像



写真-1.1 地覆に生じた収縮ひび割れから凍害が進行した事例

リートの強度や凍結融解抵抗性が低下するとの報告¹⁾もあるが、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おり、寒冷地で利用するにはこれらの特性を確認する必要がある。

一方、コンクリート構造物に生じたひび割れに水分が供給された場合に、未水和セメントが反応したり炭酸カルシウムが析出したりするなどして、ひび割れが自然に閉塞する現象が生じることがある。また、このような現象を積極的に促進させるために、コンクリートにあらかじめひび割れを充填する機能を有したあるいは付与した材料を仕込んでおけば、ひび割れ発生時に自動的に閉塞させることも可能となる。このような

現象全体をコンクリートの自己治癒・自己修復²⁾と言
い、自動的にひび割れを閉塞させる方法としては、セ
メント系材料の再水和を期待して水セメント比を小さ
くしたり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの
混和材を利用したりする研究などが行われている^{2,3)}。
これら混和材の利用は、耐久性向上対策としても有効
であり、環境負荷低減にも寄与する。

以上から、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、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検討を行うととも
に、混和材の活用によるコンクリートの自己修復性につ
いて検討を行った。以下に得られた成果を報告する。

2. 収縮低減剤によるひび割れ抑制対策の検討

2. 1 収縮低減剤の効果に関する検討

2. 1. 1 収縮低減剤の効果に関する試験概要

収縮低減剤の収縮低減効果と耐凍害性を確認する
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。

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 3,770cm²/g、
以下、高炉セメント（記号B））を使用した。細骨材は
苫小牧樽前産の陸砂を、粗骨材は小樽市見晴産の碎石
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 2.70g/cm³、吸水率 0.90%、ロッ
ト2は密度 2.67g/cm³、吸水率 1.24%、粗骨材ロット1

は、密度 2.68g/cm³、吸水率 1.72%、ロット2は密度
2.68g/cm³、吸水率 1.65%を用いた（粗骨材最大寸法は
25mm）。

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」⁴⁾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±0.5%とした。目標スランプは 8.0
±2.5cmとした。コンクリートの配合を表-2.1に示す。

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。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

表-2.1 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(kg/m ³)					AE 減水剤 C×%	AE 助剤 C×%	消泡剤 C×%	実測 スランプ ^g (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	-	1	55	5.0	45	155	282	864	1049	-	0.05	0.00750	-	10.4	4.8
	SR1	1								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								3.0	-	0.00500	※	8.0	4.5
		2								6.0	-	0.00925	※	8.8	4.7
	SR4	1								6.0	-	0.01400	0.001	8.6	5.4
SR5	2	11.5	-	0.00325	0.004	10.0	5.3								
	2	23.0	-	0.00375	0.004	10.0	5.3								
B	-	1	55	5.0	45	155	282	860	1045	-	0.05	0.01000	-	8.8	4.6
	SR1	1								3.0	-	0.02200	0.002	8.7	4.7
	SR2	1								6.0	-	0.01200	0.002	8.5	5.7
	SR3	2								3.0	-	0.00375	※	9.5	4.4
		2								6.0	-	0.01125	※	9.6	4.7
	SR4	1								6.0	0.15	0.04000	0.001	9.1	4.8
SR5	2	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

もの(消泡剤も同じメーカーのもの)を用いた。また、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 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減水剤(リグニンスルホン酸塩系)を用いた。なお、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°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°C 水中養生を行った後に基長を測定し、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 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) 拘束ひび割れ試験

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、一部配合で鉄筋拘束によるひび割れ試験を行った。図-2.1に供試体の概要を示す。試験は、日本コンクリート工学協会のコンクリートの自己収縮応力試験方法(案)⁹⁾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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 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⁹⁾において実施した凝結試験の始発時間を引照して判定した。

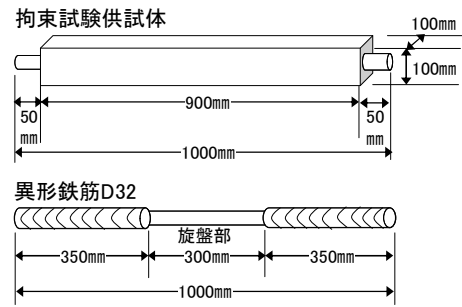


図-2.1 鉄筋拘束試験用供試体の概要

d) 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、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用い、28日間の 20°C 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°C を16時間、 23°C 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、 $220 \times 220 \times 100\text{mm}$ 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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 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($220 \times 220\text{mm}$)とし、土手を設けて3%NaCl水溶液を湛水した。

e) 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 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱供試体より採取して測定した。

2.1.2 収縮低減剤を用いたコンクリートの強度特性

図-2.2に各コンクリートの圧縮強度を、図-2.3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^3)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。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

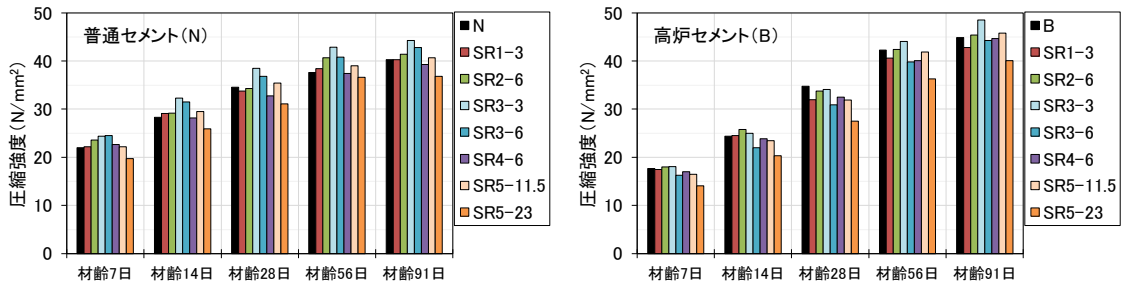


図-2.2 コンクリートの圧縮強度

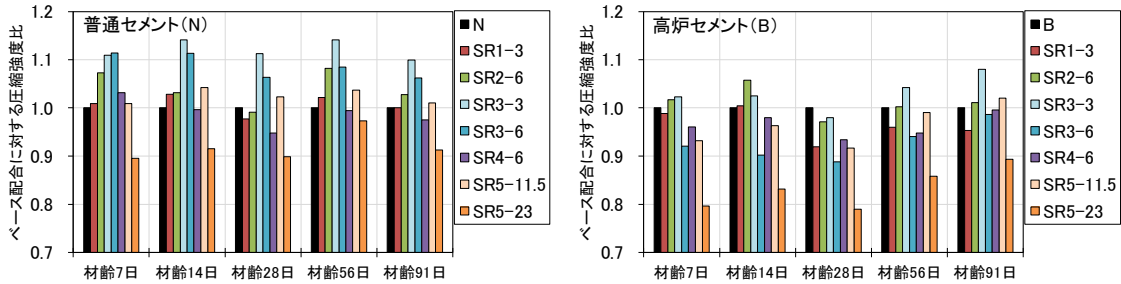


図-2.3 ベースコンクリートに対する圧縮強度比

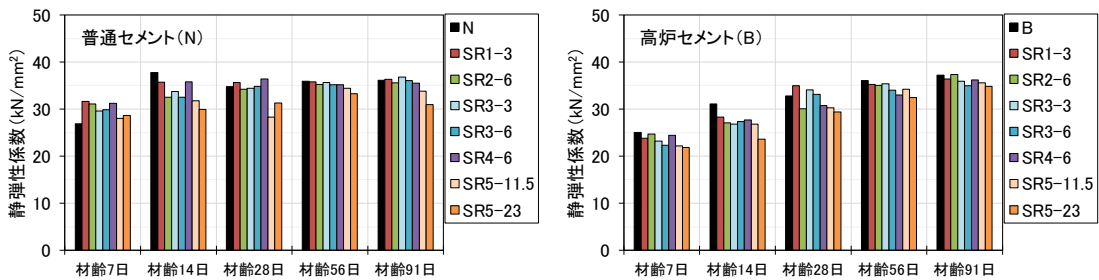


図-2.4 コンクリートの静弾性係数

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低下する場合があるため留意が必要である。

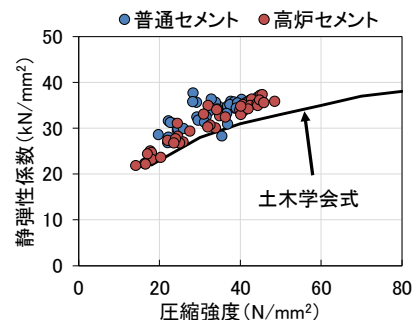


図-2.5 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-2.4 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-2.5 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。

2. 1. 3 収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮特性

1) 乾燥収縮特性

図-2.6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 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 μ 程度、高炉セメントで80~180 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。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-2.7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-2.8)。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が大きい。収縮低減剤を用いた場合、普

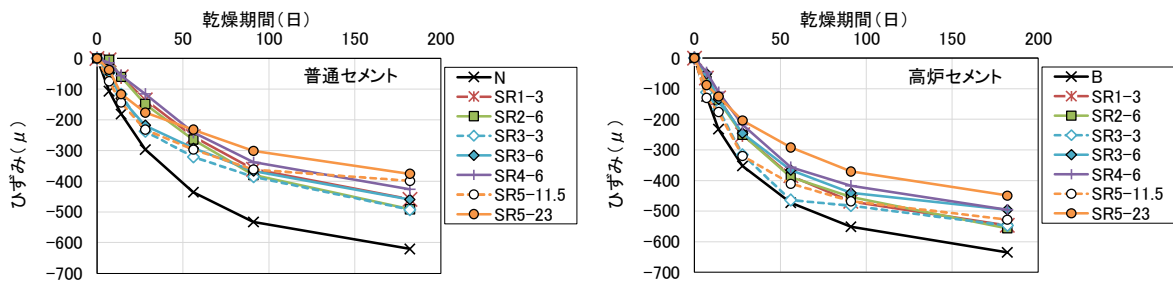


図-2.6 乾燥期間とひずみの関係

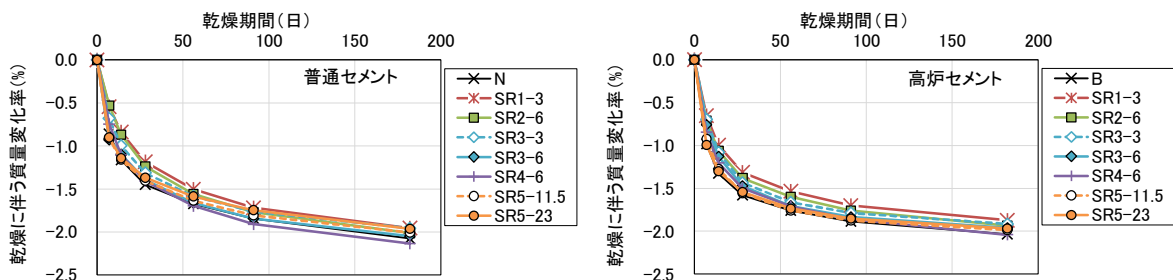


図-2.7 乾燥期間と質量変化率の関係

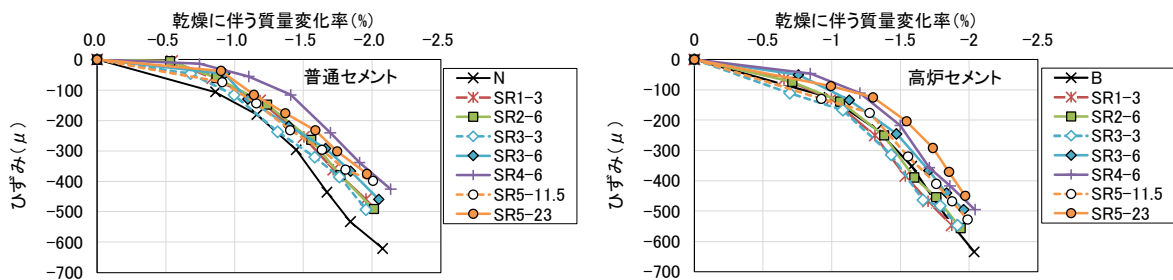


図-2.8 乾燥に伴う質量変化率とひずみの関係

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。

2) 乾燥収縮によるひび割れ抵抗性

図-2.9 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。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-2.6 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、高炉セメントの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の日数は増加した。

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

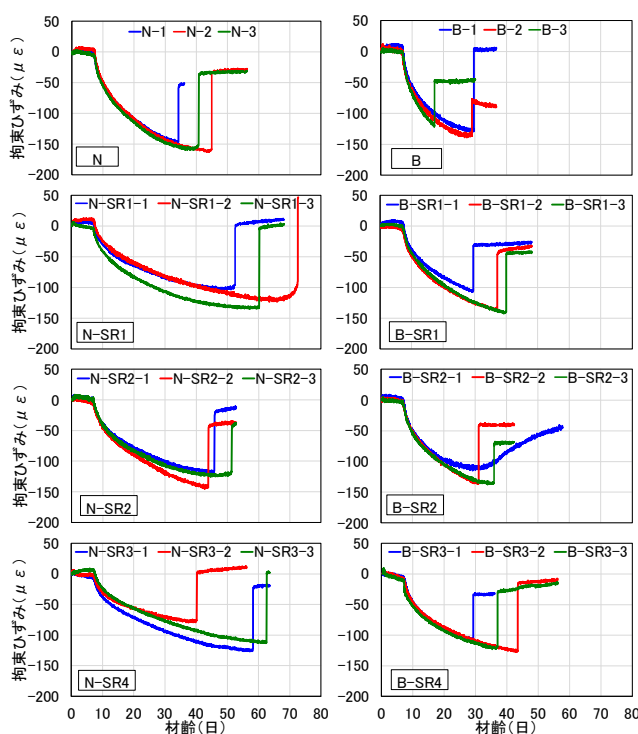


図-2.9 拘束ひずみの経時変化

数を併せ詳細に分析する必要がある。

2.1.4 収縮低減剤を用いたコンクリートの耐凍害性

1) 水中凍結融解による凍結融解抵抗性

図-2.10 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量も大きかった。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。

2) 塩水凍結融解によるスケーリング抵抗性

図-2.11 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⁸⁾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

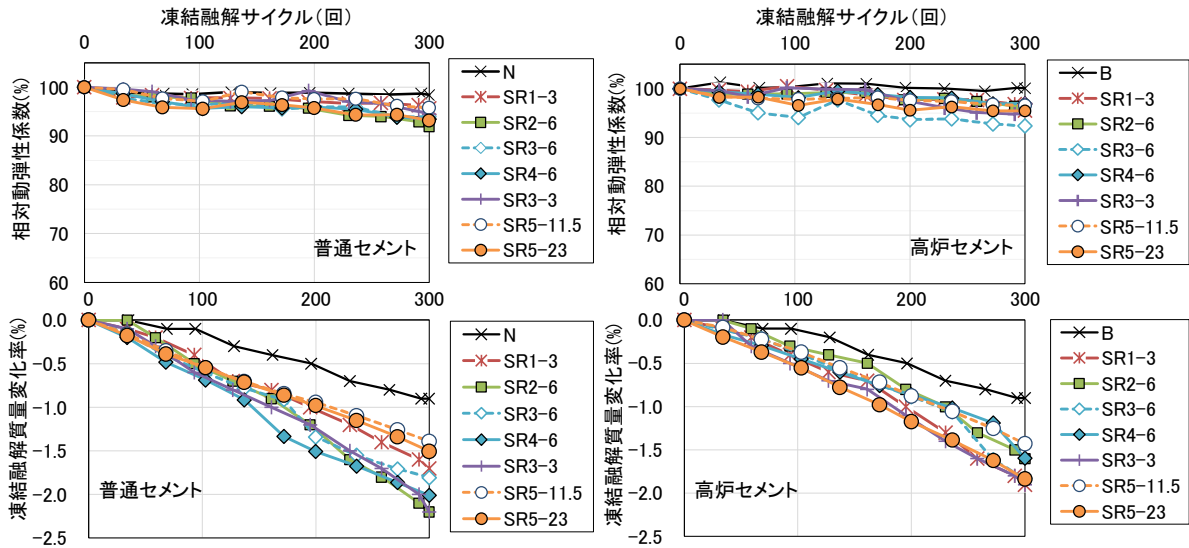


図-2.10 真水による水中凍結融解試験結果 (JIS A 1148 A 法)

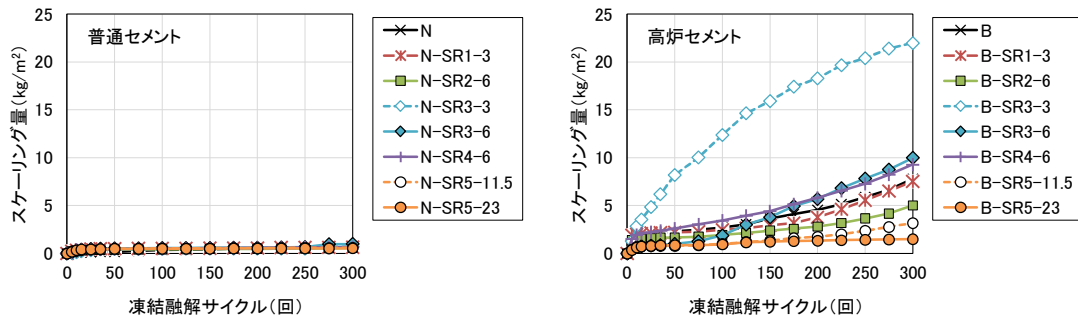


図-2.11 塩水によるスケール試験結果 (ASTM C672)

低減剤を使用した場合、スケール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 はスケール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ル量が多かったが、SR5 はスケール量が少なかった。以上から、JIS A 1148 A 法による凍結融解抵抗性を確保できた場合でも、スケール量が著しく増加する可能性があることがわかった。

2. 1. 5 各コンクリートの気泡間隔係数

図-2.12 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ル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-2.1 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、スケール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

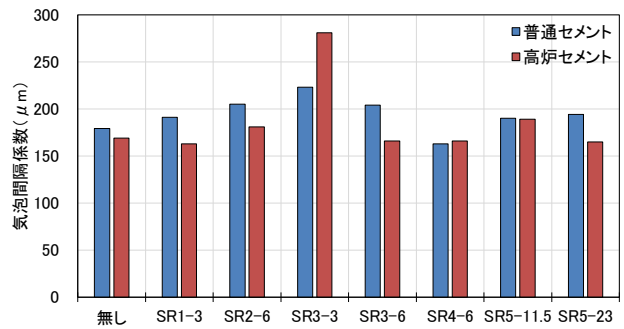


図-2.12 各コンクリートの気泡間隔係数

されているものであるが、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。

以上から、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

する必要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。

2. 2 耐凍害性確保のための空気量調整方法の検討

前節において、収縮低減剤を使用した場合でも、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た。

一方、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、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。そこで、本節では、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検討した。

2. 2. 1 空気量の調整方法に関する試験概要

前節では、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。ここでは、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。

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セメント (密度 3.16g/cm³、比表面積 3,420cm²/g) と、高炉セメント (密度 3.05g/cm³、比表面積 3,750cm²/g) を

使用した。細骨材は苫小牧樽前産の陸海砂 (密度 2.67g/cm³、吸水率 1.17%) を、粗骨材は小樽市見晴産の砕石 (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、前節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-2.2 に示す。比較するパラメータの絞り込みのため、前節と同様に水セメント比は 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。目標スランブは 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ブが 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) は前節の表-2.1 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ブと空気量も示している。

空気量の調整について、前節では、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

表-2.2 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×%	実測スランブ (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		46			867	1021	3.0	-	0.00200	-	16.5	5.8
NSR1-6		-							6.0	-	0.00250	-	15.2	5.7
NSR4-6		SR4							6.0	-	0.00125	-	12.2	5.6
NSR5-23		SR5							23.0	-	0.00175	-	10.6	5.3
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		46			863	1016	3.0	-	0.00125	-	13.2	5.2
BSR1-6		-							6.0	-	0.00200	-	7.8	4.9
BSR4-6		SR4							6.0	-	0.00250	-	8.6	6.0
BSR5-23		SR5							23.0	-	0.00125	-	9.5	4.8

※表-1から抜粋

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前節の試験結果と比較した。

2) 実験項目と供試体

本節では、空気量の調整方法の違いが強度特性や耐凍害性に及ぼす影響を把握するために、圧縮強度試験、静弾性係数測定、耐凍害性試験として前節と同様、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。また、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。各試験方法の詳細は、2. 1. 1 試験概要の 2) と同様である。

2. 2. 2 空気量の調整方法が強度特性に与える影響

図-2.13 に各コンクリートの圧縮強度を、図-2.14 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 N-t と B-t 以外の配合については、前節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-2.3 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-2.15 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も同様であり、消泡剤使用の有無による違いは特にない。

図-2.16 に各コンクリートの静弾性係数を示す。多

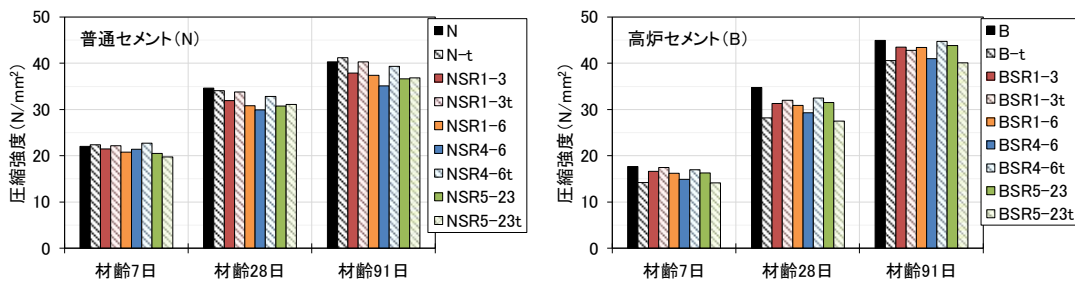


図-2.13 コンクリートの圧縮強度

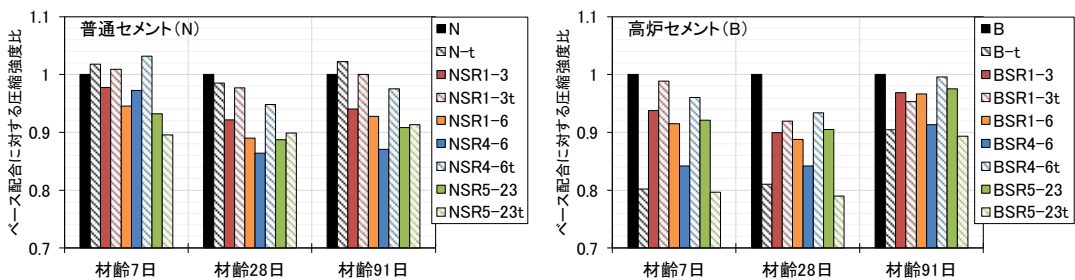


図-2.14 ベースコンクリートに対する圧縮強度比

表-2.3 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

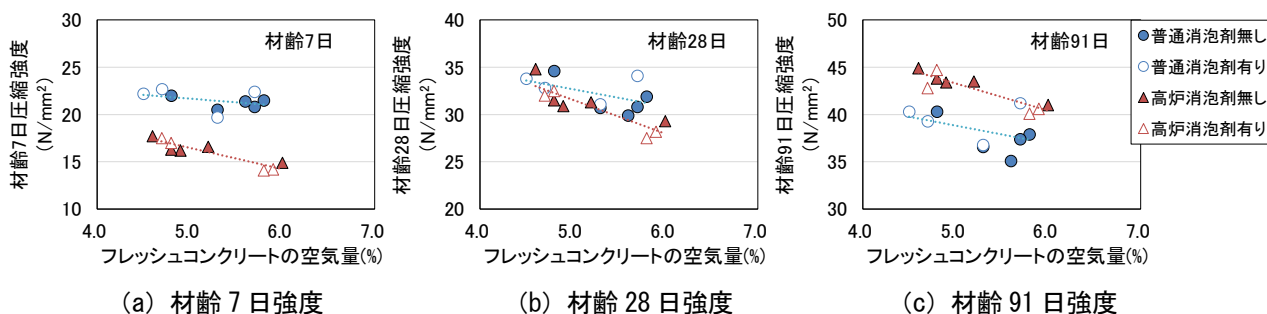


図-2.15 コンクリートの圧縮強度

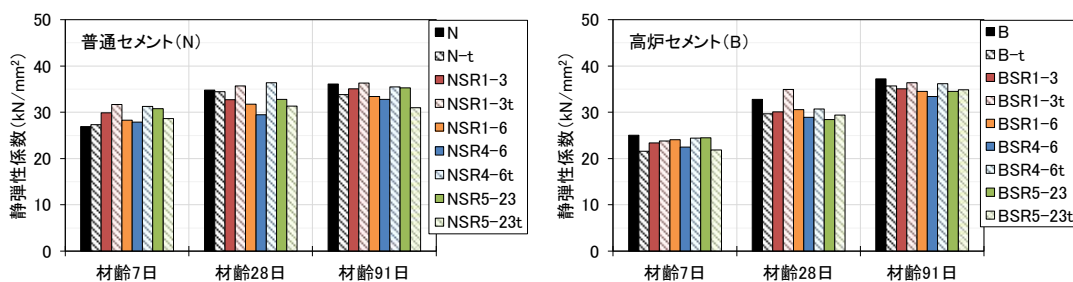


図-2.16 コンクリートの静弾性係数

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-2.17 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⁷⁾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。

2. 2. 3 空気量の調整方法が耐凍害性に与える影響

1) 水中凍結融解試験による耐凍害性の評価

図-2.18 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

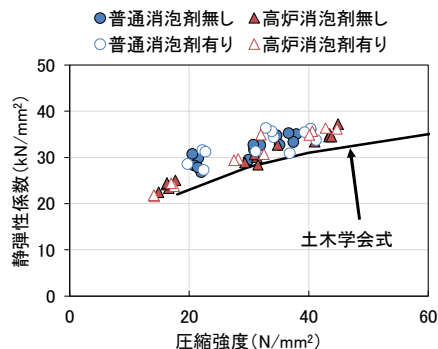


図-2.17 圧縮強度と静弾性係数の関係

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。

2) 塩水凍結融解によるスケーリング抵抗性

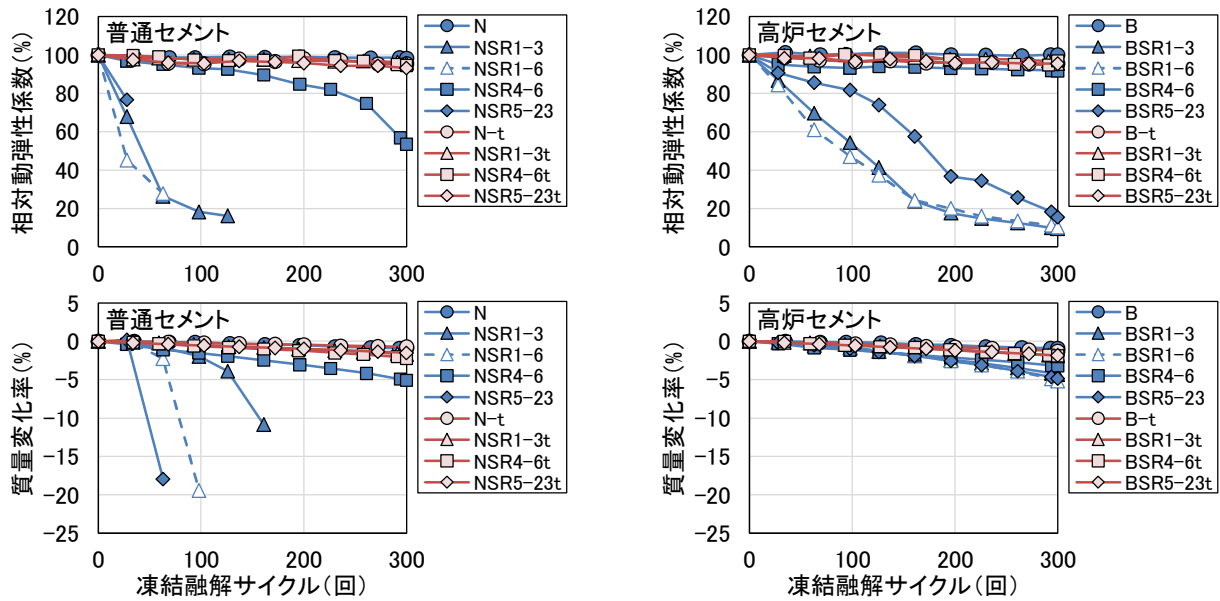


図-2.18 真水による水中凍結融解試験結果 (JIS A 1148 A 法)

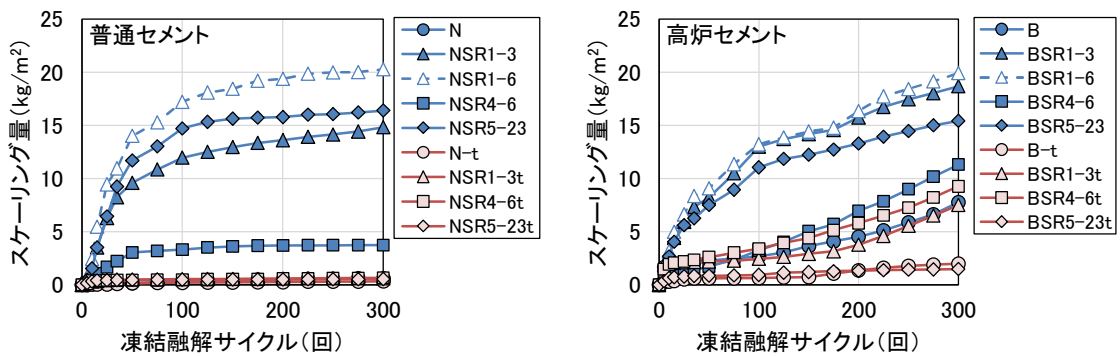


図-2.19 塩水によるスケーリング試験結果 (ASTM C672)

図-2.19 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。

2. 2. 4 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数

図-2.20 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 $200\mu\text{m}$ 以下の範囲に集中しており、ピークは気泡弦長 $50\mu\text{m}$ 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有り、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-2.21 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¹⁾。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-2.22 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%程度あつ

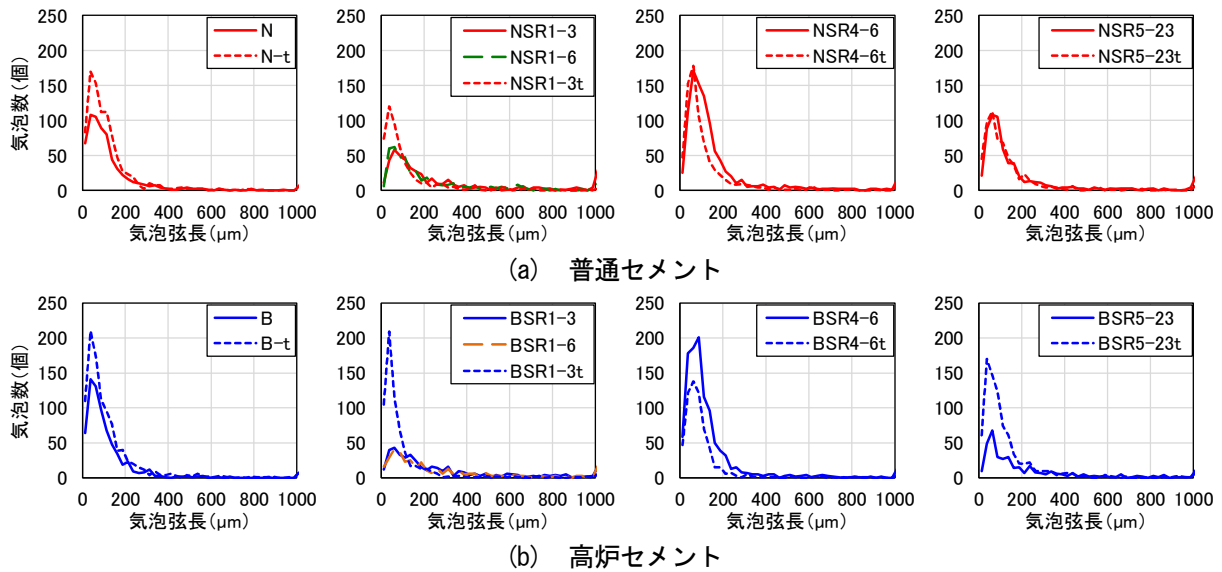


図-2.20 各コンクリートの気泡径分布

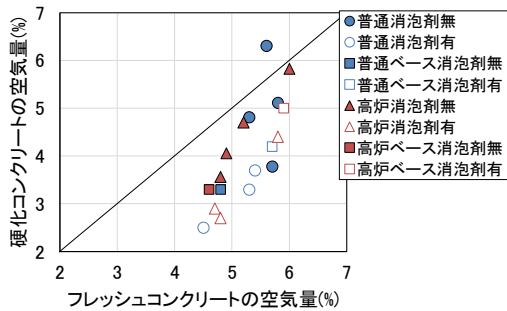


図-2.21 硬化コンクリートの空気量とフレッシュコンクリートの空気量の関係

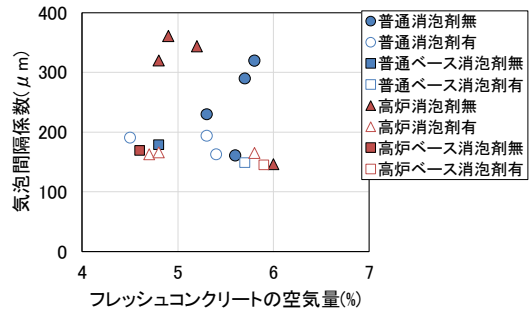


図-2.22 気泡間隔係数とフレッシュコンクリートの空気量の関係

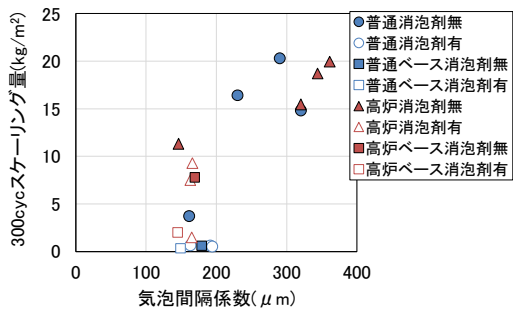


図-2.23 気泡間隔係数とスケーリング量の関係 (ASTM C672 300 サイクル後)

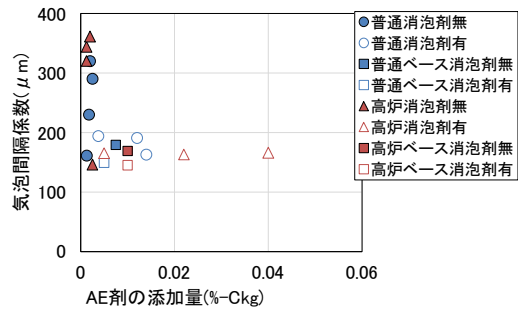


図-2.24 気泡間隔係数と AE 剤添加量の関係

で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 $200\ \mu\text{m}$ 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-2.23 に気泡間隔係数と凍結融解 300 サイクル後のスケーリング量の関係を示す。気泡間隔係数が 200

μm 以下ではスケーリング量が減少しており、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-2.24 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て済むが、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-22 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。

2. 2. 5 適切な空気量確保のための調整方法

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て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、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。

2. 3 収縮低減型混和剤の収縮低減効果と耐凍害性

前節では、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を行い、コンクリートの耐凍害性を確保しながら収縮低減が可能なことを示してきた。

他方、コンクリート用化学混和剤の JIS 規格を満たした収縮低減型の高機能 AE 減水剤や高性能 AE 減水剤（以下、収縮低減型混和剤）があり、寒冷地における使用実績も確認されている。これら収縮低減型混和剤に含まれる収縮低減成分は、前節で検討してきた従来型の収縮低減剤と同様の効果があるが、標準的な使用量の範囲内では、収縮低減成分の量が収縮低減剤に比べると少なく、乾燥収縮抑制効果や耐凍害性への影響について不明な点が多い。

そこで本節では、収縮低減型混和剤を用いたコンク

リートの乾燥収縮抑制効果と耐凍害性を確認し、寒冷地で用いるための留意事項を整理した。

2. 3. 1 収縮低減型高機能 AE 減水剤の試験概要

1) 使用材料および配合

高機能 AE 減水剤は、ポリカルボン酸エーテル系化合物とポリグリコール誘導体の複合体成分からなるもの（記号 a）と、変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸コポリマーとポリエーテル誘導体の複合体成分からなるもの（記号 b）、ポリカルボン酸系化合物とグリコールエーテル系誘導体成分からなるもの（記号 c）の 3 種類を用いた。なお、高機能 AE 減水剤は 3 種類全てに消泡剤を含有している。比較として用いた収縮低減剤は、前節で検討したものの中から、従来型アルコール系の主成分がポリエーテル誘導体のもの（記号 SR）1 種類を用いた。

セメントは、普通セメント（密度 3.16 g/cm^3 、比表面積 $3,280 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）と、高炉セメント（密度 3.05 g/cm^3 、比表面積 $3,910 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）を用いた。細骨材は苫小牧樽前産の陸砂（密度 2.67 g/cm^3 、吸水率 1.41% ）を、粗骨材は小樽市見晴産の碎石（密度 2.68 g/cm^3 、吸水率 1.77% 、粗骨材最大寸法 20 mm ）を使用した。

コンクリートの配合を表-2.4 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 155 kg/m^3 に統一した。目標空気量は $4.5 \pm 1.0\%$ 、目標スランプは $12.0 \pm 2.5 \text{ cm}$ とした。表には実測のスランプと空気量も示している。

高機能 AE 減水剤の添加量は、単位水量を一定としたため、目標スランプ値の範囲内に収まる添加量で調整した結果、標準添加量範囲のほぼ下限の添加量となった。収縮低減剤の添加量については、前節で検討した 3 kg/m^3 に加え添加量を高めた 8.5 kg/m^3 （単位セメント量 $C \times 3\%$ ）の 2 水準とした。なお、ベース配合と収縮低減剤を用いた配合では、標準型の AE 減水剤（リグニンスルホン酸塩系、記号 n）を適宜用いた。

空気量は、消泡剤を含む高機能 AE 減水剤を用いた配合とベース配合は AE 剤（変性ロジン酸化合物系）を用いて調整した。なお、収縮低減剤を用いた配合では、空気量を適切に確保する観点から、収縮低減剤と同一メーカーの AE 剤（特殊界面活性剤系）と消泡剤（ポリエーテル系）を併用して調整した。

2) 実験項目と供試体

高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートの強度や収縮特性、および耐凍害性に及ぼす影響を把握するために、圧縮強度試験（材齢 7、28、91 日）、静弾性係数測定（圧縮強度試験と同材齢）、乾燥収縮試験（乾燥開始

表-2.4 コンクリートの配合

配合記号	セメントの種類	AE減水剤の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤(C×%)	AE剤の種類	AE剤(C×%)	消泡剤(C×%)	実測スランブ(cm)	実測空気量(%)
					水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G						
N	N	n	55	45	155	282	848	1046	—	N	0.00200	—	12.5	4.7
N-a		a							—	N	0.00175	※	14.0	4.5
N-SR3.0		n							3.0	D	0.00500	0.0020	8.6	4.6
N-SR8.5		n							8.5	D	0.00600	0.0020	9.5	4.5
B		n							—	N	0.00500	—	13.5	5.1
B-a	a	—	N	0.00225	※	11.2	4.0							
B-b	b	—	N	0.00225	※	13.6	4.6							
B-c	c	—	N	0.00450	※	11.5	4.9							
B-SR3.0	n	3.0	D	0.00700	0.0020	11.5	4.8							
B-SR8.5	n	8.5	D	0.00600	0.0020	11.0	4.0							

※AE減水剤に消泡剤を含んでいる

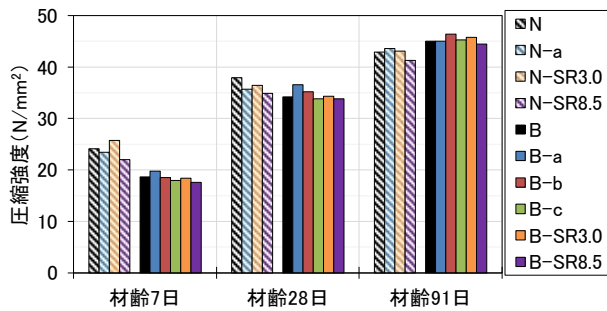


図-2.25 各コンクリートの圧縮強度

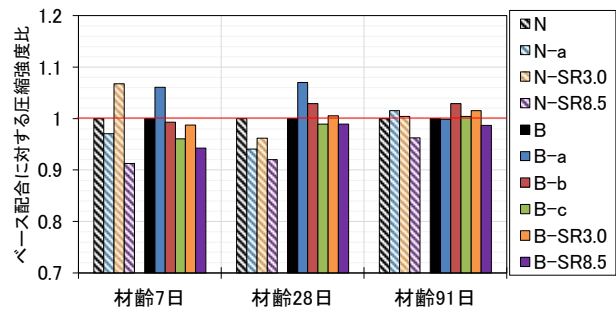


図-2.26 ベース配合に対する圧縮強度比

後 7、14、28、56、91、182 日で測定)、拘束ひび割れ試験、耐凍害性試験として 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、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それぞれ行った。なお、各試験方法の詳細は、2. 1. 1 試験概要 2)と同様である。

2. 3. 2 収縮低減型高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートの強度特性

図-2.25 に各コンクリートの圧縮強度を、図-2.26 にベース配合に対する圧縮強度比を示す。なお、凡例の記号は、表-2.4 の配合記号と対応している。

各コンクリートの圧縮強度は、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、材齢 91 日で逆転した。

普通セメントでは、高機能 AE 減水剤を用いた N-a の圧縮強度はベース配合 N や収縮低減剤を用いた N-SR3.0 より低かったが、材齢 91 日で若干上回った。収縮低減剤を用いた N-SR3.0 の圧縮強度は材齢 28 日でベース配合より低かったが、材齢 7 日と 91 日では上回った。一方、収縮低減剤の添加量が多い N-SR8.5 はいずれの材齢においても最も強度が低かった。

高炉セメントでは、高機能 AE 減水剤を用いた場合、

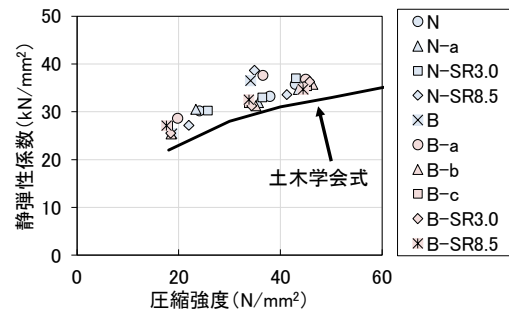


図-2.27 圧縮強度と静弾性係数の関係

B-a の圧縮強度はいずれの材齢においてもベース配合とほぼ同程度以上だったが、B-b は材齢 7 日、B-c は材齢 28 日までの強度がベース配合より低かった。収縮低減剤を用いた B-SR3.0 の圧縮強度は材齢 28 日以降ベース配合を上回り、B-SR8.5 は普通セメントと同様、いずれの材齢においても最も強度が低かった。

以上から、高機能 AE 減水剤を用いた場合、材齢 28 日までの圧縮強度はベース配合より低くなる場合があるが、その低下割合は最大でも 6 %程度であり、材齢 91 日ではベース配合と同等以上となることを確認した。また、収縮低減剤を用いた場合には、添加量が多くなると、前節で示した傾向と同様、ベース配合の強度を下回る可能性があることを確認した。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2.27 に示す。圧

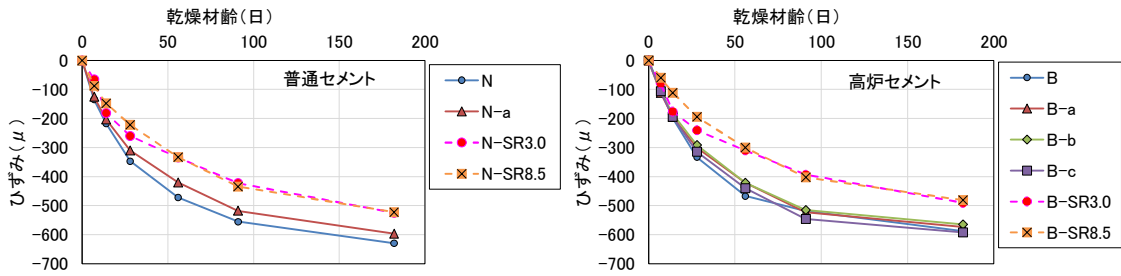


図-2.28 乾燥期間とひずみの関係

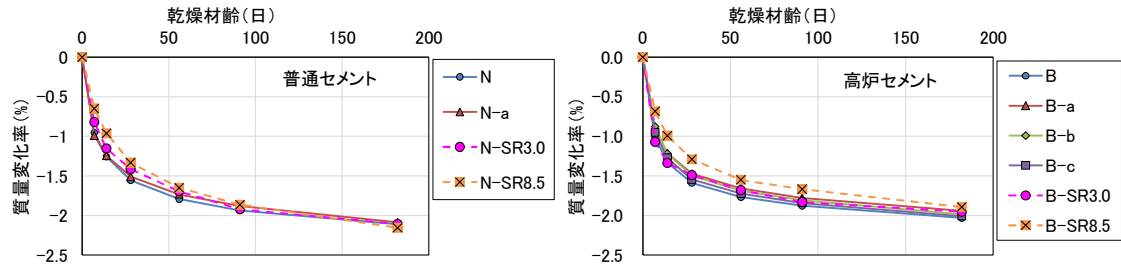


図-2.29 乾燥期間と質量変化率の関係

縮強度と静弾性係数の関係は、いずれも土木学会式より算出した値よりも上側にあり、高機能 AE 減水剤と収縮低減剤を添加したコンクリートは、通常的设计と同様に扱えることを確認した。

2. 3. 3 収縮低減型高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートの収縮特性

1) 乾燥収縮特性

図-2.28 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。高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートは、ベース配合よりいずれのセメントでも特に乾燥 8 週程度までは収縮量が抑制される傾向があるものの最大でも 50 μm 程度とその差は小さく、高炉セメントはそれ以降ベース配合とほぼ同程度となった。一方、収縮低減剤を用いたコンクリートは、ベース配合に比べ約 100 μm 以上ひずみが抑制された。添加量が多い SR8.5 は初期の乾燥収縮量がより抑制されていたが、乾燥材齢 50 日以降は SR3.0 とほぼ同程度だった。

高機能 AE 減水剤を用いた場合の収縮抑制効果が小さいことについて、本研究では、全配合で単位水量を一定として目標スランプが得られる範囲内で添加量を調整したため、実際の添加量はメーカー標準添加量範囲の下限值程度となり添加量が少なかったことに加え、ベース配合自体の乾燥収縮量も大きくないため、効果が明確にならなかったことが考えられる。一方、収縮低減剤の場合、高機能 AE 減水剤よりも収縮低減成分の量が多いため収縮抑制効果が高かったと考えられる。

なお、収縮低減剤の添加量を増加しても収縮抑制効果が小さかったのは、単位セメント量が比較的少ないため、効果が頭打ちになっていることが推察される。

図-2.29 に乾燥期間と質量変化率の関係を示す。高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートの質量変化率は、ベース配合と同程度であり、質量減少率当たりの乾燥収縮量はベース配合と同程度だった。一方、収縮低減剤を用いた場合も他の配合との質量変化率の差は最大でも 0.3 %程度と小さいことから、収縮低減剤を用いたコンクリートは質量減少率当たりの収縮量が小さいことを確認した。

以上から、本研究では配合条件の制約から高機能 AE 減水剤の添加量が少なく、高機能 AE 減水剤の収縮抑制効果は小さかった。また、収縮低減剤による収縮抑制効果を確認できたが、単位セメント量が少ない配合では添加量を増加しても効果が頭打ちになる可能性が示唆された。

2) 乾燥収縮によるひび割れ抵抗性

図-2.30 に鉄筋拘束試験における拘束ひずみの経時変化を示す。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。

高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートは、3 供試体中 1 供試体のみひび割れ発生日数が長いものもみられるが、全体としてひび割れが生じた日数はベース配

合と差がなかった。ひび割れ抑制効果が発揮されなかった理由として、図-2.28 の考察で述べたように高機能 AE 減水剤の添加量が少ないことに起因してベース配合に対する乾燥収縮量の差が小さく、鉄筋比が大きい拘束ひび割れ試験では、ひび割れ発生日数に差が生じなかったことが考えられる。他方、収縮低減剤を添加した供試体では、ベース配合と比べて、ひび割れ発生までの日数が延びた。また、添加量の多い SR8.5 は SR-3.0 と乾燥収縮量は同程度だったもののひび割れ発生日数は長くなる傾向があった。

以上から、本研究では高機能 AE 減水剤の添加量が少ないことに起因し、ひび割れ抑制効果は明確にならなかったが、収縮低減成分が多い収縮低減剤を用いた場合には、ひび割れ抑制効果を確認することができた。なお、ひび割れ抑制効果を定量的に評価するには、ひび割れ発生時の応力とコンクリートの強度、弾性係数を併せ詳細な検証を行う必要がある。

2. 3. 4 収縮低減型高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートの耐凍害性

1) 水中凍結融解試験による耐凍害性

図-2.31 に真水による水中凍結融解試験結果を示す。高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートの試験終了時（凍結融解 300 サイクル）の相対動弾性係数は、N-a は 56%、B-a は 72%、B-b は 48%、B-c は 86%となり、減水剤の種類によって差はあるものの、いずれのセメントにおいてもベース配合より低かった。また、質量変化率も概ね同様の傾向だった。相対動弾性係数の低下が大きい B-a や B-b は、表-2.4 に示したように実測空気量がベース配合より少なく、B-c は同程度だった。このため、前節と同様、収縮低減成分を含んでも微細な空気量が適量確保されていれば、耐凍害性は確保できる可能性がある。

一方、収縮低減剤を用いた場合、添加量が少ない SR3.0 は、試験終了時の相対動弾性係数がベース配合と同程度となり高い耐凍害性を示したが、SR8.5 はベース配合や SR3.0 と比較して相対動弾性係数が低下しており、収縮低減剤の添加量が増加した場合、耐凍害性が低下する可能性を確認した。なお、耐凍害性については前節で示したように硬化コンクリートの空気量と合わせて考察する必要がある。

2) 塩水凍結融解によるスケーリング抵抗性

図-2.32 に塩水によるスケーリング試験結果を示す。高機能 AE 減水剤を用いたコンクリートは、普通セメントではベース配合と同程度で少なかったが、高炉セメントではいずれもベース配合よりスケーリング

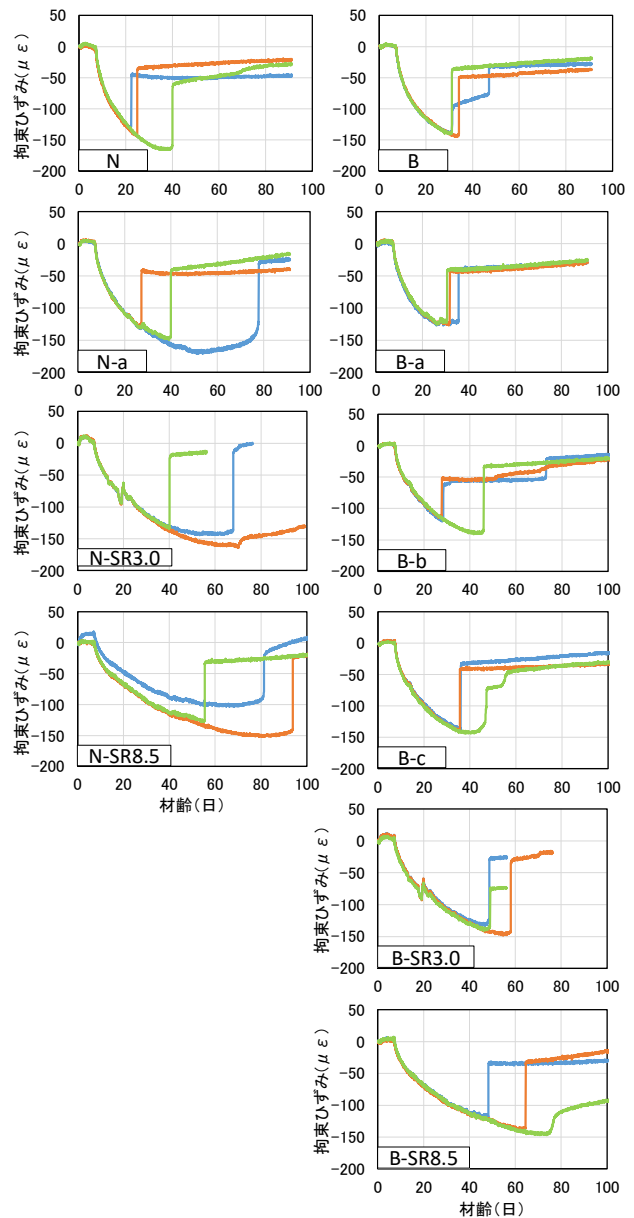


図-2.30 拘束ひずみの経時変化

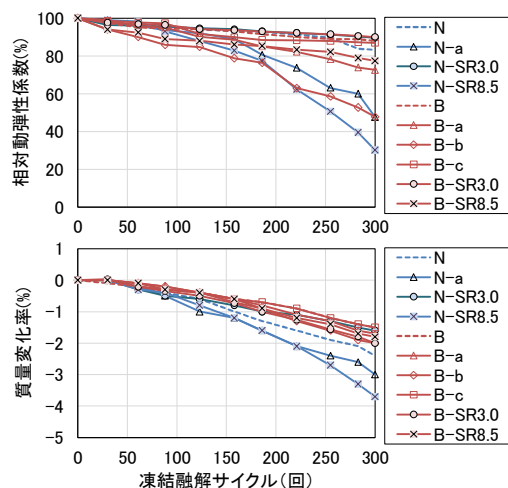


図-2.31 水中凍結融解試験結果

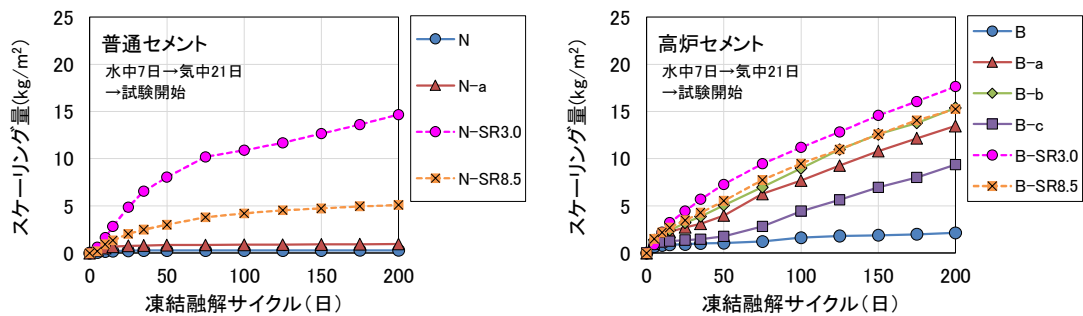


図-2.32 スケーリング試験結果

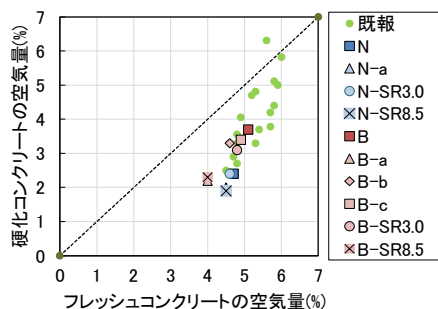


図-2.33 硬化コンクリートの空気量とフレッシュコンクリートの空気量の関係

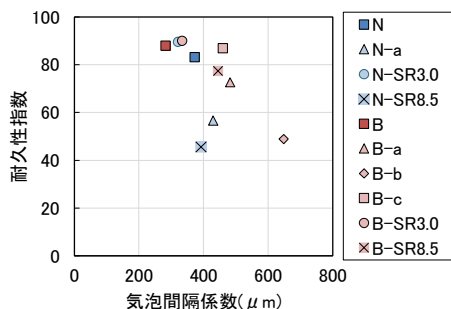


図-2.34 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

量が多くなった。ただし、B-c は他の高機能 AE 減水剤よりもスケーリング量が少なく、図-2.32 に示した水中凍結融解試験でも B-c の劣化は B-a や B-b より小さかった。表-2.4 に示したように、B-c の実測空気量は比較的多いことから、気泡が耐凍害性に影響していることが考えられる。

一方、収縮低減剤を用いたコンクリートは、いずれのセメントにおいてもスケーリング量が多かった。また、添加量が少ない SR3.0 の方が SR8.5 よりスケーリング量は多く、図-2.31 に示した真水による水中凍結融解試験結果と逆の傾向を示した。SR3.0 の実測空気量は比較的多めであり、硬化コンクリートに含まれる微細な空気量だけでなく細孔構造が影響していることが考えられる。

以上から、収縮低減型高機能 AE 減水剤を用いた場合、耐凍害性が低下する場合があることを確認した。なお、耐凍害性については、微細な気泡の量が影響していると考えられ、硬化コンクリートの空気量と合わせて考察する必要がある。

3) 硬化コンクリートの空気量と耐凍害性

図-2.33 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。なお、凡例の既報とは図-2.21 に示したベース配合を含む収縮低減剤を用いたコンク

リートのデータであり図に併記している。硬化コンクリートの空気量はフレッシュコンクリートの空気量よりも 1~2% 程度減少しており、既往の結果と同様の傾向であることを確認した。

図-2.34 に耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示す。気泡間隔係数が小さくなると耐久性指数は高くなる傾向が概ねみられ、微細な空気量が耐凍害性の確保に重要なことがわかる。

図-2.35 に凍結融解 200 サイクル後のスケーリング量と気泡間隔係数の関係を示す。なお、凡例の既報とは図-2.23 に示したデータのスケールリング量を 200 サイクル時点のものに変更したものである。気泡間隔係数が小さくなるとスケーリング量が減少する傾向が概ねみられ、耐久性指数と同様に微細な空気量がスケールリング抵抗性の確保に重要なことを確認した。なお、SR-3.0 は気泡間隔係数が比較的小さいが、スケーリング量は多くなっており、気泡間隔係数だけでは説明することができないため、細孔構造等の影響を受けていることが考えられる。他方、本試験結果と既報データの気泡間隔係数の絶対値が大きく異なっていた。これについては、使用した測定機器が変わったことが影響している可能性があり、別途検討の必要性がある。

図-2.36 に気泡間隔係数と AE 剤の添加量の関係を図-2.24 の試験データ (凡例の既報) とともに示す。

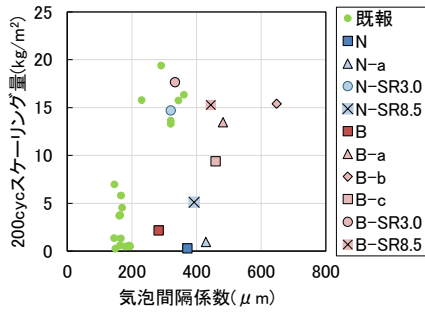


図-2.35 スケーリング量と気泡間隔係数の関係

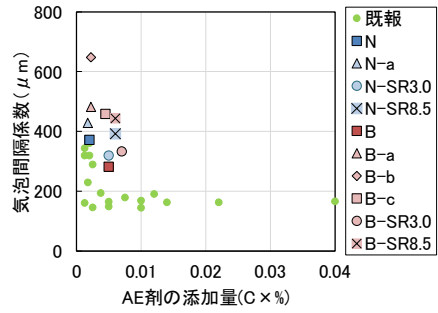


図-2.36 気泡間隔係数と AE 剤添加量の関係

表-2.5 収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの配合

配合記号	セメント	高性能AE減水剤の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					高性能AE減水剤添加量 (C%)	AE剤の種類	AE剤 (C%)	消泡剤 (C%)	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)							
					W	C	S	G	SR														
N	普通	n	45	43	155	344	790	1056	—	0.90	N	0.00210	—	19.0	—	4.6							
N-sa		sa							—								1.50	N	0.00170	※	21.4	48.0	4.3
N-SR		n							3.0								0.90	D	0.00130	0.0005	18.1	—	4.5

※高性能AE 減水剤に消泡剤を含んでいる

上述のように気泡間隔係数の絶対値が既報データと比べて大きい場合、統一的に評価することは難しい。しかし、本試験においても AE 剤の添加量が少ない場合には、気泡間隔係数が大きくなる危険性は高まる傾向があった。したがって、良質な空気量を確保するには、一定量以上の AE 剤の添加量を確保する必要があると考えられる。

以上から、高性能 AE 減水剤を用いた場合、材齢 28 日までの強度が通常のコンクリートより低下する可能性があるが、その低下率は 6%以下と小さいことを確認した。また、高性能 AE 減水剤の添加量が少ないと乾燥収縮とひび割れに対する抑制効果は小さくなるため、配合や想定する収縮抑制量を考慮して適切な添加量となるように事前に試験で確認して、混和剤のタイプや添加量を定める必要がある。なお、高性能 AE 減水剤の使用により耐凍害性が低下する可能性があるため、収縮低減剤と同様に微細な気泡を適量確保する必要がある。そのためには、消泡剤があらかじめ添加されている場合は目標空気量の設定を高くしたり、消泡剤無添加の場合は、消泡剤と AE 剤を併用して AE 剤添加量を確保することが重要である。

2. 3. 5 収縮低減型高性能 AE 減水剤の試験概要

1) 使用材料および配合

収縮低減型の高性能 AE 減水剤は、ポリカルボン酸エーテル系化合物とポリグリコール誘導体からなるもの (記号 sa) を用いた。比較として、高性能 AE 減水剤の検討でも用いた従来型アルコール系の主成分がポリエーテル誘導体の収縮低減剤 (記号 SR) を用いた。

なお、ベース配合と収縮低減剤を用いた配合では、標準型の高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物, 記号 n) を用いた。

コンクリートの配合を表-2.5 に示す。橋梁上部工への適用を想定し、セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm³, 比表面積 3,340 cm²/g) を用い、水セメント比は 45%として、単位水量は全配合統一した。高性能 AE 減水剤の添加量は、メーカー推奨の標準添加量とし、比較として用いた収縮低減剤の添加量は 3 kg/m³とした。結果として、配合 N と N-SR のスランブは 18cm 程度、N-sa はスランブフロー 48cm の中流動となった。目標空気量は 4.5%とし、空気量の調整は、N と N-sa は同じ AE 剤 (変性ロジン酸化合物系, 記号 N) を用い、収縮低減剤は、メーカー推奨の消泡剤 (ポリエーテル系) と AE 剤 (特殊界面活性剤系, 記号 D) を併用した。なお、細骨材は苫小牧樽前産の陸砂 (密度 2.65 g/cm³, 吸水率 1.41%) を、粗骨材は小樽市見晴産の砕石 (密度 2.68 g/cm³, 吸水率 1.77%, 粗骨材最大寸法 20 mm) を用いた。

2) 実験項目と供試体

高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの強度や収縮特性 (ひび割れ抵抗性)、および耐凍害性に及ぼす影響を把握するために、圧縮強度試験 (材齢 7、28、91 日)、静弾性係数測定 (圧縮強度試験と同材齢)、乾燥収縮試験 (乾燥開始後 7、14、28、56、91 日で測定)、拘束ひび割れ試験、耐凍害性試験として 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それぞれ行った。なお、各試験方法

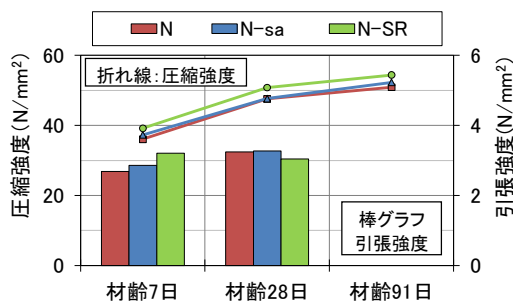


図-2.37 各コンクリートの圧縮強度と引張強度化

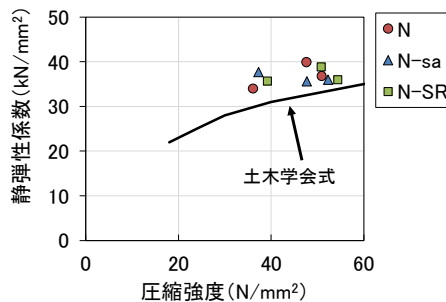


図-2.38 圧縮強度と静弾性係数の関係

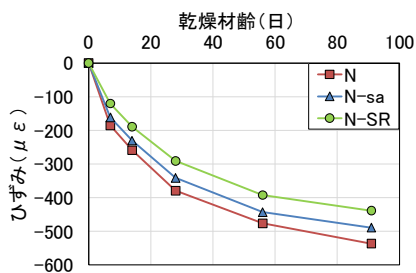


図-2.39 乾燥材齢と収縮ひずみの関係

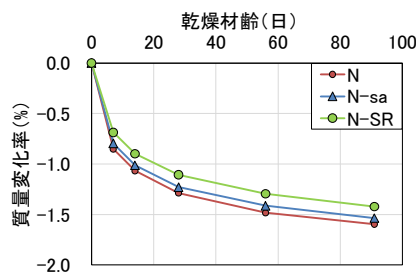


図-2.40 乾燥材齢と質量変化率の関係

の詳細は、2. 1. 1 試験概要 2)と同様である。また、ここではひび割れ抵抗性の評価の一環として、ひび割れ発生時の拘束応力とコンクリートの引張強度の関係を簡易的に把握するために、JIS A 1113 に準じた割裂引張強度試験をφ10×20cm 供試体を用いて材齢 7、28 日で実施した。

2. 3. 6 収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの強度特性

図-2.37 に各コンクリートの圧縮強度と引張強度を示す。なお、凡例の記号は表-2.5 の配合記号と対応している。圧縮強度は、いずれも材齢の経過に伴い増加し、収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いた N-sa はベース配合 N と同程度、収縮低減剤を用いた N-SR はいずれの材齢においても N と N-sa を上回った。引張強度は材齢 7 日では N-sa、N-SR とともにベース N を上回り、材齢 28 日ではいずれも強度の増加は小さく、N と N-sa は同程度だったが、N-SR については原因は不明だが 3 供試体の強度がばらつき、結果としてその平均値は材齢 7 日強度を下回った。

図-2.38 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。いずれも土木学会式の値を上回っており、土木学会式⁷⁾により安全側で設計可能なことを確認した。

2. 3. 7 収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの収縮特性

1) 乾燥収縮特性

図-2.39 に乾燥材齢とひずみの関係を示す。収縮低

減型高性能 AE 減水剤を用いた N-sa は、ベース N に比べ 50 μm 程度とその差は小さいものの収縮ひずみは抑制された。また、収縮低減剤を用いた N-SR はさらにひずみが抑制され、ベース N よりも 100 μm 程度ひずみは小さかった。収縮低減剤は収縮低減型高性能 AE 減水剤よりも収縮低減成分が多いため、収縮抑制効果が高かったと考えられる。

図-2.40 に乾燥材齢と質量変化率の関係を示す。収縮ひずみが抑制された配合ほど質量減少率は小さく、質量減少率当たりの収縮ひずみ量はいずれも同程度であり、質量変化が抑制されたことが収縮ひずみの抑制に寄与したと考えられる。

2) 乾燥収縮によるひび割れ抵抗性

図-2.41 に鉄筋拘束試験における拘束ひずみの経時変化を示す。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。乾燥収縮ひずみが小さかった N-SR はひび割れ発生日数が N より長く、ひび割れ抑制効果を確認できたが、N-sa は乾燥収縮ひずみが N より小さかったものの、N より早期にひび割れが生じるケースが確認された。このため、鉄筋拘束供試体の鉄筋のひずみから拘束応力を算出し、ひび割れ発生時の応力を確認した。各供試体の拘束応力は式-1 で算出⁹⁾した。

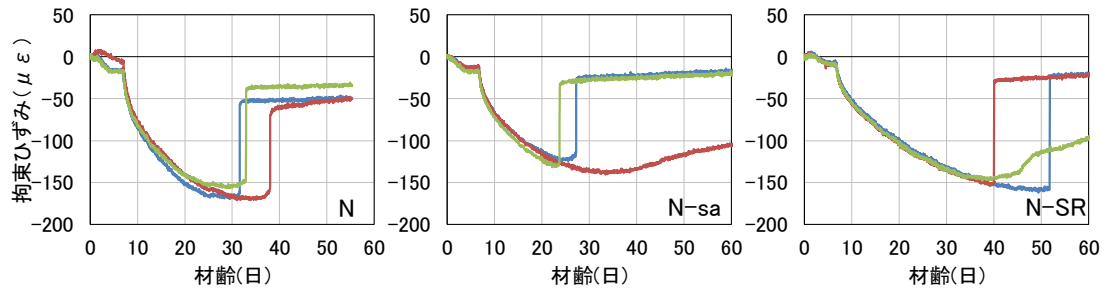


図-2.41 鉄筋拘束試験における拘束ひずみの経時変化

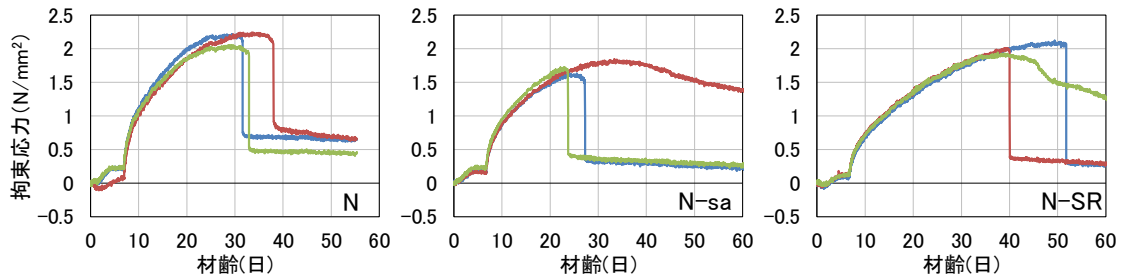


図-2.42 鉄筋拘束試験における拘束応力の経時変化

$$\sigma_c = (E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (\text{式-1})$$

ここに、 σ_c : コンクリートの拘束応力(N/mm²)、 E_s : 鋼材の弾性係数(N/mm²)、 ε_s : 鋼材のひずみ、 A_s : 鋼材中央の断面積(mm²)、 A_c : コンクリートの純断面積(mm²)

図-2.42 に拘束応力と材齢の関係を示す。拘束応力の急激な低下はひび割れの発生を意味しているが、収縮低減型混和剤を用いたコンクリートのひび割れ発生時の応力はベース配合 N よりも低く、特に収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いた N-sa はひび割れ発生時の応力が低かった。

コンクリートに生じるひび割れは、コンクリートの収縮が鉄筋等により拘束された際に生じる拘束応力がコンクリートの引張強度を上回った時に生じると考えられるが、乾燥収縮を対象とした一軸拘束ひび割れ試験による既往の研究において、ひび割れ発生時の拘束応力は引張強度の 60~70%とする報告もある^{9,10)}。本研究では、ひび割れ発生時の引張強度を測定していないため、参考として水中養生材齢 7、28 日における引張強度に対する拘束応力の最大値の割合を調べた。

図-2.43 に材齢 7 日と 28 日の引張強度に対する最大拘束応力の割合を示す。材齢 7 日強度は拘束ひび割れ試験における乾燥開始時の強度、材齢 28 日強度は養生条件が異なるものの N や N-sa でひび割れが生じた材齢に近いが、N と N-SR は概ね引張強度の 60-70%程度でひび割れが生じており、既往の研究と同様の範囲

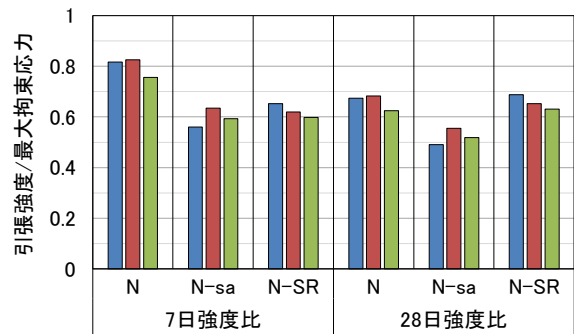


図-2.43 引張強度に対する最大拘束応力の割合

内だったが、N-sa は引張強度の 50-60%程度と他の配合よりも低い応力比でひび割れが生じていた。図-2.38 に示したように、圧縮挙動時ではあるが収縮低減型混和剤を用いたコンクリートの弾性係数がベース配合と大きく異なる傾向はないため、比較的小さい応力比でひび割れが生じた原因については本研究の範囲内では特定できなかった。しかし、図-2.9 や図-2.30 で示した拘束ひずみの経時変化をみれば、収縮低減型混和剤を用いた場合ひび割れ発生時の最大ひずみがベース配合より小さい傾向があり、このことから収縮低減型混和剤を用いたコンクリートは比較的低い応力比でひび割れが発生する可能性があることが推察できる。このため、収縮低減型混和剤を用いてひび割れ抑制効果を高めるには、収縮低減剤を用いたコンクリートの試験結果から判断して、乾燥収縮ひずみを 100 μ 以上抑

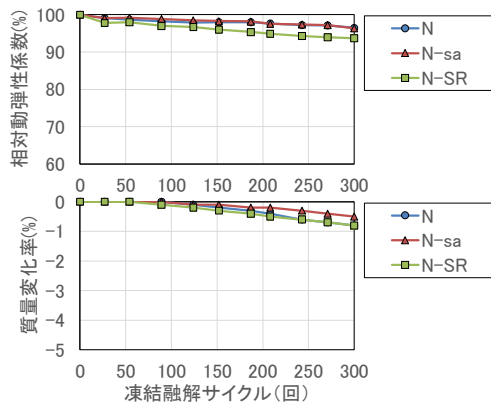


図-2.44 水中凍結融解試験結果

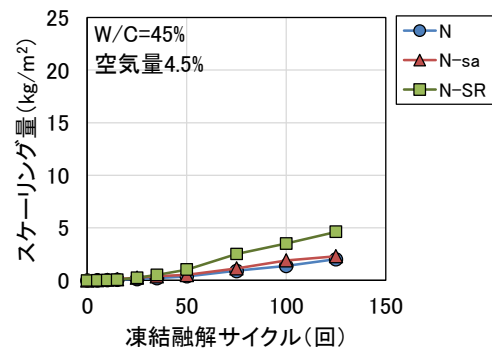


図-2.45 スケーリング試験結果

制する必要があると考えられる。

2. 3. 8 収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの耐凍害性

1) 水中凍結融解試験による耐凍害性

図-2.44 に真水による水中凍結融解試験結果を示す。いずれの配合も凍結融解 300 サイクル終了時の相対動弾性係数は 90%以上で、収縮低減型混和剤を用いたものは質量変化率もベース配合と同程度以下だった。一般的に高性能 AE 減水剤は水セメント比が低く比較的強度が高いコンクリートに用いられるため、収縮低減型混和剤を用いた場合でも水セメント比が 45%程度であれば空気量 4.5%で高い耐凍害性を確保できることを確認した。

2) 塩水凍結融解によるスケーリング抵抗性

図-2.45 に塩水によるスケーリング試験結果を示す。収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いた N-sa のスケーリング量は、ベース配合と同程度で少なかった。収縮低減剤を用いたコンクリートは他の配合よりもスケーリング量が多くなったが、図-2.32 に示した水セメント比 55%と比べるとスケーリング量は大きく減少した。このことから、水中凍結融解試験と同様、水セメント比 45%程度であれば空気量 4.5%でスケーリング抵抗性も確保できることを確認した。

以上から、収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いた場合、水セメント比 45%程度で比較的強度が高いコンクリートであれば、空気量 4.5%で耐凍害性は確保できることを確認した。なお、砕砂の使用等により単位水量の増加が見込まれるコンクリートでは、水セメント比 50%前後でも高性能 AE 減水剤を用いる場合がある。この様な場合、空気量 4.5%では高い耐凍害性が確保できない可能性もあるため、耐凍害性について事前に確認するとともに、2. 3. 4 で示した対策について検討する必要がある。

3. 混和材によるコンクリートの自己修復性の検討

3. 1 高炉スラグ微粉末によるひび割れの自己修復性

冒頭で述べたように、未反応セメント系材料の再水和や、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材の水和反応の遅延性を利用してひび割れを自動的に閉塞させる自己修復コンクリートに関する研究が行われている^{2,3)}。本研究では、その使用が耐久性向上や環境負荷の低減にも寄与する混和材に着眼し、混和材によるひび割れの自己修復性について検討を行った。

ひび割れの自己修復性として、高炉スラグ微粉末による自己充填の可能性について検討を行った。高炉スラグ微粉末は比表面積が大きいと反応速度が早く、ひび割れが生じた後の自己修復性を考慮すると比表面積は小さい方が回復効果は高いことが報告されている³⁾。そこで、本研究では、2013年に JIS 化された比表面積 3000cm²/g の高炉スラグ微粉末を用いてひび割れの自己修復性を検討した。

3. 1. 1 使用材料と配合

ベースとなるセメントは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）と記述）とした。混和材として、高炉スラグ微粉末（密度 2.92g/cm³、比表面積 3,110cm²/g、活性度指数 82%（材齢 28 日）、112%（材齢 91 日）、以下、スラグ（記号 BS）と記述）を使用し、置換率はセメント内割で 50%とした。細骨材は苫小牧樽前産の陸砂（密度 2.70g/cm³、吸水率 0.90%）、粗骨材は小樽市見晴産の砕石（密度 2.68g/cm³、吸水率 1.65%、粗骨材最大寸法 25mm）を用いた。また、自己修復に関する研究としてフライアッシュを用いた事例も多いため、本研究では汎用性の観点からフライアッシュセメント B 種（密度 2.96g/cm³、比表面積 3,380cm²/g、以下、フライアッシュセメントと記述）を用いたケースについて

表-3.1 自己修復コンクリートの配合

記号	セメントの種類	高炉スラグ 微粉末 置換率 (%)	水結合 材比 B/W (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 B×%	AE 助剤 B×%	実測 スランプ ^o (cm)	実測 空気量 (%)
					水	結合材(B)		細骨材 S	粗骨材 G				
						W	セメント C						
N55A45	普通ポルトランド	-	55	45	155	282	-	864	1047	-	0.0075	9.1	4.5
N55A45s5		50				141	141	864	1047	0.07	0.0075	10.5	4.5
F55A45	フライアッシュB種	-				282	-	857	1039	-	0.0250	11.5	4.6

も比較した。

表-3.1に配合を示す。水結合材比は55%の1水準として、単位水量を155kg/m³に固定した。目標スランプは8から12cmを目安とし、目標空気量は4.5±1.0%として、AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)とAE助剤(変性ロジン酸化合物系)を適宜用いてそれぞれ調整した。なお、表-3.1には実測のスランプと空気量も示している。

3. 1. 2 供試体の作製方法と自己修復の評価項目

本研究では、自己修復効果を確認するために、事前にひび割れを導入した供試体を作製し、一定期間水中と屋上に暴露した後、目視によりひび割れの充填状況を確認した。以下に詳細を示す。

1) 供試体の作製方法

供試体の作製は、既往の研究¹⁾を参考に、図-3.1に示した塩化ビニル管(VU200、内径202(外径216)×高さ100mm、以下、塩ビ管と記述)に塗装合板を一液型液状シリコンゴムで接着して作製した型枠にコンクリートを打込み、湿気養生槽で1日静置後、底板を取り外し、塩ビ管のまま(上下面開放)ひび割れ導入まで20℃水中養生を行った。

若材齢で生じたひび割れの方が未水合の結合材が残存しているためひび割れ修復力は高いと考え、ひび割れ導入材齢は若材齢の7日と標準材齢28日の2水準とした。写真-3.1にひび割れ導入時の状況を示す。圧縮強度試験機により塩ビ管のまま供試体側面に手動載荷した。荷重計と目視により割裂ひび割れが生じたことを確認した段階で載荷を保持し、除荷後にひび割れが閉塞しないように0.1mm厚のアルミテープを貼り合わせて厚さ0.2mm相当にして、供試体打込み面と底面のひび割れ2カ所ずつに挟んだ後除荷した。

2) 供試体の暴露

ひび割れの自己修復性を確認するため、寒地土木研究所(札幌市豊平区平岸)の実験棟屋上(4階相当)に暴露するとともに、自己修復のポテンシャルを確認するために、20℃恒温室内に設置したテナ内でも水中暴露した。写真-3.2にひび割れ供試体の暴露状況を示す。

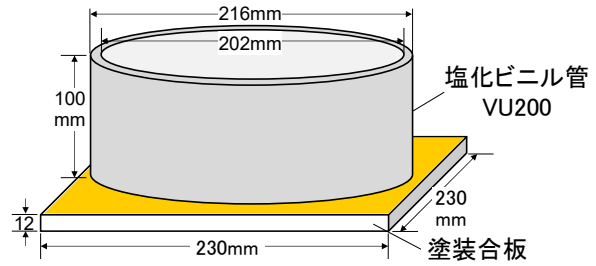


図-3.1 供試体用型枠



写真-3.1 ひび割れ導入状況(中央に割裂ひび割れ)



写真-3.2 ひび割れ供試体の暴露状況

供試体は、いずれも打込み面を上にして静置した。なお、供試体の作製は1月下旬から2月中旬にかけて行ったため、ひび割れ導入直後の供試体の含水が高い状態で屋上に暴露すると凍結融解作用により劣化する可能性が高いことから、ひび割れ導入後材齢91日まで温度20℃、相対湿度60%に設定された恒温恒湿室内に静置し、4月下旬から5月中旬にかけて屋上、水中ともに暴露を開始した。

3) 自己修復性の評価項目

本研究では、結合材の再水和によるひび割れ修復に着目したため、水和の進行度を把握することは自己修復のポテンシャルを評価する一つの目安になる。ここでは水和度を簡易的に把握するために、圧縮強度発現による評価を行った。圧縮強度試験は、ひび割れ供試体と同配合で作製したφ10×20cm 円柱供試体を用いて、水中養生材齢7、28、56、91日の4材齢に加え、ひび割れ供試体と同様、水中養生7日または28日以降恒温恒湿室で気中養生した円柱供試体についても各材齢で実施した。

ひび割れ供試体のひび割れ修復状況については、一定期間暴露したひび割れ供試体を目視で観察する事により行った。写真-3.3に示すように、ひび割れ導入後、供試体の打込み面、底面それぞれ任意で3カ所（一部4カ所）に印をつけてひび割れ充填状況を写真撮影するとともに、自己修復可能なひび割れ幅の目安を確認するためにクラックスケールにより暴露前の表面ひび割れ幅を測定した。

3. 1. 3 圧縮強度発現

図-3.2に各コンクリートの圧縮強度を示す。横軸の記号Wは水中養生、Dは気中養生を示しており、各記号の前の数値はそれぞれの養生日数を示している。また、材齢は圧縮強度試験を実施した材齢である。水中養生のみの場合（記号Wのみ）、普通セメントに比べてスラグやフライアッシュセメントを用いたコンクリートは、材齢初期の強度発現が小さいが、長期的には強度差が小さくなる事がわかる。一方、気中養生を行ったものは、材齢初期の水中養生期間が短いほど

長期強度の増加は小さい傾向があり、特にスラグやフライアッシュセメントを用いた場合にその傾向が顕著だった。

図-3.3に水中養生した場合の材齢28日の圧縮強度に対する各材齢のコンクリート強度比を示す。フライアッシュセメントの材齢7日の強度比は普通セメントより低いが、56日以降は差は小さいものの普通セメントと同程度以上になった。また、スラグを用いた場合、材齢7日の強度比は最も小さいが、56日以降は強度比が最も大きくなった。

図-3.4に各材齢における水中養生のみの強度に対する気中養生を実施した場合の圧縮強度比を示す。材齢28日の強度比は、気中養生を行ったものの方が水中養生のみの場合よりも高かったが、水中養生は最も結合材の水和が進行するため、乾燥に伴う見かけの強度増加が影響したのと思われる。これに対して、材齢56日以降の強度比は、気中養生を実施したものは水中養生のみの場合よりも小さくなり、その傾向は材齢初期の水中養生期間が短く、長期材齢になるほど顕著になった。特に、スラグを用いた場合の強度比は小さく湿潤養生日数の影響を大きく受けるのに対し、普通セメントは材齢長期の強度比の低下がほぼみられず、湿潤養生日数が7日程度あれば、長期強度発現に及ぼす影響は小さいことがわかる。なお、材齢56日以降においても、気中養生を行ったものの方が水中養生のみの場合よりも強度比が高いものがみられるが、これについても乾燥に伴う見かけの強度増加が影響していると考えられる。



写真-3.3 暴露開始前のひび割れ幅測定状況

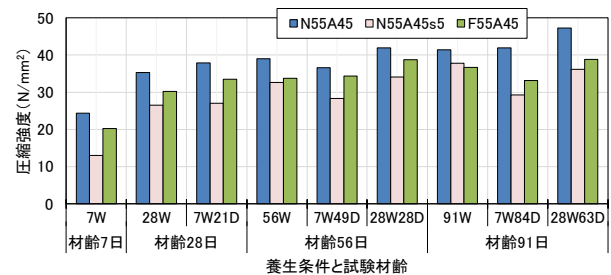


図-3.2 各養生条件と材齢における圧縮強度

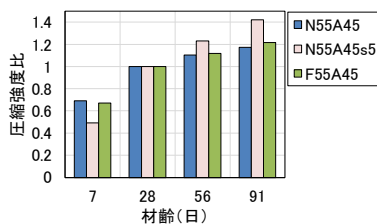


図-3.3 水中養生した場合の圧縮強度比

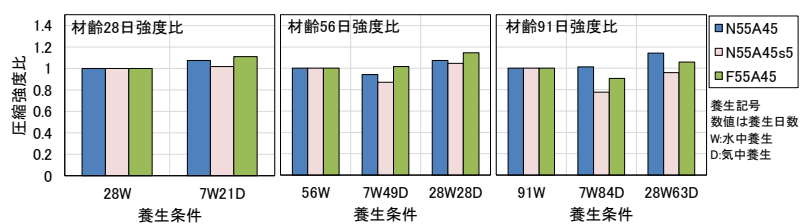


図-3.4 気中養生した場合の水中養生に対する圧縮強度比

以上から、圧縮強度発現を結合材の水和度の目安として評価すると、いずれの結合材も長期的に強度は増加しており、材齢 7 日や 28 日に導入したひび割れに対して自己修復するポテンシャルを有していると推察されるが、普通セメントは材齢 28 日以降の強度増進が小さいことに加え、水中養生 7 日でも水和度は高く、自己修復ポテンシャルは比較的低いと考えられる。一方、フライアッシュセメントやスラグを用いた場合は、普通セメントよりも長期的な強度増加が大きく、特にスラグは材齢初期の水中養生日数が少なくその後乾燥の影響を受けた場合、強度増加は停滞し未水和状態で多数残存していると考えられるため、自己修復ポテンシャルは高いと思われる。

3. 1. 4 暴露後のひび割れ修復状況

表-3.2 に暴露開始前に測定した各供試体の初期ひび割れ幅と暴露 3 か月後のひび割れ自己充填状況を示す。着色したセルは自己充填がみられた箇所であり、色が濃いほど密に充填されていることを示している。なお、表には参考としてひび割れ導入時の荷重から算定した割裂引張強度も示した。いずれの配合も底面側のひび割れに水和物が析出しやすく、打込み面側のひび割れ充填はスラグを用いた N55A45S5 の水中暴露の一部でしか確認できなかった。本研究では、各暴露環境において打込み面を上側にして暴露したため、水中

暴露では水和生成物が重力により下方に移動しやすいことが、屋上暴露では雨水等による水分がひび割れ下方に流れ下面に水和物が析出するためと考えられる。普通セメントの N55A45 はひび割れ導入材齢の影響が小さく全体に自己充填するケースが多いが、水和反応が他の配合よりも速く再水和も速いことや、再水和前から存在していたものも含め水酸化カルシウムの生成量が多く、ひび割れ下面に溶出した際に二酸化炭素と反応し炭酸カルシウムとして析出したためと考えられる。一方、スラグやフライアッシュセメントを使用したものは普通セメントよりも未充填箇所が多く、ひび割れ導入材齢 7 日の方が 28 日より充填しやすい傾向が確認された。これらの結合材は、強度発現から推定したように、水和反応が遅く未水和物が比較的多く残存していることや、潜在水硬性やポゾラン反応により普通セメントよりも水酸化カルシウムの生成量が少ないため表面的な水和物の析出も少なかったものと推察される。

その後暴露 2 年程度経過した時点で、自己修復ポテンシャルが高いと考えられる材齢 7 日でひび割れを導入した供試体の一部を回収し、ひび割れ充填状況を観察するとともに、ひび割れ直交方向に切断して内部のひび割れ充填状況を確認した。写真-3.4 に暴露 2 年後に回収した供試体底面のひび割れ充填状況を暴露 3 か

表-3.2 初期ひび割れ幅と暴露 3 か月後の充填状況
(着色部がひび割れ充填箇所)

配合記号	ひび割れ導入材齢(日)	暴露環境	番号	引張強度 N/mm ²	ひび割れ幅mm(打込み面) 左右基準:ラベル手前				ひび割れ幅mm(底面) 左右基準:ラベル手前に表返			
					左	中央	右	右	左	中央	右	右
					N55A45	7	水中	1	2.68	0.10	0.10	0.20
			2	2.69	0.15	0.10	0.10		0.15	0.15	0.05	
			3	2.72	0.10	0.10	0.15		0.20	0.15	0.10	
			4	2.71	0.20	0.15	0.10		0.10	0.10	0.05	
	屋上		5	2.54	0.15	0.15	0.10		0.20	0.20	0.10	
			6	2.84	0.15	0.15	0.20		0.15	0.20	0.15	
			7	3.72	0.20	0.20	0.15		0.25	0.20	0.05	
	28	水中	8	3.66	0.25	0.15	0.15		0.15	0.20	0.15	
			9	3.57	0.15	0.15	0.15		0.20	0.15	0.10	
			10	3.79	0.15	0.15	0.10		0.15	0.15	0.10	
		屋上	11	3.5	0.05	0.15	0.10		0.30	0.25	0.10	
			12	3.76	0.20	0.20	0.15		0.20	0.20	0.10	
			1	1.53	0.20	0.25	0.25		0.20	0.15	0.15	
N55A45S5	7	水中	2	1.47	0.30	0.20	0.25		0.15	0.35	0.15	
			3	1.6	0.15	0.20	0.20		0.20	0.15	0.10	
			4	1.63	0.10	0.15	0.20		0.15	0.20	0.10	
		屋上	5	1.53	0.20	0.20	0.10		0.15	0.20	0.15	
			6	1.55	0.15	0.15	0.20		0.15	0.15	0.15	
			7	2.51	0.15	0.20	0.10		0.20	0.15	0.10	
	28	水中	8	2.79	0.20	0.20	0.15		0.20	0.15	0.05	
			9	2.65	0.20	0.15	0.15		0.25	0.25	0.15	
			10	2.74	0.05	0.20	0.10		0.10	0.20	0.20	
		屋上	11	2.69	0.15	0.20	0.15		0.25	0.20	0.15	
			12	2.58	0.30	0.10	0.25		0.35	0.40	0.30	
			1	2.58	0.15	0.20	0.15		0.15	0.15	0.20	
F55A45	7	水中	2	2.51	0.10	0.15	0.15		0.20	0.20	0.15	
			3	2.58	0.10	0.25	0.20	0.15	0.25	0.25	0.25	
			4	2.49	0.15	0.20	0.10		0.05	0.15	0.20	
		屋上	5	2.45	0.20	0.25	0.35		0.15	0.15	0.15	
			6	2.48	0.25	0.20	0.20		0.15	0.25	0.30	
	28	水中	13	3.31	0.20	0.20	0.15		0.20	0.20	0.15	
			14	3.04	0.15	0.15	0.15		0.25	0.25	0.10	
			15	3.21	0.10	0.15	0.15		0.20	0.20	0.15	
			16	3.06	0.10	0.15	0.15		0.25	0.20	0.10	
		屋上	17	3.12	0.15	0.20	0.25		0.15	0.25	0.20	
			18	3.02	0.20	0.25	0.15		0.35	0.35	0.20	

*打込み面から底面までの貫通ひび割れとしては、打込み面の左と底面の右が対応

月目の状況と併せて示す。水中暴露供試体は、3 か月時点よりひび割れが確実に自己充填されていることが確認できる。一方、屋上暴露した供試体は一見すると大きな違いはなかったが、スラグやフライアッシュセメント供試体では半透明状の水和物がひび割れに析出

していることが確認された。また、ひび割れ直行方向に切断して内部を観察した結果、暴露環境によらずひび割れ内部は未充填であり、ひび割れの閉塞はほぼ表面部分に限られていた。

表-3.3 にさらに半年経過した2年半後のひび割れ充

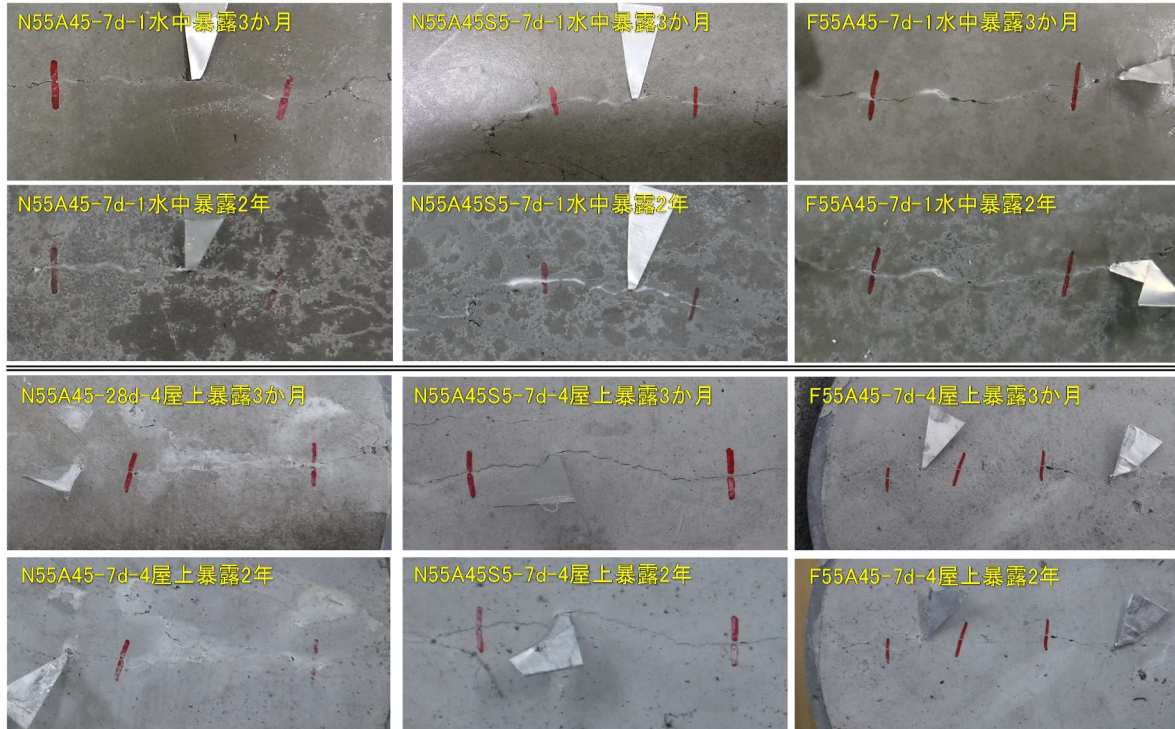


写真-3.4 暴露3か月と2年後の底面のひび割れ自己充填状況

表-3.3 暴露2年半後のひび割れ充填状況

配合記号	ひび割れ導入材齢(日)	暴露環境	番号	引張強度 N/mm ²	ひび割れ幅mm(打込み面) 左右基準:ラベル手前				ひび割れ幅mm(底面) 左右基準:ラベル手前に裏返			
					左	中央	右	右	左	中央	右	右
N55A45	7	水中	1		暴露2年目で回収済み							
			2	2.69	0.15	0.10	0.10		0.15	0.15	0.05	
			3	2.72	0.10	0.10	0.15		0.20	0.15	0.10	
			4		暴露2年目で回収済み							
	28	屋上	5	2.54	0.15	0.15	0.10		0.20	0.20	0.10	
			6	2.84	0.15	0.15	0.20		0.15	0.20	0.15	
			7	3.72	0.20	0.20	0.15		0.25	0.20	0.05	
			8	3.66	0.25	0.15	0.15		0.15	0.20	0.15	
	7	水中	9	3.57	0.15	0.15	0.15		0.20	0.15	0.10	
			10	3.79	0.15	0.15	0.10		0.15	0.15	0.10	
			11	3.5	0.05	0.15	0.10		0.30	0.25	0.10	
			12	3.76	0.20	0.20	0.15		0.20	0.20	0.10	
N55A45S5	7	水中	1		暴露2年目で回収済み							
			2	1.47	0.30	0.20	0.25		0.15	0.35	0.15	
			3	1.6	0.15	0.20	0.20		0.20	0.15	0.10	
			4		暴露2年目で回収済み							
	28	屋上	5	1.53	0.20	0.20	0.10		0.15	0.20	0.15	
			6	1.55	0.15	0.15	0.20		0.15	0.15	0.15	
			7	2.51	0.15	0.20	0.10		0.20	0.15	0.10	
			8	2.79	0.20	0.20	0.15		0.20	0.15	0.05	
	7	水中	9	2.65	0.20	0.15	0.15		0.25	0.25	0.15	
			10	2.74	0.05	0.20	0.10		0.10	0.20	0.20	
			11	2.69	0.15	0.20	0.15		0.25	0.20	0.15	
			12	2.58	0.30	0.10	0.25		0.35	0.40	0.30	
F55A45	7	水中	1		暴露2年目で回収済み							
			2	2.51	0.10	0.15	0.15		0.20	0.20	0.15	
			3	2.58	0.10	0.25	0.20	0.15		0.25	0.25	0.25
			4		暴露2年目で回収済み							
	28	屋上	5	2.45	0.20	0.25	0.35		0.15	0.15	0.15	
			6	2.48	0.25	0.20	0.20		0.15	0.25	0.30	
			13	3.31	0.20	0.20	0.15		0.20	0.20	0.15	
			14	3.04	0.15	0.15	0.15		0.25	0.25	0.10	
	7	水中	15	3.21	0.10	0.15	0.15		0.20	0.20	0.15	
			16	3.06	0.10	0.15	0.15		0.25	0.20	0.10	
			17	3.12	0.15	0.20	0.25		0.15	0.25	0.20	
			18	3.02	0.20	0.25	0.15		0.35	0.35	0.20	

填状況を示す。表-3.2の3か月後の充填状況と比べると、底面はほぼひび割れが閉塞し、打込み面でもひび割れの閉塞が確認され、特に、スラグ供試体の自己充填割合が高く、スラグの自己修復ポテンシャルが高いことが確認できた。また、修復可能なひび割れ幅については、本研究では一部ではあるが0.35mmまで閉塞が確認された。

3.2 ひび割れの自己修復性の評価方法

前節では、収縮ひび割れを模擬したコンクリートの自己修復状況を確認し、結合材による修復効果の違いや、修復可能なひび割れ幅の目安を確認した。一方、ひび割れの自己修復性として重要なのは、ひび割れによって失われた品質や性能をどの程度修復できたか評価することであり、目視による充填性の確認だけでは不十分である。このため、3.2節では、ひび割れの自己修復性の評価方法について検討を行った。

3.2.1 透水試験による自己修復性の評価

1) 供試体の作製方法

自己修復性の評価に用いた供試体は、図-3.1に示したVU管の寸法を変更し（VU75、内径83（外径89）×高さ100mm）、塩ビ管サイズに合わせて寸法を変えた塗装合板（110×110×12mm）を底板にした型枠にコンクリートを打込み、湿気養生槽で1日静置後、底板を取り外し、塩ビ管のまま（上下面開放）ひび割れ導入まで20℃水中養生を行った。ひび割れの導入は、前節と同様、若材齢の7日と材齢28日の2水準とした。ひび割れの導入方法は、写真-3.1に示した方法と同様である。表-3.4にコンクリートの配合を示すが、骨材ロットの違いから骨材量が多少異なるが基本的に表-3.1に示した配合と同様である。なお、後述する凍結融解試験後の自己修復性の検討と同じ配合とした関係から、目標空気量は3.0%としている。

2) 供試体の暴露条件とひび割れ修復性の評価方法

ひび割れ導入後の自己修復性を評価するため、前節と同様、寒地土木研究所実験棟屋上と20℃恒温室に設置したコンテナ内の水中に暴露した。

ひび割れ修復性の評価はひび割れを介した透水性

により評価した。ひび割れの透水性試験として、JSCE-K 572 けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）に示されている方法¹²⁾があり、自己修復によるひび割れの充填はけい酸塩系表面含浸材によるものと同様と考えられるため本試験法の採用は望ましいと考えられるが、水圧を一定にする必要があるなど多少の工夫が必要なことから、本研究では、JSCE-K 571 表面含浸材の試験方法（案）で示されているシラン系含浸材の透水量試験方法¹³⁾で使用する漏斗の寸法が供試体上面とほぼ同じ大きさであり測定準備が比較的容易なため、シラン系含浸材の透水量試験法により簡易的な評価を試みた。

試験はJSCE-K 571に準じて、ひび割れを導入した塩ビ管供試体の打込み面側に図-3.5に示すように漏斗とメスピペットを接続したものを設置し、一液型液状シリコーンゴムで水が漏れないようにシールした。なお、試験法では試験面に漏斗の大きさに合わせて供試体上面を切削して区切るが、本試験では供試体上面積とロート径がほぼ同じなため切削せずそのまま取り付けた。1配合1暴露環境当たり供試体3個で測定を行った。

自己修復性の評価は、試験法で示されている水頭高さがメスピペットの9ml目盛に相当しており、そこから20ml目盛に到達するまでの時間を計測し、流量を

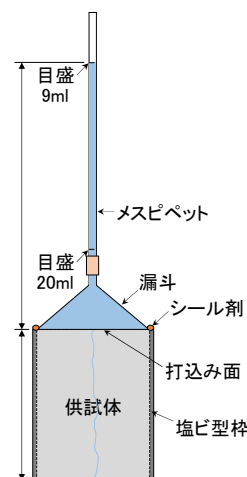


図-3.5 ひび割れ透水試験の概要

表-3.4 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	高炉スラグ 微粉末 置換率 (%)	水結合 材比 B/W (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤 B×%	AE 助剤 B×%	実測 スランプ (cm)	実測 空気量 (%)	
					水 W	結合材(B)							
						セメント C	高炉スラグ 微粉末 BS	細骨材 S					粗骨材 G
N55A30	普通セメント	—	55	45	155	282	—	866	1068	0.19	—	9.0	3.3
N55A30s5		50				141	141	861	1062	0.29	—	8.6	3.2
F55A30	フライッシュセメント	—				282	—	859	1060	0.11	0.0150	12.2	3.1

時間で除した透水速度 (ml/s) で評価した。なお、屋上に暴露した供試体は乾燥し、透水試験中に吸水する影響を受けるため、透水試験は各供試体 2 回実施し、2 回目の測定値で評価した。また、暴露期間中にひび割れ内に水和物が充填して 20ml 目盛まで流下しないものもあったため、その場合は、半日から翌日までの透水量から透水速度を求めて評価した。また、ひび割れを導入していない供試体についても同様に測定を行い、暴露中におけるコンクリートの表面品質評価の参考とした。なお、ひび割れがない供試体も 20ml 目盛までは流下しないため、表層品質については JSCE-K 571 に準じて 7 日後の吸水量により評価した。

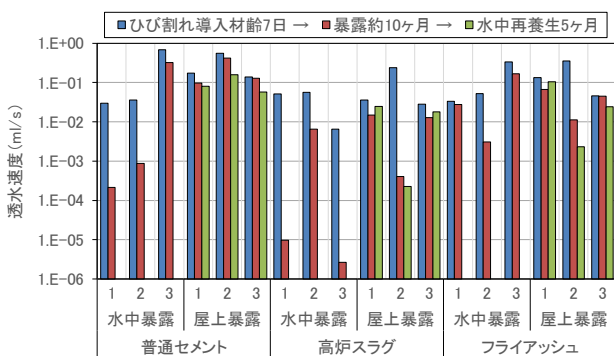
3) ひび割れ供試体の透水速度

図-3.6 にひび割れ供試体の透水速度を、図-3.7 にひび割れ導入直後の透水速度に対する速度比を示す。左図は材齢 7 日でひび割れを導入したもの、右図は材齢 28 日にひび割れを導入したものである。いずれもひび割れ導入直後に透水試験を行い、これを基準として暴露約 10 ヶ月後と、屋上暴露供試体のみさらに水中で再養生 5 ヶ月後に測定した値を示している。なお、ひび割れ導入直後の透水速度は同一配合でも供試体に

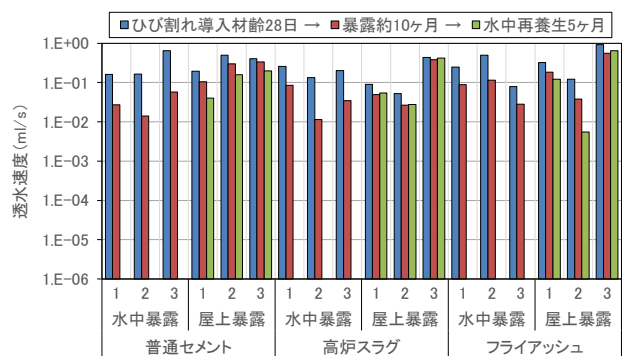
より異なっているが、これは導入したひび割れのひび割れ幅が一定で無いためである。

暴露 10 ヶ月後の透水比は水中暴露の方が屋上暴露よりも大きく低下しており、水の供給が自己修復に重要なことがわかる。ひび割れ導入材齢では、全体として、材齢 7 日にひび割れを導入した方が透水比は低下する傾向がある。3. 1. 4 でも材齢 7 日にひび割れを導入した方がひび割れは閉塞しやすいことが確認されており、早期材齢でひび割れが生じた場合、未水和物の残存が多いことによるものと考えられる。他方、ひび割れ導入材齢 7 日時点の透水速度は 0.1ml/s 未満のものが多く、材齢 28 日と比べて透水速度が低い傾向がみられ、透水速度 0.1ml/s 未満の方が暴露後の透水速度は低下する傾向もみられる。ひび割れ導入時の強度が高いほどひび割れは脆性的に生じてひび割れ幅が比較的大きくなり、結果として強度が小さい材齢 7 日にひび割れを導入した方がひび割れ幅は小さく、閉塞しやすかったことも影響していると考えられる。

結合材の比較では、スラグを用いたものは普通セメントより透水速度が低下しており、スラグによる自己修復効果が確認できた。一方、フライアッシュセメン

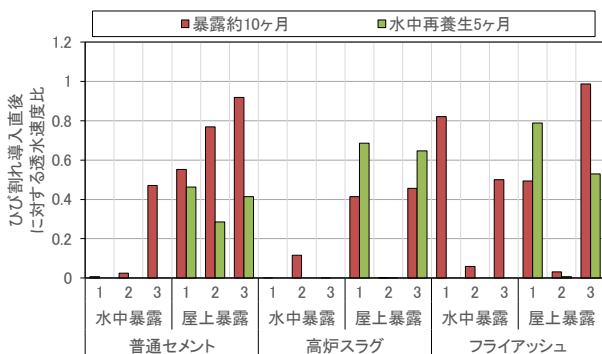


(a) ひび割れ導入材齢 7 日

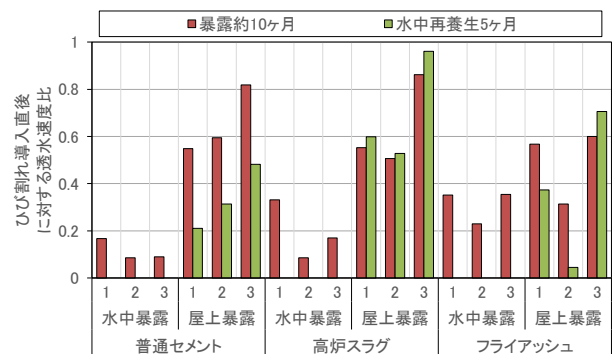


(b) ひび割れ導入材齢 28 日

図-3.6 ひび割れ供試体の透水速度



(a) ひび割れ導入材齢 7 日



(b) ひび割れ導入材齢 28 日

図-3.7 ひび割れ導入直後の透水速度に対する速度比

トを用いたものは透水速度の低下が比較的小さく、表-3.3 に示した暴露 2 年半後のひび割れ充填状況と同様、自己修復効果が比較的低かった。参考として、図-3.2 に示したコンクリートの強度に暴露後約 2 年および 3 年経過時の強度を加えたものを図-3.8 に示す。なお、横軸の記号 W は水中養生（水中暴露）、D は気中養生（20℃、相対湿度 60%）、R は屋上暴露を示しており、各記号の前の数値はそれぞれの養生・暴露日数を示している。また、材齢は圧縮強度試験を実施した材齢である。暴露後も長期的に圧縮強度は増加しており、材齢 28 日強度を基準にすればスラグは長期の増加割合が高く、暴露 10 ヶ月後の透水速度の低下もスラグの水和継続が大きく影響していると思われる。なお、フライアッシュセメントも増加傾向にあるが、増加の程度は普通セメントに近く、ひび割れ修復性が顕著ならなかったと思われる。

一方、暴露 10 ヶ月後の屋上暴露供試体を 20℃水中で再養生し、5 ヶ月後に測定した結果をみると、普通セメントではいずれも暴露 10 ヶ月後より透水速度は低下したが、その他の結合材ではほぼ同程度か増加するケースもみられた。屋上暴露供試体は乾燥状態であり、本研究では透水試験時の吸水の影響を低減するために透水試験を 2 回実施し、2 回目の測定結果で評価している。しかし、普通セメントより強度が低い他の結合材は乾燥の程度が大きく、吸水量が多ければ透水速度には吸水速度の影響が含まれるため、屋上暴露 10 ヶ月後についてはひび割れ修復性を適切に評価できていない可能性がある。

4) ひび割れがない供試体の吸水量

図-3.9 にひび割れがない供試体の吸水量の経時変化を示す。凡例は、結合材の種類（N：普通セメント、B：スラグ、F：フライアッシュセメント）、水中養生期

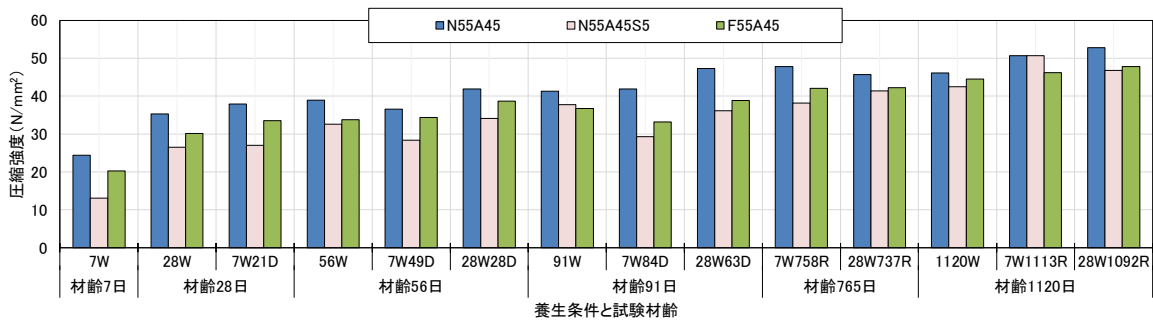


図-3.8 材齢 28 日水中養生供試体の圧縮強度に対する強度比

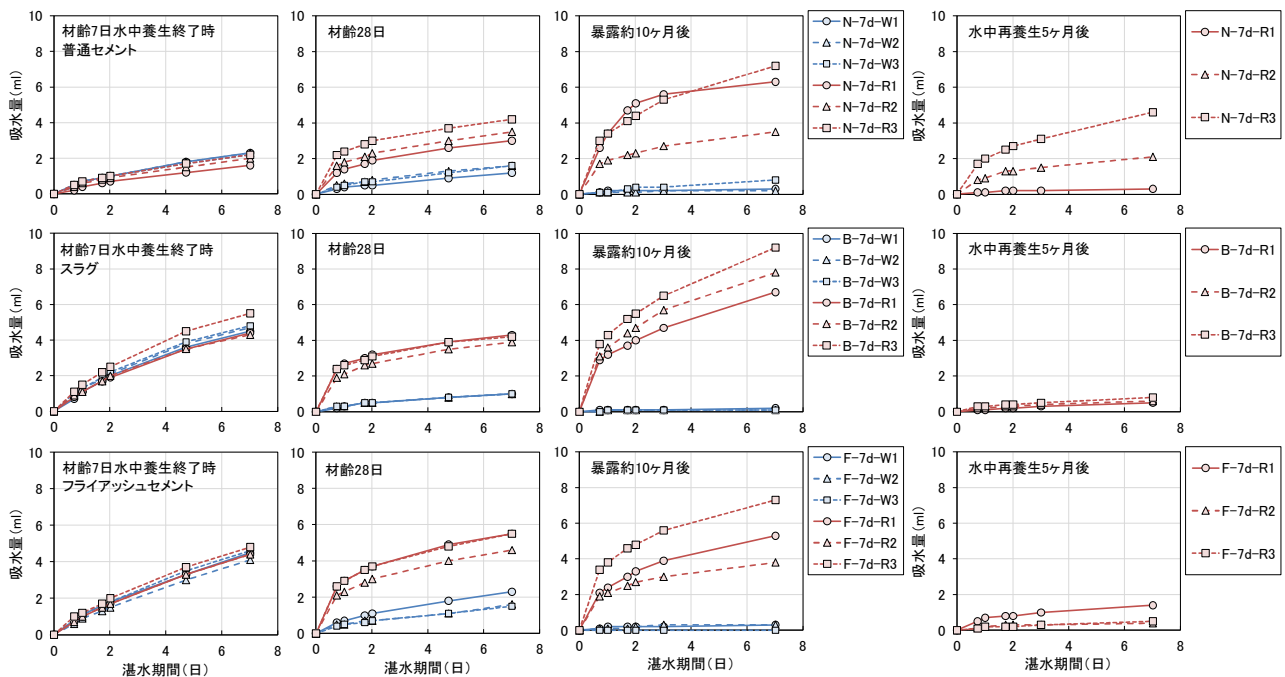


図-3.9 ひび割れがない供試体の吸水量の経時変化

間(7d:7日)、暴露環境(W:水中暴露、R:屋上暴露)、供試体番号を示している。図-3.8に示した圧縮強度の傾向と同様に、材齢7日時点では強度が高いほど吸水量は少なく、表層品質が緻密なことがわかる。その後は暴露環境により吸水量は大きく異なり、水中暴露を継続したものは暴露期間の増加に伴い吸水量は減少した。一方、屋上暴露供試体は、材齢28日における吸水量の変化は小さかったが、暴露10ヶ月後は吸水量が増加し、特にスラグの吸水量が増大した。透水量試験時に測定した供試体の質量は減少していたことから、屋上暴露供試体は乾燥の影響を受けており、測定時の吸水により見かけの吸水量が増加していると考えられる。このことから、暴露10ヶ月後のひび割れ供試体の透水速度には供試体の乾燥の影響が含まれており、この場合透水速度は見かけ上大きく評価されていることが推測される。

一方、水中再養生5ヶ月後の吸水量は、普通セメントではばらつきがあるものの概ね減少し、スラグやフライアッシュセメントを用いたものは暴露10ヶ月後の水中暴露供試体と同程度まで低下した。再養生中の吸水により見かけの吸水量が低下した影響もあるが、スラグやフライアッシュセメントを用いたものは、図-3.8に示したように長期的な強度増加のポテンシャルを有していることから再水和により水和が進行し、品質が向上したものと考えられる。

以上から、試験条件によっては本研究で実施した透水試験を用いてひび割れの修復性を評価することは可能と思われるが、測定時の供試体の乾燥の影響を受けるため、適切に評価するには試験前の供試体の含水状態を調整するなど、測定前条件を整理する必要がある。

3.2.2 凍結融解により生じたひび割れの自己修復性評価

コンクリートが凍結融解作用を受けると内部に微細なひび割れが生じる。3.1節で評価した修復可能なひび割れ幅を考慮すれば、このような微細ひび割れは自己修復可能と思われる。そこで、凍結融解作用により生じたひび割れの自己修復性の検証と評価方法について検討した。

1) 試験概要

JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法では、微細ひび割れによる内部損傷の程度を、試験開始時の動弾性係数に対する相対動弾性係数により評価する。本研究では、JIS A 1148 A法に準じて凍結融解試験を行い、相対動弾性係数が低下した供試体に対して自己修復を促進させるために20℃の水中に一定期間浸漬し自己修復性を検証し、水中浸漬後の相対動弾性係数の回復の程度により自己修復性を評価した。

供試体の配合を表-3.5に示す。試験ケースは3ケースあり、結合材や骨材等の使用材料はこれまでの検討と同様だが、骨材ロットにより骨材の品質が若干異なるため、s/aや単位水量が異なっている。水セメント比は55%で統一し、凍害劣化促進の観点から目標空気量は3.0%±0.5%に設定した。また、目標スランプはケース1と2が8.0±2.5cm、ケース3は12.0±2.5cmとしたが、空気量の設定を重視したため目標範囲外のものもある。実測スランプと空気量は表-3.5に併記している。

2) 凍結融解試験後の再養生による弾性係数の回復(試験ケース1)

試験ケース1では、JIS A 1148に準じて凍結融解300サイクル終了まで凍結融解試験を行い、劣化が最大の状態から再養生により弾性係数が回復するかどうかを

表-3.5 コンクリートの配合

試験ケース	記号	セメントの種類	高炉スラグ微粉末置換率 (%)	水結合材比 B/W (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 B×%	AE助剤 B×%	実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)	
						水 W	結合材(B)		細骨材 S					粗骨材 G
							セメント C	高炉スラグ BS						
1	N55A30	普通セメント	—	55	48	160	291	—	998	920	0.15	0	8.6	2.8
	N55A30S5		50				146	146	994	915	0.22	0	10.1	3.0
	F55A30	フライアッシュセメント	—				291	—	990	912	0.15	0.005	10.3	2.5
2	N55A30	普通セメント	—	55	45	155	282	—	866	1068	0.19	—	9.0	3.3
	N55A30s5		50				141	141	861	1062	0.29	—	8.6	3.2
	F55A30	フライアッシュセメント	—				282	—	859	1060	0.11	0.0150	12.2	3.1
3	N55A30	普通セメント	—	55	45	155	282	—	869	1071	0.16	0.0028	12.8	3.3
	N55A30s5		50				141	141	864	1062	0.16	0.0033	14.3	3.5
	F55A30	フライアッシュセメント	—				282	—	862	1062	0.08	0.0175	11.8	3.1

ケース1: 細骨材密度2.67g/cm³、吸水率1.17%、粗骨材密度2.68g/cm³、吸水率1.65%

ケース2: 細骨材密度2.65g/cm³、吸水率1.41%、粗骨材密度2.68g/cm³、吸水率1.77%

ケース3: 細骨材密度2.66g/cm³、吸水率1.41%、粗骨材密度2.68g/cm³、吸水率1.49%

確認した。

写真-3.5に凍結融解300サイクル終了時の各コンクリートの供試体側面の劣化状況を示す。いずれも供試体表面は大きくスケーリングが生じているが、大きなひび割れや角欠けのような欠損は生じていない。

図-3.10に試験ケース1における凍結融解試験時と再養生後の相対動弾性係数と質量変化率を示す。スラグを用いた配合は相対動弾性係数の低下が最も早く、次いでフライアッシュ、普通セメントの順に低下した。しかし、凍結融解300サイクル終了時はいずれも相対動弾性係数が20%程度まで低下した。質量も同様に減少したが、結合材により多少差が生じた。

一方、凍結融解終了後20℃水中養生を行った結果、いずれも相対動弾性係数は回復した。特にスラグを用いたものは再養生28日で相対動弾性係数が60%程度まで回復しており、凍結融解による微細ひび割れは自己修復可能なことを確認した。なお、質量も再養生後微増していた。

3) 凍結融解試験後の再養生による弾性係数の回復 (試験ケース2)

ケース2では、ケース1の劣化状況を参考に、凍結融解150サイクルで試験を終了し、劣化状況が異なる場合の回復状況を確認した。

写真-3.6に凍結融解150サイクル終了時の各コンクリートの供試体側面の劣化状況を示す。普通セメントは写真-3.5に示したケース1よりも表面のスケーリングが大きかった。他の結合材については、フライアッシュセメントの1供試体でスケーリングが激しく生じたものの、概ねケース1よりもスケーリングは小さかった。

図-3.11に試験ケース2における凍結融解試験時と再養生後の相対動弾性係数と質量変化率を示す。なお、フライアッシュの質量変化率は、上述のように1供試体のスケーリングが激しかったため、その値を除いた2供試体の平均値で示している。相対動弾性係数はいずれもほぼ同程度で低下したが、凍結融解150サイクル終了時で80~90%となり、この程度の低下であれば内部損傷の程度は小さいと判断できる。この状態から20℃水中で再養生した結果、相対動弾性係数はいずれも95%以上まで回復し、特にスラグを用いたものは回復率が大きく、再養生91日で100%を超えた。なお、ケース1と同様、質量も再養生後微増していた。

4) 凍結融解試験後の再養生による弾性係数の回復 (試験ケース3)

ケース3ではこれまでの結果を踏まえ、耐凍害性を

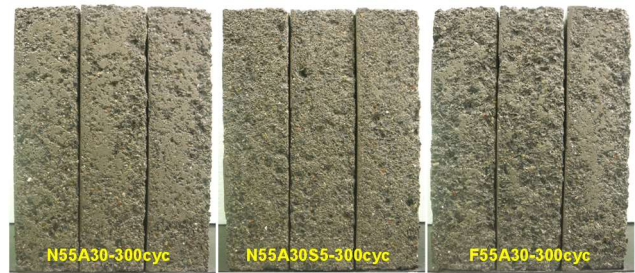


写真-3.5 凍結融解終了時の側面の状況 (ケース1)

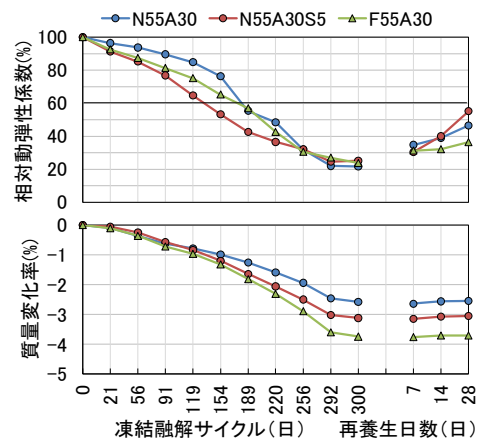


図-3.10 相対動弾性係数と質量変化率 (ケース1)



写真-3.6 凍結融解終了時の側面の状況 (ケース2)

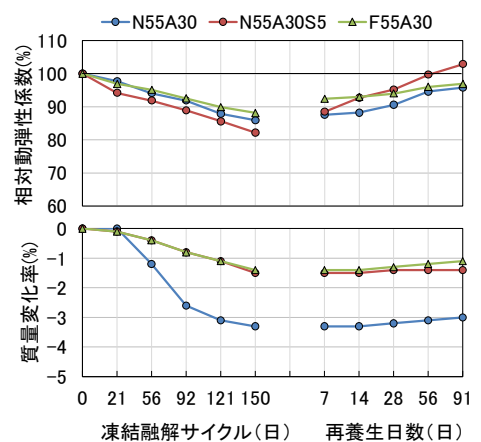


図-3.11 相対動弾性係数と質量変化率 (ケース2)

満足する相対動弾性係数の下限値 60%程度までの劣化を試みたが、結果として 300 サイクルまで凍結融解を繰り返しても 80%程度までしか低下しなかったため、時間的な制約からほぼケース 2 の再現性を評価する形になった。

写真-3.7 に凍結融解 300 サイクル終了時の各コンクリートの供試体側面の劣化状況を示す。表面上は普通セメントのスケールリングが試験ケース 1、2 よりも少なかったが、他の結合材はケース 1 と同程度だった。

図-3.12 に試験ケース 3 における凍結融解試験時と再養生後の相対動弾性係数と質量変化率を示す相対動弾性係数はケース 2 によりは低下したものの 80%前後であり、再養生後はいずれも 90%以上まで回復し、スラグを用いたものは再養生 91 日で 100%程度まで回復するなど、ケース 2 とほぼ同様の傾向を示した。

以上から、凍結融解作用を受けてコンクリート内部に微細ひび割れが生じた場合でも、結合材の再水和を促す養生を実施することにより回復可能なことを確認した。また、劣化の程度が小さい段階で回復養生を行えば初期性能まで回復可能であり、特に水和反応が遅い高炉スラグ微粉末等の混和材の利用は回復効果が高いことを確認した。なお、コンクリート内部の自己修復性は弾性係数の回復の程度により評価可能であり、実構造物では超音波伝播速度の測定によっても評価可能と思われる。

4. まとめ

本研究では、寒冷地でのコンクリートの収縮ひび割れ制御技術の提案を目的として、収縮低減剤使用による乾燥収縮抑制効果と耐凍害性の確保について検討を行うとともに、混和材の活用によるひび割れの自己修復性について検討を行った。本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 収縮低減剤使用による収縮ひび割れ抑制対策
 - 1) 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 100~200 μ 程度低減可能である。
 - 2) 圧縮強度は収縮低減剤の種類や使用量の増加により 10~20%程度低下する可能性があることに留意する必要がある。
 - 3) 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耐凍害性の確保が可能であり、耐凍害性確保のための適切な空気量の調整方法を提案した。
 - 4) 収縮低減型の高性能・高機能 AE 減水剤の添加量



写真-3.7 凍結融解終了時の側面の状況 (ケース 3)

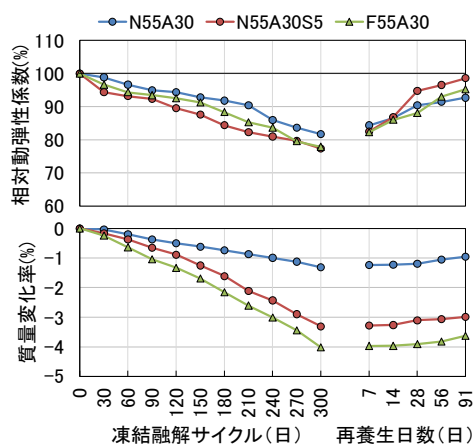


図-3.12 相対動弾性係数と質量変化率 (ケース 3)

が少ない場合、十分な収縮低減効果やひび割れ抵抗性を確保できない場合があるため、コンクリートの配合や想定する収縮抑制量を考慮して適切な添加量となるように、事前に試験で確認して混和剤のタイプや添加量を決める必要がある。

- 5) 収縮低減型の高性能・高機能 AE 減水剤の使用により耐凍害性が低下する場合があるため、微細な気泡を適量確保する必要があり、そのためには収縮低減剤と同様の対策が必要である。
- (2) 混和材によるコンクリートの自己修復性
 - 1) 本研究で検討した結合材はいずれも自己修復ポテンシャルを有しているが、特に比表面積が小さい高炉スラグ微粉末は長期的に未水和状態で残存しているため、自己修復ポテンシャルは高いと考えられる。
 - 2) 割裂荷重により貫通ひび割れを導入した供試体の暴露試験から、実環境下におけるひび割れの自己修復性を確認するとともに、比表面積が小さい高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートはひび割れ閉塞割合が高いことを確認した。
 - 3) 暴露供試体のひび割れの閉塞はほぼ表面部分に限定され、修復可能な最大のひび割れ幅は 0.35mm 程度だった。

- 4) シラン系表面含浸材の透水量試験により、簡易的にひび割れの自己修復性を評価することが可能であるが、測定時の供試体の乾燥の影響を受けるため、適切に評価するには試験前の供試体の含水状態を調整するなど、測定前条件を整理する必要がある。
- 5) 凍結融解作用を受けてコンクリート内部に微細ひび割れが生じた場合でも結合材の再水和を促す養生の実施により回復可能であり、特に比表面積が小さい高炉スラグ微粉末は回復効果が高く、劣化程度が小さい段階で回復養生を行えば初期性能まで回復可能である。
- 6) 凍結融解を受けたコンクリート内部の自己修復性は弾性係数の回復の程度により評価可能であり、実構造物では超音波伝播速度の測定により評価可能と思われる。

体の作製方法と試験方法、土木学会第 67 回年次学術講演会、V-451、pp.901-902、2012.9

- 12) 土木学会：けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）（JSCE-K 572-2018）、2018 年制定コンクリート標準示方書[規準編：土木学会規準および関連規準]、p.528、2018.10
- 13) 土木学会：表面含浸材の試験方法（JSCE-K 571-2013）、2018 年制定コンクリート標準示方書[規準編：土木学会規準および関連規準]、p.517、2018.10

参考文献

- 1) 張友海、小山田哲也、坂本龍、藤原忠司：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) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究委員会報告書、2009
- 3) 澁谷将ほか：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの自己修復効果、日本建築学会北海道支部研究報告集 No.83、pp.47-50、2010.7
- 4) 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
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書、pp.58-60、2002.9
- 6) 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
- 7) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編：本編]、p.43、2018.3
- 8) 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
- 9) 牧角龍憲、徳光善治：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.5、pp.185-188、1983
- 10) 鈴木計夫、大野義照、三浦義礼：コンクリートの一軸拘束ひび割れ試験と壁体試験の収縮拘束ひび割れ性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.10、pp.261-266、1988
- 11) 藤井隆史ほか：微細なひび割れを持つコンクリート試験

STUDY ON CRACK CONTROL SYSTEM OF CONCRETE IN COLD REGIONS

Research Period : FY2016-2020

Research Team : Cold-Region Maintenance Engineering Research
Group (Materials)

Author : SHIMATA Akinori, YASUNAKA Shintaro,
KIKUTA Etsuji, YOSHIDA Susumu, YAMAUCHI Ryo

Abstract : In order to extend the life of concrete, it is necessary to control cracks that promote deterioration of concrete structures. In this study, to propose crack control system of concrete in cold regions, we evaluated the effect of crack control methods by using shrinkage reducing agent and the self-healing property of crack by using mineral admixtures.

As a result, we confirmed the self-healing property of cracks and the crack form which can be self-repaired by using mineral admixture such as ground granulated blast-furnace slag with low specific surface area (approximately 3000cm²/g). Besides, we proposed the evaluation method of self-healing property of crack. As for the shrinkage reducing agent, we confirmed the shrinkage reducing effect by using shrinkage reducing agent, and organized the points to be noted when using it. Moreover, we proposed a method of adjusting the air content in fresh concrete to ensure the frost damage resistance when using the shrinkage reducing agent.

Key words : crack, drying shrinkage, shrinkage reducing agent, frost damage resistance, self-healing, mineral admixture