

# 論文 膨張材を使用したコンクリートのスケーリング抵抗性確保に関する研究

小山田 哲也\*1・羽原 俊祐\*2・秋田谷 涼\*3・千葉 大\*4

**要旨**：近年、コンクリート構造物のひび割れを伴う収縮補償の観点から使用されている膨張材について、それを混合したコンクリートのスケーリング抵抗性を検討した。膨張材は、石灰系、エトリンガイト系とし、それぞれ推奨混合量が  $1\text{m}^3$  あたり 20 kg と 30 kg の 2 種類を用いた。膨張材の膨張は確認されたものの、スケーリング促進試験では、無混合のものと有意差は無く、スケーリング抵抗性への影響は確認されなかった。硬化後の空気量の結果から、スケーリング抵抗性には、通常のコンクリートと同様に、AE 剤によってもたらされる連行空気が重要であり、特に微細な空気量の確保が重要であることが分かった。

**キーワード**：スケーリング抵抗性，膨張材，連行空気，微細空気，膨張率

## 1. はじめに

膨張材は「JISA 6202」にて規定されるコンクリート用混和材であり、用語の説明として「セメント及び水とともに練り混ぜた場合、水和反応によってエトリンガイト、水酸化カルシウムなどを生成し、コンクリート又はモルタルを膨張させる作用のある混和材。」と示されている。一般的な使用目的は、コンクリートあるいはモルタルの収縮補償、ケミカルプレストレスの導入などであり、近年では特に収縮ひび割れの抑制策として使用の頻度が高まっている。

東北地方整備局では広範かつ大規模に行われている復興道路・復興支援道路の建設をきっかけとした、「ひび割れ抑制のための参考資料(案)(橋脚、橋台、函渠、擁壁編)」を作成しているがその中のひび割れ防止策として、橋台の胸壁においては、ひび割れ抑制鉄筋の追加によるひび割れの分散に加えて、部材厚が薄くて鉄筋比が高い場合に膨張材の活用も有効とし、その理由として「胸壁のように鉄筋比 0.5%程度の部材は鉄筋の拘束により膨張材の効果が十分期待できるためである。」<sup>1)</sup>としている。また「東北地方におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案)」では、配合設計の際、床版の収縮を低減してひび割れを抑制するために、膨張材を入れることを基本<sup>2)</sup>としている。このように道路構造物の高耐久化あるいはひび割れ抑制のために膨張材が用いられる事例は近年多い。

一方で膨張材を混合したコンクリートは、無拘束の状態では組織が弛緩し、強度の低下を引き起こす可能性がある<sup>3)</sup>。特に床版のような鉛直方向に鉄筋の影響が少ない構造物では、膨張材により水平方向に比べ鉛直方向に大きな膨張あることが報告されている<sup>4)</sup>。

積雪寒冷地域の道路構造物は、凍害劣化の危険がある。膨張材を使用したコンクリートについて、JIS A 1148 で行った実験では、耐凍害性は空気量と相関があり、この関係は膨張材を混合しないコンクリートと同様と結論づけている。内部ひび割れを伴う凍結融解試験では、相対動弾性係数の変化はないとの結果から導き出されたものであり、近年問題が深刻化しているスケーリング劣化については論じられていない。

筆者らの研究によれば<sup>5)</sup>、膨張材の混合の有無は、JISA1148 (A 法) で 300 サイクルまでの相対動弾性係数の変化で拘束の有無で相違はなかったものの、同じ供試体の質量減少率は、明らかに膨張材のある方が大きく、悪影響が懸念された。この実験では、硬化後の空気量も測定しており、膨張材を混合したものが最も空気量が少なく、スケーリング劣化が大きかった原因が、膨張による組織の粗大化等の体積膨張が空気量の低下かの判別は出来なかった。

そこで本研究では、膨張材の混合によるコンクリートのスケーリング抵抗性について検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に示す。セメントには、高炉セメント B 種を使用した。膨張材の影響を広く検討するため、本研究では、石灰系およびエトリンガイト系の膨張材について、それぞれ  $1\text{m}^3$  あたりの推奨混合量が 20 kg のものと 30 kg のものをそれぞれ使用した。コンクリートの空気量は市販の AE 助剤および AE 減水剤を用い調整した。配調合を表-2 に示す。コンクリートは一般的な橋脚

\*1 岩手大学 理工学部システム創成工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 岩手大学 理工学部システム創成工学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 青森県庁土木部技師

\*4 岩手大学 理工学部システム創成工学科

表-1 使用材料

材料	記号	種類	備考
水	W	水道水	
セメント	C	高炉 B 種セメント	密度 : 3.04 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	北海道白老産砕砂	密度 : 2.66 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	岩手県黒川産碎石	密度 : 2.94 g/cm <sup>3</sup>
膨張材 E	A1	石灰系 20 kg混合型	
	A2	石灰系 30 kg混合型	
	B1	Aft 系 20 kg混合型	
	B2	Aft 系 30 kg混合型	
混和剤	AE	AE 助剤 4 種	市販品
	AD	AE 減水剤 1 種	市販品

表-2 配調合条件

記号	Air (%)	W/C (%)	単位量 ( kg / m <sup>3</sup> )						
			W	C	E	S	G	AD	AE
4.5	4.5	53.0	175	330	0	955	918	3.14	0.013
7.0	7.0	50.0	165	330	0	942	888	2.64	0.026
A1	7.0	50.0	165	310	20	942	888	2.64	0.037
A2	7.0	50.0	165	300	30	942	888	2.64	0.040
B1	7.0	50.0	165	310	20	944	888	2.64	0.037
B2	7.0	50.0	165	300	30	944	888	2.64	0.040
50	7.0	50.0	165	310	20	875	964	2.31	0.056
52	7.0	50.0	165	310	20	910	926	2.64	0.053
56	7.0	50.0	165	310	20	979	850	2.81	0.037
b	7.0	50.0	165	310	20	944	888	2.97	0.008
c	7.0	50.0	165	310	20	944	888	2.97	0.008
r	7.0	50.0	165	310	20	944	888	3.30	0.040

表-3 コンクリートの実験項目

フレッシュ コンクリート	スランプ (JISA 1101 : 2005 (2011 確認))
	空気量 (JISA 1128 : 2005 (2011 確認))
硬化 コンクリート	圧縮強度 (JISA 1108 : 2008)
	スケーリング量 (ASTM C672 M-12)
	空気量 (リニアトラバース法)
	膨張率 (JCI-S-009-2012) 室内実験のみ

あるいは橋台等を考慮して、水セメント比を 50%，スランプを 18 cm と設定して配調合を決定した。筆者らの研究結果<sup>6)</sup>からフレッシュコンクリートの空気量を 7%と高めに設定することで、スケーリング抵抗性の向上が図られることが分かっている。また吉田らの研究<sup>7)</sup>によれば、普通ポルトランドセメントと比較し、本実験で対象としている高炉セメント B 種は硬化後の空気量を多くする必要が示されている。そこで本研究ではフ

レッシュコンクリートの空気量は 7.0%とした。空気量 7.0%は日本工業規格 JIS では規格外であるが、スケーリング劣化対策として有効であることが分かっており、東北地方整備局が通知した東北地方における凍害対策に関する参考資料 (案)<sup>8)</sup>において、特に厳しい凍害環境と予め指定された区間に対しては、JIS に規定された空気量の範囲の適用を除外したコンクリートが実用化されており、空気量 7%のコンクリートの有用性を評価するのも本研究の一つの目的である。比較のため、膨張材を混合しないものについては、フレッシュコンクリートの目標空気量を 4.5%と 7.0%のコンクリートも対象とした。

実験は室内試験と実機試験をそれぞれ行った。室内実験では、同表のすべてを対象とし、実機試験では、膨張材の種類を変更した記号 A1,A2,B1,B2 および膨張材を無混合とした空気量 4.5%と 7.0%を対象とした。その他は、膨張材として A1 を用いている。

その他の表中の記号は、50, 52, 56 はそれぞれ細骨材率を示しており、b, c, r は AE 剤を変更したものである。

これらを以後、それぞれに分けて記述する。

## 2.2 練混ぜおよび運搬

### (1) 室内実験

練混ぜには容量 55L の強制二軸型ミキサを使用し、練混ぜ時間は、セメントおよび表乾状態の細骨材を 30 秒間、水および混和剤を入れて 60 秒間、粗骨材を投入して 90 秒間とした。

### (2) 実機実験

コンクリートは、生コンクリート工場から出荷して、容量 4m<sup>3</sup> のアジテータ車に 3m<sup>3</sup> 積載して現場まで運搬した。練混ぜは容量 2.0 m<sup>3</sup> の強制二軸型ミキサで、1.5 m<sup>3</sup> ずつ 2 回行った。練混ぜ時間は、セメントおよび表乾状態の細骨材を 30 秒間、水および混和剤を入れて 60 秒間、粗骨材を投入して 90 秒間とした。運搬は 40 分であった。

## 2.3 打込み

### (1) 室内実験

練り混ぜ後、10 分間静置させた後に各実験供試体を採取した。室内実験では、表-3 に示す測定を行った。

圧縮強度、硬化コンクリートの空気量の測定に関しては、φ10×20 cm の鋳物製型枠、膨張率に関しては、軽量鋼製型枠を用い、JISA 1132:2014「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠して供試体を作製した。また、スケーリング実験用供試体は、スケーリング促進実験の供試体は、採取したフレッシュコンクリートを、φ153×120mm の塩化ビニルパイプの底面をコンクリートパネルで 20mm 底上げした型枠に、天馬までコンクリートを打ち込んで作製し、硬化後にパネルを外して実験に供した。打込みは、2 層に分けて行い、突き棒で 1 層 20 回締固めた。各層の締固めの後、木槌で型枠側面をたた

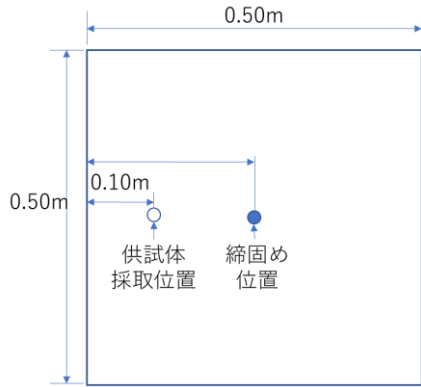


図-1 試料採取位置

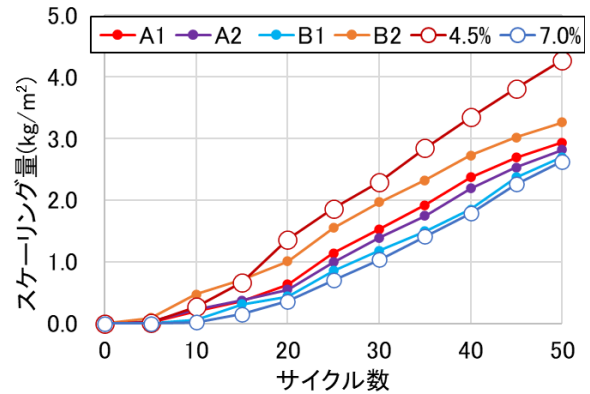


図-2 スケーリング抵抗性 (室内実験)

いて、巻込み空気を排除した。

## (2) 実機実験

現場に到着したコンクリートは受入検査を行い、スランプの許容差 $\pm 2.5\text{cm}$ 、フレッシュコンクリートの空気量の許容差 $\pm 1.0\%$ の範囲内であることを確認した後、幅 $0.5\text{m}$ 、奥行き $0.5\text{m}$ 、高さ $1\text{m}$ のコンクリートパネルで作製した模擬部材型枠に打ち込んだ。

打込み時のバイブレータの挿入位置および各実験に用いる供試体の採取位置を図-1に示す。

圧送の有無によりコンクリート中の連行空気に差が生ずる可能性があるため、本研究では、圧送の有無の別にそれぞれ型枠に投入した。

圧送無しコンクリートは、アジテータ車のシュートを模擬部材型枠に付けて打ち込んだ。コンクリートの締固めは、1層 $0.5\text{m}$ 毎に1回、断面中央に $\phi 50\text{mm}$ の棒状バイブレータにより10秒間の締固めを行った。

圧送有りのコンクリートは、アジテータ車のシュートをコンクリートが流下した後にコンクリートポンプ圧送車で圧送した。コンクリートポンプ車には、理論最大吐出量 $=160\text{ m}^3/\text{h}$ 、理論最大吐出圧 $=8.5\text{ MPa}$ のピストン式ブーム車を用いた。圧送ポンプの最高高さをなるべく大きく取り、配管の最高点は地面から $16\text{ m}$ となった。

振動締固めの方法は、圧送無しと同一とした。

実機実験においても、表-3に示す測定を行っている。

供試体の採取は、室内実験と同様に行っている。

## 2.4 実験内容

それぞれのコンクリートの試料は、スコップにより採取し、フレッシュコンクリート空気量を測定して、余分な振動が掛からないようにして締め固めて採取した。

フレッシュコンクリートの空気量の測定は空気室圧力方法 (JIS A 1128) に準拠した。

スケーリング促進実験は ASTM C 672 法に準拠した。試験面は前述の塩化ビニルパイプで作製したコンクリートの底面とし、貯水面を上部にして、 $1\text{cm}$ に塩化ナトリウム $3\%$ 水溶液を貯留して、実験に供した。塩化ビニルパ

イプはつけたまま、縁をコーキング材でシーリングした。実験条件として、凍結 $-23^\circ\text{C}$ を16時間、融解 $+10^\circ\text{C}$ を8時間のサイクルで50サイクルまで繰り返した。実験結果は、5サイクルごとに表面に剥離した残渣を採取して24時間乾燥させ質量を測定し、スケーリング供試体の表面積で除した値をスケーリング量と見なして評価した。

供試体について硬化コンクリートの空気量を求めた。硬化後のコンクリートの空気量は、研磨断面によるリニアトラパス法で行った。試験面は底面から $20\text{mm}$ 上の部分を切断して測定した。

室内実験では、コンクリートの膨張率を測定した。膨張によるコンクリート組織の粗大化やひび割れ等がスケーリング抵抗性に及ぼす影響を検討するためである。測定方法は、日本コンクリート工学会 JCI-S-009-2012「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」に準拠して行った。型枠側面の円周方向のひずみを測定するものであり、それぞれのコンクリートから3本の供試体のデータを測定した。データの取得にはデータロガーを用い、測定間隔20分毎に材齢約18日までひずみを測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 室内実験

スケーリング促進試験の結果を図-2に示す。比較のため、膨張材が無い場合の空気量 $4.5\%$ と $7.0\%$ の場合も加えている。膨張材が無いものを比較すると空気量が $7.0\%$ でスケーリング抵抗性が高い。連行空気による水圧あるいは浸透圧の緩和が効果的であることに加え、水結合材比が小さいことが主因であると考えられる。空気量 $7.0\%$ について、膨張材の種類と有無について着目すると、膨張材無混合のコンクリートのスケーリング抵抗性が高く、膨張材の種類による相違は50サイクルのスケーリング量で $0.5\text{ kg}/\text{m}^2$ 程度であった。

これらのコンクリートの材齢18日までの膨張率の推移を図-3に示す。結果は3本の平均値を示している。各

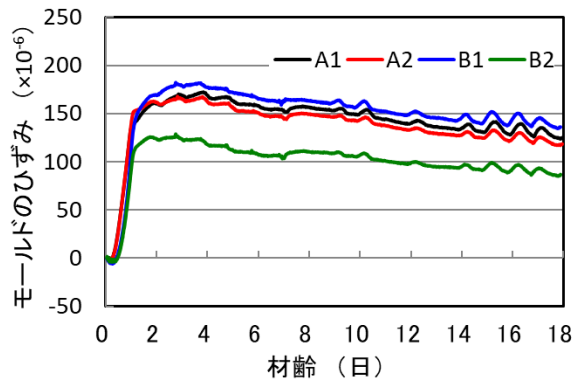


図-3 膨張率

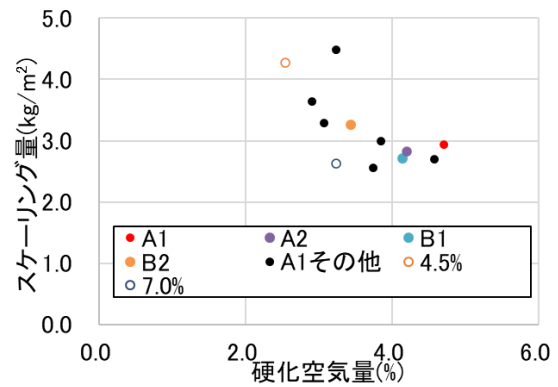


図-4 全空気量とスケーリング量の関係

表-4 各実験の実測値

記号	スケーリング量 (kg/m <sup>2</sup> )	硬化空気量(%)	100μm 空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)	膨張率 (×10 <sup>-6</sup> )
4.5%	2.05	2.5	0.23	215	-
7.0%	2.63	3.2	0.30	176	-
A1	2.93	4.7	0.39	216	126
A2	2.82	4.2	0.34	246	120
B1	2.70	4.1	0.35	221	147
B2	3.26	3.4	0.29	259	97
50	2.56	3.7	0.35	239	-
52	2.69	4.6	0.42	232	-
56	2.99	3.9	0.36	289	-
b	3.29	3.1	0.27	246	-
c	3.64	2.9	0.24	267	-
r	4.49	3.2	0.16	321	-

膨張材により、3本のばらつきに相違があり、最大で $\pm 50 \times 10^{-6}$ 、最小で $\pm 4 \times 10^{-6}$ であった。B2以外はほぼ同様な傾向を示しており、1日目で急激な膨張を示し、材齢3日程度で膨張ひずみが最大の $160 \sim 180 \times 10^{-6}$ となり、その後緩やかに低下が見られた。B2は最大値が $125 \times 10^{-6}$ 程度であり、膨張量は他と比較し小さかったが、経時変化の傾向は同様と読み取ることが出来る。

表-4は、各配合の供試体から得られた実験の実測値を示している。膨張材A1については、細骨材率とAE剤の種類を変更した実験も行っており、50、52、56、b、c、rとして同表にまとめている。数字が細骨材率、英小文字がAE剤を変更したものである。実測値には、図-2および図-3から得られるグラフの最終値の他、硬化後の $1000\mu\text{m}$ 以下の空気量（以下、全空気量）、微細な空気のみを対象とした $100\mu\text{m}$ 以下の空気量および気泡間隔係数を示している。

表-4の表中の連行空気に関連する数値あるいは膨張

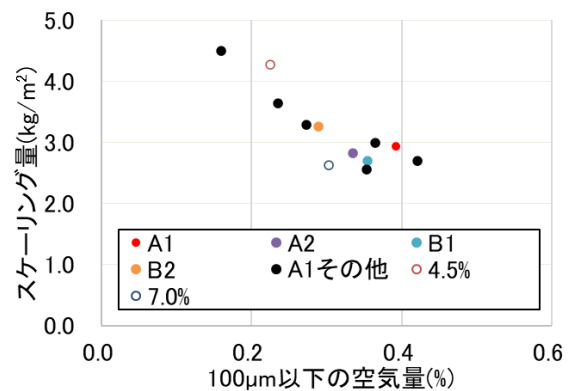


図-5 100μm以下の空気量とスケーリング量の関係

率とスケーリング量の関係を以下に示す。

図-4は、硬化後の全空気量との関係を示している。図-4において、スケーリング量と硬化後の全空気量との関係は見られるものの、総じてばらつきがある。一方で、気泡径分布の結果から、微細な空気に着目していった結果、微細な空気が多い程、スケーリング抵抗性が向上するとの結果が得られた。 $100\mu\text{m}$ 以下の空気量との関係を調べた図-5ではその関係が明瞭となり、微細な空気が多くなる程小さくなる傾向を示している。膨張材を混合しないものは白抜きであるが、これらも傾向から外れておらず、微細な空気泡の量がスケーリング抵抗性に関連しているものと考えられる。これは、気泡の表面積が大きくなり、気泡内に圧力が高まった余剰水が逃げるためと推察される<sup>9)</sup>。

図-6に気泡間隔係数との関係を示す。一般に耐凍害性の判断指標とされる気泡間隔係数でも右上がりの関係が見られたが、図-5と比較して関係は低かった。

図-7には、膨張率との関係を示す。膨張材無混合のものは膨張率を測定していないが、膨張率との関係には必要と考えられるため、膨張率0と示している。膨張率の測定結果が4点のみであるが、関係性はほとんど確認されないと行って良く、本研究の範囲で膨張材の膨張によるスケーリング抵抗性への影響はないものと評価できる。

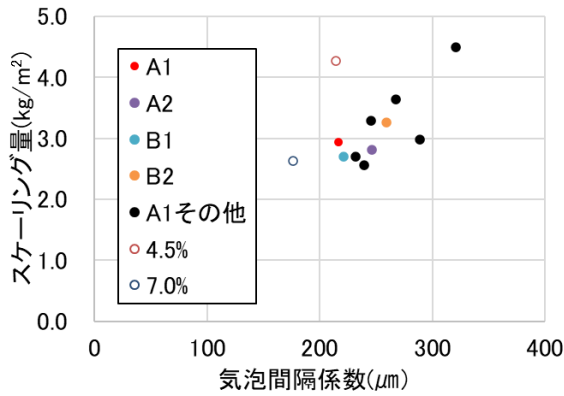


図-6 気泡間隔係数とスケーリング量の関係

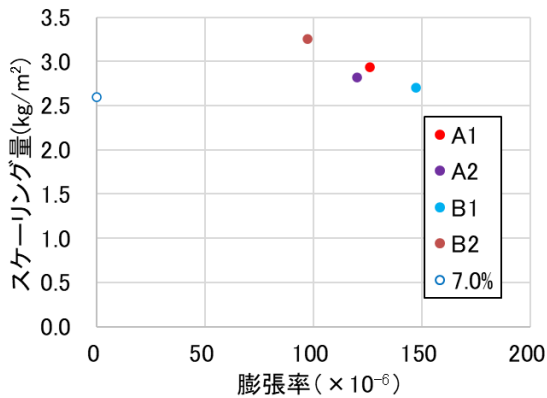


図-7 膨張率とスケーリング量の関係

### 3.2 実機実験

フレッシュコンクリートの空気量の振動締めによる変化を図-8に示す。振動締めを行った場合、空気量4.5%では、変化がほとんど見られないのに対し、本研究で対象としたその他の7%では、空気の低下が見られるものが多くあった。これまでの研究からフレッシュコンクリートの振動機により抜ける空気は、巻き込み空気が多いとの結果を得ており<sup>10)</sup>、これが原因である可能性が高いと考えられる。

図-8に対し荷卸し後に圧送を行って締め固めたフレッシュコンクリートの空気量の変化を図-9に示す。いずれの配調合の場合も圧送により著しく空気量の低下が見られ、振動締めでは変化が少ない。これらの結果は、これまでの実験の傾向<sup>9)</sup>と同様であった。

圧送前に採取したコンクリートのスケーリング実験の結果を図-10に示す。膨張材を混合しない空気量4.5%と7%を比較すると、7%でスケーリング量が少なくなる傾向が明らかである。膨張材の混合に着目すると、膨張材を混合しないものよりスケーリング量は低く抑えられていることが分かる。膨張材の使用はスケーリング抵抗性に悪影響を与えないとの室内実験の結果と対応している。

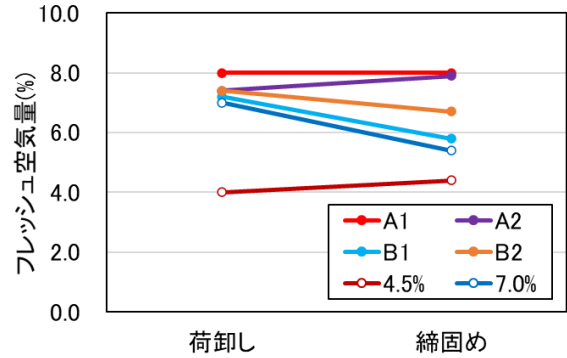


図-8 フレッシュコンクリートの空気量の変化

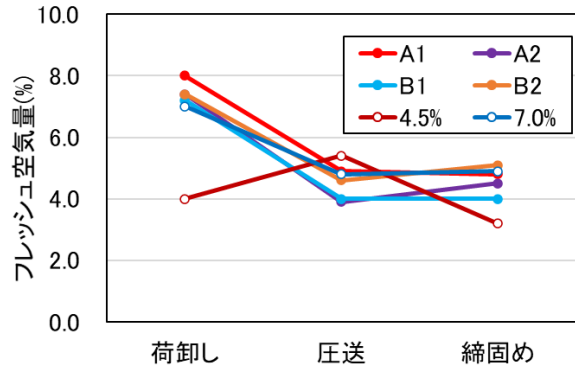


図-9 フレッシュコンクリートの空気量の変化

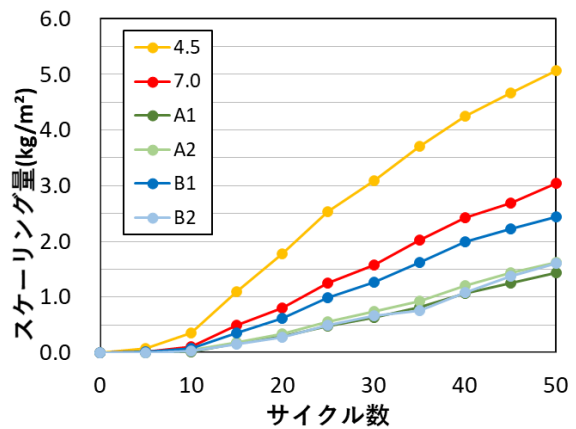


図-10 スケーリング量 (圧送前)

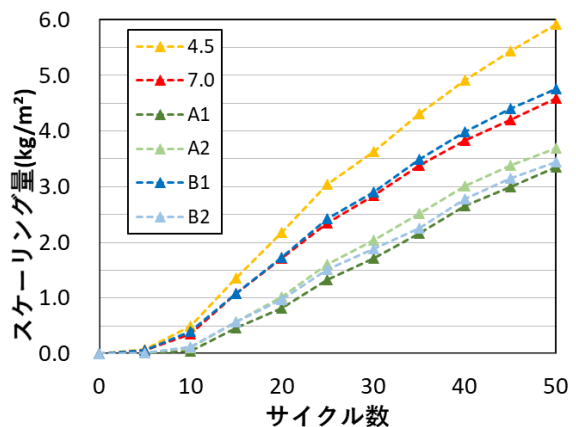


図-11 スケーリング量 (圧送後)

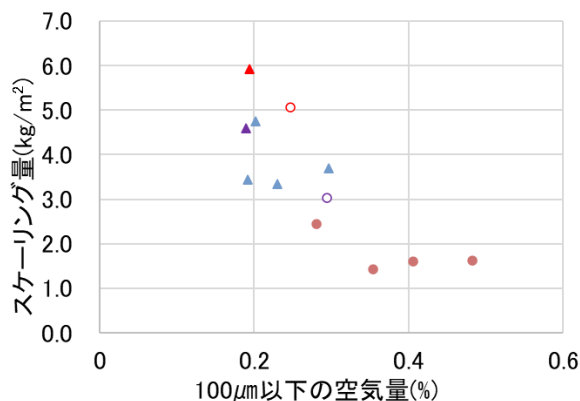


図-12 100µm以下の空気量とスケーリング量の関係

圧送後のコンクリートのスケーリング量の推移を図-11に示す。図-10と比較し、いずれのコンクリートの場合でもスケーリング量は大きくなっており、圧送の影響が顕著であることが分かる。これは、これまでの筆者らの研究<sup>11)</sup>で述べた通り、圧送の圧力により、コンクリート中の微細気泡が溶液中に溶解して、圧力が解放された後に戻らなかったことが主因と考えられる。

100µm以下の空気量とスケーリング量の関係を図-12に示す。圧送前を●、圧送後を▲で示し、膨張材無混合を白抜きとしている。両者には空気量が多くなる程、スケーリング量が少なくなる関係が認められ、微細な連行空気がスケーリング量を改善することが明らかとなった。

以上より、膨張材を混合したコンクリートのスケーリング抵抗性は、根本的には硬化コンクリートの連行空気の量によって支配され、特に微細空気が多い程、スケーリング量は少なくなることが分かった。

末筆であるが、本研究で求めたものはコンクリート自体の理想的かつ潜在的な能力であり、必ずしも構造物の耐久性とは同一でない。コンクリート構造物の品質確保を大前提とし、これらのポテンシャルを引き出す努力が必要であると考えている。

#### 4. まとめ

本研究では、膨張材を混合したコンクリートのスケーリング抵抗性について、膨張量と硬化後の空気量から検討を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 本研究の範囲で、膨張材を混合したコンクリートのスケーリング抵抗性は、混合しないものと比較して変化はなく、膨張の影響を受けない。
- (2) コンクリートのスケーリング抵抗性は、膨張材の有無に関わらず、硬化後の微細空気の量の影響を受ける。
- (3) コンクリートの圧送はコンクリートの空気量を低下させる原因となり、スケーリング抵抗性を損なわ

せる可能性がある。

謝辞：本研究は西松建設株式会社との共同研究として行ったものである。また膨張率試験については、株式会社太平洋コンサルタントから技術支援を頂いた。ここに付記して関係各位に深甚の謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局編：ひび割れ抑制のための参考資料（案）（橋脚、橋台、函渠、擁壁編），<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/170322hibiwareyokusei.pdf>, pp.5-8（閲覧日：2016年1月8日）
- 2) 国土交通省東北地方整備局編：東北地方におけるRC床版の耐久性確保の手引き（案），[http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/tebiki/taikyusei\\_honpen.pdf](http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/tebiki/taikyusei_honpen.pdf), pp.25-31（閲覧日：2016年1月8日）
- 3) 五味秀明：膨張材，pp.201-214，シーエムシー，2000
- 4) 宮口 克一，本間 一也，前島 拓，岩城 一郎：膨張材と中空微小球を併用したフライアッシュコンクリートを用いた道路橋 RC 床版供試体の収縮低減効果とスケーリング抵抗性，セメント・コンクリート論文集，Vol.71，No.12，pp.339-344，2017
- 5) 小山田哲也，赤石広秋，林大介，佐久間啓吾：トンネル覆工コンクリートのスケーリング抵抗性における連行空気の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1005-1010，2016
- 6) 小山田哲也，太田和彦，林大介，佐久間啓吾：トンネル覆工コンクリートのスケーリング抵抗性確保に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.847-852，2015
- 7) 吉田行，安中新太郎：塩化物作用下におけるスケーリング対策と評価試験法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41 No.1，pp.809-814，2019
- 8) 国土交通省東北地方整備局編：東北地方における凍害対策に関する参考資料（案），pp.18-21，2017
- 9) 樊小義，小山田哲也，羽原俊祐：スケーリング劣化に及ぼす気泡径分布の影響とその原因，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.777-782，2018
- 10) 小山田哲也，平戸謙好，山本英和：コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす施工による空気量の変化の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.803-808，2019
- 11) 田中館悠登，羽原俊祐，小山田哲也，林大介：外部からの圧力がコンクリート中の空気量に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1389-1394，2016