

論文 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

小山田 哲也*1・平戸 謙好*2・山本 英和*3

要旨: 実機によりポンプ圧送および振動締固めを施した打ち込んだコンクリートについて、スケーリング劣化への影響を確認するとともに、コンクリートからの連行空気の変化について気泡径分布の定量的な特徴を抽出し両者を比較した。コンクリートのスケーリング劣化は圧送により悪化することが判明した。この原因は、圧送によりエントレインドエアの消失によることが分かった。一方、適度な振動締固めは主にエントラップドエアを消失させるのに効果があることが確認できた。コンクリート中の空気量をあらかじめ多くすることにより、それぞれの工程を経ても、スケーリング劣化を軽減できることが分かった。

キーワード: スケーリング劣化, エントレインドエア, 空気量, 気泡径分布, 圧送, 振動締固め

1. はじめに

東日本大震災直後の2011年11月に東北地方の幹線道路224kmが事業化された¹⁾。被災地の復興の旗印として、復興道路・復興支援道路と呼ばれ着々と施工が行われ、大部分の路線が2020年度の開通に向け、終盤を迎えている。広範囲、大規模かつ迅速に行われたこれらの工事では、国土交通省東北地方整備局を中心として、コンクリート構造物の品質確保および耐久性確保に関する様々な取り組みが産官学のそれぞれの立場から行われた。

特に東北地方の道路は積雪寒冷地域を通過し、コンクリート構造物の設置環境は過酷である。冬期間に交通安全のために散布される凍結防止剤は、大半が塩化ナトリウムであり、橋梁点検の結果等から、塩害、アルカリシリカ反応等、コンクリートの早期劣化が深刻化していることが明らかとなっていた。また凍害の典型例の一つであるスケーリング劣化を助長させ、これらが複合的に作用して、コンクリート構造物の寿命を短くしており、東北では5年から20年で補修に至る橋梁が珍しくない²⁾。

国土交通省東北地方整備局では、スケーリング劣化の重大性を鑑み、道路橋等の劣化の大きな課題の一つにコンクリートのスケーリング劣化を取り上げ、東北地方整備局管内で2016年8月、9月に施工された橋脚および橋台に打ち込まれたコンクリートのスケーリング抵抗性を調査した。9現場から採取したスケーリング供試体により行ったスケーリング促進試験(ASTM C672)では、いずれのコンクリートも50サイクルで1.0 kg/m²を上回るスケーリング量となり、スケーリング抵抗性が十分でないことが分かった。また施工に伴う空気量の変化を測定したところ、圧送および振動締固めにより、コンクリー

ト中の空気量は低下し、特に圧送で損失が大きいことが明らかとなった。

これらの内容は、平成29年3月に東北地方整備局により通知された「東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)」³⁾の一部として記載されている。

このように荷受け時のフレッシュコンクリートと打ち込まれたコンクリートの連行空気では、空気量および気泡径分布に相違があることは明らかになりつつあるが、その特徴は現時点で不明であった。一方、耐凍害性確保のためには、構造物に打ち込まれたコンクリートに良質な連行空気を残す必要があることが知られており、特に微細な連行空気が耐凍害性確保には重要であると考えられているが、施工による気泡径分布の変化等についての検討例はほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、実施工における空気量の変化の検討を行うとともに、硬化コンクリートの空気量とスケーリング抵抗性の関係を検討することとした。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

使用材料および配調合を表-1、表-2に示す。セメントには、高炉セメントB種を使用した。コンクリートは一般的な橋脚あるいは橋台等を考慮して、水セメント比を55%、スランブを12cmと設定して配調合を決定した。フレッシュコンクリートの空気量は4.0%、5.5%、7.0%とした。空気量は市販のAE助剤およびAE減水剤を用いて調整した。コンクリートの単位水量は166 kg/m³で一定としており、コンクリートのワーカビリティが極端に変わることはない様に、細骨材率を調整して作製した。

*1 岩手大学 理工学部システム創生工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 岩手大学大学院 総合研究科地域創生専攻

*3 岩手大学 理工学部システム創生工学科准教授 博士(工学)

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 ³
細骨材①	S1	葛根田川水系産砂	密度 : 2.59 g/cm ³
細骨材②	S2	築川産砕砂	密度 : 2.72 g/cm ³
粗骨材①	G1	築川産碎石	密度 : 2.80 g/cm ³
粗骨材②	G2	下米内産碎石	密度 : 2.90 g/cm ³
混和剤	AE	AE 助剤	市販品
	AD	AE 減水剤	市販品

表-2 配調合条件

Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg / m ³)					
			W	C	S1	S2	G1	G2
4.0	55.0	46.0	166	302	497	348	525	544
5.5	55.0	47.0	166	302	496	348	504	522
7.0	55.0	48.0	166	302	496	347	484	501

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

Air (%)	AE 減水剤 (Cx%)	AE 剤 (Cx%)	スランプ (cm)		空気量 (%)		コンクリート温度 (°C)
			荷卸	30分	荷卸	30分	
			4.0	1.0	0.02	11.0	
5.5	1.0	0.03	12.0	12.0	5.7	4.7	23
7.0	1.0	0.04	13.5	11.0	7.7	6.7	23

その結果、空気量の増加分は、粗骨材の減量で対応した形となっている。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、前述のように参考資料 (案) 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する旨の記載があり、すでに実用されているため、検討に加えた。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。

表-3 には、これらのフレッシュコンクリートの試験結果を示している。荷卸し時の結果から見ると空気量の増加に伴いスランプが大きくなる。コンクリート中の連行空気がボールベアリングの役割を果たしていると考えられるが、空気量 7.0% では、細骨材率が高まっており、コンクリートの粘性が高まっているように観察された。スランプおよび空気量の 30 分後の変化も同表に示している。スランプはほとんど変化がない。また空気量は、

表-4 打込み条件

配調合条件	圧送条件	
	空気量 [%]	圧送無
4.0	○	○
5.5	○ / 2 種類 (締固め方法検討)	○
7.0	○	○

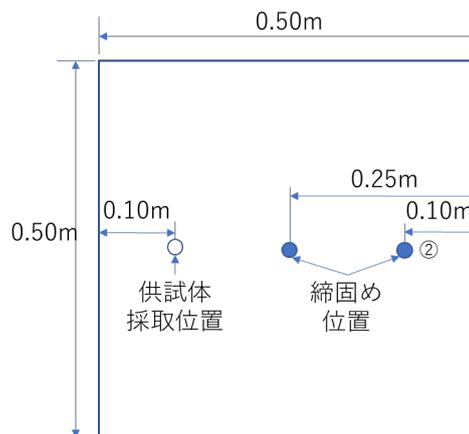


図-1 締固め位置および供試体採取位置

0.2~1.0% の損失があった。

(2) 練混ぜおよび運搬

コンクリートは、生コンクリート工場から出荷して、容量 4m³ のアジテータ車に 3m³ 積載して現場まで運搬した。練混ぜには容量 2.0 m³ の強制二軸型ミキサを使用し、1.5 m³ ずつ 2 回練り混ぜた。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。

(3) 打込み

空気量を 3 水準に設定したコンクリートについて、現場到着の受入検査を行い、スランプの許容差 ±1.5cm、フレッシュコンクリートの空気量の許容差 ±0.5% の範囲内であることを確認した後、幅 0.5m、奥行き 0.5m、高さ 1m のコンクリートパネルで作製した型枠に打ち込んだ。

打込み条件を表-4 に、パイプ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。

3 水準のコンクリートは、圧送の有無の別にそれぞれ型枠に投入した。

圧送無しのコンクリートは、型枠にアジテータ車のシュートをそのまま付けて打ち込んだ。コンクリートの締固めは、1 層 0.5 m 毎に 1 回、断面中央に φ 50 mm の棒状パイプレータにより 10 秒間の締固めを行った。

空気量 5.5% の構造体のみ、振動締固めの位置を中央か

表-5 コンクリートの実験項目

フレッシュ	スランブ (JIS A 1101 : 2005 (2011 確認))
コンクリート	空気量 (JIS A 1128 : 2005 (2011 確認))
硬化	圧縮強度 (JIS A 1108 : 2008)
コンクリート	スケールリング量 (ASTM C672 M-12)
	空気量 (面積比法)

ら型枠平面側に 10cm ずらして振動締めを行い、効果を検証することとし、この供試体およびスケールリング供試体を「5.5_無②」とした。また供試体の採取は、図-1 に示す位置とした。

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 m³/h、理論最大吐出圧=8.5 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 m となった。

振動締めの方法は、圧送無しと同一とした。

設定した空気量 3 種類と圧送の有無および振動場所の変更を合わせ、合計 7 種類のコンクリートを本研究の対象として検討を行った。

(4) 実験内容

フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの実験項目を表-5 に示す。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。

スケールリング促進試験は、ASTM C 672 法に準拠した。材齢 14 日以上経過した構造体より、打込み面から鉛直方向にφ 150mm のコアを一本採取して打込み面から深さ方向に 3 cm の位置で切断して表面側を廃棄し、内側のコンクリートについて高さ 80 mm になるように、打込み面方向から順に 3 本切断してスケールリング供試体とした。スケールリング供試体には、外周部にアルミテープを貼付し、2cm の貯水部を設置し、貯水面を上部にして、1cm に塩化ナトリウム 3%水溶液を貯留して、実験に供した。凍結融解は、凍結-23℃を 16 時間、融解+10℃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、スケールリング供試体の表面積で除した値をスケールリング量と見なして評価した。

それぞれの工程でスコープにより試料を採取し、フレッシュコンクリート空気量を測定するとともに、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、研磨断面による面積比法⁴⁾で行った。構造体より鉛直方向にスケールリング用と別のコアを採取し、打込み面から 10 cm 下の部分を切断して測定した。

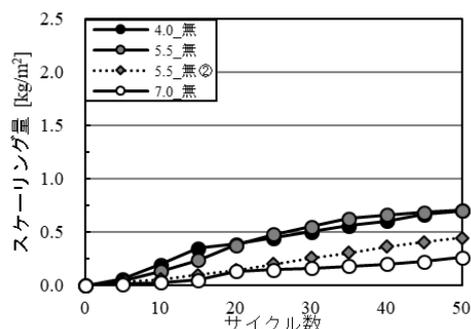


図-2 スケールリング量の推移 (圧送無)

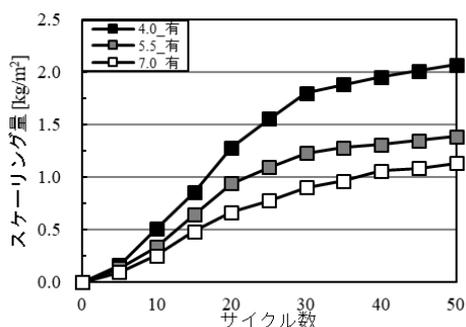


図-3 スケールリング量の推移 (圧送有)

3. 実験結果および考察

3.1 スケールリング量

図-2 には、圧送せずに型枠に打ち込んだ構造体からコアを抜いて成型した供試体のスケールリング促進試験の結果を表している。図中の凡例は空気量_圧送の有無を示しており、結果は累積値で示している。圧送なしの場合、本実験の範囲では、空気量 7%まで空気量が多くなる程スケールリング量は少なくなる傾向があり、これまでの筆者らの研究結果⁵⁾と同様の傾向であると確認できた。スケールリングの評価は、ASTM C672 に示されている基準を参考にした。スケールリングのレーティングは 0 から 5 までの 5 段階で評価される。この評価で「軽微 (極少量と中程度の中間)」が「2」である。このスケールリング量は、既往の研究により 0.5 kg/m²程度と想定されるが⁶⁾、空気量 7%であれば、この値を下回る良好な結果となった。したがってコンクリートの空気量が 7%は JIS の規定範囲を超えているものの、一義的にスケールリング劣化が懸念されるコンクリートの場合には、耐久性確保の観点から有効な手段であると考えられる。

図中の凡例 5.5_無②は、振動締めが届かない範囲から採取したコンクリートのスケールリング量を示している。パイプレータの影響範囲内の 5.5_無と比較して、スケールリング量は少なくなっている。この点については、気泡径分布との相関を後述する。

図-3 には、圧送した場合のコンクリートのスケールリング量の推移を示している。圧送を行った場合、図-2 の圧

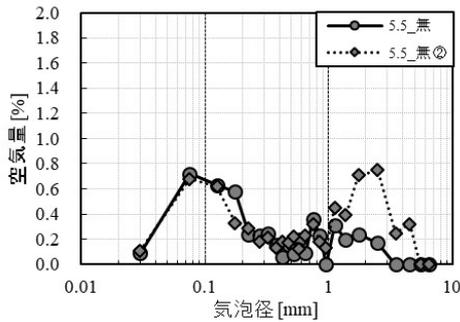


図-4 気泡径分布（締固め有無）

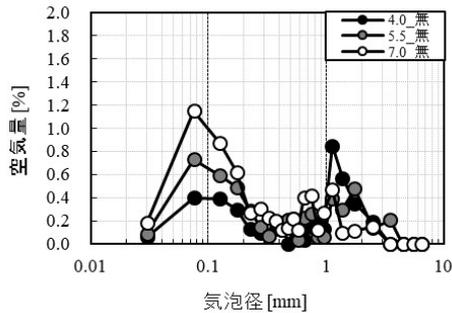


図-5 気泡径分布（振動締固め前）

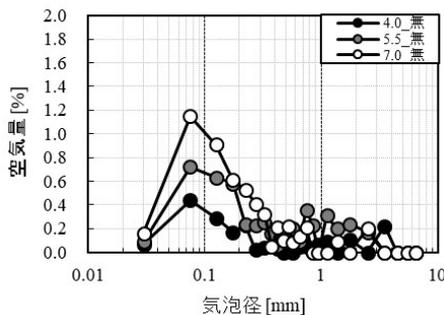


図-6 気泡径分布（振動締固め後）

送無しの場合より明らかにスケーリング量が多くなるすなわち圧送によりスケーリング抵抗性が低下することが分かった。また、空気量に着目すると、圧送無しと同様に圧送前の空気量が多い程、スケーリング量は少なくなっている。

このようにコンクリート中の空気量の相違と圧送の有無により、コンクリートのスケーリング量は異なると言える。そこで本研究では、硬化コンクリートの気泡径分布を基にして、それらの原因を解釈しようとした。

3.2 気泡径分布

(1) 圧送無し

図-4 は、空気量 5.5% で圧送無しのコンクリートの振動締固めの影響を確認したものである。影響範囲外のコンクリートコアから測定した気泡径分布は図-2 同様、凡例に②をつけている。相対的に見ると、振動締固めの有無により大きく異なるのは 1mm 以上の気泡である。一般的にこの領域の空気はエントラップドエアと呼ばれ、

打込み時に巻き込まれた気泡である。したがって、適切な振動締固めは、このエントラップドエアを除去するのに有効であると言える。図-2 において、5.5_無②は、5.5_無と比較して、スケーリング抵抗性が高かった。十分に打ち込まれたコンクリートに振動締固めをかけた場合、ブリーディングが発生する。これが抵抗性に負の効果をもたらした可能性がある。

図-5 には、型枠にシュートで直接打ち込んで振動締固めを行う前に採取したコンクリートの硬化後の気泡径分布を示している。空気量の別に見ると、いずれの場合も直径 0.3mm 以下と直径 1mm 以上に分布が偏る傾向にあり、使用した AE 剤は、0.3mm 以下のエントレインドエアが混入する特徴があることが分かる。一方、1mm 以上の空気はエントラップドエアであると考えられる。空気量を多くした場合に 0.1mm 付近のエントレインドエアの量が増えるのは、AE 剤の量を増やして空気量を多くしたことに対応しており、予定通りの結果となっている。

図-6 には図-5 に対して振動締固めのみを施した場合の気泡径分布を示している。図-5 と比較して、エントレインドエアにはほとんど変化がなく、一方、エントラップドエアは確実に低減していることが分かった。したがって、図-4 に示したように、適度な振動締固めはエントラップドエアを減らす効果が卓越すると言える。

図-7 は、圧送前にアジテータ車のシュートから排出したコンクリートから採取した供試体の硬化後の気泡径分布を示している。工程は図-5 と同様であるが、実験上、図-5 の実験の後にコンクリートを採取しており、図-5 と比較して空気量 7% のエントレインドエアが少ない傾向があり原因は不明であるが、それ以外は総体的に同様の傾向がある。

このコンクリートをポンプ圧送して採取した供試体の気泡径分布を図-8 に示す。粗大な空気も若干低下は見られるが、特にエントレインドエアの低下が著しい。圧送したコンクリート中の気泡は、外圧が高く作用した場合に、内圧が均衡して気泡を守るが、気泡径が 20 μ m 以下になると、気泡径が小さくなるにつれ内圧が急になり、内外圧の均衡が崩れて気泡自体がコンクリート中の液体に溶解した^{7),8)}結果であると考えられる。

図-9 には圧送後に締固めたコンクリートの硬化後の気泡径分布を示している。図-8 と比較して圧送後に振動締固めを行った場合、全体的に空気量は低下する傾向にあった。気泡径の別に見ると、0.3mm 以下のエントレインドエアの量には、若干の低下が見られる一方で、1mm 以上のエントラップドエアは確実に少なくなっていることが分かる。

以上を総合して判断すると、適度な振動締固めでは、1mm 以上のエントラップドエアが消失し、圧送を受ける

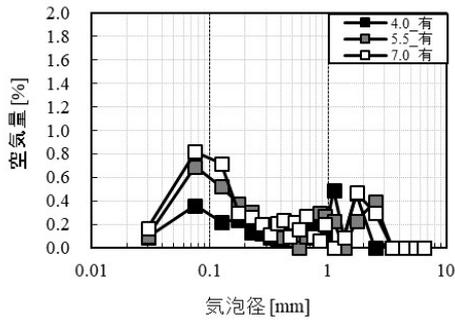


図-7 気泡径分布 (圧送前)

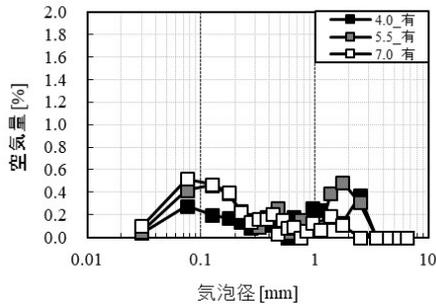


図-8 気泡径分布 (圧送後)

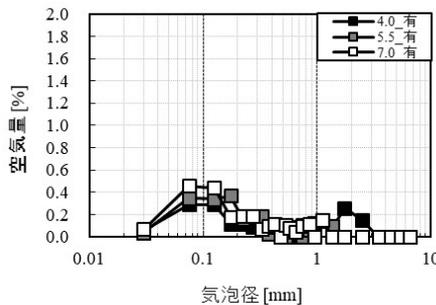


図-9 気泡径分布 (圧送および締固め後)

ことにより 0.3mm 以下のエントレインドエアが消失すると考えられる。

3.1 において圧送により悪化したスケーリング抵抗性は、このエントレインドエアの消失が原因である可能性があり、本研究では次にスケーリング劣化に及ぼす気泡径分布の影響を検証することとした。

3.3 スケーリング量と気泡径分布の関係

硬化後の全空気量とスケーリング量の関係を図-10 に示す。図中の凡例は、□が圧送および振動締固めを施した場合、○が振動締固めのみを行った場合である。

図-10 では、2.0%付近の空気量の範囲で、スケーリング量が大きく変化するが、空気量の変化がほとんどなく、発散した状態で全体的な相関は伺えない。図-4 から図-9 において検討したすべてを俯瞰すると、本研究で確認された硬化後の気泡は 5mm 以下であり、特に 1.5mm 以下が多い。

そこでエントレインドエアに着目するため 150 μ m 以下の空気量とスケーリング量との関係を検討した。結果

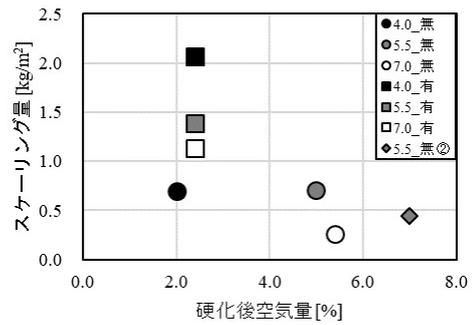


図-10 硬化後の全空気量とスケーリング量の関係

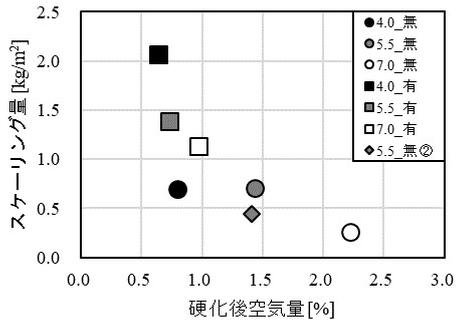


図-11 150 μ m 以下の空気量とスケーリング量の関係

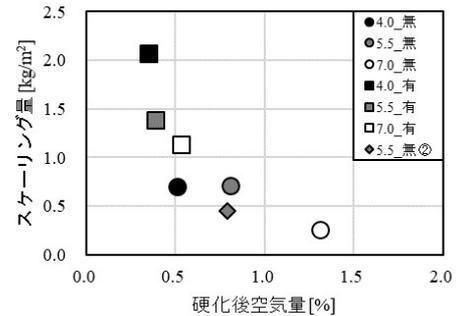


図-12 100 μ m 以下の空気量とスケーリング量の関係

を図-11 に示す。150 μ m 以下の空気量で考えると、硬化後の空気量が多い程、コンクリートのスケーリング量が少なく、一定の関係があることが分かった。また、圧送の有無には関わらず、硬化後の空気量との相関があることも分かった。単に硬化コンクリートの空気量でなく、微細な空気泡がスケーリング抵抗性を高める効果を発揮すると言える。

さらに小さな気泡について着目するため、100 μ m 以下の空気量とスケーリング量との関係を検討したが、図-12 である。図-11 と比較し、両者の関係はさらに鮮明になったと言える。

一般に凍害は、気泡間隔係数との関係が深いと言われている。気泡間隔係数とスケーリング量との関係を図-13 に示す。気泡間隔係数が大きい程、スケーリング量が大きくなる正の相関があった。これまでの筆者らの研究⁹⁾では、気泡間隔係数では解釈できない例があり、80 μ m 以下の空気量とスケーリング量との関係の方が良好であるとの結果を報告した。本実験では、同一の AE 剤で空

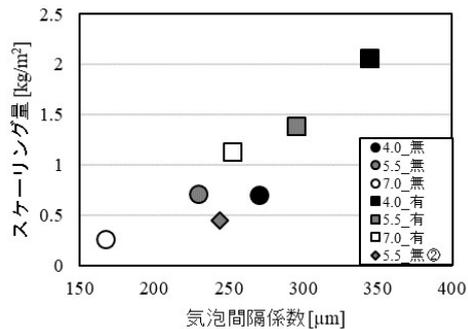


図-13 気泡間隔係数とスケーリング量の関係

気量を変更して配調合設計を行っており、気泡径分布に代表されるような気泡の諸性質が同様であったことが原因であると考えられ、この点に言及するには、更なる検討が必要になる。

微細な連行空気がスケーリング抵抗性に寄与するのは、微細な気泡程同一体積において気泡の表面積が大きく、水圧説で述べられるように、凍結圧により毛細管空隙中の未凍結水に発生する水圧の排出口の面積が大きくなるのが原因であると推察される。

以上より、コンクリートの空気量とその気泡径分布は施工による影響を受け、特に圧送および振動締固めにより消失する気泡径は特徴づけられることが分かった。

また検討したコンクリートの中では、空気量 7%のスケーリング量が最も少なく、その原因は圧送・振動締固めしても適切な量と分布の連行空気が残ったことが原因であると考えられる。

このように圧送に関する連行空気の影響は、程度の差はあるものの他の現場でも多数確認されており、コンクリートのスケーリング抵抗性を考える上で重大な課題であり、今後広範に検討すべきと考えている。

4. まとめ

本研究では、施工工程によるコンクリートのスケーリング劣化への影響を確認するとともに、コンクリートからの連行空気の消失について気泡径分布の測定結果から定量的な特徴を抽出して両者を比較した。得られた結果は以下のように整理できる。

- (1) 圧送によってコンクリートの空気量は全体的に低下するが、AE 剤による微細な連行空気、すなわちエントレインドエアが多く消失することが分かった。
- (2) 振動締固めによる気泡径分布の変化は、気泡径の大きなエントラップドエアの現象に特徴があることが分かった。
- (3) フレッシュコンクリートの空気量を 4%、5.5%およ

び 7%のスケーリング抵抗性を評価した結果、圧送や振動締固め等、同一の施工をした場合には、空気量が多い程、スケーリング抵抗性が高いことが分かった。

- (4) 気泡径分布とスケーリング抵抗性の関係を検討した結果、微細な空気が多い程、スケーリング抵抗性は高くなるものと考えられた。
- (5) 本研究の範囲でコンクリートのスケーリング量が最も少ないのは空気量が 7%の場合であった。

謝辞

本研究は鹿島建設(株)と共同で行ったものである。ここに付記して関係の皆様へ深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 3.11 復興道路・復興支援道路情報サイト 復興道路の概要：
<http://www.thr.mlit.go.jp/road/fukkou/content/summary/index.html> (閲覧日：2019年1月14日)
- 2) 東北地方整備局編：コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)橋脚、橋台、函渠、擁壁編，p.1, 2015
- 3) 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
- 4) 西山孝，前川慎喜，日下部吉彦，中野錦一：シアノアクリレートによる硬化コンクリート中の気泡組織の染色と観察，セメント技術年報，No.42，pp.212-214, 1988
- 5) 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，pp. 847-852, 2015
- 6) 月永洋一，庄谷征美，笠井芳夫：凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.8，No.1，pp. 121-132, 1997
- 7) 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，pp. 1389-1394, 2016
- 8) 服部健一，セメント化学雑論【17】：洗剤の泡とコンクリートの泡，セメント・コンクリート，No.412，pp.42-48, 1981.6
- 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，pp. 777-782, 2018