

# 論文 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

小山田 哲也\*1・太田 和彦\*2・林 大介\*3・佐久間 啓吾\*4

**要旨:** 復興支援道路の1路線である宮古盛岡横断道路の新区界トンネルのスケーリング抵抗性を確保するため、覆工コンクリートの空気量を硬化後に4.5%以上確保する対策を検討した。スケーリング抵抗性確保には、空気泡の質が内部ひび割れ以上に重要であり、混和剤メーカーを3社選定して検討した結果、いずれの混和剤も生コンクリート工場の従来配合で空気量を4.5%とするには、フレッシュコンクリートの空気量が9%必要であることから、配合の修正が必要であることが分かった。また実機実験により施工による空気量の低下を検討したところ、ポンプ圧送と振動締固めにおいて、空気の散逸が顕著であることが分かった。

**キーワード:** スケーリング抵抗性, AE 剤, 空気量, 覆工コンクリート

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災により、東北地方の道路整備の重要性が再認識され、同年11月21日の第三次補正予算で三陸沿岸道路(三陸縦貫自動車道、三陸北縦貫道路、八戸・久慈自動車道)が「復興道路」として、また、宮古盛岡横断道路(宮古～盛岡)、東北横断自動車道釜石秋田線(釜石～花巻)、東北中央自動車道(相馬～福島)が「復興支援道路」として、整備が進められることとなった<sup>1)</sup>。

なりわいの早期復興を実現するため、短期間で数多くの構造物が計画・施工されており、そのスピード感はいままでとは一線を画する。このような施工をした場合、万が一構造物の劣化が発覚すると、同様の設計・思想で施工した他の構造物でも劣化が発生する可能性があり、その経済的・時間的影響は甚大であることは想像に難くない。国土交通省東北地方整備局では、これらのコンクリート構造物は耐久性を熟慮して構築しなければならないと考えており、各現場ではコンクリートの品質をより良いものとするため、施工状況把握チェックシートや目視評価、養生方法の検討など、様々な取組みがなされている<sup>2)</sup>。

一方、東北地方は積雪寒冷地が多く、計画や施工の段階で、耐凍害性を考慮する必要がある。特に宮古盛岡横断道路は、宮古市区界周辺に凍害危険度が4の地域を持つ。凍害危険度<sup>3)</sup>とは、外気温や日射、風速、積雪および降雨を因子に加えて凍害危険度を算出し、1から5までの5段階にグレード分けした値であり、この値の4とは凍害の予想程度が大きいことを示す。この道路は山間地を通過し、トンネルと橋梁を多く採用する予定である。したがってコンクリートの凍害対策はこの道路の生命線

であり、劣化対策は必須である。

宮古盛岡横断道路の計画路線に隣接する国道106号線区界トンネルの坑門工の現状を図-1に示す。凍害が原因と見られるコンクリートの剥離が現れており、補修跡も見られるが、根本的な解決には至っていない。このトンネルは昭和50年に完成したものであり、劣化時期は不明であるが、従前の技術では、短時間でこのようになる可能性も十分にある。

さらに近年、積雪寒冷地域の交通安全の確保を目的として凍結防止剤が散布され、これが原因とされるスケーリング劣化が深刻な問題となっている。宮古盛岡横断道路は地域高規格道路であり、コンクリートの剥離・剥落は重大な事故に繋がる可能性もある。筆者らのこれまでの研究により、気泡間隔係数を従来の耐凍害性の目安と考えられている200 $\mu\text{m}$ 以下より小さくしてもスケーリング劣化が発生し、内部ひび割れ以上にコンクリートの配合や空気の質に注意しなければならないことが明らかになってきているが<sup>4)</sup>、根本的な対策には至っていない。

このような背景のもと、平成26年5月29日に産官学で構成される「耐凍害トンネル覆工コンクリートの施工



図-1 区界トンネルの坑口の現状

\*1 岩手大学 工学部社会環境工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 国土交通省東北地方整備局 岩手河川国道事務所 調査第二課 建設監督官

\*3 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*4 鹿島建設(株) 宮古盛岡横断道路新区界トンネル工事 鹿島・東急特定建設工事共同企業体 次長

に関する打合せ会」が発足した。検討の対象は全長4,998mの宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事である。これまでの東北地方整備局が実施した調査結果から、トンネルの中でも坑口から約100mの区間には、コンクリートに凍結防止剤が付着あるいは浸透し、スケーリング劣化の可能性が高いことが分かっている。

そこで国土交通省東北地方整備局から当該トンネルの施工に対して示された発注時の特記仕様書には、「本工事は、凍害対策として硬化コンクリート中に概ね4.5%以上の空気量を確保する事を目的に、材料、配合、運搬、打込み、締固め、養生を行う試行工事である。」と明記されている。当該トンネルにおいては坑口から約100mの区間で耐凍害性を考慮した覆工コンクリートが求められたのである。

この仕様書は空気量を確保することで、内部ひび割れもさることながらスケーリング劣化に対する対策を講じようとの意図を示している。このように硬化コンクリートの空気量を仕様書で大きく設定し、硬化コンクリートの空気量を実構造物レベルで確認した結果を公表している例はない。

そこで本研究では、従来の配合や施工方法による覆工コンクリートの空気量確保の方策を検討し、スケーリング抵抗性を満足するコンクリートを得ようとした。

## 2. 実験概要

本研究は室内実験で配合およびスケーリング抵抗性を確認した後、実機で練り混ぜて現場に運搬して、各工程における空気量の変化を把握した。

### 2.1 室内実験

#### (1) 使用材料および配合

使用材料を表-1に示す。なお以後の図表中には表中の略記号を用いている。スランプおよび空気量は、AE減水剤（高機能タイプ）とAE助剤で調整した。使用する混和剤により、気泡径分布等の空気泡の特徴が異なることが予想されたため、混和剤メーカーを3社選定し、同社のものを組み合わせて使用した。

配合を表-2に示す。基準となる配合は、当該工事に出荷することが決定している生コンクリート工場の27-15-20-BBであり、呼び強度27N/mm<sup>2</sup>はフレッシュコンクリートの空気量が4.5%で達成される。本研究ではこれに倣い、水セメント比は53.3%とした。本研究で対象とするのは、硬化後の空気量で4.5%のコンクリートであるが、フレッシュコンクリートの空気量の設定値が特定できない。そこでフレッシュコンクリートの目標空気量を5.0、7.0および9.0%として、実測することとした。それぞれの目標空気量に対する許容範囲は±0.5%とした。配合上、フレッシュコンクリートの空気量の4.5%からの

表-1 使用材料

材料(略記号)	備考
セメント (C)	高炉セメント B 種 (密度: 3.04g/cm <sup>3</sup> )
細骨材 (S1)	紫波町地内産陸砂 (表乾密度: 2.54g/cm <sup>3</sup> , FM: 2.85, 吸水率: 2.92%)
細骨材 (S2)	紫波町赤沢産砕砂 (表乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> , FM: 2.95, 吸水率: 0.55%)
粗骨材 (G)	盛岡市黒川産砕石 (最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.94g/cm <sup>3</sup> , FM: 2.85, 吸水率: 0.65%, 実積率 58.0%)
AE 減水剤 (AD)	A 社: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	B 社: リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物
	C 社: 変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体
AE 助剤 (AE)	A 社: 変性ロジン酸化合物
	B 社: 変性ロジン酸化合物
	C 社: アルキルリン酸エステル系

表-2 配合

W/C	Air	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S1	S2	G	AD
%	%	%						
53.3	4.5	48.2	168	316	417	437	1041	3.16

表-3 コンクリートの実験項目

フレッシュ	スランプ (JIS A 1101)
	空気量とその経時変化 (JIS A 1128)
硬化	圧縮強度 (JIS A 1108)
	スケーリング量 (ASTM C672)
	空気量 (面積比法)

増分は、外割換算とした。以上より、空気量3水準とメーカー3社をそれぞれ組み合わせ、合計で9種類を実験の対象とした。

#### (2) 練混ぜ

コンクリートの練混ぜには50Lのパン型ミキサを使用した。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。

#### (3) 実験内容

フレッシュコンクリートの実験項目を表-3に示す。

空気量の散逸の状況を把握するため、空気量の経時変化を測定した。空気量の測定は空気室圧力方法 (JIS A 1128) に準拠して行った。経時変化は、15分ごとに90

分まで測定した。測定したコンクリートは、練混ぜ後に練板上に静置した条件、バイブレータによる振動締固めを行った条件の2種類である。バイブレータによる締固めは、以下の通り行った。コンクリートは、練混ぜ直後に7.5Lずつ底盤をつけた内径153mm塩化ビニルパイプに均等に取り分けた。分取して直ちにφ40mmの棒状バイブレータでコンクリートの締固めを10秒間行い、空気量の測定まで静置した。

硬化コンクリートの実験項目も表-3に示している。

スケーリング抵抗性は、ASTM C672に準拠して行った。供試体は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、天端までコンクリートを打ち込んで作製した。その後1日間湿空養生し、コンクリートパネルを除去して27日間水中養生した。材齢28日でスケーリング促進実験を開始した。測定面は打込み底面であり、塩化ビニルパイプをそのまま利用して3%塩化ナトリウム水溶液を貯留した。コンクリートの隅角部の劣化を抑制する様、パイプとの境には、シリコンコーキングを施した。水溶液の高さは1cmである。この供試体を-20℃の業務用冷凍庫内に12時間放置して凍結させ、12時間20℃の室内で融解させた。これを1サイクルとし、50サイクルまで凍結融解繰り返しを与えた。スケーリング量の測定は5サイクルごとに行った。スケーリング量は、供試体の表面に剥離片の浮きがないようにブラシで掻いて採取し、5Bのろ紙で溶液と分離した後、105℃の乾燥炉で定量となるまで乾燥させてその質量により求めた。すべての条件で供試体は3個使用し、結果はそれぞれの平均値を用いた。

硬化後のコンクリートの空気量は、研磨断面による画像解析手法により測定した。モルタル切断面上に蛍光塗料を塗布して硬化させた後、表面を研磨することで発光部すなわち蛍光塗料の残った空隙とその他の部分を画像解析により2値化してモルタル中に含まれる空気泡の数およびその径の分布を求めた。画像解析は面積比法<sup>5)</sup>で行った。この方法では切断面上の気泡径分布が得られる。供試体は、φ10×20cm円柱の底面から2cmの位置であり、切断して得た。測定範囲は50×50mmとし、625枚の画像を取得して解析した。

## 2.2 実機実験

### (1) 使用材料および配合

使用材料は2.1と同一である。配合は、2.1で設定したコンクリートの内、フレッシュコンクリートの空気量で7%のものを用いた。空気量7%はコンクリート標準示方書で基準とされる上限値であり、これを基準とした場合、7%以上の空気量となる可能性もある。これは前述の「耐凍害トンネル覆工コンクリートの施行に関する打合せ会」において議論し、空気量を確保してスケーリン

グ抵抗性を向上させたいとの合意に基づいている。

混和剤は、室内実験と同様の3社のAE減水剤およびAE助剤とした。

### (2) 練混ぜ、運搬および打込み

練混ぜは実際に出荷が想定されている生コンクリート工場で行った。ミキサは1.75m<sup>3</sup>の強制二次軸型ミキサであり、練混ぜを3回に分けて行い、それらの量を1.5、1.25、1.25m<sup>3</sup>とした。

工場から現場までは4m<sup>3</sup>積のアジテータ車で運搬した。運搬時間は約40分である。現場到着後にアジテータ車から荷卸しし、一般的なブームを装備した圧送車でコンクリートをポンプ圧送して、所要の現場型枠に打ち込んだ。コンクリートの締固めにはφ50mmの棒状バイブレータを用い、50cmごとに5秒間締め固めた。

### (3) 実験内容

実機実験では、各工程における空気量の変化を把握しようとした。着目したのは、工場出荷、荷卸し時、圧送および締固めの際の変化である。それぞれの工程が終了した後、直ちにコンクリートを取り出してフレッシュコンクリートの空気量を測定した。バイブレータにより締め固めた後のコンクリートは、スコープで採取した。各工程でのフレッシュコンクリートの空気量は、JIS A 1128に従い、突き棒とハンマーを使用して打ち込んだ後に測定した。

それぞれの工程で硬化コンクリートの空気量も求めている。供試体および測定方法は2.1と同様とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 室内実験

フレッシュコンクリートの実験結果を表-4に示す。AE減水剤とAE助剤をそれぞれ調整して、スランプは15±1cm、空気量はそれぞれの目標値に対し、±0.5%に収まっている。A社の空気量5.0%が例外であるが、AE助剤量が極端に少ない状態であり、すべての供試体でAE助剤を添加したいとの意図から採用した。

空気量5%の場合のコンクリートのワーカビリティと比較し、空気量が多いほど軟らかいように感じられたが、材料分離を伴うことなく打ち込むことができた。

練混ぜ後、測定時間まで静置したフレッシュコンクリートの空気量の経時変化を図-2に示す。練混ぜ直後の空気量は、7%および9%である。いずれの混和剤でも練混ぜ直後から90分までに空気量の低下が見られる。メーカー別に注目すると、空気量7%および9%で空気量の低下の傾向は同社のものはほぼ同様であることが分かった。

練混ぜ直後に振動を与えたコンクリートの空気量の変化を図-3に示す。振動締固めをした後測定の準備を行ったため、15分後から測定している。練混ぜ直後に9%あ

表-4 フレッシュコンクリートの実験結果

	AD (C×%)	AE (C×%)	SL (cm)	Air (%)	温度 (℃)
A社	0.90	0.002	15.0	5.7	24.5
	0.75	0.003	14.5	6.8	24.4
	0.85	0.005	16.0	9.2	24.0
B社	0.90	0.007	15.5	5.0	24.4
	0.85	0.010	15.0	6.6	24.2
	0.80	0.020	15.0	9.0	24.6
C社	0.80	0.005	14.0	5.0	24.1
	0.80	0.010	16.0	7.5	24.4
	0.80	0.015	15.0	9.0	24.1

った空気量が振動によりそれぞれの混和剤で低下し、15分後には2社のもので7%の場合とほぼ同様の空気量となっている。特筆すべきは15分以降の変化であり、7%の空気量のコンクリートと同様な傾向を示している。他の1社も変化は同様であった。すなわち振動締固めによりコンクリートの空気量が散逸する場合、振動時に低下した後の空気の抜けは最初から静置したものと変わらないといえる。この空気の散逸はコンクリートの硬化とともに遅くなり、凝結後に収まるものと考えられる。

硬化後のコンクリートの空気量は、前述の通り、面積比法により測定した。本研究で検討した面積比法は、取得した画像から着色して発光している空隙のみを抽出し、空隙の円形度により、空気泡であるか選別する。円形度は、気泡面積をその気泡の外接円の面積で除して計算され、1が真円である。すなわち円形度は、空気泡とその他の空隙の閾値を決定する重要な設定値となる。本研究では、6つの供試体を用いて、目視によるリニアトラバース法により空気量を測定した結果を正值として、円形度を段階的に変化させて面積比法で空気量を求め、両者が近似する円形度をそれぞれの供試体で求め、その平均値を用いてすべての測定を行った。円形度により硬化後の空気量は大きく異なるものもあるが、検討する供試体あるいは全体的な傾向に影響はないものと判断した。測定結果を表-5に示す。円形度が大きくなるほど面積比法による空気量は減少する。表にはリニアトラバース法から得られた空気量と同等となる空気量を網掛けしており、それぞれの値は、供試体により異なる。本研究では、これらを平均し、以後の円形度を0.54として実験を進めた。

練混ぜ直後に採取して静置したコンクリートの空気量を表-6に示す。フレッシュコンクリートと比較し、硬化コンクリートの空気量は少ない。ただし気泡間隔係数は凍結融解抵抗性を確保できる目安といわれている250μmあるいは200μmよりいずれも小さい。筆者らのこれまで

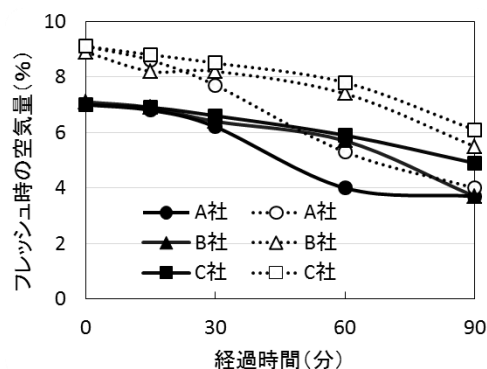


図-2 フレッシュコンクリートの空気量の変化（静置）

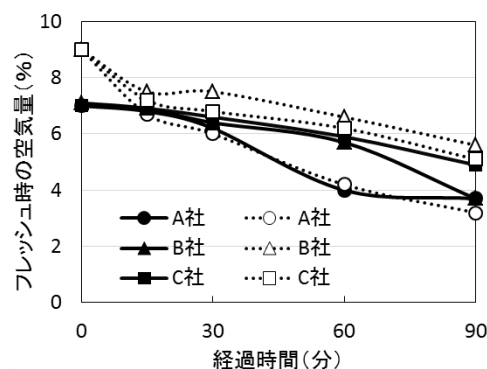


図-3 フレッシュコンクリートの空気量の変化（振動）

表-5 フレッシュコンクリートの実験結果

	リニアトラバース	面積比法	
	空気量(%)	円形度	空気量(%)
A社 室内実験	5.0	0.50	4.4
		0.48	4.9
B社 室内実験	4.3	0.50	4.1
		0.48	4.3
C社 室内実験	4.5	0.52	4.4
		0.51	4.6
A社 実機実験	2.1	0.62	2.2
		0.57	2.6
B社 実機実験	2.8	0.60	2.6
		0.57	2.7
C社 実機実験	1.9	0.60	2.0
		0.57	2.4

の検討<sup>4)</sup>において、200μm以下の気泡間隔係数であってもスケールが顕著に生ずる場合があることが認められている。また、配合やスランプ等の諸条件によってもスケール抵抗性の確保に必要な空気量あるいは気泡間隔係数は異なる可能性はある。

またフレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空

表-6 コンクリートの空気量と圧縮強度

	空気量(%)		気泡間隔係数(μm)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		
	フレッシュ	硬化		7日	28日	91日
A社	5.7	2.6	134	21.3	33.8	43.1
	6.8	3.3	153	22.2	32.4	38.8
	9.2	4.1	143	16.7	27.1	32.3
B社	5.0	2.6	180	21.9	34.3	42.0
	6.6	3.2	170	19.7	32.6	41.1
	9.0	3.7	131	15.8	25.6	33.4
C社	5.0	3.3	150	21.6	35.9	44.5
	7.5	3.7	165	17.6	29.0	38.4
	9.0	4.0	150	15.8	25.9	33.6

表-7 空気量の変化

		フレッシュ空気量(%)	硬化空気量(%)	気泡間隔係数(μm)
A社	工場出発	6.5	3.4	174
	荷卸し時	5.6	3.3	186
	筒先	4.8	2.3	206
	締固め完了	4.0	3.1	176
	荷卸し+30分	6.3	2.8	186
B社	工場出発	7.3	4.1	174
	荷卸し時	8.4	3.5	153
	筒先	5.8	3.2	154
	締固め完了	5.5	3.2	140
	荷卸し+30分	7.8	3.2	130
C社	工場出発	6.4	3.3	187
	荷卸し時	6.6	3.4	174
	筒先	4.8	3.1	160
	締固め完了	4.2	2.6	182
	荷卸し+30分	6.6	2.9	145

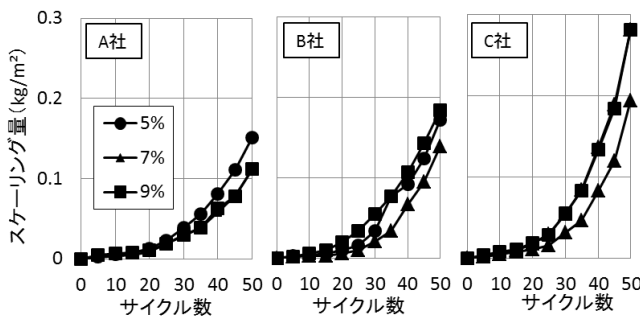


図-4 スケーリング量の推移

気量は、混和剤メーカーの別に関わらず一定の関係が認められ、フレッシュコンクリートの空気量の約半分が散逸している。これまでに坂田らはコンクリートの気泡組織と耐凍害性に関する検討を行い、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートを193ケース比較し、その差の平均値は1%程度であるデータを提示している<sup>6)</sup>。これらの研究と異なるのは、本研究ではトンネルの覆工コンクリートのみを対象としている点であり、水セメント比が高く、スランプが大きい。

圧縮強度の測定結果を表-6に示す。硬化後の空気量が4.5%必要であれば、フレッシュコンクリートの空気量は9%となる。空気量9%を目標値とすれば、コンクリート標準示方書の空気量の標準範囲を大きく逸脱し、施工実績もない。

スケーリング促進試験の結果を図-4に示す。空気量を3段階にしたコンクリートの実験結果は、いずれの混和剤でもフレッシュコンクリートの空気量で7%<9%<5%の順となる。本研究の結果は、自動車専用道の覆工コンクリートへ適用されるため、剥離・剥落を極力避けなければならない。したがって、この中で最もスケーリング量の少ない7%を採用して、実機実験を行った。

### 3.2 実機実験

実機実験の空気量の測定結果を表-7に示す。3社の混

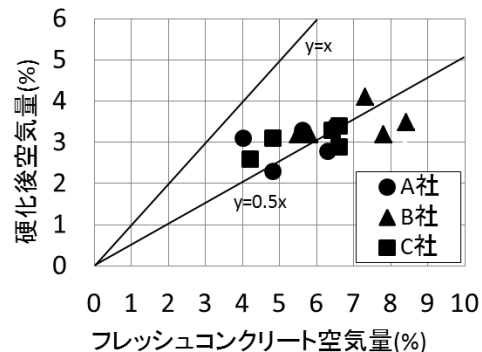


図-5 フレッシュと硬化コンクリートの空気量の関係

和剤を使用したコンクリートについて、それぞれの施工段階で空気量を確認している。いずれの混和剤でも工場出荷時と荷卸し時での空気量は、ほとんど変化がない。

一方、圧送後の空気量は2%を超える低下が見られる場合もあり、空気量の低下は著しい。

また振動締固め後も空気量の低下が0.5%程度見られる。ただしコンクリートを打込んだ場所はそれぞれに異なり、打込み高さが異なっていること、開口面積が広く、トンネル覆工コンクリートとは一概に結果を同一と見なせないため、これらの結果の精査には実際の打込みを考慮した実験を行わなければならないと考えている。

一方、荷卸しをせずに30分間アジテータ車で攪拌し続けたコンクリートの空気量はいずれの混和剤でも工場出発時と変わらない。施工に起因して空気が抜けることは明白であり、空気量の散逸を考慮した施工および空気

泡が抜けにくい配合設計をすべきと考えられる。

表-7 のフレッシュコンクリートと各施工段階で採取した硬化コンクリートの空気量の関係を示したのが図-5 である。施工にあたって巻込み空気が混入することが考えられるが、採取したコンクリートはフレッシュコンクリートの測定でも硬化コンクリートの試料の採取の場合も JIS に示されているような締固めを行っており、適切に測定がなされているものと考えた。室内実験の空気量と同様にフレッシュコンクリートの空気量は一定の関係で散逸する傾向がある。一方で、この空気量の散逸の傾向からは作業工程による明確な差異は認められない。すなわち各工程後に静置した後の空気の散逸はいずれの場合も同様であることを示唆しており、静置した後の空気量を多く残す際の着目点であると言える。

また近似直線の傾きは 0.51 であり、室内実験で得られた 0.47 とほぼ等しい。したがって静置後に散逸する空気量は、室内実験と実機実験でほぼ同様の傾向があるといえる。したがって、フレッシュコンクリートから空気が抜ける過程は、振動等の作業の影響を受けることながら、静置後の変化はコンクリートの配合や粘性等の影響が強く反映されているものと考えられる。

このようにフレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量の相関を踏まえ、フレッシュコンクリートによる管理が可能であると考えられる。

また今後は、気泡の質に着眼することによって耐凍害性を確保する方向でも検討を進める。

#### 4. まとめ

本研究では、スケーリング抵抗性向上のため、覆工コンクリートの空気量確保について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) フレッシュコンクリートの空気量は静置した状態で時間とともに低下し、振動によっても大きく低下するが、その後の傾向は静置したものと同様となり、混和剤により特徴づけられる。
- (2) 本研究の範囲で、室内実験、実機実験の別に関わらず、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の約半分になる。これは材料および配合によるものと考えられる。
- (3) スケーリング抵抗性は、混和剤メーカーに関わらず、フレッシュコンクリートの空気量が 7% で最も良好となる。
- (4) 本研究の範囲で施工上空気が散逸しやすい工程は、ポンプ圧送と振動締固めであり、空気量保持を考える場合には、格段の注意を要する。

本研究で実施した実機実験は、2014 年 8 月 5 日に実施した。実験時の外気温は 30℃程度であり、現場は最も高温となる時期であった。特に現場となる区界は、冬期の温度が低くなり、寒中コンクリート対策をしなければならぬ可能性もある。今後硬化後の空気量やスランプの変化等について冬期の実験を実施することも考えている。

#### 謝辞

本研究は「耐凍害トンネル覆工コンクリートの施行に関する打合せ会」での合意に基づき行った結果である。参加団体は、国土交通省東北地方整備局道路部道路工事課、同省東北技術事務所、同省岩手河川国道事務所、岩手県生コンクリート工業組合、鹿島建設(株)、岩手大学である。本研究にあたり、岩手大学教授羽原俊祐氏、東北地方整備局道路部道路工事課課長補佐大澤尚史氏、岩手河川国道事務所副所長亀井督悦氏には貴重なご示唆を頂いた。本研究の計画およびその方向性について、東北地方整備局南三陸事務所長佐藤和徳氏、日本大学教授岩城一郎氏、八戸工業大学教授阿波稔氏、鹿島建設株式会社坂田昇氏には建設的なご意見を頂いた。また本研究の遂行にあたり、岩手大学大学院工学研究科樊小義氏、岩手大学工学部高橋慧氏(現岩手大学大学院)、茂泉永輝氏(現 NEXCO エンジニアリング東北)、四役佳太氏(現東日本旅客鉄道(株)盛岡支社)岩手大学技術職員中村大樹氏にご協力頂いた。また AE 剤による空気連行について、竹本油脂株式会社齊藤和秀氏にご助言頂いた。また実機実験では、盛岡小野田レミコン株式会社の皆様をはじめとして、混和剤各社の方々にご協力頂いた。

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) 国土交通省東北地方整備局 HP : 3.11 復興道路・復興支援道路情報サイト、  
<http://www.thr.mlit.go.jp/road/fukkou/>
- 2) 日経 BB 社 : 特集新設コンクリート革命, 日経コンストラクション 2014.11.24, No.604, pp.22-45
- 3) 長谷川寿夫, 藤原忠司 : コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害, 技報堂出版, pp. 72-80, 1988
- 4) 小山田哲也ほか : 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.36, pp.1048-1053, 2014
- 5) 西山孝ほか : 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
- 6) 坂田昇ほか : コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012.1