論文　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

小山田　哲也[*1]・赤石　広秋[*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覆工コンクリートのスケーリング抵抗性を確保する対策を検討した。実験の結果，フレッシュコンクリートの空気量を 7%と高く設定すれば，スケーリング抵抗性を確保できることが分かった。さらに硬化後の空気量のうち特に細かなエントレインドエアが重要であり，細骨材率を高めることで空気量の確保が可能となり耐凍害性が向上することが分かった。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，ポンプ圧送において，空気の散逸が顕著であった。また本実験で使用した膨張材によりスケーリング抵抗性が低下する可能性の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

東日本大震災の被災地の復旧・復興，今後起こり得る大地震や大津波に対する防災体制の拡充等，東北地方において復興に関わるインフラストラクチャーの整備が最盛期を迎えている。

一方で東北地方のコンクリート構造物は，劣化事例が多く顕在化している。特に道路構造物では寒冷による凍害をはじめとして交通安全のために散布される凍結防止剤により凍害，塩害，アルカリシリカ反応等の被害が大きな問題意識として共有化されつつある。

復興支援道路の一つである宮古盛岡横断道路は，凍害危険度 4 となる宮古市区界を通り，凍結防止剤を多量に散布する地域に属する。凍害危険度とは，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値を算出し，1 から 5 までの 5 段階にグレード分けした値 [1)]であり，危険度 4 とは凍害の危険度が大きいことを示す。この凍害危険度が提案された 1975 年当時は，凍結防止剤の散布は一般的ではなかったが，山間部の冬期の凍結が厳しい地域では，部分的に大量の凍結防止剤が散布され，局所的に凍結して表面剥離を引き起こしている事例も多く確認されており，凍害を引き起こす危険性は高まる。

復興道路や復興支援道路のように凍結防止剤を散布されることを前提とした道路構造物が凍害の厳しい地域に大量かつ広範囲に建設された経験はこれまでになく，同様な思想で同時期に建設された構造物がひとたび劣化した場合，周辺地域で同様の劣化が生ずることも予期される。

本研究では，復興支援道路の 1 路線である宮古盛岡横断道路に建設される新区界トンネルの覆工コンクリートを対象とした。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。」と明記された。坑口から約 100m の区間の覆工コンクリートには特段の耐凍害性の考慮が求められたのである。

凍害は，「コンクリート中の水分の凍結または凍結融解の繰返しによってコンクリートに劣化を生じさせる現象」であり，スケーリング，ポップアウト，ひび割れおよび崩壊の 4 つに大別される [2)]。特に区界地域で懸念しているのはスケーリングである。スケーリングとは，表面がフレーク状に剥離する現象であり，岩手県内陸部の凍結防止剤が散布される道路構造物あるいはその付帯構造物に多くみられる。宮古盛岡横断道路は地域高規格道路であり，寒冷な気候もあって凍結防止剤の多量散布が予想され，コンクリートの剥離・剥落が生じれば重大事故に繋がる可能性もある。

本研究では空気量を多くすることでスケーリング抵抗性を有する覆工コンクリートの品質確保を狙った。コンクリート標準示方書施工編によれば，AE コンクリートの空気量はコンクリートの容積の 4～7%を基準とすると示されている。また JISA5308 によれば，生コンクリートの荷卸し時点の標準的な空気量は 4.5%とされている。空気量の下限値は 3%であるが，この程度の空気量では，場合によって凍害を防げないとの見解もある [3)]。また，耐凍害性の中でも弾性係数が低下するようなひび割れと比較し，スケーリング抵抗性を確保しなければならない構造物では必要な空気量が多くなる可能性があり，

*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　建設監督官
*3 鹿島建設（株）　技術研究所　土木材料グループ　上席研究員　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

前報[4]で検討した。スランプ 15 ㎝のコンクリートにおいて，フレッシュコンクリートの空気量を 5，7，9%とし，3 メーカーの AE 減水剤と AE 助剤を添加して確認したところ，水セメント比が 53.3%の場合，いずれの混和剤でもフレッシュコンクリートの空気量が 7%でスケーリング量は最も少なくなることが分かった。

ただしこれらのコンクリートは，空気量 4.5%のコンクリートに対して材料の構成比を変えずに空気量を 7%とした配合であり，実施工を想定した場合、振動締固め時の材料分離等が懸念された。また室内実験，実機実験の別に関わらず，硬化コンクリートのエントレインドエアは，ポンプ圧送や振動締固めによる散逸が大きいことも明らかとした。フレッシュコンクリートの性質によって，必要な空気量は異なる可能性も看過できないが，本研究では前報の知見を踏襲し実施工が可能かつ耐凍害性を有するコンクリートの配合条件の選定を目指すこととした。

2. 実験概要

本研究は，はじめに室内実験でコンクリートのワーカビリティーおよび耐凍害性を確認した。次に実機試験においてコンクリートを現場に運搬して模擬部材へ打込み，施工性の確認を行うとともに各工程における空気量の変化およびコンクリートの耐凍害性を確認した。

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。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。これらの混和剤は，前報で最も耐凍害性の高いものとした。

配合を表-2 に示す。前報で基準とした配合は，27-15-20-BB であり，呼び強度 27 はフレッシュコンクリートの水セメント比が 53.3%，空気量が 4.5%で達成される。このコンクリートの空気量を 7%としたところ，実機試験における荷卸し時に採取したコンクリートの圧縮強度は材齢 28 日で 24.0 N/mm^2 となった。覆工コンクリートの設計強度は坑口の鉄筋コンクリート区間において 24 N/mm^2 であり，配合を決定するために割り増しが必要となった。そこで当該工場の圧縮強度とセメント水比の関係に倣い，水セメント比を 53.3%から 49.3%とした。比較のため，通常の水セメント比 53.3%，空気量 4.5%のコンクリートも本研究の対象としている。

コンクリート標準示方書にあるように同じ材料で単位水量を同一とし，低水セメント比とした場合，細骨材率は小さくするのが一般的である。本工事では耐凍害性に有効な空気を残す必要があると考えた。文献調査の結果により，空気量の確保には細骨材量を多くした配合が有効であるとの結果[5]から，本研究では，細骨材率をワーカビリティーが確保される範囲で大きい方に設定して凍結融解試験を実施し，耐凍害性確保に最適な条件を探ることとした。検討した細骨材率は表中の 6 水準である。

対象とする工事では，冬期間の外気温が-15℃以下まで低下するため，温度応力解析から温度ひび割れの懸念が高い。その対策に膨張材を使用する。ただし膨張材の混合については，耐凍害性に関する知見が十分とは言い難い。そこで本研究では基本的に膨張材を混合しない条件で最も耐凍害性の優れた配合条件を見出し，実施工で膨張材を混合することとした。

一方で細骨材率の最も大きい配合については膨張材の有無による比較を行い，耐凍害性に対する膨張材の影響を確認することとした。膨張材は水酸化カルシウム系を使用し，セメントに対して内割で 20kg/m^3 混合した。

(2) 練混ぜ

コンクリートの練混ぜには 50L の強制二軸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。

表-1　使用材料

材料（略記号）	備考
セメント（C） 膨張材	高炉セメント B 種（密度：3.04g/㎤） 水酸化カルシウム系（密度：3.04g/㎤）
細骨材（S1）	紫波町地内産陸砂（表乾密度：2.54g/cm^3，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^3，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^3，FM：2.85，吸水率：0.65%，実積率 58.0%）
AE 減水剤（AD）	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
AE 助剤（AE）	変性ロジン酸化合物

表-2　配合

W/C	Air	s/a	単位量（kg/m^3）					
%	%	%	W	C	S1	S2	G	AD
53.3	4.5	48.2	168	316	417	437	1041	2.54
49.3	7.0	46.0	160	325	389	403	1053	2.60
		47.0			396	413	1032	2.60
		48.0			404	421	1014	2.96
		49.0			414	429	994	2.93
		50.0			422	440	973	3.26
		51.0			429	448	956	3.27
		51.0		(20)	429	448	956	3.27

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（JIS A 1128）
硬化	圧縮強度（JIS A 1108）
	相対動弾性係数（JIS A 1108）
	スケーリング量（ASTM C672）
	空気量（面積比法）

(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。空気量の測定は空気室圧力方法（JIS A 1128）に準拠した。

硬化コンクリートの実験項目も表-3 に示している。耐凍害性は内部劣化を対象とした JIS A 1148（A 法）と表面劣化いわゆるスケーリングを対象とした ASTM C672 の 2 つの方法で評価した。

スケーリング促進試験の供試体はφ153×120 ㎜の塩化ビニルパイプの底面をコンクリートパネルで 20 ㎜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，ASTM C672 に準じて評価した。

2.2 実機実験

(1) 使用材料および配合

使用材料は 2.1 と同一とし，表-2 から 6 配合を選定して実験に供した。

(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 1.75㎥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, 1.25㎥とした。

工場から現場までは 4m^3 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 φ50 ㎜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，はじめに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，圧送および締固め後の各変化である。

またフレッシュコンクリートの充てん性の判定のため テーブルバイブレータの上に土木学会基準 JSCE-F 511 に準拠した U 型充てん試験器を設置した試験を試みた。流動障害は 3 本とした。コンクリートは上端から 21cm 下の位置まで水平性を考慮して振動をかけずに打込み，仕切りゲートを静かに引き上げた。コンクリートが流動障害を通過して移動し、天端が沈下した量を初期沈下量として評価した。その後，ただちにテーブルバイブレータにより加振し，両室のコンクリートが同一高さになるまでの時間を求めた。

表-4　試験結果

W/C %	s/a %	室内試験			実機試験		
		SL. cm	Air %	σ 28 MPa	SL. cm	Air %	σ 28 MPa
53.3	48.2	18.5	4.9	35.6	15.0	5.4	
49.3	46.0	18.0	6.5	35.2	－	－	－
	47.0	17.0	6.5	－	15.0	8.2	
	48.0	18.0	7.4	34.9	16.0	8.3	
	49.0	18.0	6.7	－	15.0	8.0	
	50.0	18.5	7.0	33.8	－	－	－
	51.0	18.5	7.1	－	16.5	8.0	
	51.0	18.0	7.1	－	17.5	7.5	

耐凍害性については荷卸し時点のコンクリートに対して確認している。打込みに際しては，施工と同等な振動を想定してバイブレータによる振動を 10 秒間行った。耐凍害性の評価は室内実験と同様，JIS A 1148（A 法）と ASTM C672 の 2 つの方法で行った。

それぞれの工程でスコッ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，乱さない試料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[6)]で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 室内実験

(1)単位水量の決定

フレッシュコンクリートの空気量を 7%とした場合の最適な単位水量について室内で確認した。単位水量を数段階に設定してスランプ 15cm および空気量 7%のコンクリートを AE 減水剤および AE 助剤で調整して検討した。対象とする工事のコンクリート打込みは，冬期間であり, 同地域の気象データから外気温が-15℃以下になる可能性がある。さらにマスコンクリートとなるため，温度ひび割れが懸念された。そこで単位セメント量を減らし単位水量を施工可能な範囲で最少とすることを目指した。実験練りの結果からワーカビリティーを考慮して 160kg/m^3 とすることとした。

(2)細骨材率の選定

空気量 7%に対し最適な細骨材率が不明であり，室内実験で確認した。施工性を確認しながら 6 水準の細骨材率のコンクリートを作製し，実験に供している。

実験結果を表-4 に示す。現場到着時のスランプの低下が考えられたため，室内試験の目標スランプは，18cm とした。空気量 7%としたコンクリートの細骨材率の変化

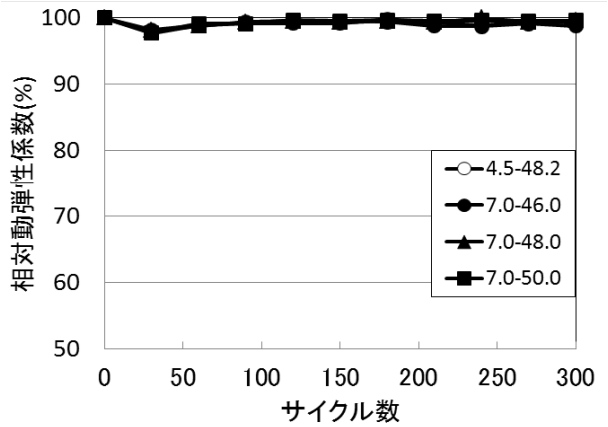

図-1　相対動弾性係数の変化

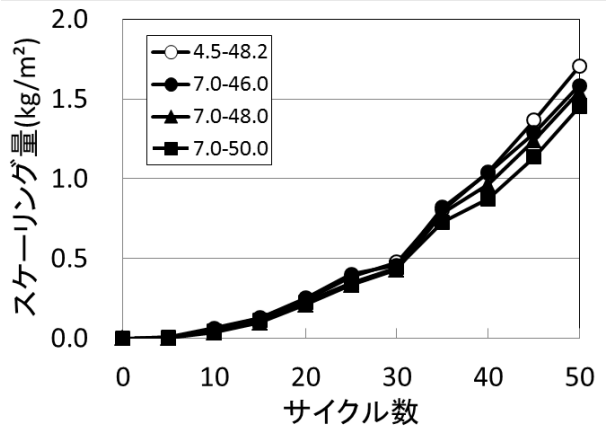

図-2　スケーリング量の変化

に対するワーカビリティーの変化は，通常の 4.5%と比較して鈍感になるようであったが，本実験の範囲において細骨材率 46%ではセメントペーストが先走りし，50%以上では粘性が若干高まる状況であった。

JISA1148（A 法）による凍結融解試験結果を図-1 に示す。凡例の表示は、空気量-細骨材率であり、以下、同様とする。耐久性指数はいずれも 99%以上となり，空気量 4.5%と比較して 7%の場合の優位性はない。

スケーリング試験の結果を図-2 に示す。空気量 4.5%と比較し 7%の場合にはスケーリング量は少なくなり，スケーリング低減効果は最大で 17%となった。また細骨材率に着目すると，スケーリングは細骨材率が大きい程低減する結果となり，細骨材率の増加の効果が見られた。

以上の結果からワーカビリティーおよび耐凍害性の最適な範囲を勘案し，実機実験の対象を細骨材率 47，48，49%とした。

3.2 実機実験

前述の 3 配合に加え，表-2 に示すフレッシュコンクリートの空気量が 4.5%の配合について，実施工と同様にアジテータ車で現場に運搬して，フレッシュコンクリートの施工性を確認するとともに硬化コンクリートの耐凍害

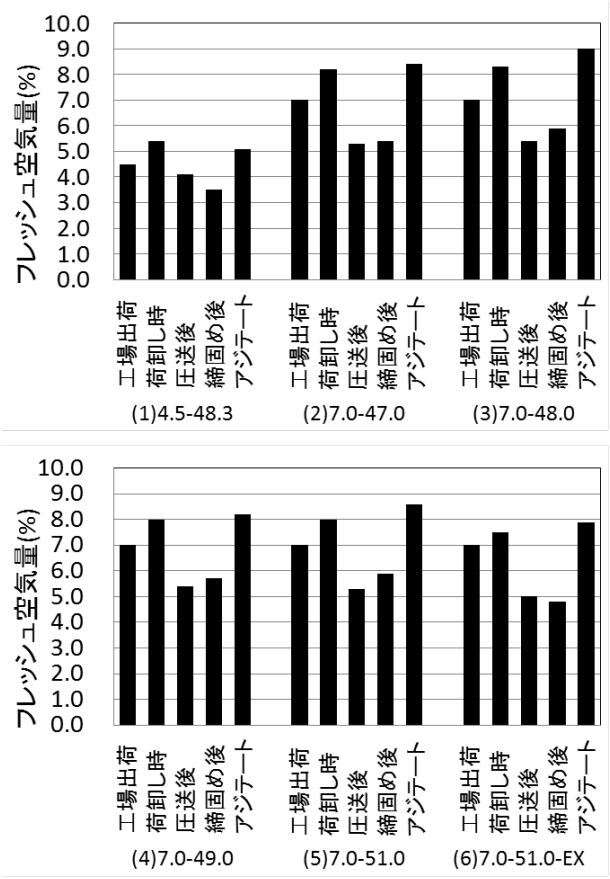

図-3　施工によるフレッシュ空気量の変化

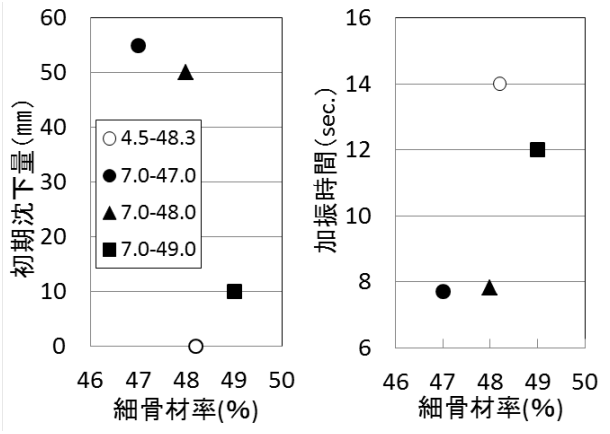

図-4　細骨材率による充てん性の変化

性を確認した。また細骨材率 51.0%について膨張材による影響を確認した。細骨材率 51.0%で膨張材無混合の場合にスケーリングが最少になる可能性が高いためである。現場到着時の測定結果を表-4 に示している。

各コンクリートの各施工段階後のフレッシュコンクリートの空気量を図-3 に示す。アジテートを 30 分間継続したコンクリートは荷卸し時とほとんど空気量の変化がないのに対し，いずれの結果でも圧送後の空気量の損失が大きい。空気の散逸量は前報とほぼ同様に空気量が 7%の配合で大きい傾向がある。前報では振動締固め後にも

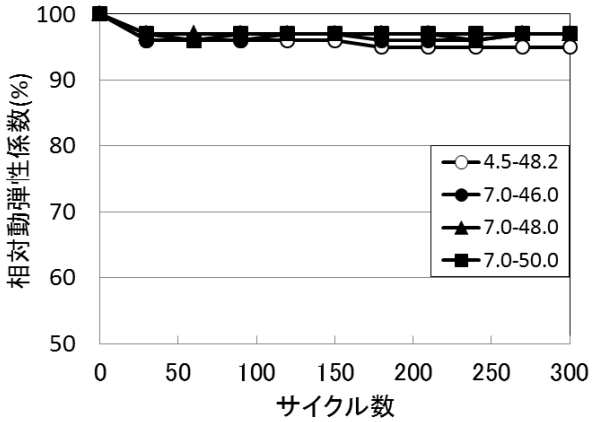

図-5　相対動弾性係数の変化

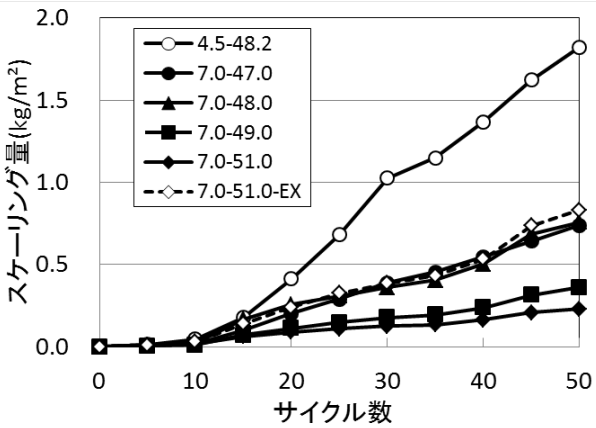

図-6　スケーリング量の変化

空気量の損失が見られたが，本実験ではそのような傾向は認められない。フレッシュコンクリートは、型枠上部から、スコップにより最上層部を取り除いて採取した。コンクリートに粘性が付与されたことに加え，打ち込んだ高さが 1m と高かったため，下層部から上層部への連行空気の浮上が原因と考えられる。

コンクリートの充てん試験の結果を**図-4** に示す。同様の細骨材率で比較すると，空気量 4.5%と比較して 7%では初期沈下量は大きくなっており，振動せずに流動が確認され，充てん性は高まっていると評価できる。7%の配合では単位水量は小さく，水セメント比は小さくなっているおり充てん性には不利な条件もあるが，混和剤量が多くなっていることに加え，粗骨材量が少ないことが原因と考えられる。空気量 7%の 3 水準に着目すると，細骨材率 49%で初期沈下量が小さくなる。細骨材率の増加によりコンクリートの粘性が高まったものと考えられる。両室のコンクリートが同じ高さになる加振時間についても図のように，同様の傾向にあった。以上より充てん性の観点から，本研究の使用材料で細骨材率 49%は細骨材率を高める限界であると言える。

JISA1148（A 法）における凍結融解試験の結果を**図-5** に示す。室内実験と同様にすべての条件で耐久性指数は 100 に近く組織の弛緩は確認されていない。

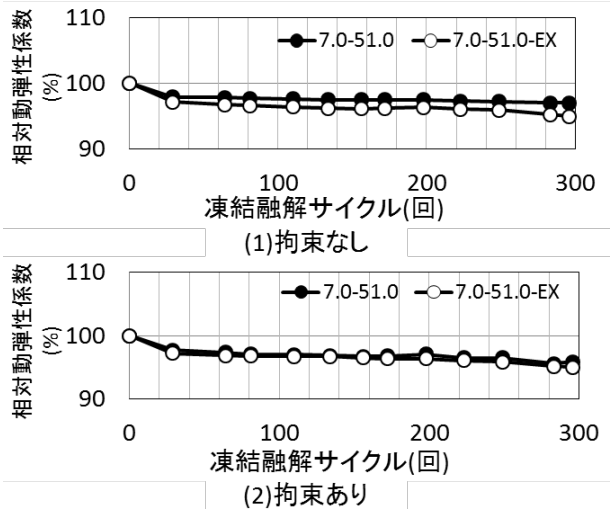

図-7　拘束の有無による耐凍害性の変化
（相対動弾性係数）

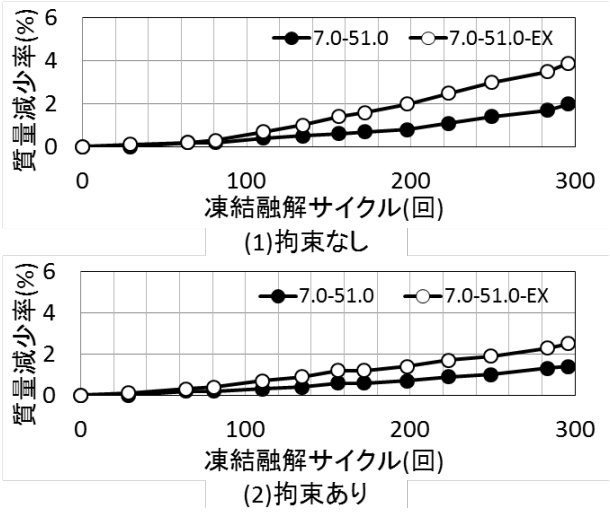

図-8　拘束の有無による耐凍害性の変化
（質量減少率）

スケーリング促進試験の結果を**図-6** に示す。フレッシュコンクリートの空気量が 4.5%の場合，累積のスケーリング量は 1.8kg/m^3 に達する。一方で配合を改良した 3 配合はいずれもその半分以下のスケーリング量となった。細骨材率に着目すれば，細骨材率を大きくするほどスケーリング量は少なくなっており，細骨材率を高める効果が確認された。

図-4 および**図-6** から施工に必要な流動性を示した中で，スケーリング量が最少となる細骨材率 49%を最適な細骨材率と判断した。

膨張材を混合した配合は、凡例に EX と記載している。膨張材の混合については，混合しないものが 50 サイクルで 0.25kg/m^3 であったのに対し，0.81kg/m^3 となった。

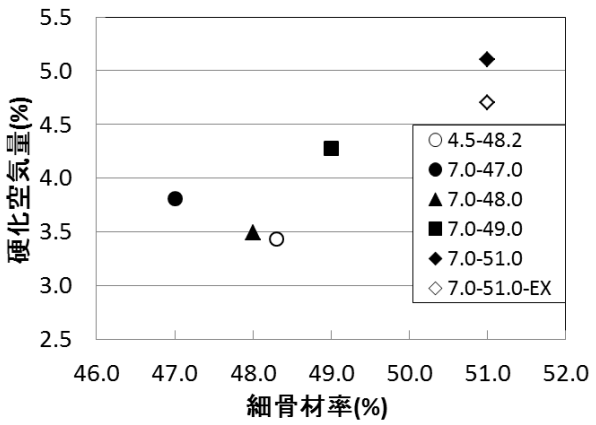

図-9　硬化空気量とスケーリング量の関係

膨張材の混合の場合，型枠等により拘束されない条件では耐凍害性が低下するとの研究もある [7]。そこで拘束の有無により結果を比較した。試験は JISA1148（A 法）により行った。結果を**図-7** および**図-8** に示す。無拘束の場合，膨張材を混合した条件で**図-7** のように相対動弾性係数に若干の低下が見られるのに対し，膨張材の無いもので低下は見られない。これに対し，拘束したものは膨張材の有無によらず低下は見られなかった。このようにコンクリート組織の弛緩は拘束によって防げることが確認された。一方で**図-8** のように拘束の有無に関わらず膨張材を混合した場合に質量減少率は高まり，無混合のものの 2 倍程度の減少が生じ，結果の相違が顕著であった。膨張材は温度ひび割れの対策として使用される場合があるが，耐凍害性でスケーリングを対象とする場合は悪影響を与える場合があることが分かった。

以上の耐凍害性の結果の原因を検討するため，硬化後の空気量を検証した。細骨材率を変数として硬化コンクリートの空気量のプロットした結果を**図-9** に示す。フレッシュコンクリートの空気量は同程度であっても，細骨材率を高めるほど硬化後の空気は多く残存することがわかる。

以上よりスランプ 15cm の覆工コンクリートにおいて空気量を 7%とし，細骨材率を一般より高めて粘性を付与することにより耐凍害性を満足する配合の製造・施工が可能であると結論付けられる。また，施工に十分なワーカビリティーを有し、スケーリング量を最小となる配合から，本研究の使用材料で最適な細骨材率は 49%であると判断した。

4. まとめ

本研究では，寒冷の極めて厳しい地域のトンネル覆工コンクリートの耐凍害性を確保する方法について検討し，施工に関わる空気量の変化を確認し、スケーリング抵抗性を高める方法を具体的に検討した。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 現場での各施工段階の空気量の散逸は，ポンプ圧送で大きい。
(2) 本研究で検討したコンクリートでは，いずれの場合も凍結融解による組織の弛緩は確認されなかった。
(3) フレッシュコンクリートの空気量を 7.0%とした配合で 4.5%の配合と比較しスケーリング抵抗性を高めることが可能である。
(4) 細骨材率を高めることはフレッシュコンクリートの空気量を保持するために効果が高い。
(5) 膨張材を混合した場合，拘束条件であってもスケーリング抵抗性には効果がない場合がある。

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。

ここに付記して関係の皆様に深甚の謝意を表す。

参考文献

1) 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
2) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書，p.3-7，2008
3) 鈴木宏武ほか：空気量がコンクリートの諸性質に及ぼす影響－空気量 6.0 %生コンの出荷に向けて－，第 18 回生コン技術大会，研 11，2014
4) 小山田哲也ほか：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
5) D.J.JANSSEN：The influence of material parameters on freeze-thaw resistance with and without deicing salt, Frost Resistance of concrete, pp.3-10, 1997
6) 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
7) 高橋幸一ほか：膨張コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響とその機構について，「膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化」シンポジウム，pp.79-84，2003