東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）

２０１９年 改訂版

平成 31 年 3 月

国土交通省　東北地方整備局

東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）

目　次

１．目的及び適用の範囲 1
２．凍害対策を行う地域と凍害対策の種別 8
３．凍害対策の種別と内容 14
４．施工上の留意事項 20
５．記録と保存 36

初版　平成 29 年 3 月
改訂　平成 31 年 3 月

東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）

１．目的及び適用の範囲

１）この参考資料は、東北地方のコンクリート構造物のうち、特に凍結抑制剤が散布される環境下における凍害（スケーリング）を防止することを目的とする。
２）この参考資料は、整備局が新設する現場打ちのコンクリート構造物（橋梁上部工のうち、桁、床版を除く）に適用する。ただし、必要に応じて工場製品に準用することができる。
３）凍害対策に必要な費用は、必要に応じて発注者が負担するものとする。
４）この参考資料で定める凍害対策は、当面実施する暫定的なものであり、新たな知見等が得られた場合には、適宜見直すものとする。

（解説）

１）について

東北地方はほぼその全域が積雪寒冷地域であり、この地に建設されるコンクリート構造物は凍害の危険性がある。さらに、整備局が管理する道路構造物においては冬期に凍結抑制剤として塩化ナトリウム（NaCl）を散布するため、塩分環境下におけるスケーリング劣化（コンクリート内の水分が凍結・融解を繰り返すことによって生じるコンクリート表面のモルタルの剥離。写真-1．1、写真-1．2、写真-1．3 参照）が進行する恐れがある。しかしながら、設計基準等においては凍害あるいは凍結抑制剤散布下におけるスケーリングを考慮した記述がほとんどなされておらず、この種の劣化に対する抵抗性を十分に有していない構造物が建設され、早期劣化に至るものも少なくない。

凍害とは、コンクリート中の水分が凍結する際の体積膨張と、融解の際の水分供給という凍結融解作用を繰り返すことにより、コンクリートが徐々に劣化する現象である。凍害を受けた構造物では、コンクリート表面にスケーリング、微細ひび割れ、ポップアウト等が顕在化する。このうち、スケーリングと微細ひび割れは、コンクリートのセメントペースト部分の劣化に起因するものであり、セメントペースト部分の品質が劣る場合や適切なエントレインドエア（AE 剤などによってコンクリート中に連行される独立した気泡径 25～250 μmの微細な空気泡であり、必要な量が確保できれば凍害抑制に顕著な効果がある。）が連行されていない場合に発生する。一方、ポップアウトは骨材の品質が悪い（吸水率が高い）場合に発生する。また、凍害による劣化の程度は、コンクリートの配合（単位水量、水セメント比、空気量等）や骨材の品質（吸水率等）等のコンクリートに関する要因、部材の断面形状やかぶり等の構造体に関する要因、および水の供給、日射、外気温（最低温度）、凍結融解回数等の構造物がおかれる環境に関する要因等によって決まる。さらに、凍結抑制剤の散布や海水飛沫によりコンクリート中に塩化物イオンが供給される場合、凍害によるスケーリングが促進されることが知られている。

我が国あるいは東北地方の凍害に関しては、いくつかの危険度マップ（ハザードマップ）が提案されている。図-1．1 は長谷川らが作成した凍害危険度の分布図である[1)]。これより、全国的に見ると凍害の厳しい地域（凍害危険度 5）は北海道の大雪山系付近であると考えられるが、東北地方においても岩手県北上山地付近で凍害危険度 5 の地域が存在する。

また、図-1．2 は成田らが作成した凍害損傷リスクマップ、図-1．3 は岩城らが作成した凍害ハザードマップであるが、これらの図はそれぞれ凍害危険度を評価する手法は多少異なっても、結果に大きな差異がないことを示している。

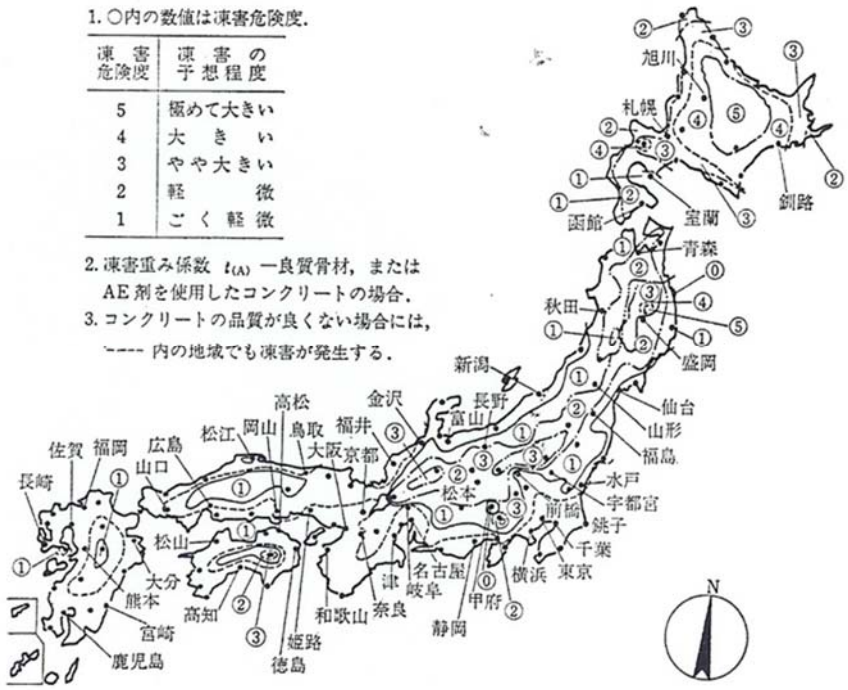


図-1．1　凍害危険度の分布図 [1)]

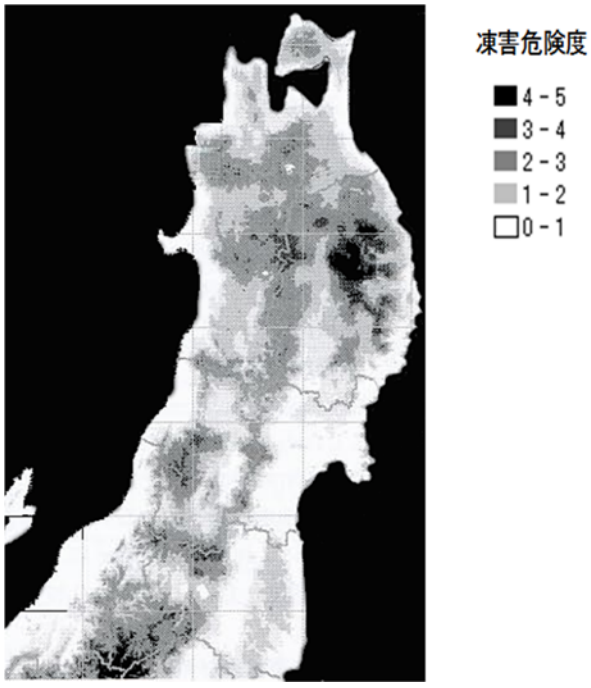


図-1．2　凍害損傷リスクマップ [2)]

一方、図-1．4 に整備局管内における管理路線の凍結抑制剤散布量を示す。図より、大量散布される区間は、太平洋側よりも日本海側にあり、急峻な道路や冬期の温度環境が厳しい地域に限定される傾向で、そのような位置に架橋された橋梁で大量散布の影響を受けているといえる。

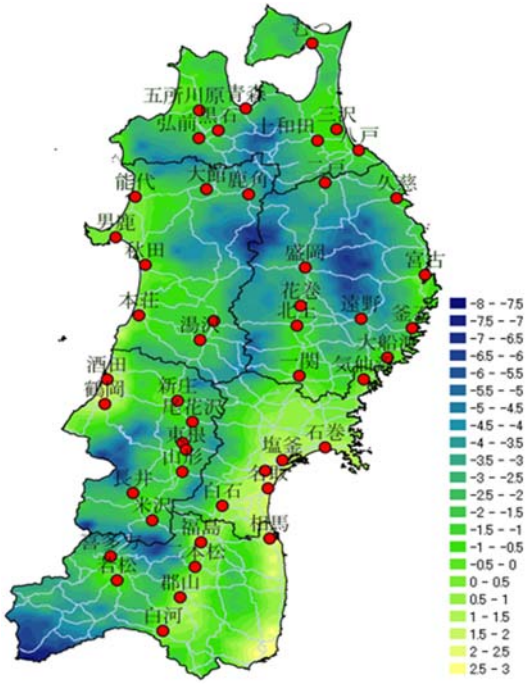


図-1．3　凍害ハザードマップ [3)]

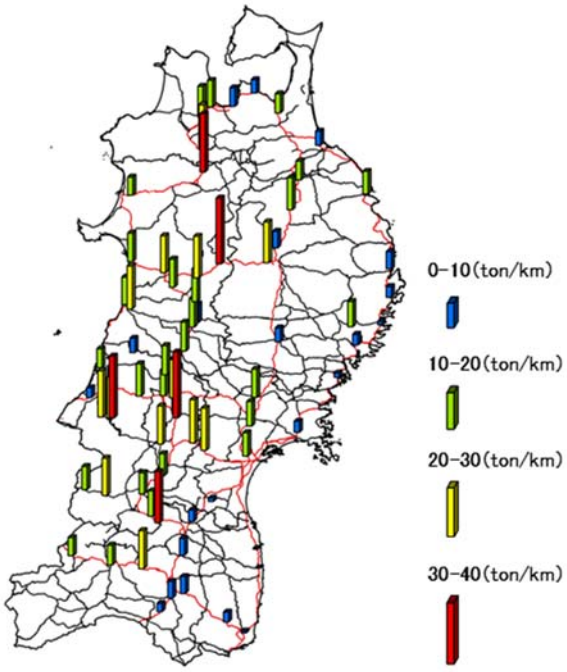


図-1．4　整備局の管内路線における凍結抑制剤散布量 [3)]

図-1．1から図-1．3は凍結抑制剤の影響を考慮しない凍害ハザードマップであるため、図-1．4 の凍結抑制剤散布の影響を考慮すると、凍害に対する危険度はさらに厳しくなることから、十分な対策を講じることが必要となる。

写真-1．1　凍結抑制剤によりスケーリング劣化した橋台

写真-1．2 凍結抑制剤によりスケーリング劣化した橋脚

写真-1．1から写真-1．3に凍結抑制剤散布の影響で著しいスケーリングを引き起こした橋梁の事例を示す。このように、凍結抑制剤散布下においては、桁端と橋台との間、ある

いは橋桁同士の間の伸縮装置から凍結抑制剤を含む水が流下し、こうしたいわゆる水掛かりと呼ばれる部位で著しいスケーリングを引き起こすこととなる。

特に写真-1．3 に示すように、凍結抑制剤の漏水範囲で、供用後わずか 11 年で補修が必要となるほどスケーリングが進行している事例が確認されている。

このように、凍害への抵抗力が弱いコンクリートでは、非常に短い期間で劣化が顕在化する傾向にある。

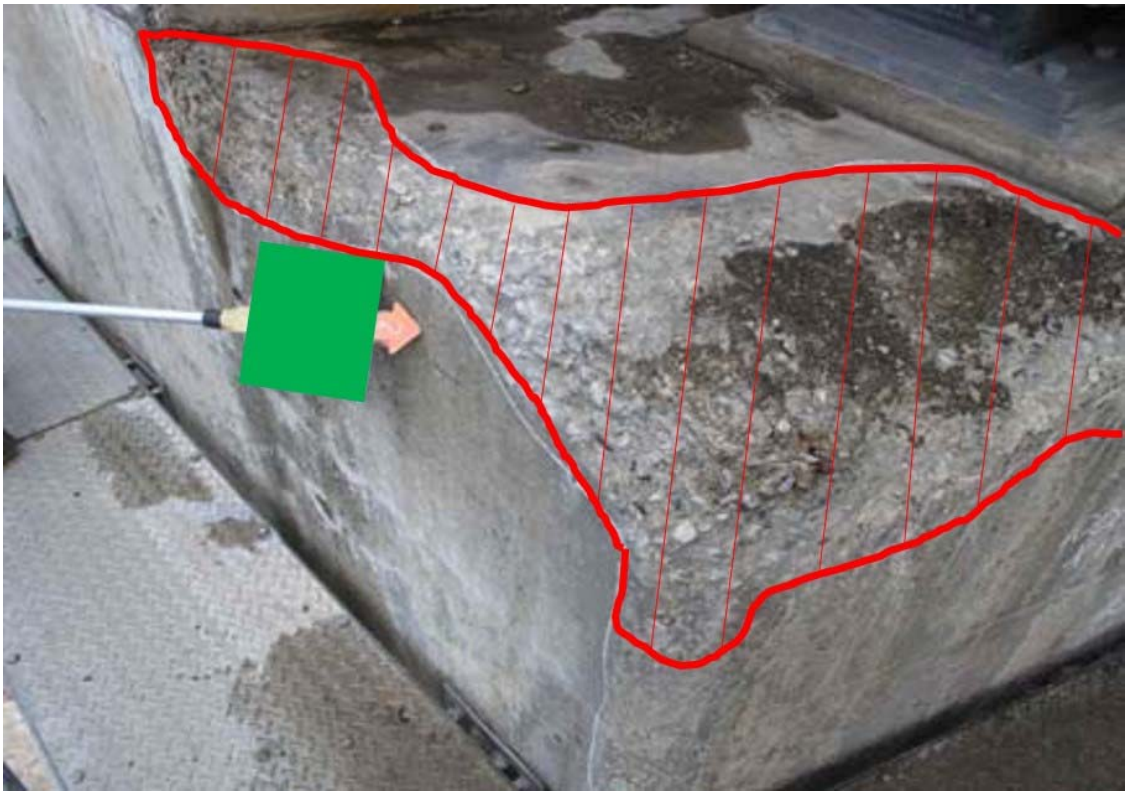


写真-1．3　供用後 11 年目でスケーリングにより補修が必要となった橋台

凍害対策としてはコンクリートの水セメント比を下げ、AE 剤により適切なエントレインドエアを連行し、かつコンクリートの水和反応に不要な水を供給させないことが重要である。しかしながら現行の基準類では、空気量 4.5%を標準とすること、共通仕様書では JIS（空気量 4.5±1.5%）の範囲とすることが規定されているのみであり、特に凍結抑制剤散布下における対策等を明記したものは見当たらない。従って、東北地方のような積雪寒冷地で凍結抑制剤を大量に散布する地方においては凍害による劣化を防ぐための適切な対策が必要となる。

また、凍害については、コンクリート構造物を建設する際に十分耐久性のあるコンクリートを使用しないと、この進行を止めることが一般に困難で、対策を行っても再劣化しやすく、補修費増大の要因となる。その対策として、最も有効な手段は、コンクリートの製造・打込み時点で凍害に有効なエントレインドエア（質と量）を適切に確保することが挙げられる。なお、凍害の進行を遅らせるためにコンクリートに表面被覆工法を施すことは、水掛かりなど、水みちが特定されている場合には有効と思われるが、そうでない場合には

コンクリート中に水を閉じ込め、かえって飽水度が高くなることで再劣化が生じる恐れがあること、また表面被覆そのものにも塗替え等のメンテナンスが必要であることから、この参考資料では、凍害に対してコンクリート自体で抵抗できるように対策することを基本とした。

以上から、現行の基準類に東北地方の実情を考慮した事項を付加することで、東北地方のコンクリート構造物のうち、特に凍結抑制剤が散布される環境下における凍害（スケーリング）を防止することとする。

２）について

点検結果等から、コンクリート製の橋梁の上・下部工、トンネルの覆工、函渠、擁壁などにも凍害が確認されている。

橋梁上部工の中でも桁および床版は、構造的な重要性が高く耐久性確保に向けて格段の配慮を要する。従って桁および床版については、別途関連する手引き等の規定によるものとする。

この参考資料は、新設する現場打ちのコンクリート構造物を対象としているが、必要に応じて、工場で製作する函渠や擁壁などにも、ここで記載されている考え方を準用できるものとした。準用する場合は、「３．凍害対策の種別と内容」で規定している「荷卸し時の目標空気量」を「製造時の目標空気量」に読み替えるものとする。

なお、工場製作のＰＣ桁については、凍害や塩害などの複合劣化に抵抗できる性能を確保した高耐久ＰＣ桁が既に標準採用されている。このため、工場製作のＰＣ桁については、高耐久ＰＣ桁の規定によるものとする。ＲＣ床版については、関連する手引き等の規定によるものとする。

３）について

東北地方の凍害は、現行の基準類において凍結抑制剤散布等、東北地方の地域特性が十分に考慮されていないことが一因となり助長されていると言える。従って、凍害対策に必要な費用は、受注者に負担させることは適当ではなく、本来発注者が負担すべきものである。

しかしながら、後述するように東北地方であっても、特に凍害の劣化作用が厳しい地域以外であれば、荷卸し時の目標空気量を 5%程度とすることで、JIS 生コンの範囲であっても、コンクリート中に適切なエントレインドエアが連行され、ほとんどの場合新たな費用なしに凍害対策が実施可能である。

一方、高さのある橋脚などでコンクリートの圧送高さが高いなどの理由で実際の施工条件での空気量の確認試験や施工性試験を行わなければならない場合や、凍害の劣化作用が厳しいために配合から見直さないとコンクリート中に適切なエントレインドエアを連行することが困難な場合には、配合の見直し、試験練り、生コンの費用、必要に応じて実施する運搬、圧送、締固めに伴う空気の損失量の試験、硬化コンクリート中の空気量や気泡間隔係数などの確認試験等、凍害に抵抗できる性能を確保するために必要な一連の費用は、発注者が負担することとした。

４）について

この参考資料は、点検の結果などから、整備局管内でも凍害が確認されていることを受けて、現在の凍害に対する知見、本施工上の種々の条件を勘案して、当面の工事に活用するため、実施可能な範囲で凍害対策を定めた暫定的な規定である。

本来であれば、東北地方の凍害に抵抗できるような性能をもった生コンクリートが標準化されることが望ましい。しかしながら、このような耐凍害仕様の生コンクリートが標準化されるのを待っていては、当面施工される構造物が従来仕様で建設されてしまうことから、現状で実施可能な範囲で凍害対策を行えるようにしたものである。

今後、この参考資料によって建設した構造物の点検結果や、凍害に対する新たな知見が得られた場合には、適宜見直すこととしている。

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、1988. 10
2) 成田健、小山慎一郎、三橋博三：実構造物群の調査結果に基づく凍害損傷リスクマップの作成に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol. 19、No1、pp. 29-38、2008. 1
3) 岩城一郎、子田康弘、石川雅美、小山田桂夫：東北地方におけるブリッジマネジメント支援ツールの構築、コンクリート工学論文集、Vol. 24、No. 3、pp. 75-87、2013. 9

２．凍害対策を行う地域と凍害対策の種別

１）凍害対策を行う地域は冬期間（12 月、1 月、2 月）の日平均気温に基づいて設定された凍害区分によって定めるものとする。

２）凍害対策の種別は凍害区分（冬期間の日平均気温）と凍結抑制剤の散布量を踏まえて設計段階において定めることを基本とする。ただし、設計が完了しているものは、発注段階で定めるものとする。

（解説）

１）および２）について

東北地方における冬期間の日平均気温の分布を図-2．１ に示す。凍害危険度を表す代表的手法である長谷川らが作成した凍害危険度マップと冬期間の日平均気温の分布から検討された凍害ハザードマップはほぼ同様の傾向にある。そのことから凍害危険度も参考にしつつ冬期間の日平均気温の分布に基づいて凍害対策を行うための地域区分を設定した。

・凍害区分

凍害区分３：冬期間の日平均気温が-3℃未満　　（凍害危険度２～３以上に相当）

凍害区分２：冬期間の日平均気温が 0℃～-3℃以上（凍害危険度１～２に相当）

凍害区分１：冬期間の日平均気温が 0℃以上　　（凍害危険度１に相当）

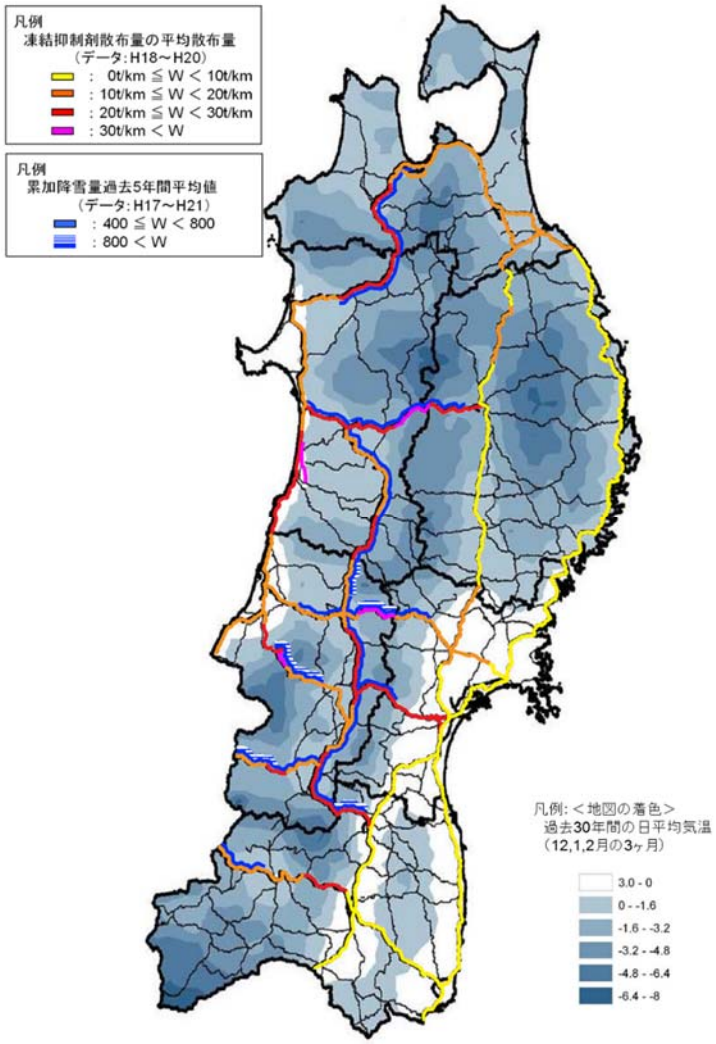


図-2．１　冬期間の日平均気温と凍結抑制剤散布量の分布

秋田県、山形県、宮城県、福島県の沿岸部や平野部では凍害区分１、平野部でも比較的標高の高い地域や高緯度の地域では凍害区分２となっている。東北では凍害区分２の地域が広く分布している。さらに北東北の山間部や新潟県境では凍害区分３の地域も認められる。日本コンクリート工学会東北支部コンクリート構造物の LCC 評価研究委員会では、東北地方における管理路線の道路橋点検データをもとに 5 年以内に補修が必要で、かつ劣化の主要因が凍害と推定された橋梁下部工の健全度の状況を整理している。その結果を表-2. 1に示す。これより凍害区分１の地域でも水掛かりのある部位では表面全体に粗骨材が露出する状態（健全度３）やかぶりコンクリートが剥落する状態（健全度２）が一部で確認される。また、凍害区分２では凍害が生じている約半数の橋梁、凍害区分３では 75%の橋梁においてかぶりコンクリートが剥落し鉄筋が露出する状態（健全度２）まで劣化が進行している。このことから、これら凍害区分２および３の地域は厳しい凍害環境であるといえ、これから新設される構造物においては十分な凍害対策を施す必要がある。

図-2. 1 には管理路線ごとの凍結抑制剤散布量も重ねて表示している。凍害区分１の地域であっても日本海側沿岸では凍結抑制剤散布量が 20t/km を超える地域が認められる。凍害区分２および３の山間部では多くの地域で凍結抑制剤の散布量が 20t/km 以上である。このような凍結抑制剤散布量の増加も劣化を重篤化させている大きな要因といえる。そこで、凍害対策の種別を検討する場合、気象データによる冬期間の日平均気温に加えて地域ごとの凍結抑制剤の散布量も踏まえて選定することが肝要となる。

表-2. 1　凍害区分と健全度の状況（橋梁下部工）

凍害区分 健全度※	橋梁数 割合
凍害区分１	28 橋
健全度４	32%
健全度３	32%
健全度２	36%
凍害区分２	86 橋
健全度４	28%
健全度３	26%
健全度２	46%
凍害区分３	16 橋
健全度４	6%
健全度３	19%
健全度２	75%

※健全度４：軽度なスケーリングの発生
健全度３：水分の供給がある構造物表面全体にスケーリングが生じ、粗骨材が露出
健全度２：かぶりが剥落し、鉄筋位置まで劣化が進行

表-2. 2 は凍害区分と凍結抑制剤散布量に基づいて示した対策の種別である。凍結抑制剤の散布量は、気象環境が厳しい標高の高い中山間地域や日本海側の路線の散布実態を考慮し、20t/㎞ を対策検討の目安とした。当面の運用として、対策の種別Ｂの地域は設定しないものとする。図-2. 2 は、図-2. 1 に凍害区分３の地域を示したものである。また、表-2. 3 に東北地方整備局が事業中もしくは管理している路線における対策の種別Ｓの区間を示した。これ以外の地域は対策の種別Ａとする。ただし、現地の凍害の実態等から対策を行う地域や対策の種別の判断が難しい場合は、整備局担当課と打合せて決めるものとする。

また、対策の種別Ｓでは、後述するように 500 ㎛以下の空気泡で硬化コンクリート中に 3.0～3.5%以上の空気量（荷卸し時の空気量としては 4.0～4.5%以上）を確保することを目標に配合設計を行い、製造から運搬・待機、圧送、締固めなどの各施工段階における空気の損失量の試験、硬化コンクリート中の空気量の確認試験、必要に応じて凍結融解試験などを行う必要があるため、橋梁下部工や函渠等の工事では、これらの試験に必要となる期間として 3～6 ヶ月程度の工期を標準工期に加算して発注するものとする。なお、トンネルについては、掘削と並行して覆工コンクリートの各種試験が実施可能であるため、対策種別Ｓであっても、通常は標準工期のまま発注可能である。

この参考資料で対象としているスケーリング劣化は、塩化物の作用によって促進されることが知られている。このため、伸縮装置からの漏水がない連続（連結）桁の中間支点の橋脚では、凍害対策を行わないという考え方もあるが、排水管からの漏水や、床版からの漏水などの経年劣化や施工の不確実性に関わるリスクもあることから、橋梁下部工、函渠、擁壁などの構造物では、対策の種別が決まれば、橋梁下部工については橋梁単位、函渠、擁壁などの構造物については連続する構造物単位で同一の対策をとることを基本とする。ただし、対策の種別Ｓを行う場合であっても、橋台、橋脚、擁壁のフーチング、函渠の底版など、土中などに埋まり凍害が発生しにくくなると想定される部位は、凍害対策として種別Ａの対策を行うことができる。また、トンネルの覆工コンクリートは、トンネル内では凍結抑制剤を散布していないこと、外気温よりも高い地山の温度の影響を受けること、トンネル内部では日照の影響を受けないことから、一般に坑口からトンネル内部に入るほど凍害の発生リスクは減少する。特に両坑口から上り勾配となりトンネル内で標高が一番高くなる縦断勾配の場合は、暖かい空気がトンネル内に留まるため、真冬でも気温が氷点下とならない場合がある。このため、トンネル覆工コンクリートは、近傍のトンネルの延長方向の気温分布を調査するなどして、坑口から一定区間までの覆工コンクリートに凍害対策を行うことでよい。「４．施工上の留意事項」で実例を示しているので参考にするとよい。

2017 年 3 月に通知した参考資料（案）では、凍害対策の種別の決定は、工事の発注段階で行うこととした。これは、既に設計が完了している復興道路等に適用することを前提としたため、工事の発注段階で決定することにしたものである。

しかしながら、凍害対策の種別の決定は、本来設計段階で行われるべきであり 2019 年 3 月の改訂においては、設計段階で定めることを基本とした。ただし既に設計が完了したものに関しては発注段階で定めるものとした。

表-2. 2　凍害区分と対策の種別

散布量 / 凍害区分	凍結抑制剤散布量 20t/km 以上	凍結抑制剤散布量 20t/km 未満	凍結抑制剤散布 ほとんどなし
凍害区分３（凍害危険度２～３以上に相当）	S	A	A
凍害区分２（凍害危険度１～２に相当）	A	A	A
凍害区分１（凍害危険度１に相当）	A	A	B

注１）当面、対策の種別Ｓ以外の地域は種別Ａとし、種別Ｂは設定しない。

注２）現地の凍害の実態等から対策を行う地域や対策の種別の判断が難しい場合は整備局担当課と打合せて決定するものとする。

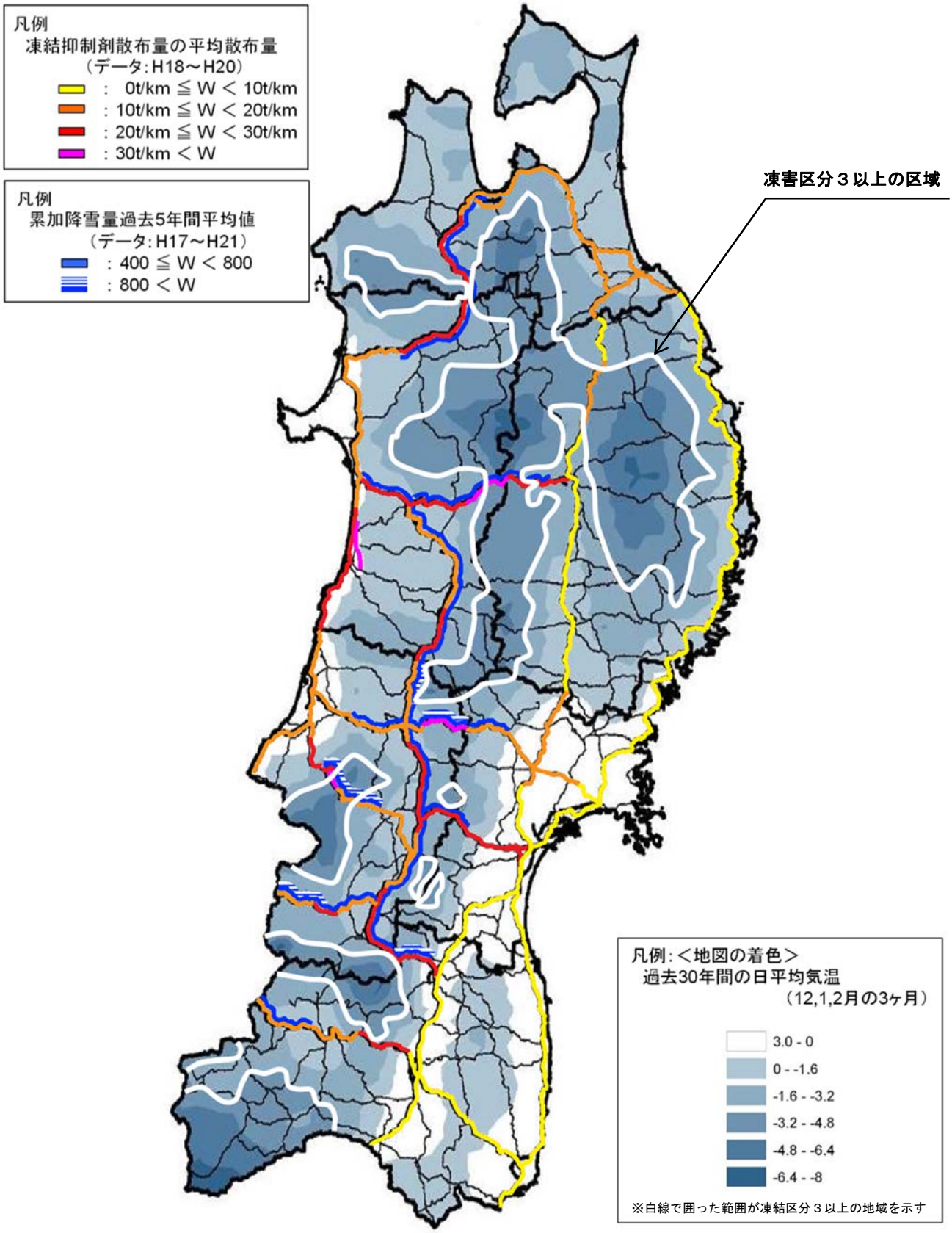


図-2. 2　凍害区分３以上の地域と凍結抑制剤の散布量

表-2. 3　整備局管内で事業中または管理路線のうち対策の種別がＳの区間

路線名	起点	終点
国道　７号	秋田県大館市長走陣場地内　(400kp)	青森県平川市　(406kp)
国道１３号	福島県福島市飯坂町中野地内　(20kp)	山形県米沢市　(29kp)
国道４６号	岩手県岩手郡雫石町橋場地内　(25kp)	秋田県仙北市田沢湖生保内地内　(40kp)
国道４８号	宮城県仙台市作並地内　(34kp)	山形県東根市関山地内　(39kp)
国道４９号	福島県耶麻郡猪苗代町山潟地内　(97kp)	福島県河沼郡河東町八田地内　(121kp)
国道１１２号	山形県西村山郡西川町月山沢地内　(50kp)	山形県鶴岡市田麦俣地内　(70kp)
国道１０３号	奥入瀬バイパス	
宮古盛岡横断道路	以下の事業区間 宮古箱石道路のうち井川～箱石地区、平津戸松草道路、区界道路	

３．凍害対策の種別と内容

１）種別Ａの凍害対策は、JIS A 5308 に規定された空気量の範囲を適用し、コンクリートの荷卸し時の目標空気量が 5%程度となるようにコンクリートの空気量の制御に努めるものとする。

２）種別Ｓの凍害対策は、JIS A 5308 に規定された空気量の範囲の適用を除外し、荷卸し時の目標空気量が 6%程度およびコンクリートの水結合材比（W/B）が 45%程度とすることを基本とする。ただし、コンクリートの水結合材比（W/B）を 45%程度とすることによって、有害な温度応力ひび割れの発生が懸念され、その対策が難しい場合には、目標空気量を 7%程度となるようにコンクリートの配合を定めることができる。なお、いずれの対策を行う場合でも、整備局担当課を通じて学識経験者の助言を受けながら、必要な試験を行わなければならない。

（解説）

凍害対策の種別と内容を表-3．1 に示す。

表-3．1　凍害対策の内容

種別	凍害環境	対策
Ｓ	特に厳しい凍害環境	目標空気量 6%(5～6.9%)および水結合材比（W/B）45%程度、あるいは目標空気量 7%（JIS 適用外）
Ａ	厳しい凍害環境	目標空気量 5%（4.5～6%）（JIS の空気量の範囲）
Ｂ	一般の凍害環境	目標空気量 4.5±1.5%（JIS の空気量の範囲）
Ｃ	凍害のない環境	凍害対策として空気量を制御する必要なし

１）について

対策種別Ａでは、JIS A 5308 のレディーミクストコンクリートの空気量の範囲を前提に目標空気量を 5%程度としてコンクリートの配合を決定し、荷卸し時の空気量管理を行うこととした。一般的な材料を用いた普通コンクリートにおいては、運搬、打込み、締固め等の施工段階で空気泡が消失し、硬化後のコンクリートの空気量を減少させる場合があることが知られている。さらに、ブリーディングが多いコンクリートでは水の移動に伴い気泡が破泡・合泡することにより残存空気の質が低下する傾向にある。

表-3．2 は橋梁下部工（フーチング）工事の荷卸し時の空気量とボス試験体により測定した硬化コンクリートの気泡組織の結果を示したものである。この結果から空気量の範囲が JIS 規格の下限値である 3%以上を満足するコンクリートであっても硬化後の残存空気量が 2%程度以下となり気泡間隔係数も 300 ㎛を超える値が認められる。通常、硬化コンクリート中の空気量が 2%程度以下となるようなコンクリートでは、そのスケーリング抵抗性も含めた耐凍害性が大きく低下する懸念がある。一方、荷卸し時の空気量が増加することによって硬化後の空気量と気泡の質が向上しているのが分かる。よって、実構造物における凍害対策としてコンクリートの目標空気量を増加させることは、製造工場・施工現場ごとの気泡組織の変動を考慮して、安全側で空気の量と質を確保するための一つの手法として有効であると判断される。

表-3．2　橋梁下部工（フーチング）工事における気泡組織の測定結果

工事名	Ａ工事	Ｂ工事	Ｃ工事	Ｄ工事	Ｅ工事	Ｆ工事	Ｇ工事	Ｈ工事
気泡数[個]	198	288	1164	419	1009	526	682	437
平均気泡径[μm]	284	292	195	272	182	235	239	312
荷卸し時の空気量[%]	3.5	3.8	6.0	5.0	4.1	4.3	4.6	4.1
硬化後の空気量[%]	1.6	2.4	6.1	4.0	5.1	3.5	4.6	3.8
気泡間隔係数[μm]	375	316	131	232	145	219	205	280

そこで、種別Ａの凍害対策では硬化コンクリート中の空気量が 3%程度以上確保されることを目指し、施工段階での空気量の変動を安全側で制御する目的から、荷卸し時の目標空気量を 5%程度とすることとした。安全側で空気量管理を行うためには荷卸し時の空気量は 4.5～6%の範囲内であることが望ましい。ただし、当面は荷卸し時の空気量が 4%を下回らないことを管理目標としてよい。なお、目標とする空気量はあくまで努力目標であり、荷卸し時の空気量が 4.0%以下であっても JIS 範囲に収まっていれば受け入れることとした。この目標値を満足するために、製造直後の実測空気量が 7%を超える場合は、AE 剤を変更するあるいは細骨材率を調整するなどして、運搬や施工過程で空気量を保持しやすい配合に修正するとよい。これは、空気量が 7%を超えるような場合のコンクリートの性状や長期的な挙動など未解明の部分が多いためである。さらに、使用する AE 剤の添加量がその標準添加量よりも明らかに少ない添加量で目標空気量が達成されている場合は、耐凍害性の向上には寄与しないエントラップトエア（コンクリートの撹拌中に自然に取り込まれる空気であり、粗大で凍害抑制には効果がない）が多い可能性がある。そのような場合は AE 剤の添加量を増やす、あるいは AE 剤を変更する等の使用材料の組合せを見直すとよい。

なお、詳しくは後述するが W/C が 50～55%程度のコンクリートにおいては、ポンプの圧送条件も硬化コンクリートの気泡組織に影響する要因となる。特に圧送高さが 20m を超えるようなコンクリート工事においては、硬化コンクリートの空気量が大きく低下する場合が確認されている。よって、そのような施工条件ではポンプ圧送にともなう空気量の低下を慎重に考慮し目標空気量を別途検討するとよい。

２）について

対策種別Ｓでは、目標空気量を 6%程度、水結合材比 45%程度とする対策を基本とした。水結合材比を 45%程度とするとコンクリートの圧縮強度は概ね 40N/mm^2 以上となる。一般に橋脚、橋台、函渠などの設計基準強度は 24～30N/mm^2 程度であり、地震や土圧などで決まるコンクリートの強度よりもかなり大きな強度のコンクリートとなる。コンクリート強度の増加は、当然コストアップにつながる。しかしながら、道路構造物のスケーリング劣

化は、水結合材比の低下が効果的であることを認識すべきである。凍害はコンクリート内部の水が凍結融解を繰り返すことによって劣化が進行する現象である。通常、生コンクリートの状態では、セメントが水と反応して硬化するために必要な水よりも多くの水を含んでいる。これは、硬化するための最低限の水だけでは、流動性などの施工性が損なわれ、適切な施工が出来なくなるためである。水結合材比が大きい場合、水和に関わらない水量が多く、その水は空隙として硬化コンクリート中に残る。一方、水結合材比が小さい場合には、単位水量は同等でも、セメント水和物が多く生成され空隙を密実に充てんする。そのため凍結可能な水が減る。水結合材比の低減は、この他にコンクリートの粘性を高めて凍害対策に有効な空気の保持力の増加などの効果も期待している。

対策種別Ｓのように非常に厳しい低温環境では、設計で定まる強度の水結合材比よりも凍害対策のために必要となる水結合材比で配合が決まることがほとんどであることに十分留意する必要がある。

以上のような理由により特に厳しい凍害環境を想定した種別Ｓの凍害対策では、JIS A 5308 に規定された空気量の範囲の適用を除外し、荷卸し時の目標空気量が 6%程度およびコンクリートの水結合材比（W/B）が 45%程度となるようコンクリートの配合を決定し、荷卸し時の空気量管理を行うことを基本とした。気温環境が極めて厳しく多量の凍結抑制剤が散布されている地域では、空気量の増加のみで凍害を制御するには限界がある。そこで、この種別では目標空気量の増大に加えて水結合材比（あるいは水セメント比）を低減し凍害対策を講ずることを基本とした。一般に目標空気量 6%、水セメント比 45%程度としたコンクリート試験体でスケーリング試験を実施した場合、スケーリングはほとんど生じないことが確認されている。また、2012 年制定コンクリート標準示方書「設計編」では、凍結抑制剤等による塩化物の影響を受ける場合において、水セメント比が 45%程度で空気量が 6%以上である場合は、凍害に対する照査を行わなくてよいこととしている。さらに、整備局が策定した「東北地方におけるコンクリート構造物設計･施工ガイドライン（案）」においても凍結抑制剤が散布される環境下でスケーリングを防止するための凍害対策として目標空気量 6%、水セメント比 45%程度が推奨されている。なお、水セメント比を 45%程度とした場合は、水和反応に伴う発熱量が大きくなることから、有害な温度応力ひび割れの発生が懸念されるため、ひび割れ抑制に対する検討が必要となる。この場合、「ひび割れ抑制のための参考資料（案）（橋脚、橋台、函渠、擁壁編）」で推奨している山口県の「コンクリート構造物の品質確保ガイド 2016」中のコンクリート施工記録のデータベースは、水セメント比 50～55%程度の構造物を対象としているため活用することは出来ない。他の信頼できる実績や温度応力解析などを活用してひび割れ抑制対策を検討する必要がある。

当面の間、目標空気量 6%程度、水結合材比 45%程度の対策は、PC もしくは RC の橋梁上部工（主桁、床版等）が対象となると思われるが、目標空気量 7%程度の対策では、十分なスケーリング抵抗性を確保出来ない場合には、橋梁下部工やトンネル覆工コンクリートなどの構造物であっても、ひび割れ抑制対策を行った上で、目標空気量 6%程度、水結合材比 45%程度の対策を採用することができるものとした。

橋脚、橋台、トンネル覆工コンクリート、函渠等のように水セメント比を大きく低下さ

せることがひび割れ抑制等の観点から必ずしも合理的でない構造物（部材）においては、目標空気量を 7%程度として凍害対策を実施することができるものとした。ただし、目標空気量を 7%程度とするコンクリートは、スケーリング試験による劣化抵抗性の確認と併せて、空気量の増加がコンクリートの強度やその他の性質に悪影響を及ぼさないよう配合を定める必要があり、コンクリートの製造の確実性なども含めて施工管理に必要な空気量の上下限値や他の管理値を定めるなど慎重な検討が必要となる。なお、実部材に近い大型の模擬試験体を作製し、コア採取による硬化コンクリート中の気泡組織の測定やスケーリング試験等を行い、所要の抵抗性が確認できれば目標空気量を低減させてもよい。

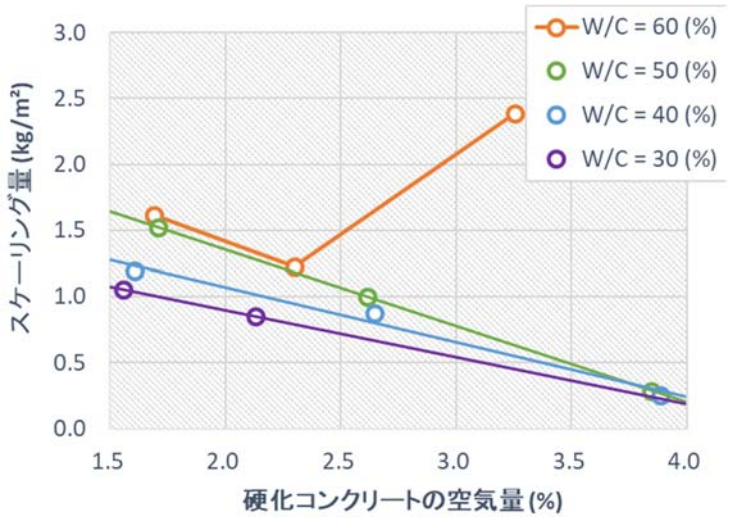


図-3. 1　硬化コンクリートの空気量とスケーリング量の関係

図-3. 1 は高炉セメントを用い、水結合材比をパラメータとしたコンクリートのスケーリング量と硬化後の空気量の関係を示している。同じ硬化コンクリートの空気量でも水結合材比が大きい程、スケーリング量は大きくなる傾向がある。また水結合材比が大きい程、硬化コンクリートの空気量の減少に対して、スケーリング量が増大する割合が大きくなる。すなわち硬化コンクリートの空気量を 4%程度にすると、配合によっては水結合材比の影響を受けにくいと言え、空気量のみではなく水結合材比を下げることによって、スケーリング劣化の危険度を低くすることができる。そこで水結合材比 45%程度の場合には、目標空気量を 6%とし、それ以上の水結合材比では、目標空気量を 7%とした。空気量 7%のコンクリートは、空気量 4.5%のものと比較し、フレッシュ時の性状が大きく異なり、配合調整や現場での空気量の管理等が難しい。また硬化後の物性等が不明の点も多い。したがって種別Ｓの対策としては、水結合材比 45%程度かつ空気量 6%のコンクリートを推奨し、温度ひび割れが懸念されて水結合材比を下げられない場合には、目標空気量 7%とした。

スケーリングの目標値は、対象構造物によって異なる。例えばモルタルが剥離し粗骨材が露出する直前のスケーリング量は、多くの研究結果から約 0.5kg/m^2 と考えられるが、それ以下にスケーリング劣化を抑えようとすると、概ね、3.5%程度の空気量を残すことが重要であることがこの図から読み取れる。このようにスケーリング劣化の抑制対策としては硬化コンクリート中に残存する連行空気が重要である。したがって種別Ｓの地域において

は、水結合材比が 45%を超える配合とする場合は、硬化コンクリートの空気量を 3.5%程度以上確保されることを目指すこととする。

種別Ｓにより目標空気量を 6%あるいは 7%程度として凍害対策を行う場合、荷卸し時に目標値が達成されるよう製造工場での空気量管理の方法や運搬方法、空気量の変動を踏まえた施工計画等を入念に検討しなければならない。

種別Ｓの凍害対策は、いずれの対策を行う場合でも、スケーリング抵抗性のほかに、強度や他の耐久性の確認、ひび割れ抑制対策の検討などが必要となるため、整備局担当課を通じて学識経験者の助言を受けながら、必要な試験を行うものとした。

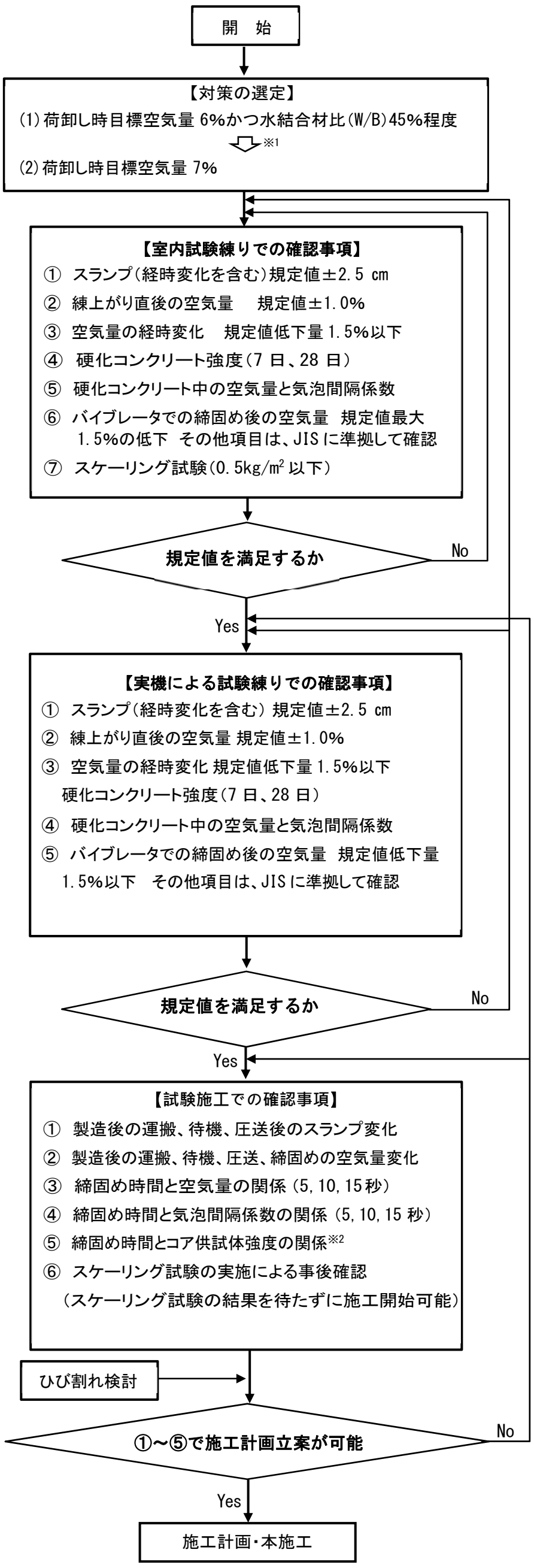
目標空気量を 7%程度としてコンクリートの配合を検討する場合、種別Ｓの凍害対策を行ったトンネルの覆工コンクリートの取組みを 4 章に示した。また、次頁に「種別Ｓの凍害対策用コンクリートの配合検討フロー（案）」を掲載したので参考とするのがよい。確認事項が多岐にわたっているが、特に実構造物でのデータの蓄積が少なく、当面はすべての試験を実施することとする。

種別Ｓの凍害対策の優劣の判断は、室内試験練りでのスケーリング量および室内・実機による試験練りにおける硬化後の空気量で行う。室内試験練りでのスケーリング量の上限は、0. 5 kg/㎥程度とし、これが得られた配合において、室内試験練りと実機による試験練りの硬化コンクリートの空気量が同等となっていることを確認して照査することとする。特に目標空気量 7%で室内試験練りのスケーリング量が多くなった場合には、硬化後の空気量が少ないことが予想される。前述のようにスケーリング抵抗性を考慮した硬化後の空気量の目安は 3. 5%程度であり、これを満足する様、再試験を行うべきである。

目標空気量 6%、7%のコンクリートのいずれの場合も、スケーリング抵抗性を高めるには、空気量確保あるいは硬化コンクリートの緻密性の確保が有効である。したがって水結合材比の低減、AE 剤の添加量や種類の変更、膨張材の種類の変更などの方策を検討するのが良い。

対策の検討時間が工期に間に合わない場合には、整備局担当課と学識経験者を交えた協議を行い最善の方法を講ずるものとする。

種別 S の凍害対策用コンクリートの配合検討フロー（案）



※1:水結合材比を下げられない場合
※2:(2)の対策を選択した場合

種別 S の凍害対策用コンクリートの配合検討フロー

1．凍害対策用コンクリートとは

コンクリートは、強度が同じなら全国どこでも同じという認識は誤りであり、使用骨材や配合、施工環境が異なれば、AE 剤との適合性も相違し、空気の保持力や粘性、さらには耐久性等が変化する。

種別 S の対策は、高いスケーリング抵抗性を確保することであり、これを達成するための配合や現場での空気量管理が重要となる。種別 S の凍害対策に必要な経費と工期は発注者が負担することが原則である。

2．対策の選定

対策の選定、実行にあたっては学識経験者の技術支援を受けるものとする。

○対象構造物

・場所打ちの橋梁下部工、函渠工、擁壁工およびトンネル覆工コンクリート
※PC もしくは RC の橋梁上部工(主桁、床版等)は除く

○対策の選定方法

水結合材比 45%程度かつ目標空気量 6%のコンクリートを検討し(対策(1))、温度ひび割れが懸念されて水結合材比を下げられない場合には空気量 7%(対策(2))として検討するものとする。

3．室内試験練り

室内試験練では、配合の目安を得るために、凍害やその他の性質に関して必要な事項はすべて実施する。目標空気量は、現場では上振れ、下振れがあるので、そのような場合も想定した配合を複数案作成して、耐凍害性を硬化コンクリート中の空気量とその質(気泡間隔係数)で評価確認する。これまでの調査では、目標空気量を 6%程度以上とした場合、硬化コンクリート中の空気量は 4～5%程度以上となるケースが多い。また、空気量の増加にともない気泡間隔係数は 200～250μm 程度以下となる。

一般に空気量が多くなると強度は低下する傾向にあり、耐凍害性にも影響が出る。そのような配合を排除できるように配合案を作成し、強度と硬化コンクリート中の空気量により配合を絞り込む。空気量とともにスランプの保持性も計測し、練上がり後 2 時間程度静置して、30 分毎にスランプと空気の損失量を計測するとよい。静置状態での経時変化で目標空気量から 1.5%以上空気が抜けるようでは空気の保持力が上がる配合に変更する。また、バイブレータで締固め後の空気量は、運搬中(0.7%程度)やポンプ圧送(0.7%程度)の損失を受けることから、それらを加味し目標空気量からの低下量を確認する必要がある。空気量の低下が顕著にみられる場合、細骨材率を上げるあるいは細粒分を増やす、AE 剤を変更する等の見直しが必要である。

橋梁下部工等で 2)の対策を選択した場合、目標空気量が確保される配合を用いてスケーリング試験を行い、一般に高いスケーリング抵抗性が期待できる 0.5kg/m^2 以下となることを確認する。もし、十分なスケーリング抵抗性が確保出来ない場合には 1)の対策を検討する。

4．実機による試験練り

室内の試験練りと実機による試験練りとでは、ミキサーの練混ぜ効率は練混ぜエネルギーの違いにより、フレッシュコンクリートの性状が必ずしも同様にならないことがあるため、実機による試験練りを必ず実施するものとする。

実機による試験練りは、室内試験で実施した確認事項を実機により再現可能であることを確認するものとする。特にトラックアジテータでの運搬中のスランプと空気量については、最低3m^3 以上積載し運搬し変動を確認することが重要である。また、バイブレータによる締固め後にフレッシュコンクリートでの空気量を計測することで、空気の保持性を確認することが重要である。

5．試験施工

試験施工は、施工計画の立案に不可欠な項目を施工前に確認するために実施するものである。施工時期に合わせて実施することが望ましい。

締固め時間による空気量の保持性とその質を気泡間隔係数により評価し最適な締固め時間を確認し本施工に反映するものとする。試験供試体は本施工の対象部材をモデル化することが重要である。

種別Sの凍害対策の優劣の判断は、室内試験練りでのスケーリング量および室内・実機による試験練りにおける硬化後の空気量で行う。室内試験練りでのスケーリング量の上限は、0.5 kg/m3 程度とし、これが得られた配合において、室内試験練りと実機による試験練りの硬化コンクリートの空気量が同等となっていることを確認して、照査することとする。

強度については、締固めをしたものをコア抜きし確認するものとする。この場合、7日、14 日強度の確認で 28 日強度を想定してもよい。

最終確認のために試験施工では供試体を作製し、施工位置付近の同じ環境下で養生したものでスケーリング試験を実施し、耐凍害性を確認する。

また、ひび割れの検討を別途実施し、対応策を本施工に反映するものとする。
尚、実機による試験練りや試験施工の結果を反映し、配合の微調整や混和剤の変更をする場合、実機による試験練りを行う事で室内試験練の実施は必要としない。

４．施工上の留意事項

１）施工計画立案前に凍害対策の必要性、対策の内容等について関係者と共有し、適切に凍害対策が行えるように努めるものとする。
２）凍害対策の種別に応じて、配合を適切に定めるとともに、硬化後のコンクリートに必要な質と量の空気が確保されるように、荷卸し時の目標空気量を適切に定めなければならない。
３）凍害対策の種別に応じて、目標空気量の上下限値、空気量の測定頻度等を適切に定めなければならない。
４）施工の基本事項を遵守し、施工由来の不具合が発生しないように努めるとともに、凍害対策が適切に行えるように施工計画を立案するものとする。

（解説）

１）について

コンクリート構造物の施工は、コンクリートの製造、運搬、施工に関わる多くの関係者がおり、これらの関係者が凍害対策の必要性や内容をよく理解してそれぞれの作業を行うことが、適切な凍害対策を行う上で重要である。特に凍害対策は、荷卸し時の目標空気量が定められた範囲内に収まっていることが前提であり、その後の施工に由来する空気量の損失があっても、硬化後のコンクリートに必要な質と量の空気が確保されることが重要である。これらのことを、施工計画立案前に関係者間で共有できるように、打合せ等を適切に行うものとした。

２）について

図-4．1[1)]は隣り合う気泡間の間隔を指標とした気泡間隔係数と耐凍害性を示す耐久性指数の関係であり、気泡間隔が小さい程、空気泡が多く存在していることを示す。また、気泡間隔係数が小さくなる程耐凍害性は良好となり、気泡間隔係数が 250 ㎛以下で劣化が防止できる結果を示している。このように硬化コンクリートのエントレインドエアは耐凍害性の確保には肝要となることが分かる。

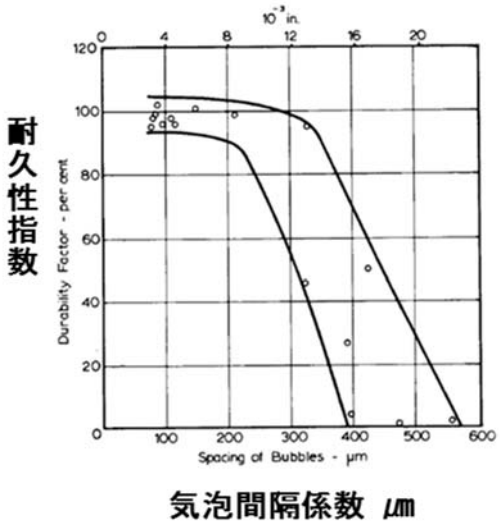


図-4．1　気泡間隔係数と耐久性指数の関係

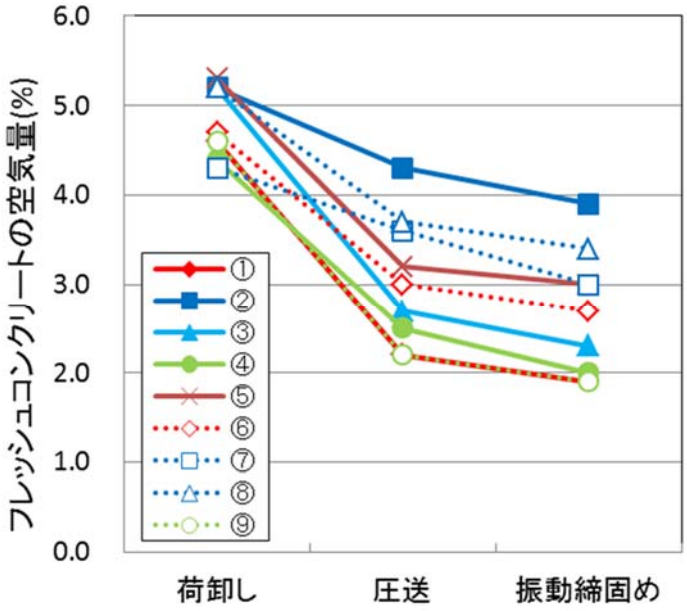


図-4. 2 施工によるフレッシュコンクリートの空気量の変化

図-4. 2 は、整備局管内の種別Ａに該当する地域の橋梁下部工工事（9 工事①～⑨）で、施工による空気量の変化を確認した結果である。配合条件は全ての工事において、24-8-20BB、フレッシュコンクリート空気量 4.5±1.5%である。

各現場の荷卸し時の空気量は、4.3～5.2%であった。すべての現場コンクリートにおいて、圧送により空気量は低下し、振動締固め後で 2%程度になったものもある。空気量の低下量は各現場により異なるが、コンクリート中に連行された空気は施工により低下することは明らかである。

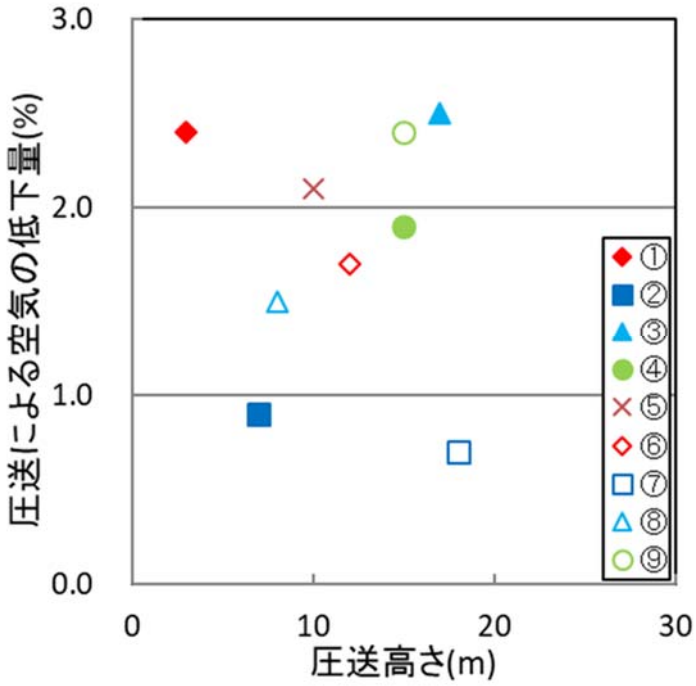


図-4. 3　圧送高さと空気量低下との関係

圧送によるフレッシュコンクリートの空気量の損失が顕著であったため、現場における圧送の特性値との関係について検討した。結果を図-4．3 に示す。圧送の特性値は、圧送高さについて着目して定めた。

空気量の変化と圧送高さとの関係は、圧送高さが高い程、フレッシュコンクリートの空気量の低下が大きいことが明らかとなった。

これは、本施工の圧送による空気の損失量を推定するには、垂直圧送試験が有効であり、あらかじめ把握しておくことが必要であることを示している。

凍害を抑制するためには、硬化後のコンクリートに必要な質と量の空気を確保することが重要である。硬化後のコンクリートの空気量は、製造時の空気量から、運搬・待機による損失、圧送による損失、振動締固めによる損失、凝結までのブリーディングを伴う損失を差し引いたものに概ね等しく、以下の式で表すことができる。

硬化後の空気量（%）≒製造時の空気量－損失空気量（運搬・待機＋圧送＋振動締固め＋凝結まで）

したがって、圧送高さが 20m を超える場合や、種別Ｓの凍害対策を行う場合には、空気量の損失を加味して、硬化後のコンクリートに必要な質と量の空気を確保できるように配合を決定する必要がある。

圧送高さ 20m 以下の種別Ａの凍害対策については、JIS の範囲内の空気量で、荷卸し時の目標空気量を概ね 5%程度とすることで、硬化コンクリート中に必要な質と量の空気が確保されるとしているのは、以下に示す試験結果や既往の研究を踏まえたものである。

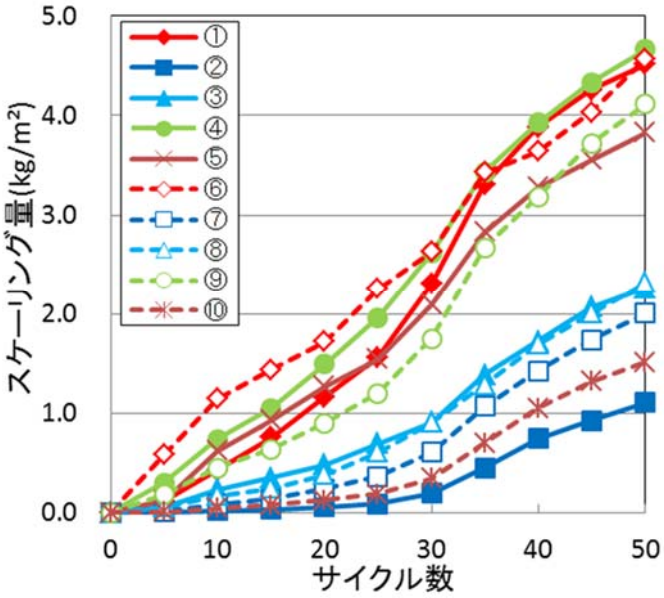


図-4．4　スケーリング量

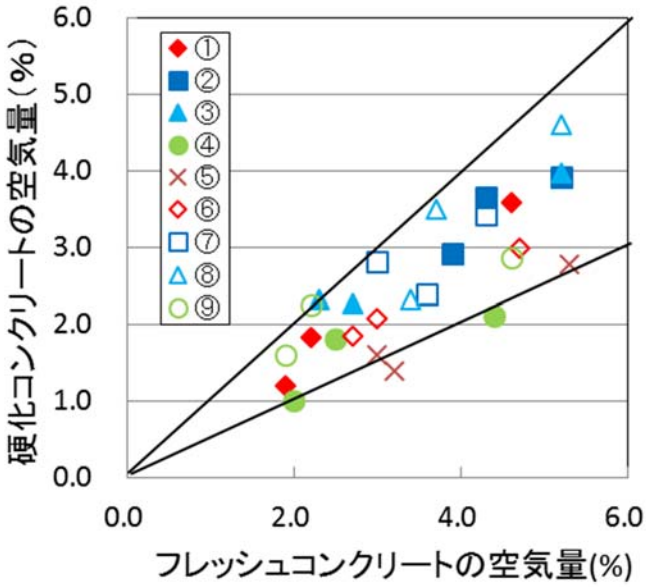


図-4. 5　硬化コンクリートの空気量とスケーリング量の関係

図-4. 2 で示した橋梁下部工工事の振動締固め後のコンクリートを対象にスケーリング試験を実施した結果を図-4. 4 に示す。この図のようにコンクリートのスケーリング量は各現場により大きく異なる。

これらのコンクリートのスケーリング量と硬化コンクリートの空気量との関係を表したのが図-4. 5 である。硬化コンクリートの空気量は 500 μm以下の空気泡を計測しており、250 μm以上のエントラップトエア（巻込み空気）を 0.5～1.0%を含んでいる。それ以上のエントラップトエアも 1%程度存在しているが測定範囲外である。硬化コンクリートの空気量の増加に伴い、スケーリング量は低下する傾向が見られ、両者の相関は高い。すなわちスケーリング対策としてエントレインドエアの重要性が確認できる。この図からスケーリング量を少なくするには、硬化コンクリートの 500 μm以下の空気量を 3.0～3.5%程度は確保しなければならないことが分かる。一方、JIS の空気量範囲を超えるようなケースにおいてエントレインドエアを多く連行し過ぎたコンクリートでは、フレッシュ性状が一般のコンクリートとは大きく異なり、強度や耐久性上の弱点となる可能性もあり注意が必要である。

本施工で硬化コンクリートの空気量を施工管理に用いることは現実的ではない。ただしフレッシュコンクリートの空気量と硬化後の空気量の関係が明確になれば、フレッシュコンクリートの空気量を基に硬化後の空気量を判断できる。

本試験で対象としたコンクリートのフレッシュ時と硬化後の空気量の関係を図-4. 6 に示す。硬化コンクリートの空気量は、図-4. 2 で示す①～⑨と同一のコンクリートをφ10×20cm の型枠に打込み、硬化後の 500 μm以下の空気量である。試験の結果（図-4. 5）、硬化コンクリートの空気量はフレッシュコンクリートと比較して少なくなることが明らかになり、x 軸:y 軸で 1:1 から 1:0.5 の範囲に収まり、概ね y=0.7x で近似できた。

前述の通り、スケーリング抵抗性に優れた硬化コンクリートの 500 μm以下の空気量を

3.5%とするためには、近似式よりフレッシュコンクリートの空気量を 5.0%以上とする必要がある。

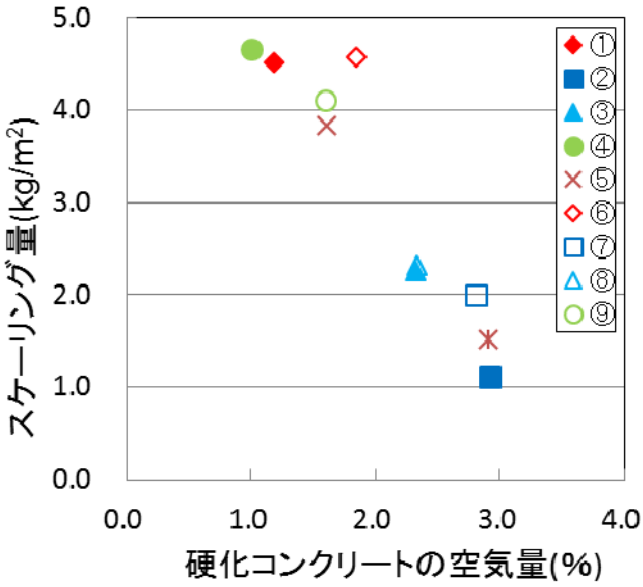


図-4. 6　フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量の関係（橋梁下部）

種別Ｓの凍害対策では、目標空気量を 6%かつ水結合材比を 45%程度または、目標空気量を 7%としているのは、凍害の劣化作用の厳しさを考慮したものである。種別Ｓの凍害対策において、骨材や施工条件などから、これによらず荷卸し時の空気量を定める場合には、凍結融解試験により耐凍害性を確認しておくことが望ましい。

種別Ｓの凍害対策における配合計画の事例などをこの章の最後に掲載したので参考にするのがよい。

３）について

種別Ａの凍害対策では、荷卸し時の目標空気量の上下限値は、4.5～6.0%を努力目標とする。凍害環境が厳しい地域であることから、4.0%を下回らないように空気量の管理に努める。4.0%を下回った場合でも受け入れるが、速やかに目標空気量となるように努めるものとする。

写真-4. 1 は、実際の現場において、種別Ａの凍害対策と同様に、努力目標として生コンの空気量を注文書に記載した例である。写真-4. 2 は、この注文書を出した現場における受け入れ検査結果の写真である。空気量は 5.4%となっており、生コン工場の協力によって必要な空気量が確保されていることがわかる。

○○レミコン(株)　○○工場長殿

○○建設(株)
○○　○○

生コン打設のご連絡

お世話になります。
2015.○.○の生コン打設について連絡致します。

【場　所】○○○○高架橋　P1　RC橋脚工　3ロット
【配　合】(モルタル)　　1:3モルタル　　V=0.5m3
　　(生コン) 配合⑬　27-8-20　BB　　V=281m3 (71台) (膨張材入り)
【時　間】1台　4.0m3積み
　　1台目　　7：40着　8：00打設開始
　　2台目から@5分
　　68台目まで出荷
　　69台目　　から連絡待ち
【テストピース】　σ7、σ28　・・・・・　(標準養生)　　1台目、150m3
　　各6本の計(6×2=)12本
【備　考】・品質管理試験については1台目、150m3で実施します。
・打設数量がかなり多いので、生コン供給の遅れがないよう、重ねてお願い申し上げます。
・コンクリートの空気量は 5.0%以上を目標にお願いいたします
・ポンプ車はロングでお願いいたします。
※　7:10ごろ電話致しますので、それまで待機でお願い致します。
※　昼も連続して打設したいので、ご協力をよろしくお願い致します。　　以上

写真-4．1　注文書の例

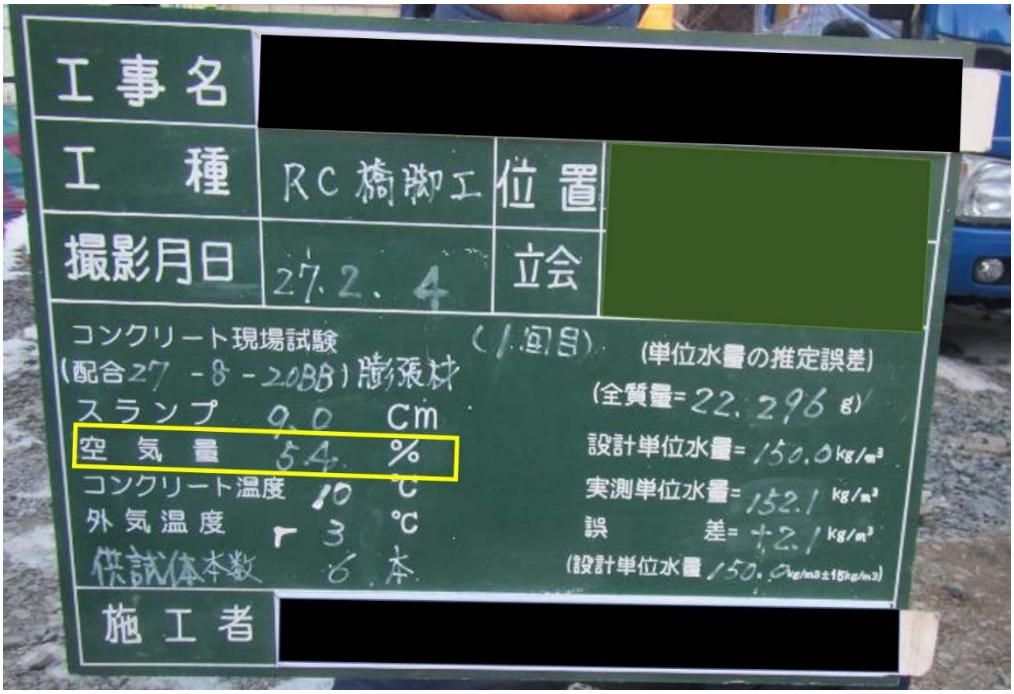


写真-4．2　受け入れ検査時の空気量

荷卸し時の空気量の測定頻度は、建設する構造物の標準の値でよい。

ただし、室内試験練りの段階で、空気量がなかなか安定しない場合や、運搬や圧送による空気の損失量が大きい場合、構造物の供用環境が厳しい床版などでは、空気量が目標値

の上下限値内に安定的に収まっていることを確認するため、試験頻度を増やすことが望ましい。その場合であっても、打設が進むにつれて空気量の変動幅が安定してきている場合には、測定頻度を標準に戻してよい。

種別Ｓの凍害対策では、各種の試験などから硬化後の空気量が適切になるように、最適な荷卸し時の空気量を決定する。定めた荷卸し時の空気量に対する管理上の上下限値は、目標空気量±1.0%が望ましい。少なくても目標空気量±1.5%を超えないように努めるものとする。荷卸し時の空気量の測定頻度は、種別Ｓの凍害対策では、空気量が安定していることを確認するまで測定することを基本とし、空気量が安定していることが確認出来た時点で標準に戻してよい。

４）について

コンクリート構造物に施工由来の不具合が発生すると、そこが弱点となって劣化が進行しやすくなる。このため、施工の基本事項を遵守して、施工由来の不具合が発生しないように努める必要がある。整備局では、コンクリート構造物の品質確保の手引きを一般構造物とトンネル覆工コンクリートについて試行的に運用しているが、これ以外の構造物なども、手引きの考え方を準用して、施工由来の不具合を発生させさせないように努める必要がある。加えて凍害対策においても、振動締固め時間が長すぎて、エントレインドエアが過度に抜けてしまわないように、適切な施工計画を立案するものとした。また、養生方法が不適切であったり、養生期間が不足したりすると、コンクリートのスケーリング抵抗性は低下することが報告されている。その養生がスケーリング抵抗性に及ぼす影響は、普通セメントよりも高炉セメントの方が大きい。よって、上述の品質確保の手引き（案）に従い標準養生に加えて追加養生を実施し、材齢初期のコンクリートが急激な温度変化や乾燥を受けないよう対策を講ずることが推奨されている。

また、両坑口から上り勾配となるトンネルでは、一般に坑口から離れるほど気温が上がる傾向となり、トンネル中心付近では冬場でも凍結が発生しない坑内気温となる場合もある。このため、トンネル覆工コンクリートの凍害対策は、近傍の同様なトンネルの凍害状況や、坑内気温を延長方向に測定するなどして、坑口から凍害のリスクが小さい区間を定めて、必要となる区間のみ対策を実施すればよい。ただし、縦断線形が上り勾配となるトンネルでは、坑内気温は延長方向に一定となる場合もあるので、慎重に検討するのがよい。

既設トンネルの坑内気温の実測結果から、凍害対策が必要となる区間を定めて、トンネル覆工のコンクリートの配合を、凍害対策仕様とそれ以外に分けて施工した事例をこの章の最後に記載したので参考にするとよい。

【橋梁下部工（橋台）の例】

橋梁下部工（橋台）を対象に種別Ｓとして実施された対策事例について紹介する。耐凍害性を満足するための配合設計やそのための確認試験、さらに工場や現場での空気量管理の容易さから橋梁下部工においてはW/B 45%程度、荷卸し時の目標空気量6%とした対策を基本に検討することが推奨される。

コンクリートの配合を表-4．1 に示す。この工事の当初設計のコンクリートの配合は、

橋梁下部工の標準である 24-8-25BB（目標空気量 4.5%）であった。そこで検討期間も限られていることから、新たな配合設計を必要とせず、W/C が 45%程度となるよう呼び強度 30N/mm^2 の標準配合を選定した。そして、この配合をベースに混和剤量の調整により目標空気量を達成することとした。また、試験練りによってフレッシュコンクリートの性状や空気量、硬化コンクリートの気泡組織、圧縮強度の確認試験を行った。さらに、コンクリートのスランプは 8cm から 12cm に変更している。これは、セメント量が 400kg/m^3 を超える配合となるため、コンクリートに十分な材料分離抵抗性が期待できることから、スランプの増加によって施工性の改善に寄与するためである。

表-4. 1　コンクリートの配合（30-12-25BB）

呼び強度	目標スランプ	目標空気量	粗骨材の最大寸法		セメントの種類による記号	
30N/mm^2	12cm	6%	25mm		BB	
W/C	s/a	単位量（kg/m^3）				
		C	W	S	G	AE 減水剤
42.8	39.0	404	173	637	1134	4.04

表-4. 2　現場での試験施工における空気量試験

測定時期	スランプ（ cm ）	空気量（ % ）	コンクリート温度（℃）	外気温（ ℃ ）
製 造 後	13.5	6.7	19	16
荷卸し時	12.0	6.3	20	16
圧 送 後	11.5	6.1	20	16
振動　5 秒	－	6.0	－	16
振動 10 秒	－	5.5	－	16
振動 15 秒	－	5.2	－	16

現場での試験施工における空気量試験の結果を表-4. 2 に示す。試験施工では、100×100×100cm の模擬試験体を作製し、工場での製造後、現場での荷卸し時（約 60 分間の運搬）、ポンプによる圧送後、バイブレータによる 5 秒、10 秒、15 秒の振動後においてフレッシュコンクリートの空気量を測定した。これらの結果より、運搬、圧送、振動締固めの各段階において空気量の減少が確認された。製造後から振動締固め 15 秒までに空気量は 1.5%減少した。しかし、振動締固め 15 秒後においてもフレッシュの状態で 5%以上の空気量が確保できていることが確認された。

表-4．3　気泡組織の測定結果

測定結果（500μm 以下）	荷卸し時	圧 送 後
気 泡 数　（個）	1,320	779
平均気泡径（μm）	166	183
フレッシュ時の空気量（%）※	6.3	6.1
硬化後の空気量（%）	4.4	2.9
比 表 面 積　（$\mu m^2/\mu m^3$）	53.4	53.4
気泡間隔係数（μm）	149	199

※フレッシュ時の空気量はエアメータによる計測値

実際の施工段階の荷卸し時と圧送後においてコンクリートを採取し、15×15×53cm の角柱試験体を作製し、硬化コンクリートの気泡組織の測定を実施した。その結果を表-4．3 および図-4．7 に示す。気泡組織のパラメータは気泡径 500μm 以下のデータにより算出したものである。これより、硬化コンクリートの空気量は、荷卸し時から圧送後において 1.5%の低下が認められるが、約 3%が確保され、気泡間隔係数は 200μm 以下であった。また、気泡分布の結果より、圧送によって 150μm 以下の微細な気泡が減少する傾向にある。このことから、使用したコンクリートは材料やその組合せに起因する気泡の安定性が比較的低いものと推察される。しかし、目標空気量を 6%に設定することによって、このような使用材料や施工状況による気泡の質の変動リスクを耐久性の観点から安全側で制御できるものと考えられる。加えて、W/C を 45%程度としてコンクリートの粘性を増加させ、気泡の保持性を向上させることも硬化コンクリート中の空気の質を確保する上で有効となる。

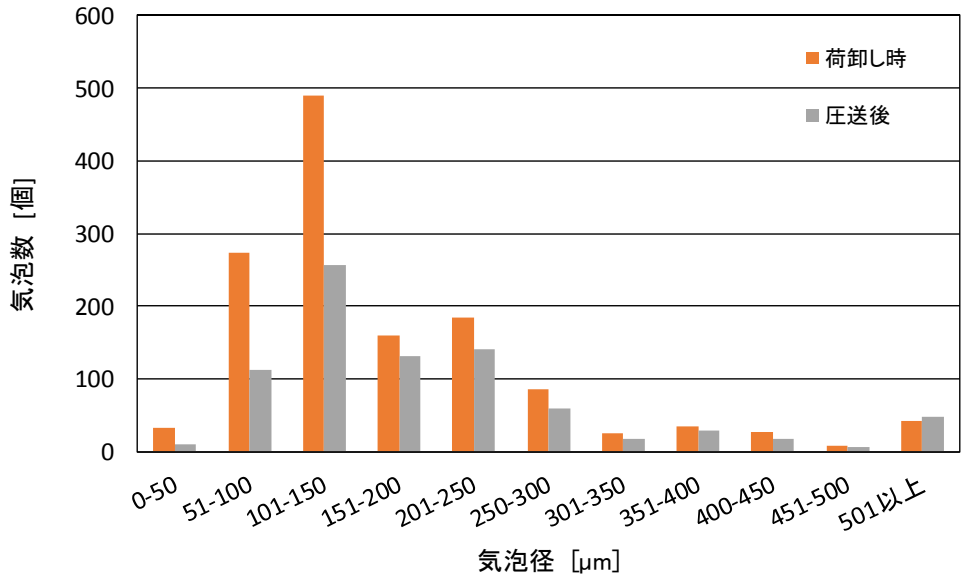


図-4．7　荷卸し時と圧送後の気泡分布

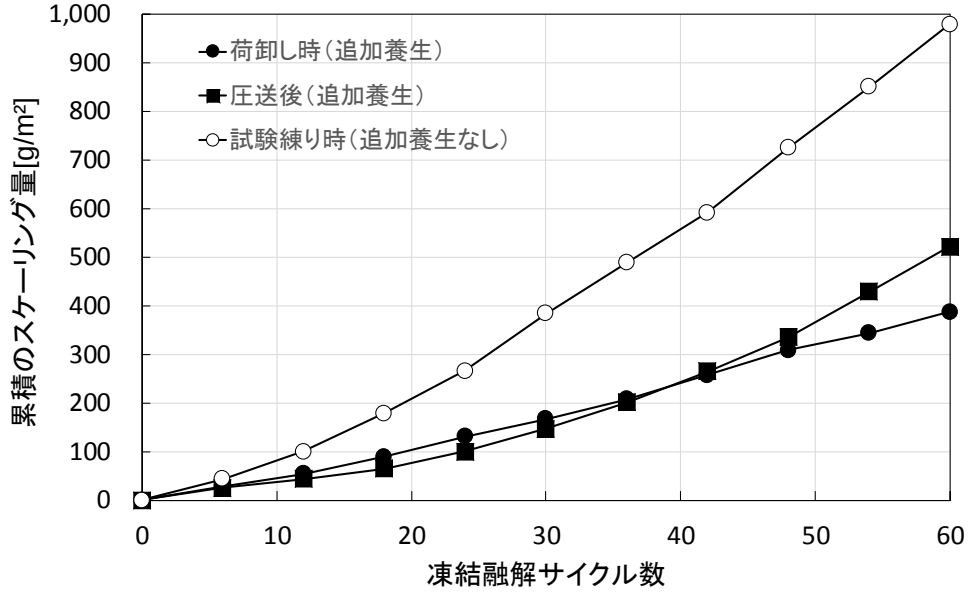


図-4. 8　施工段階における累積のスケーリング量

上記の気泡試験と同一の試験体を用いてスケーリング試験を実施した。試験体は脱型後、実現場と同等の追加養生として封かん養生を行っている。試験は前処理として塩水の供給工程が設定されている JSCE-K 572（6. 10）に従って行った。その結果を図-4. 8 に示す。凍結融解が 60 サイクル時の累積のスケーリング量は、荷卸し時の試験体で約 400g/m^2、圧送後の試験体で約 500g/m^2 であり、圧送に伴う気泡の質の低下によりスケーリング量が少し増加する傾向にあったが、何れも軽微なスケーリングであり、高い耐凍害性を有することが確認された。参考データとして試験練り時に作製した試験体のスケーリング試験結果も示す。この試験体は脱型後に気中養生したものであり追加養生は行っていない。この結果、追加養生を行った試験体と比較し、2 倍程度のスケーリングが生じている。このことから、W/C を 45%程度とし、目標空気量を 6%とした場合であっても、適切な追加養生がなされなければ期待している耐凍害性が確保されないことが示される。

【トンネル工事の例】

種別Ｓでのトンネル覆工コンクリートの凍害対策を「産学官」で実施した事例を示す。この地域は東北地方で最も凍害危険度の高い地域の 1 つであり、自動車専用道路の凍害による剥離・剥落等の危険を配慮して施工時の対策を検討したものである。具体的な対策として、空気量の確保による耐凍害性の確保を目指した。

室内試験練りで作製したコンクリートのスケーリング促進試験の結果を図-4. 9 に示す。

図中の数値はフレッシュコンクリートの目標空気量であり、5、7、9%の 3 水準で実験を行った。それぞれ AE 剤はメーカーの異なる 3 社のものを使用した。

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% の順となった。いずれもスケーリング量は小さい範囲と言えるが、剥離剥落の可能性が最も少ない空気量 7%を採用した。

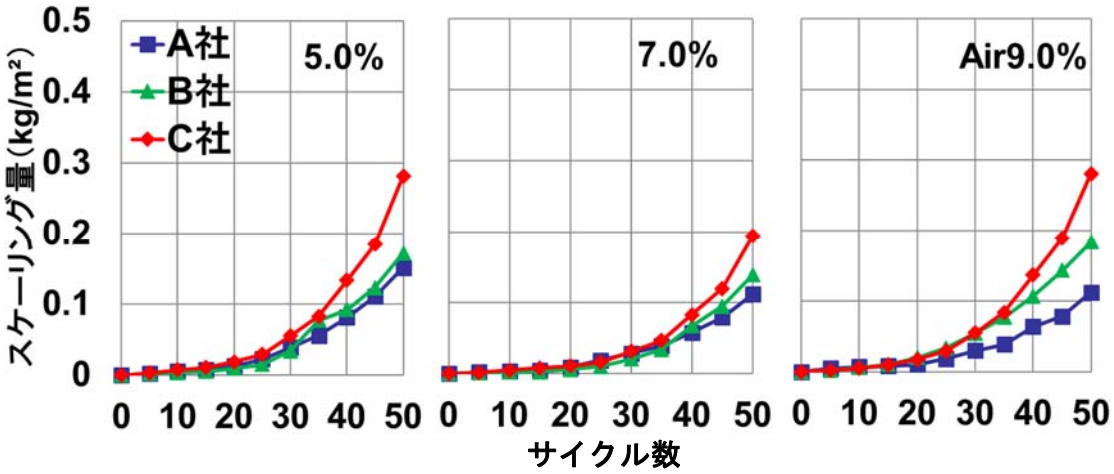


図-4. 9　空気量を変化させたコンクリートのスケーリング量

施工によるフレッシュコンクリートの空気量の変化を図-4. 10 に示す。試験は生コン工場から通常出荷されるフレッシュコンクリートの空気量を 4.5%とした場合（図中左端）および空気量を 7%とした 5 水準を対象とした。AE 剤による連行空気が施工時に損失されることが懸念されたため、細骨材率を大きくして、連行空気を留めようとした。

橋梁下部工と同様に圧送を施すことにより、いずれのフレッシュコンクリートも空気量は大きく低下することが分かる。

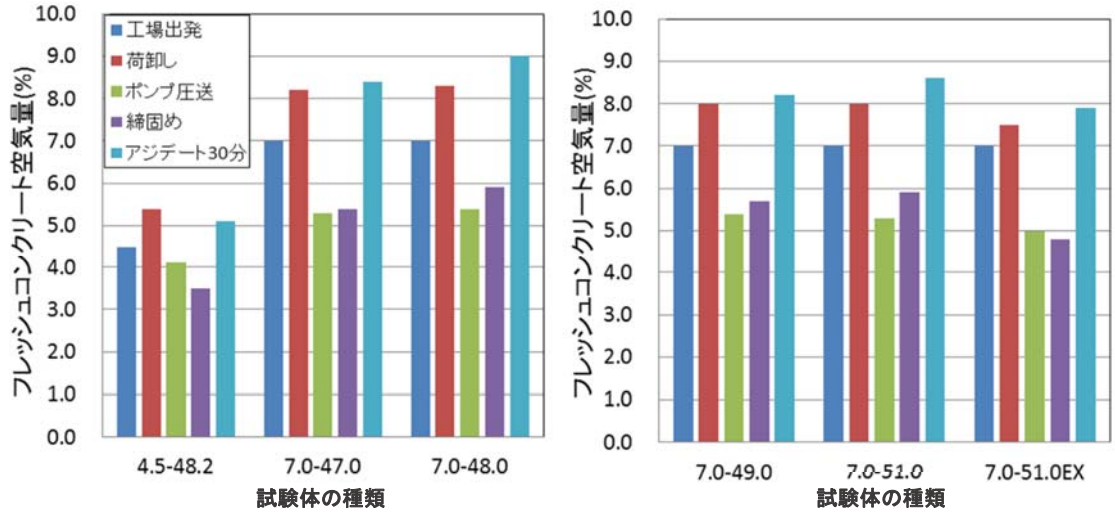


図-4. 10　施工によるフレッシュコンクリートの空気量の変化

荷卸し後のコンクリートから採取した試験体のスケーリング量の推移を図-4. 11 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 4 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。細骨材率に着目すると、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、細骨材率を大きくすることで、耐凍害性が増すことが確認された。

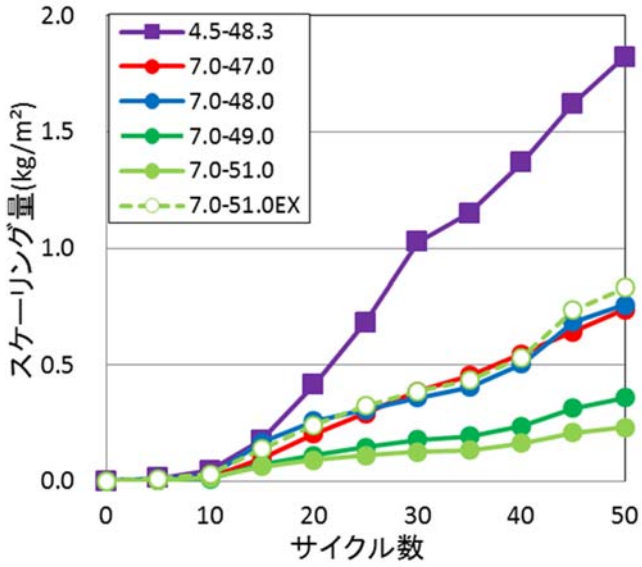


図-4．11　コンクリートのスケーリング量（荷卸し後）

細骨材率と硬化コンクリートの空気量の関係を図-4．12 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。このように細骨材率による配合の工夫により硬化コンクリートの空気量を高めることが可能であることが分かった。

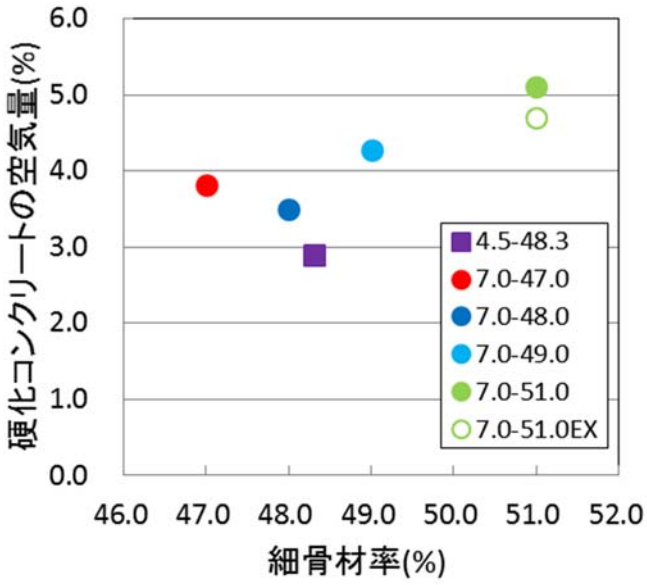


図-4．12　細骨材率と硬化コンクリートの空気量の関係

スケーリング量と硬化コンクリートとの空気量の関係を図-4．13 に示す。硬化コンクリートの空気量が多くなる程、スケーリング量が少なくなる傾向がこの結果からも明確となった。

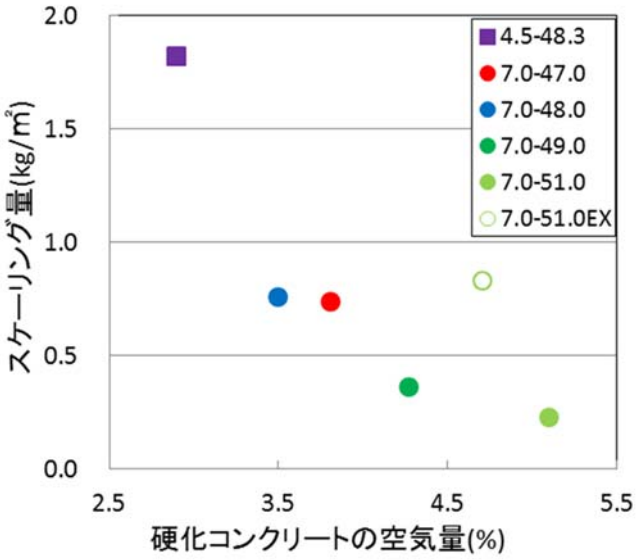


図-4．13　スケーリング量と硬化コンクリートの空気量との関係

下部工の場合と同様にフレッシュコンクリートの空気量から硬化コンクリートの空気量を推測するため、両者の関係を求めた。結果を図-4．14 に示す。両者は一定の関係が見られ、フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、硬化コンクリートの空気量も増加が見られた。したがって、この関係を用いて硬化コンクリートに必要となる空気量を確保する様にフレッシュコンクリートの目標空気量を設定することが可能である。橋梁下部工の場合の図-4．6 と比較し、図-4．14 では硬化コンクリートの空気量が残りにくい配合となっており、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関係は使用材料や配合により異なることが予想される。

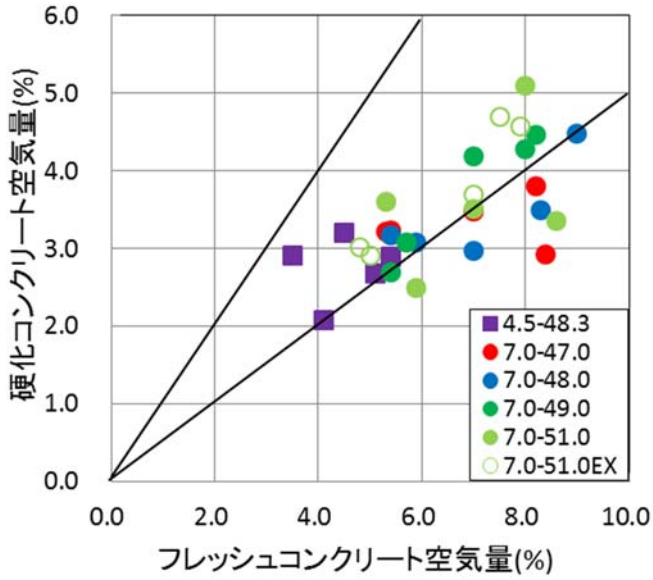


図-4．14　フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量の関係（トンネル）

本結果で得られたコンクリートは種別Ｓの凍害対策が必要なトンネルの坑口から 100m の区間の覆工コンクリート施工に使われた。受け入れ検査の結果が表-4. 4 である。目標空気量 7.0±1.5%に対して試験結果は 6.5～8.5%を示している。このコンクリートの運搬には 40～60 分を要したが、目標空気量 7.0%としても設定の範囲を外れるコンクリートはなかった。

表-4. 4　種別Ｓの凍害対策を行ったトンネルのコンクリートの受け入れ検査結果

打込み日	構造物の部位	スランプ（cm）	空気量（%）	σ_{28} 強度 (N/mm^2)
2016.4.14	坑門	19.0	7.1	30.2
2016.4.14	坑門	20.0	7.6	28.0
2016.3.24	1BL	19.5	7.0	29.5
2016.3.24	1BL	20.0	8.0	25.8
2015.11.24	2BL	20.0	7.1	29.2
2015.11.24	2BL	17.5	8.4	28.7
2015.11.10	3BL	15.5	7.4	30.7
2015.11.10	3BL	16.5	7.5	30.1
2015.12.08	4BL	18.0	7.2	28.3
2015.12.08	4BL	18.5	8.0	28.5
2015.12.15	5BL	19.5	6.6	31.8
2015.12.15	5BL	19.0	8.5	29.4
2015.12.22	6BL	19.0	7.7	31.2
2015.12.22	6BL	18.5	6.5	28.5
2016.01.12	7BL	17.5	7.5	32.1
2016.01.12	7BL	19.5	7.3	28.7
2015.01.19	8BL	18.0	6.6	32.1
2015.01.19	8BL	20.0	7.5	26.9
2016.02.03	9BL	18.0	7.2	28.9
2016.02.03	9BL	20.0	7.7	27.6

このトンネルの 4BL 目の圧送後のコンクリートを採取し、スケーリング促進試験を実施した結果を図-4. 15 に示す。比較のため、荷卸し後のコンクリートについても試験の対象に加えた。荷卸しおよび圧送後のコンクリートの 50 サイクル時のスケーリング量は 0.10kg/㎡、0.28kg/㎡であった。圧送することにより荷卸し後のコンクリートと比較しスケーリング量が多くなるのは前述のように硬化コンクリートの空気量が少なくなるためである。本工事では、目標スケーリング量を 0.3kg/㎡以下と定めた。試験結果はこの目標を満足しており、空気量の確保による耐凍害性確保の有用性が実証された。

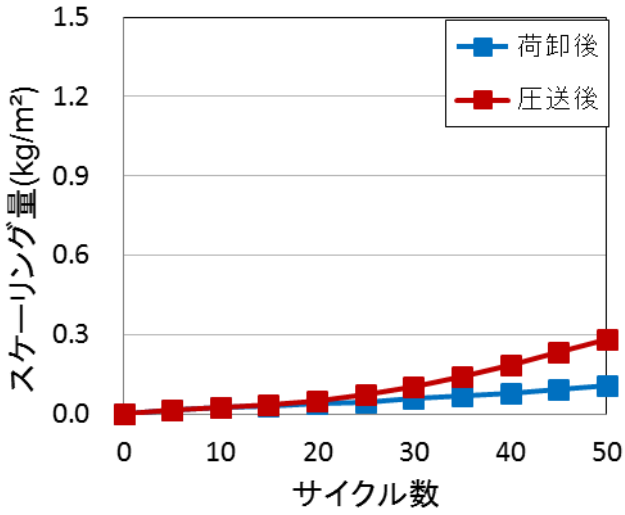


図-4．15　コンクリートの荷卸し後と圧送後のスケーリング量の比較

表-4．5 は、種別Ａの凍害対策を行ったトンネル覆工の配合の例である。この事例では、生コンの自社製造が可能であるため、目標空気量は 6%に設定している。耐凍害区間に使用する配合Ａと、それ以外の一般部で覆工に鉄筋が入る有筋区間の配合Ｂ、一般部の無筋区間の配合Ｃと、インバートの配合Ｄの 4 種類の配合を用意している。耐凍害対策用の配合Ａを使用する区間を決定するため、並行する延長約 2,300ｍのトンネル内の気温を冬期間に計測した結果が図-4．16 である。坑口から 100ｍまでの気温は外気温が 0℃の時でも 4℃程度あることがわかる。この結果とトンネル施工地点の過去の冬期間の気温が氷点下となる場合もあることから、坑口から 50ｍの区間に配合Ａを使用している。トンネル全長の配合区分を図-4．17 に示した。このように、並行する既設トンネルの坑内の気温を計測して、耐凍害区間を決定するのも一つの方法である。

表-4．5　凍害対策を考慮したトンネル覆工の配合区分の例

番号	配合	W/C（%）	C（kg）	Ex（kg）	Air（%）	備考
A	24-15-20BB	51.0	310	外割20	6.0	耐凍害性配合
B	24-15-20BB	54.3	291	外割20	4.5	一般部有筋
C	18-15-40BB	53.4	290	外割20	4.5	一般部無筋
D	18-8-40BB	54.0	250	―	5.5	ｲﾝﾊﾞｰﾄ部（実施済）

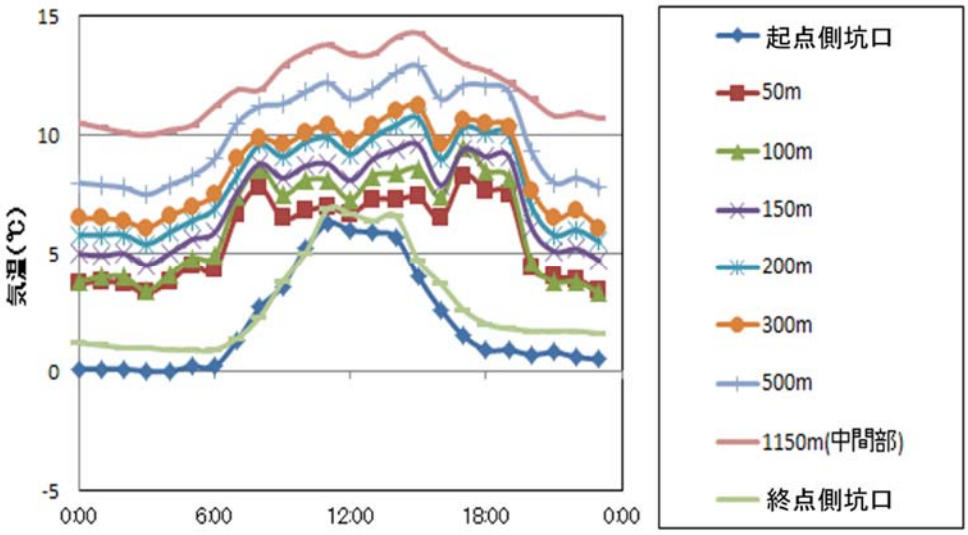


図-4．16　既設トンネルの坑内温度の測定結果

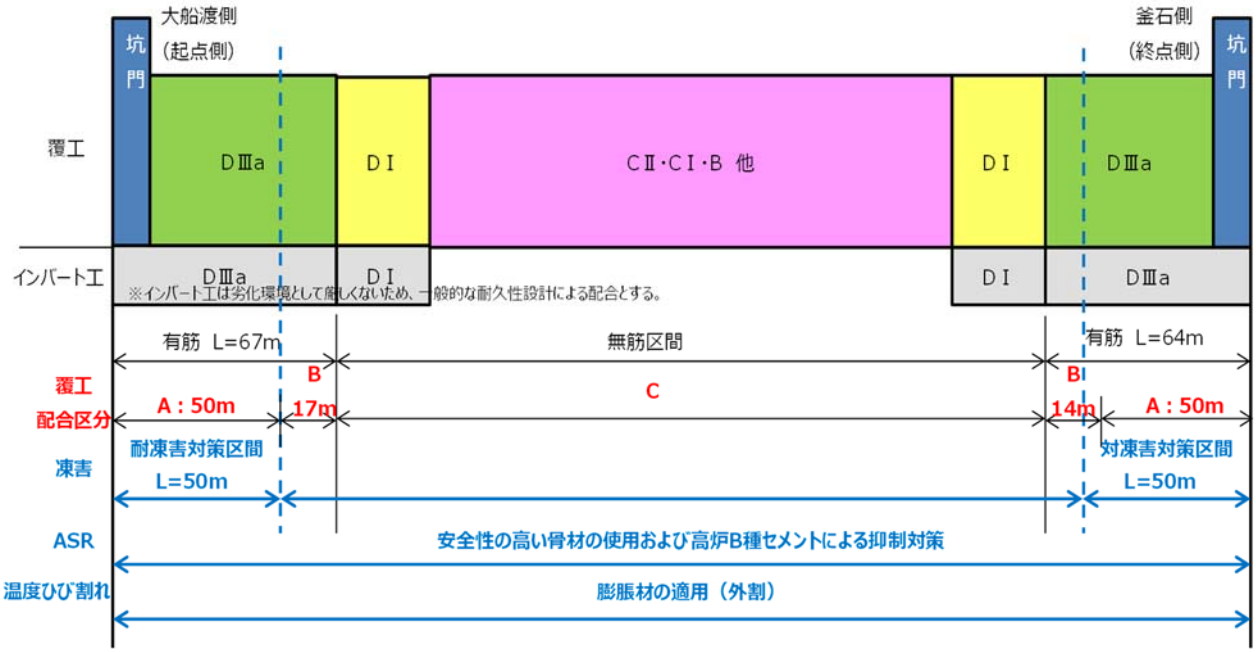


図-4．17　坑口から５０ｍ区間を耐凍害区間に設定した事例

参考文献

1） U.S. Bureau of reclamation、 The air-void system of highway research board co-operative concretes、 Concrete Laboratory Report No．C-824、 1956

５．記録と保存

将来、環境条件、施工条件と凍害対策の効果の関係などを分析可能とするために、必要なデータを工事の完成書類の一部として記録・保存するものとする。

【解説】

施工計画、施工状況把握チェックシートの記録、養生方法、表層の緻密性の調査結果やひび割れのデータなど、品質確保のためのデータは、「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）」に準じて記録・保存するもとする。表-5.1 に上記手引きに記載されている保存すべきデータを掲載した。種別Ａの凍害対策を行う工事では、ポンプ圧送の高さが 20m以下であれば、表-5.１に準じて必要なデータを保存すればよい。種別Ａの凍害対策のうちポンプ圧送の高さが 20mを超える場合や、種別Ｓの凍害対策を行う工事については、品質確保の手引き等に記載されているものに加えて、表-5.２に示す項目について記録・保存を行うものとする。

表-5.１品質確保の手引き（橋脚、橋台、函渠、擁壁編）における保存するデーター覧表

施工計画書

コンクリート打設管理記録

〇構造に関する記録
- **コンクリートの配合表**
- **誘発目地記録**

〇環境に関する記録

〇材料に関する記録
- **受け入れ検査の結果**

〇施工に関する記録
- **コンクリートの打設リフト（ロット）図**
- **各リフト（ロット）ごとの施工状況把握チェックリストの結果**
- **養生方法、給熱養生の場合、温度の記録（内外気温など）**
- **あれば、コンクリートの内部温度の記録**

〇出来映えに関する記録
- **表層目視評価の結果と改善事項**
- **あれば、表層品質の調査結果（透気試験、吸水試験など）**
- **ひび割れの調査結果**
- **誘発目地の記録**

表-5. 2　凍害対策として保存するデーター覧表

〇凍結融解試験の記録（試験練り、試験施工、本施工時）

〇硬化コンクリート中の空気量に関する記録（試験練り、試験施工、本施工時）
・リニアトラバース法（気泡径 500 μm以下の空気量、気泡間隔係数など）
・またはこれに準じる試験に関する記録

〇空気の損失量に関する記録（製造、運搬・待機、圧送、締固め時等）

〇必要に応じて実施したその他の試験等に関する記録