

報告 凍害危険度の高い寒冷地に建設する北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）の空気量の確保を目指した配合の検討

井上 翔^{*1}・大林 省悟^{*2}・佐藤 亙^{*3}・西 恭彦^{*4}

要旨：北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）の建設区間の一部は凍害危険度が3～4であり、より確実な凍害対策が必要であるが、凍害に効果がある空気量は、施工過程での減少が指摘されているため、硬化後に空気量が確保される配合を検討することとした。配合は、生コン工場の対応が容易でない場合も想定し、柔軟に配合を選択できる工夫として、スランプ保持性を有する別途添加型の混和剤を用いた配合を含めて複数検討した。試験は、室内試験練り、実機による模擬試験体の製作に加えて、実構造物での試験施工を行い、硬化後の空気量と施工性の確認を行った。本稿では、上記の結果を基に定めた凍害対策の配合方針を報告する。

キーワード：凍害、寒冷地、AE コンクリート、空気量、気泡間隔係数、別途添加型混和剤、スランプ保持剤

1. はじめに

鉄道建設・運輸施設整備支援機構（略称：鉄道・運輸機構（以下、JRTT））では北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）の建設を進めている。寒冷地では凍害への対策が必要となるが、東北新幹線の一部では AE コンクリートを使用した場合でも凍害が確認されており、その硬化後の空気量は 3%未満であり施工過程による減少が指摘されているほか¹⁾、北海道開発局や東北地方整備局では凍害や凍結防止剤による塩害との複合劣化が課題²⁾となっており、空気量を確保する配慮が行われている。

JRTT でも平成 17 年以降に建設した路線では、凍害対策として、JIS A 5308 の標準的な空気量である 4.5%よりも多い 5.5%としてきた。しかし、現在の建設区間の一部は、凍害危険度³⁾がこれまでに経験のない危険度 3～4 の地域を通ることから、現行の対策で十分であるか検証するとともに、より確実な空気量の確保を目指した新たな配合について検討する必要があると考えた。

新たな配合は、整備新幹線事業が特定の期間内に集中して建設を進める事情から、生コン工場の細やかな対応が容易でない場合も想定し、複数の配合を検討し、柔軟に配合を選択できるように工夫した。具体的には、空気量を増やした配合と北海道で凍害劣化の報告が少ない配合に加えて、空気量の保持効果も報告されているスランプ保持性を有する別途添加型の混和剤⁴⁾を用いた配合を検討した。

試験は、室内試験練り、実機による模擬試験体の製作に加えて、実構造物で試験施工を行った。硬化後の空気量と施工性を確認し、その課題や留意点を整理し、結果を基に定めた凍害対策の配合方針を示したので報告する。

2. これまでの凍害対策と配合検討の方針

2.1 これまでの凍害対策

JRTT では、平成 17 年以降に建設した東北新幹線の八戸以北から、凍害対策として空気量を JIS A 5308 の標準的な空気量である 4.5%よりも多い 5.5%とし、水セメント比を低減した配合を採用しており、北海道新幹線の新函館北斗までの区間で建設を進めきたところである。空気量が 5.5%の現行配合は、過去に室内試験で凍結融解試験を実施しており、300 サイクル終了後の相対動弾性係数は 89～93%で耐凍害性を有することを確認している⁵⁾。

他方、東日本旅客鉄道による東北新幹線の八戸以南までの凍害調査⁶⁾において、水掛かりの多い橋面工を中心に凍害の発生が明らかとなった。凍害の有無に関わらず採取されたコアのうち、空気量 3%を下回っていた部位で凍害が生じていた。八戸以南までは、空気量 4.5%として建設されており、荷卸し時の JIS A 5308 の規格値±1.5%の下限値は 3%であることから、施工過程で空気量が減少し、硬化後の空気量が 3%を下回ることが考えられた。そのため、東日本旅客鉄道では、空気量 5.5%の管理値を±1.0%として下限値を上げることで、硬化後の空気量が 3%程度確保されるように配慮している。

また、北海道開発局や東北地方整備局では凍害や凍結防止剤による塩害との複合劣化が課題²⁾となっており、凍害のリスクに応じて空気量を 6～7%程度確保する配慮が行われている。鉄道構造物では、凍結防止剤を散布することがないため、沿岸部や道路と近接する箇所を除き、凍害と塩害の複合劣化のリスクはないものの、凍害の観点で、施工過程での空気量の減少を考慮し、より確実に空気量を確保することが必要である。

*1 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道技術センター設計部橋梁構造課課長補佐 工修（正会員）

*2 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局後志建設事務所主任

*3 西松建設（株） 新幹線倶知安工事事務所係長 工修

*4 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道技術センター設計部橋梁構造課総括課長補佐 工修（正会員）

2.2 配合検討の方針

現在の建設区間は、北斗市の新函館北斗駅から、八雲町、長万部町、ニセコ町、倶知安町や小樽市を経て、札幌市の札幌駅に至るルートである。このうち、ニセコ町、倶知安町および札幌市は凍害危険度³⁾が3～4の地域である。これまで空気量5.5%で建設を行ってきた区間は、凍害危険度は1～2の地域であり、現在までに凍害は顕在化していないが、凍害危険度が高い地域では、より確実な耐凍害性を確保するために、空気量の確実な確保を目指すこととした。具体的には、AE剤による微細な空気を連行し、硬化後のコンクリートが気泡間隔係数250μm以下かつ空気量3%以上となる配合を目標とした。

2.3 配合

新たな配合を検討するにあたっては、整備新幹線事業が特定の期間内に集中して建設を進める事情から、生コン工場が細やかな対応を容易にできない場合を想定して、柔軟に配合を選択できるように3種類を検討した。表一1に配合一覧を、表一2に使用材料を示す。各配合について以下に示す。

(1) 空気量を増やした配合（空気量6.5%）

空気量を増やした配合は、空気量のJISにおける空気量の規格値の±1.5%の下限側でも、施工過程による空気量の減少が生じても空気量が3%未満とならないことを目標とした。施工過程の空気量の減少量は、荷卸し時から筒先まで空気量が1～2%程度であることを事前の検討で確認し想定した。一方、上限側では、8%を超えるとエアメーター法の測定精度が低くなり管理が難しくなると想定されたことから、上限値が8%以下となるようにし、双方を満足する空気量として6.5%とした。

(2) 別途添加型のスランプ保持剤を用いた配合

別途添加型のスランプ保持型AE減水剤(以下、スランプ保持剤)を用いた配合は、現行の空気量5.5%の配合に、スランプ保持剤⁴⁾を別途添加した配合とした。スランプ保持剤は、近年、生コン工場の統廃合による運搬距離の長距離化に対応する混和剤として注目されている。別途添加型は現場に到着したアジテータ車に添加するため、

生コン工場の設備に依存しない配合として選定した。主成分はポリカルボン酸エーテル系化合物であり、短い主鎖側鎖のポリカルボン酸を若干配合することにより気泡膜を強化できるという特徴で、スランプの保持性能に加えて、一定の空気量の保持性能を有するため、施工過程の空気量の減少を抑制できると考えた。

(3) 北海道開発局の沿岸用の配合

北海道開発局の沿岸用の配合は、北海道開発局の道路設計要領で定めている配合のRC-5S(b)(c)である⁶⁾。令和5年度までは沿岸構造物に適用されていた配合で、塩分作用下での凍害と塩害を考慮し、空気量6.0%、最大水セメント比45%以下に設定されている。検討時点では沿岸地域の生コン工場のみでJIS認証品として供給されていたが、凍結防止剤が散布される内陸部の橋梁地覆・高欄での凍害劣化状況の調査と実構造物のコンクリート空気量調査結果⁷⁾を踏まえて、令和6年度の道路設計要領の改訂において凍結防止剤による対策が必要な内陸部の構造物への適用が検討されていたため、将来的に内陸部でも入手が容易となることを想定して選定した。

表一2 使用材料の諸元

種類	記号	成分および物性
セメント	C	N:普通セメント, 密度 3.16g/cm ³
水	W	上水道水, 密度 1.00g/cm ³
細骨材	S1	北斗市嵯朗産砕砂(石灰砂), 5.0mm以下, 表乾密度 2.64g/cm ³ , 粗粒率 3.10
	S2	石狩市志美産(陸砂), 0.6mm, 表乾密度 2.58g/cm ³ , 粗粒率 1.65
粗骨材	G	北斗市嵯朗産(石灰碎石), 碎石 2005, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 61.0%
混和剤	A1	AE剤(Ⅰ種) アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	A2	AE減水剤(標準型Ⅰ種) 変性リグニンスルホン酸化合物
	A3	スランプ保持型AE減水剤(別途添加型) ポリカルボン酸エーテル系化合物

表一1 配合一覧表

配合	種別	設計				単位量					混和剤			W/C	細骨材比
		強度	W/C 上限	Air	SL	W	C	S1	S2	G	AE 減水剤	AE剤※	スランプ 保持剤※		
		(N/mm ²)	(%)	(%)	(cm)	(kg/m ³)					(kg/m ³)			(%)	(%)
1	現行	27	53	5.5	12	162	328	345	337	1129	3.28	3～4A	—	49.5	38.4
2	新規	27	53	6.5	12	157	333	329	321	1145	3.33	8A	—	47.2	37.0
3	新規	27	53	5.5	12	162	328	345	337	1129	3.28	3～4A	0.3	49.5	38.4
4	新規	30	45	6	12	160	357	326	319	1134	3.57	6A	—	44.9	37.0

※AE剤はセメントC (kg/m³)×0.001%を1Aとして表記。スランプ保持剤は結合材質量比(%)。

3. 模擬試験体による試験

3.1 試験内容

試験は、室内試験練り後、実機で製作した模擬試験体で行った。試験体は図-1 に示す高架橋の地覆を想定した壁状試験体と、梁や柱を想定した角状試験体の2種類を配合ごとに製作し、表-3 に示す試験を行った。生コン工場の実機により練混ぜを行い、アジテータ車に2.0m³のコンクリートを積込み、現場の運搬を想定した15分の運搬時間で現場事務所のヤードに運搬し、荷卸し時の試験を行った。その後、一般的な施工条件を想定しポンプ延長33mで圧送した試料を採取して試験を行い、模擬試験体に圧送して打込みを行った。打込みは2層で打込み、2層目は練混ぜから打終わりまでの最長時間として1.5時間を想定してアジテータ車を待機させた後に打込んだ。締固めは、壁状試験体はφ30mmのバイブレータを、角状試験体はφ50mmを使用し、締固め箇所をそれぞれ4箇所と9箇所に定め、1箇所当たり10秒間の締固めを行った。降雪および氷点下での作業となったため、雪寒囲いしジェットヒーターによる給熱養生を行った。打込み中は5℃以上とし、養生中は5℃以上を9日間、0℃以上を2日間確保して計11日間の給熱養生を行った。

硬化後の空気量試験は、模擬試験体からφ100mmの長さ約250mmのコアを図-1 に示す位置から5本を採取

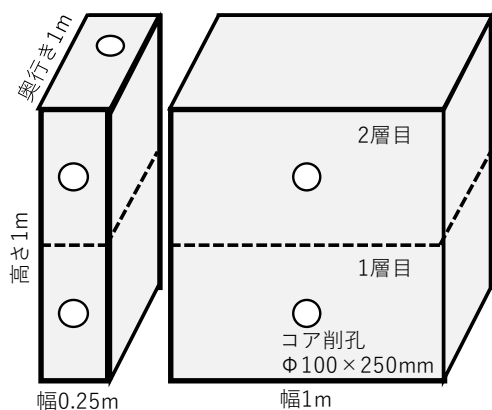


図-1 模擬試験体の概要

表-3 試験条件・項目

試験日〔気温〕	2023年12月22日 -8.6～-4.9℃
空気量試験 (JIS A 1128)	練混ぜ直後、荷卸時、ポンプ筒先採取、1層目締固め後、2層目締固め後
空気量試験 (硬化後) (ASTM C457)	コンクリートコア（5本/配合） 材齢28日 φ100mm 表層から20mmと250mmの位置
スランプ試験 (JIS A 1101)	練混ぜ直後、荷卸し時、 ポンプ筒先採取、1層目締固め後、2層目締固め後
圧縮強度試験 (JIS A 1108)	材齢3日、7日、28日（計18本/配合） 標準養生（水中20℃） 気中養生（給熱養生 5℃以上9日間、0℃以上2日間）

して、室内にて ASTM C457 に準拠したリニアトラバース法によって空気量と気泡間隔係数をコアの表層と深部で測定し、配合当り10点の測定値を得た。

3.2 試験結果

図-2 に各配合の空気量の経時変化と硬化後の空気量を示す。硬化後の空気量は、配合当り測定数（n=10）の平均値を示し、標準偏差を併記した。フレッシュ時の空気量は荷卸し時から筒先までの間に1～2%程度減少する傾向であり、硬化後の空気量は筒先と同等以上の傾向であった。空気量の減少は圧送の影響が大きく、打込みと締固めによる減少は小さいことから、荷卸しから硬化まで1～2%の減少を想定しておくことが妥当と考えた。配合3の空気量の筒先までの減少量は小さく、一定の空気量の保持性能が確認できた。硬化後の空気量のばらつきは、配合2が最も大きく標準偏差が1.47で、配合4は標準偏差が0.44と比較的ばらつきが小さかった。

図-3 に気泡間隔係数と空気量の関係を示す。概ね破線で示す目標範囲内であったが、現行配合の配合1の一部が250μm以下だったものの3%未満だった。新規配合はいずれの配合も250μm以下かつ3%以上であり、現行配合より高い耐凍害性を有することが分かった。なお、コアの深さによる相違は確認できなかった。

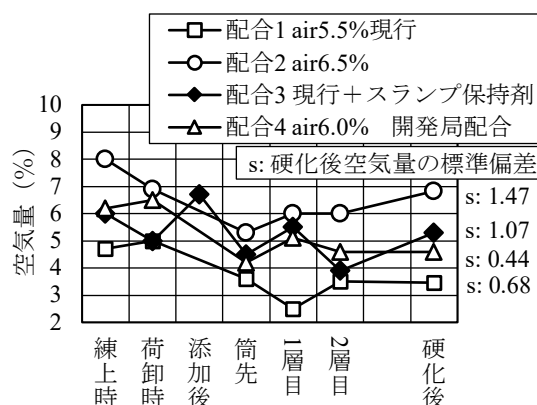


図-2 空気量の経時変化（模擬試験体）

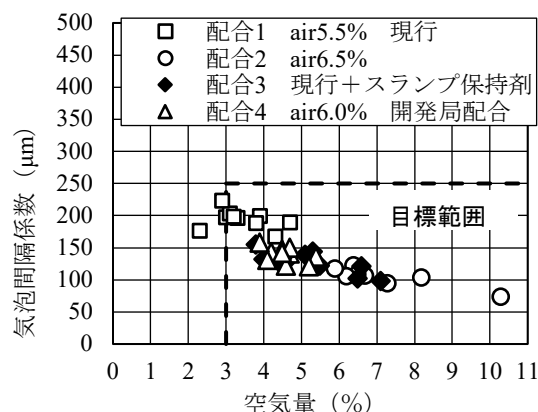


図-3 気泡間隔係数と空気量（模擬試験体）

4. 実構造物による試験施工

4.1 試験施工の概要

模擬試験体の試験結果を踏まえ、実際の製造・施工の影響および出来映えの確認として、実構造物による試験施工を行った。試験施工は、凍害や中性化の影響を受けにくい地中部材で行い、写真-1に示す全長40mの4径間のラーメン高架橋の梁高さ1.6mの地中梁を対象とした。生コン工場の出荷量と工程の都合から、延長方向に3分割し3つの配合で実施した。試験配合は、基準となる現行配合の配合1に加え、空気量を1%増やした配合2とスランプ保持剤を別途添加した配合3を対象とし、生コン単価および適用性の観点で、北海道開発局の配合4は試験施工から除外した。

表-4に試験項目を示す。打込みは1層40cmとして4層に分けて打込んだ。硬化後の空気量の測定は、地中梁の横梁と縦梁の側面の3層目の高さ1.2mの位置に設けたボス供試体を用いた。材齢28日後に取出した供試体の中央の水平切断面を対象にASTM C457に準拠したリニアトラバース法によって空気量と気泡間隔係数を測定した。

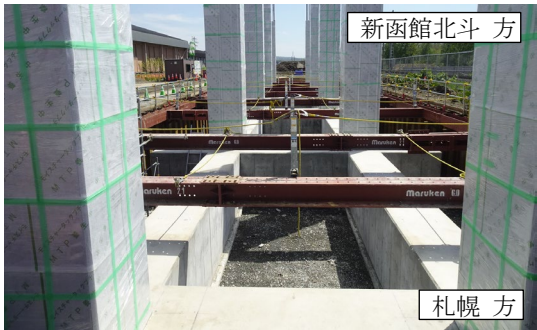


写真-1 試験施工箇所（地中梁）

表-4 試験条件・項目

試験日 〔気温〕	2024年3月13日〔-1~1℃〕 (配合2 空気量6.5%) 2024年3月20日〔-2~-1℃〕 (配合3 スランプ保持剤添加) 2024年3月28日〔5~6℃〕 (配合1 現行配合 空気量5.5%)
空気量試験 (JIS A 1128)	練混ぜ直後、荷卸時、ポンプ筒先採取
空気量試験 (硬化後) (ASTM C457)	ボス供試体(2箇所/配合) 高さ1.2m 3層目の位置に供試体の上面を配置。中央の水平切断面を測定。
スランプ 試験 (JIS A 1101)	練混ぜ直後、荷卸時、ポンプ筒先採取 (0.25, 50, 75, 100m³ごと。ただし、筒先は0m³のみ。)
圧縮強度 試験 (JIS A 1108)	材齢3日, 7日, 28日 (計18本/配合) 標準養生(水中20℃) 気中養生(給熱養生 5℃以上9日間, 0℃以上2日間 計11日間)

4.2 試験施工の結果

図-4に、配合ごとの荷卸し時の空気量と硬化後の空気量および気泡間隔係数を示す。荷卸し時から硬化後の空気量の増減は、配合1は-1~+1.5%、配合2は-2~±0%、配合3は0~+2%であり、1~2%程度の減少を想定することが妥当と確認でき、いずれも硬化後の空気量と気泡間隔係数の目標値は満足した。なお、図-4には、直径0.15mm以下の微細な空気量も記載した。文献8によれば、直径0.15mm以下の微細な空気量が1%以上であれば耐久性指数が高いことが指摘⁸⁾されており、圧送や締固め作業の影響で空気量が低下しても、いずれの配合も1%以上連行され、耐凍害性を有すると考えられる。特に配合3は、2.5~3%程度と微細な空気をより多く連行し、より高い耐凍害性を有すると考えられる。

図-5に、配合ごとのフレッシュ時の空気量の経時変化を示す。フレッシュ時の空気量は、ボス供試体と同じロットの試験値を示している。配合2は、荷卸し直後からの空気量の減少が大きく、圧送による減少が顕著であった。また、品質の変動がやや大きく、一部のアジテータ車の返却が発生したため、供給の面で課題があることが分かった。一方、配合3は、添加後に一時的に空気量が増加し圧送時に大きく減少したが、荷卸し後と圧送後との減少量を比較すると配合1より小さかった。打込み

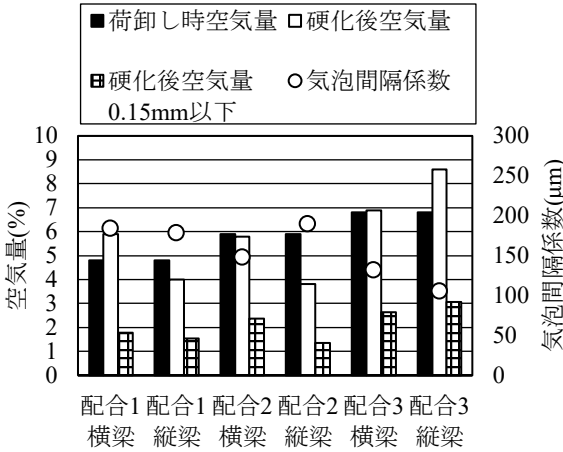


図-4 気泡間隔係数と空気量

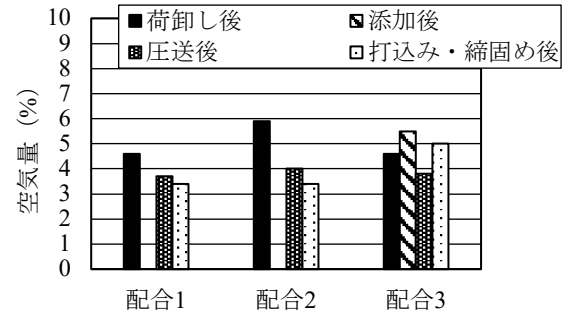


図-5 空気量の経時変化

と締固め後は空気量が増えており、スランプ保持剤の影響で打込みと締固め作業によって空気量が増えたことが考えられる。ただし、先に述べたように、硬化後の空気量は、直径 0.15mm 以下の微細な空気量も多いため、粗大な空気泡ではなく、凍害対策に効果のある空気泡が多く連行されていると考えられる。留意する点としては、添加剤量の調整や作業員の投入手間が必要な点である。

次に、強度発現について、図-6 に圧縮強度の結果を示す。室内での圧縮強度試験に加えて、JSCE-G504 に準拠したテストハンマーによる推定強度も示した。いずれも、所定の強度 27N/mm² が確保されていた。ただし、圧縮強度と推定強度は大きく乖離する傾向があった。この傾向は、同じ地域の他工区で施工された、空気量が 4.5% の地中部材でも同様であり、テストハンマーによる強度推定の取扱いは検討の余地を残した。施工計画の検証を行った上で、原因の検討や推定式の検証が必要と考えられる。一方で、標準養生や気中養生の圧縮強度は所定の強度を満足していることと、スケーリングを考慮したかぶり厚さを確保しているため、推定強度が乖離していても構造体の強度および耐久性は問題がないと判断した。

最後に、出来映えについて、沈みひび割れ、表面気泡、打重ね線、型枠継ぎ目のノロ漏れおよび砂すじの 5 項目を 1～4 点で評価する目視評価法⁹⁾によって、全体を代表

すると思われる任意の面を選定し評価した結果を述べる。評価値の平均値は、配合 1 が 3.4 点、配合 2 が 2.9 点、配合 3 が 3.3 点であった。全体的には良好であったが、地中梁の側面の上層部付近に気泡やブリーディング水が集中し、表面気泡が目立ち、一部で打重ね線や砂すじが見られた。空気量を多く含む配合であることから、上層に気泡が集まりやすい傾向があり、最終層は振動による締固めは過度に行わず、タンピングやスクレーパーなど加振に拠らない方法で入念に仕上げるのがより重要であることが考えられた。なお、寒地土木研究所の協力により表層透気試験（Torrent 法）¹⁰⁾や表面吸水試験（SWAT 法）¹¹⁾を実施してもらったところ、表面状態の悪い箇所や地中梁の側面の上層側は結果が悪く、上述したように配合のスランプや空気量に起因した気泡やブリーディングの影響が考えられる箇所があった。一方で、全体としては、透気試験結果は 5 段階の優～極劣で概ね優～良であり、吸水試験結果は 3 段階の良～劣で概ね良～一般であった。全体としては良好な品質であるため、上層部の締固めや仕上げに関する施工上の留意点を示し改善を繰り返すことで対応できると判断した。

5. 具体的な配合方針と配合検討時の留意点

以上までの検討状況を踏まえて、より確実な耐凍害性の確保のため、凍害危険度が 2 を超える 3～4 の区間では、表-5 に示す A～D のいずれかの配合を参考に、生コン工場や施工条件に応じた配合の選定や検討を行うことを定めた。A は、3%未満となる場合を想定して、現行の配合の品質管理の許容範囲を±1.5%から±1.0%や-0%～+1.5%などのように変更を協議するものとした。管理値が JIS 規格値より厳しくすることを踏まえて目標値とし、目標値を超過した場合には、試験頻度を増やして管理し、改善を図ることとした。

配合選定や検討時の留意点として、今回の試験で得られた知見を「配合検討時の留意点」として整理した。留意点やその方法をより具体的に示すことで、今後、他の現場で円滑に検討・導入できるように配慮した。

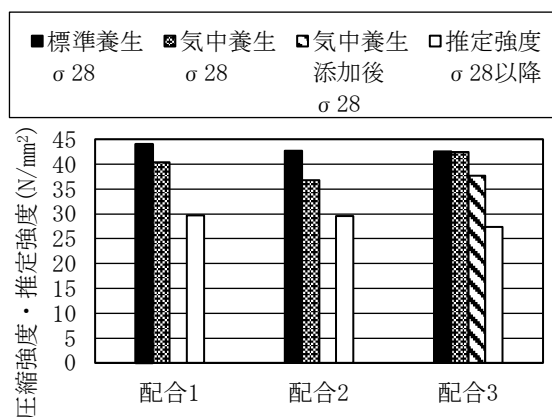


図-6 圧縮強度試験及び強度推定

表-5 凍害危険度 3～4 の区間に対する凍害対策の配合方針

配合方針	記事
A 現行の配合（空気量 5.5%）（配合 1）に対し空気量の品質管理の許容範囲を狭める方法（例：±1.0%や-0%～+1.5%）	許容値は、目標値として管理。ただし、超過時は試験頻度を増やして改善を図る。
B 現行の配合（空気量 5.5%）に現場で別途添加型のスランプ保持剤を投入する方法（配合 3）	営業線近接工事・暑中コンなど打込みまでに時間制約が厳しい高い場合など A, C, D が適用できない場合に有効
C 空気量 6.5%の配合（配合 2）	品質の変動がやや大きい 安定するまで返却リスクがあるため、全台数に対する返却数と各々の返却事由を報告
D 北海道開発局 RC-5S(b)(c)の配合（配合 4）	—

※A～D に拠らない場合は、硬化後の空気量の測定による耐凍害性を別途検討して配合を決定。

「配合検討時の留意点」

- (1)生コン工場の供給体制や工区の施工条件を考慮し、荷卸し時の空気量の下限値 4～5%程度の確保を目安に、配合を検討・協議する。
- (2)実機と圧送による試験施工を均しコン・地中部材などで実施することが望ましい。
- (3)施工の初期段階は品質管理の頻度を上げ、5 回目までの変動状況を確認する。
- (4)微細な空気量の連行のため、AE コンクリートを基本とし AE 剤の添加量を記録する。
- (5)ブリーディング水の除去、上層や仕上げ面の締固めや仕上げは入念に行う。ただし、過度な振動に留意し、加振以外の方法を検討する。
- (6)温度管理や適切な養生設備を用いて、湿潤養生、給熱養生や仕上げ面の養生などの施工管理を重点的に行い、入念な施工計画の策定と施工を行う。
- (7)空気量およびスランプ性状の経時変化と圧縮強度ならびに硬化後の空気量試験を実施する。
- (8)テストハンマーによる推定強度が設計基準強度を下回る場合、圧縮強度試験の確認に拠るが、以後の打込み～養生の施工計画を見直した上で検証する。

6. まとめ

凍害危険度の高い寒冷地に建設する北海道新幹線のより確実な凍害対策として、硬化後の空気量の確保の観点で、室内試験、実機による模擬試験体ならびに実構造物での試験施工を行い、現行配合の検証と新規配合を検討した。現行配合も耐凍害性を有することが確認されたが、新規配合はより高い耐凍害性を有することを確認した。ただし、いずれも製造や施工性の観点で優劣があり、生コン工場や施工条件によって適切な配合を選定することが必要であることから、本検討結果を基に「配合方針 A～D」を示すとともに、その選定及び実施に対する留意事項を「配合検討時の留意点」として定めた。

今後は、今回試験を行った生コン工場とは別の工場や工区での製造や施工性などの諸課題を抽出し対応していくことが求められる。

謝辞

配合の検討や各種試験では、横浜国立大学の細田暁教授、ジェイアール東日本コンサルタンツの石橋忠良氏、寒地土木研究所の吉田行氏や西松建設の三井功如氏にご指導ならびにご助言を頂いたほか、多くの関係者に多大なご協力を頂きました。ここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 池田 泰博, 松田 芳範, 三浦 秀一朗: 鉄道コンクリート構造物の凍害と空気量調査, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.1, No.1, 423-428, 2022.3
- 2) 土木学会: コンクリート構造物の耐凍害性確保に関する調査研究小委員会 (359 委員会) 委員会報告書およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ No.127, 2021.10
- 3) 長谷川 寿夫: コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案, セメント技術年報, Vol.29, pp.248-253, 1975
- 4) 土木学会: 養生および混和材料技術に着目したコンクリート構造物の品質・耐久性確保システム研究小委員会 (356 委員会) 第 II 期成果報告書, コンクリート技術シリーズ No.134, 2023.11
- 5) 石井 秀和, 進藤 良則, 井上 翔, 朝長 光, 前原 聡: -20℃を超える寒冷地におけるコンクリートの品質確保の検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, V-479, 2017
- 6) 国土交通省北海道開発局: 令和 6 年度北海道開発局道路設計要領, 第 3 集橋梁第 2 編コンクリート橋第 2 章コンクリートの品質,
https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_ken/ud49g7000001tos-att/splaat0000003wal.pdf (閲覧日: 2025 年 1 月 8 日)
- 7) 吉田行, 長谷川諒, 佐藤義臣, 島多昭典: 実橋梁の硬化コンクリート空気量と耐凍害性に関する調査, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.23, 2023.10
- 8) 片平 博, 古賀 裕久: 振動締固めを行ったフレッシュコンクリートの空気量測定試験方法の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.22, 2022.10
- 9) 坂田 昇, 渡邊 賢三, 細田 暁: 目視調査に基づくコンクリート構造物の表層品質評価手法の実績と調査結果を反映した表層品質向上技術, コンクリート工学, Vol.52, No.11, pp.999-1006, 2014
- 10) R.J.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992
- 11) 林 和彦, 細田 暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82～97, 2013