

北海道における実橋梁の空気量と耐凍害性に関する調査

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○吉田 行
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 長谷川 諒
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

耐凍害性を確保するための適切な空気量の設置に向けて、実橋梁の空気量と耐凍害性について調査した。その結果、エントレインドエアーの量により凍害の劣化形態が異なる可能性があることを確認した。また、スケーリングを抑制するには、硬化コンクリートの空気量とコンクリート表層品質の確保が重要であるとともに、水掛かりを防止するための対策についても考慮する必要があることを確認した。

キーワード：凍害、スケーリング、空気量、表層品質、水掛かり

1. はじめに

積雪寒冷地では、凍結防止剤等の塩分作用下で促進されて生じる凍害劣化が顕在化しており、対策が求められている。国土交通省東北地方整備局では、実構造物の凍害劣化の実態調査から冬期間の日平均気温と凍結防止剤散布量により凍害対策区分を設け、室内スケーリング試験結果も加味して、最も厳しい凍害対策区分では、レディーミクストコンクリートの標準空気量4.5%よりも高めた空気量6%（管理目標5.0～6.9%）および水結合材比45%程度、あるいは目標空気量を7%とする対策が提案されている¹⁾。著者らが行った塩分作用下のコンクリートのスケーリング抵抗性に関する室内試験においても、空気量の増加がスケーリング抑制対策の一手法として有効なことを確認している²⁾。

一方、国土交通省北海道開発局においても、海上および飛沫帯等の塩分が作用する環境下に建設する構造物については、耐凍害性確保の観点から、空気量6%かつ最大水セメント比45%の品質条件（例えばRC-4S(b)、(C)）が示されている³⁾。しかし、凍結防止剤の散布に対しては、塩害対策として最小かぶりの確保を基本に、かぶりが確保できない地覆、防護柵については、凍害、凍塩害の複合劣化の抑制を考慮して、塗装鉄筋や表面被覆、表面含浸材の適用について検討が必要なが示されているものの空気量等の品質条件は示されておらず、構造物の設置環境等を考慮して適切な品質条件を設定する必要がある。そのためには実構造物の設置環境と凍害劣化状況の把握が必要だが、実構造物を調査すると、おおよそ1980年を境として、それ以前に建設された構造物は劣化部周辺に微細ひび割れを伴い欠損が生じる事例が、それ



(a) ひび割れを伴う凍害劣化事例



(b) スケーリング劣化事例

写真-1 特徴的な凍害劣化事例

以降に建設された構造物はひび割れを伴わず表面損傷（スケーリング）が卓越する事例が多くみられる。写真-1はそれぞれの特徴的な凍害劣化事例を示しているが、このような劣化形態の違いは空気量の違いが影響していると推察され、寒冷地では古くから適切な空気量の確保が必要とされていたものの、レディーミクストコンクリートの空気量4.5%が標準となったのは1978年のJIS改訂以降であることと関係していると考えられた。

そこで本研究では、耐凍害性を確保するための適切な空気量の設定に向けた基礎調査として、実橋梁の空気量調査を行うとともに、採取した一部のコアでスケーリング試験を実施し、耐凍害性を評価した。

2. 実構造物の空気量調査

(1) 調査用コンクリートコア試料の収集

空気量の調査対象は橋梁とし、北海道開発局の協力を得て、橋梁定期点検調査による凍害劣化状況の確認と実橋梁の目視調査を事前に行って調査橋梁を選定したほか、撤去橋梁からもコアを採取した。加えて、構造物の調査・診断、落橋防止や橋脚巻立て、床版防水の導水孔設置など、削孔作業を伴う調査や工事で採取された調査済みまたは不要なコアを、凍害劣化の有無や採取部位によらず現場から送付してもらい、気泡分布測定が可能な試料を選別した。以上の各コア試料により気泡分布を測定した。

(2) 気泡分布の測定方法

気泡分布測定は、直径 $3\mu\text{m}$ 以上の気泡を画像から自動認識して計測可能な装置を用いてASTM C457に準じたリニアトラバース法により行った。なお、硬化コンクリートの空気量や気泡間隔係数の算出にあたってはコンクリートのペースト量が必要となるが、実橋梁のセメントの種類や配合が不明なため、セメントは普通ポルトランドセメント（密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ）、単位セメント量 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 、単位水量 $150\text{kg}/\text{m}^3$ と仮定して算出した。また、気泡分布測定用の試料はコア表面から 5cm 以深から切り出したものを使用し、粗骨材最大寸法を 25mm としてトラバース長 2413mm 以上を確保するため、コア直径に応じて1面から最大4面まで研磨して測定した。なお、直径 3cm 以上 5.5cm 未満の小径のコアについては、図-1に示すように、長さ 10cm に揃えたコアを半割し、直径 3cm の半割試料は3個、直径 4cm ～ 5.5cm 未満の半割試料は2個切断面を下向きに並べ、プラスチック枠を試料全周に配置して供試体間の隙間をシリコンと無収縮モルタルで充填成形し、硬化後に切断面（測定面）を研磨して測定した

(3) 実橋梁の硬化コンクリートの空気量

図-2に実橋梁の供用開始年と硬化コンクリートの空気量の関係を示す。凡例はコアを採取した部位である。また、既往データとは、寒地土木研究所で過去に実施した調査データ⁴⁾であり、調査部位はいずれも下部工（橋台・橋脚）、測定は顕微鏡を用いた手動計測（リニアトラバース法）によるものである。なお、参考として、凍害劣化形態の境と考えられる1980年と、レディーミクスコンクリートの標準空気量の下限值である3%を点線で示している。供用開始年や部位によらず、硬化コンクリートの空気量はほとんどの橋梁で3%を下回っていた。施工時の圧送や締固めにより硬化後の空気量が減少することが報告されており⁵⁾、空気量だけでは凍害劣化形態の違いを説明できなかった。

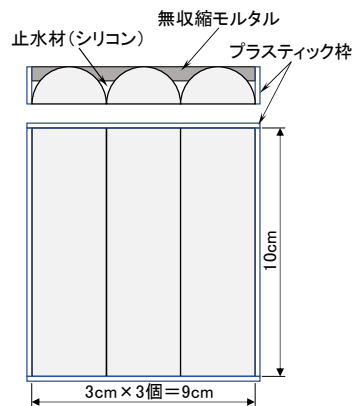


図-1 気泡測定用試料の加工例
(コア直径 3cm の場合)

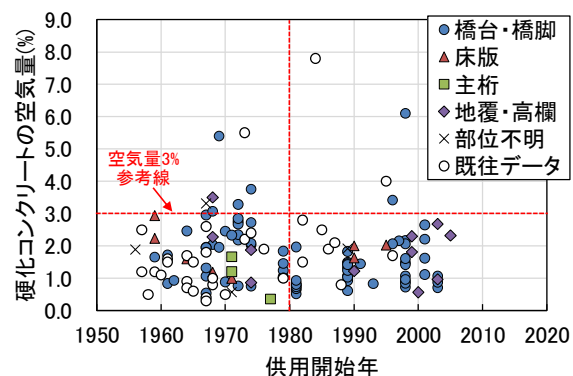


図-2 実橋梁の硬化コンクリートの空気量

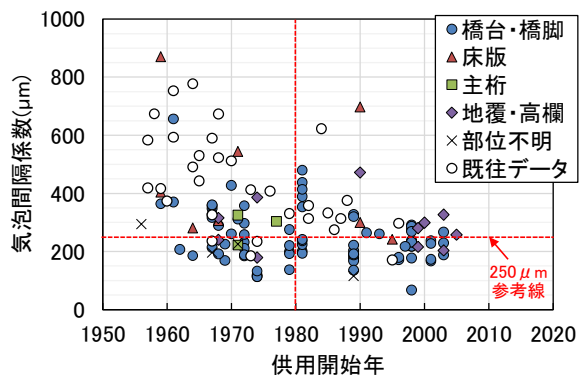


図-3 コンクリートの気泡間隔係数

(4) コンクリートの気泡間隔係数

図-3にコンクリートの気泡間隔係数を示す。気泡間隔係数は、コンクリート中の気泡径や数を考慮して算定され、気泡径が小さい微細な気泡（エントレインドエア）が多いほどその値は小さくなり、耐凍害性も良好となる。なお、既往データには気泡間隔係数 $2582\mu\text{m}$ （1964年）、 $1666\mu\text{m}$ （1967年）のデータが含まれていたが除外して表記している。1980年以前は、気泡間隔係数がこれを下回ると耐凍害性が向上するとされている $250\mu\text{m}$ の参考線より大きい橋梁が多く存在し、このような構造物ではエントレインドエアが不足しており、写真-1(a)に示したような微細ひび割れを伴う凍害劣化が顕著になると考えら

れる。一方、1990年以降は概ね300 μm 以下であることからAEコンクリートであることが確認でき、このような構造物では微細ひび割れ等の内部損傷は抑制されるものの、空気量の多少（空気量の許容差の下限側）や水掛かり、凍結防止剤の散布量等により写真-1(b)に示したような表面損傷（スケーリング）が生じると考えられる。なお、1980年から1990年までは気泡間隔係数が大きいものもみられるが、1978年のJIS改訂が現場に反映されるまでの過渡期にあたることや、実際のコンクリート施工時期と供用開始に差がある橋梁も含まれているためと考えられる。

(5) 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係

図-4に硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係を示す。硬化コンクリートの空気量3%以上のデータが少なく参考ではあるが、本調査の範囲内では、耐凍害性が向上するとされる気泡間隔係数250 μm 以下を確保するには、硬化コンクリートの空気量として3.5%以上が目安となる。なお、東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)¹⁾では、コンクリートの運搬、圧送、振動締め、ブリーディング等により空気量は損失するため、これらの損失を考慮して荷卸し時の空気量を適切に決める必要があることが示されており、レディーミクストコンクリートの標準空気量の下限値が3%では硬化コンクリートの空気量3.5%は確保できないため、凍結防止剤が散布される環境下では、空気量の標準値4.5%よりも高めて設定する必要があると考えられる。

3. コア試料による耐凍害性評価

2章で調査した試料のうち、事前に選定した橋梁や撤去橋梁から採取したコアについて、超音波伝播速度測定やスケーリング試験を別途行い、前述の気泡分布測定結果と合わせて耐凍害性の評価を行った。表-1に対象とした橋梁のコア採取部位と調査したコア試料数を示す。採取したコアの直径は、実構造物の配筋の関係から防護柵は70mm、それ以外は100mmとした。なお、超音波伝播速度は採取したコアの全てで実施したが、気泡間隔係数とスケーリング試験は一部のコアしか実施していないものもあり、表には実施した試料数を示している。

(1) 試験方法

a) 超音波伝播速度測定

コンクリート表層から内部方向の劣化状況を把握することを目的として透過法により超音波伝播速度を測定した。測定はコア表面から内部10mm位置より内部方向に10mm間隔で供試体直径方向に超音波を透過させ、その伝播速度を測定した。測定は、コアを採取した構造物の鉛直、水平方向に対応して直交する2測線で行い、その平均値で評価した。

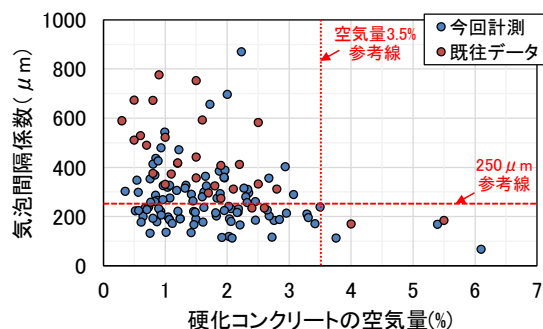


図-4 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係

表-1 耐凍害性評価対象としたコアの採取部位と試料数

供用開始年	構造部位	採取箇所	採取コア数	気泡間隔係数	スケーリング
A橋(1964)	翼壁	A1	2	1	2
B橋(1968)	地覆	下り	2	1	2
		上り	2	-	2
	堅壁	A1	4	1	4
C橋(1971)	堅壁	A2	4	1	4
D橋(1974)	地覆	桁上	4	1	4
		橋台上	5	1	4
	堅壁	A2	5	5	1
E橋(1979)	堅壁	A2	5	2	2
F橋(1981)	堅壁	A1	5	5	2
		A2	5	5	2
G橋(1989)	堅壁	A1	5	5	1
		A2	5	5	2
H橋(1999)	防護柵	桁上	1	1	1
		橋台上	1	1	1
I橋(2000)	防護柵	桁上	1	1	1
J橋(2003)	防護柵	上り	1	1	1
		下り	1	1	1
K橋(2005)	防護柵	桁上	1	1	1

b) スケーリング試験

スケーリング試験は、コアの表層から10mm厚さの円盤状供試体をコンクリートカッターで切り出し、RILEM CDF試験に準じて+20 $^{\circ}\text{C}$ から-20 $^{\circ}\text{C}$ まで10K/hの定速で4時間冷却し、-20 $^{\circ}\text{C}$ を3時間保持後、同じ定速で20 $^{\circ}\text{C}$ まで4時間加熱し、+20 $^{\circ}\text{C}$ を1時間保持する、12時間1サイクルで凍結融解作用を与えた。供試体はコンクリートカッターで切り出し後、側面をエポキシ樹脂でコーティングし、試験面（コア表面）を下向きにして3%NaCl溶液を7日間吸水（毛管浸透）させてから試験を開始した。測定は凍結融解4、8、14、28サイクルで実施した。

(2) コアの超音波伝播速度

図-5に各コアの表層から内部方向の超音波伝播速度を示す。超音波伝播速度は3000~4500m/sの間に分布し、橋梁やコア採取部位等により速度の絶対値は異なるが、コンクリート強度が高い場合には速く、低い場合には遅くなる特性があるため、配合や強度が異なる橋梁の劣化状況を絶対値により直接的に比較することは適切でない。このため、ここでは同一橋梁における表面から内部方向の変化やコア採取箇所の違いで評価した。

表面から内部方向の速度変化をみると、E橋やF橋A1堅壁のように、同じ部位から採取した場合でもコアによってばらつきが大きいケースもあるが、全体としては複数コアのばらつきは大きくなく、表層から内部方向まで

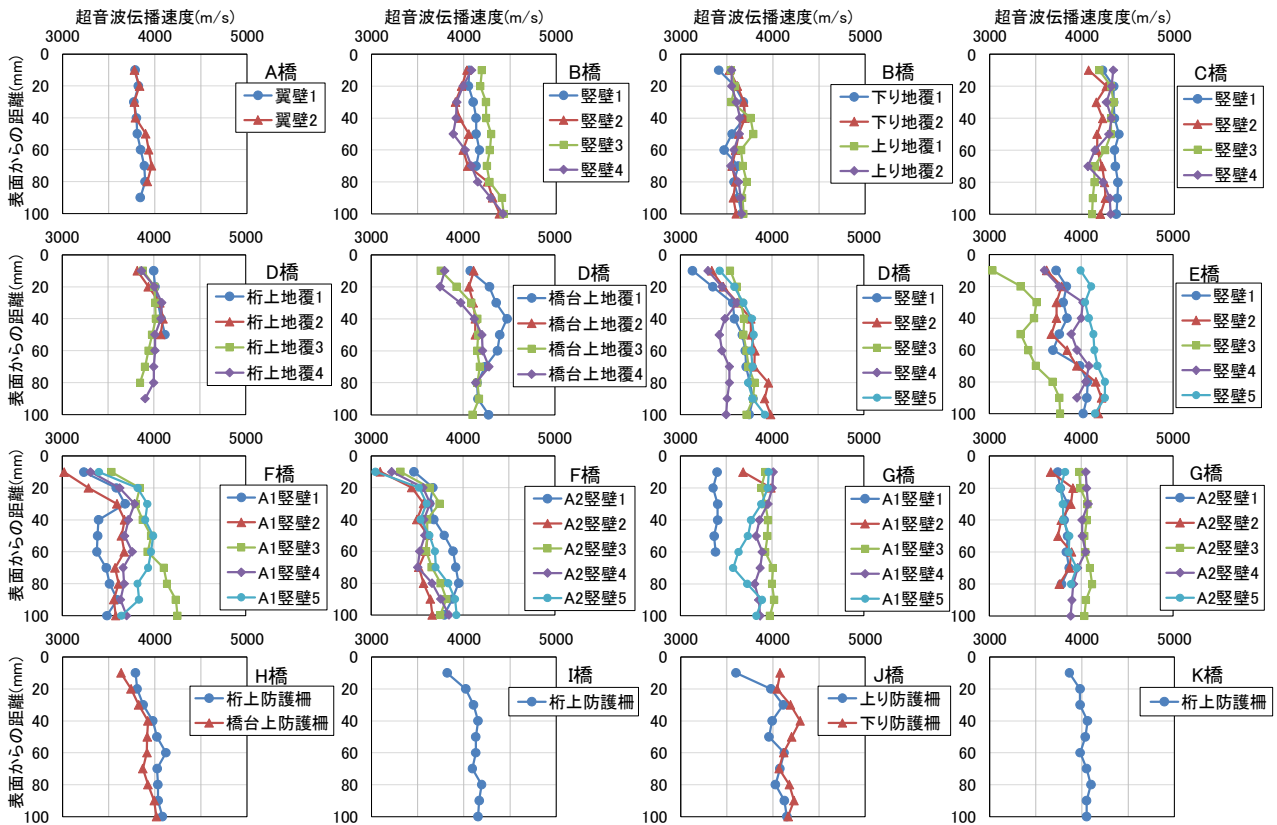


図-5 各コアの超音波伝播速度

速度の変化が小さいケースと、表層部の速度が内部よりも低下しているケースがみられた。表層部の速度低下は、乾燥による水和停滞や微細ひび割れ、塩分供給下での凍結融解作用等により品質が低下したためと考えられる。

橋梁毎に詳細に見ると、供用開始年が古いA～C橋は表層から内部の超音波伝播速度の変化は比較的小さかったが、D橋はコア採取部位により傾向は異なった。A橋は水掛かりがある胸壁やその上の地覆に凍害劣化がみられたが、配筋の関係からコアは翼壁下部の比較的健全な箇所から採取したため表層と内部の差が小さかったと考えられる。B橋は跨線橋の撤去橋梁で、地覆、縦壁ともにコア採取箇所のスケールリングは小さかった。C橋は河川平水位付近の気中水中境界部からコアを採取したが、現地縦壁のスケールリングは比較的軽微だった。D橋は跨線橋の撤去橋梁で、現地では桁上の地覆より橋台上の地覆の方がスケールリングが大きく、コア採取は作業性を考慮して桁上地覆は上面から垂直に、橋台上地覆は地覆内側のスケールリングがない部位から水平に採取したが、桁上地覆の超音波伝播速度は深さ方向で差はなく、橋台上地覆は多少ばらつきがあるものの表層10mmの速度が低下傾向を示した。現地縦壁はジョイント部から水が流入して上部にスケールリング劣化が生じていたが、コア表層部の超音波伝播速度も低下していた。

E～G橋はレディーミクストコンクリートの空気量4.5%が標準となって以降の過渡期に建設されたものである。E橋は水掛かりのない桁下縦壁と、橋台横に接続さ

れた擁壁縦壁からコア採取しており、現地ではいずれもスケールリングはみられなかったが、ばらつきはあるもののコア表層部の超音波伝播速度が低下していた。F橋は写真-1(a)に示した張り出した縦壁上部の角部にひび割れを伴う凍害劣化がみられた橋梁だが、コアはいずれも水掛かりのない桁下縦壁から採取している。A1縦壁でコアによりばらつきはあるものの、いずれも表層部の超音波伝播速度は低下していた。G橋はA1、A2ともにジョイント部からの水の流入が確認され、いずれの現地縦壁にもスケールリングが確認されたが、縦断勾配がありA1側がA2側より低く、A1縦壁のスケールリングが大きかった。コアはいずれも比較的スケールリングが小さい箇所から採取しており、超音波伝播速度はいずれも表層と内部の差は小さかった。

H～K橋は同一路線の高規格自動車専用道路のコンクリート壁式防護柵からコアを採取しており、北海道開発局の道路設計要領で表面含浸材の塗布が標準となる前に建設された箇所である。H橋は遮音壁が設置された防護柵で、スケールリングが比較的大きく、特に橋台上の防護柵の方が桁上の防護柵よりもスケールリングは大きかったが、コアの超音波伝播速度は、いずれの箇所でも表層部の速度低下が確認された。I橋も遮音壁が設置された防護柵だが現地ではスケールリングは生じていなかった。しかし、コアの超音波伝播速度は表層部で低下していた。J橋は遮音壁が設置されていない中央分離帯からコアを採取しており、現地の上り側防護柵はスケールリングが生

じておらず、下り側防護柵の下部にスケーリングが生じていたが、コアの超音波伝播速度は、上り防護柵の表層部で低下しており、下り防護柵は表層と内部の差はほとんどなかった。K橋は遮音壁が設置されている防護柵で、調査橋梁の中で最もスケーリングが大きく、防護柵全面にスケーリングが生じていたが、コアの超音波伝播速度は、表層と内部の差が比較的小さかった。

以上から、一部のコア表層で超音波伝播速度が低下しており、構造物表層の品質低下を確認できたが、現地スケーリング状況とは必ずしも対応していなかった。

(3) コア供試体のスケーリング量

図-6に各コアから採取した供試体のCDFスケーリング量を示す。CDF試験ではスケーリングの限界量として凍結融解28サイクルのスケーリング量 1.5kg/m^2 が示されており⁶⁾、これを目安としてスケーリング抵抗性を評価した。なお、図-6中段に示したE橋とF橋はスケーリング量が多かったため、縦軸のスケールを他と変えて表示している。また、I橋とK橋は同一のグラフに表示している。

供用開始年が古いA～D橋をみると、B橋は堅壁の1供試体で限界量の 1.5kg/m^2 をわずかに上回ったものの、地覆、堅壁ともにスケーリング量は少なく、実橋梁で劣化が小さかったことと一致した。一方、A橋、C橋およびD橋堅壁は凍結融解サイクルの進行に伴いスケーリング量は増加し限界量を大きく上回ったが、D橋桁上地覆は凍結融解14サイクルまではスケーリング量が少なく、28サイクルで1供試体で限界量を下回ったものの3供試体で急増し限界量を大きく上回った。A橋は現地で水掛かりがある胸壁上部や地覆で、D橋は地覆や堅壁でスケーリングが確認されており試験結果と一致した。他方、C橋の現地堅壁でスケーリングが軽微だったのは、塩分を含まない河川水が作用したためと考えられる。

空気量の標準が4.5%となって以降の過渡期に建設されたE～G橋をみると、E橋とF橋は凍結融解14サイクル以降スケーリング量が急増し、特にF橋の1供試体は14サイクルで崩壊した。E橋は現地堅壁でスケーリングは生じておらず、塩分を含む水掛かりがなかったためと考えられ、F橋は水掛かりがある堅壁上部の角部にひび割れを伴う凍害が生じておりスケーリング試験結果と一致した。一方、G橋は、現地堅壁でスケーリングが生じていたもののスケーリング試験ではスケーリング量が少なかった。

高規格自動車専用道路の防護柵であるH～K橋をみると、現地でスケーリングが生じていなかったI橋でスケーリングが少なく限界量を下回ったが、それ以外はいずれの橋梁も限界量を上回った。H橋の現地防護柵は、橋台上の方が桁上よりもスケーリングが大きく、スケーリング試験においても同傾向が確認された。J橋の現地防護柵は、下り側のみでスケーリングが生じていたが、スケーリング試験では両者に差がなかった。K橋の現地防護柵は、本調査における同一路線で最もスケーリングが大きかったが、スケーリング試験ではH橋やJ橋と概ね同程度だった。

以上から、コア供試体によるスケーリング試験結果は、現地のスケーリング状況と概ね一致していたが、G橋のように現地と異なる結果となるケースも確認された。

(4) スケーリングが生じる要因に関する考察

これまでに、コアの超音波伝播速度測定とスケーリング試験を行い、現地構造物のスケーリング状況との関係を定性的に評価してきた。ここでは、室内試験で得られた各特性値の関係を調べ、スケーリングが生じる要因について考察を加える。

図-7に硬化コンクリートの空気量と凍結融解28サイクルにおけるスケーリング量の関係を示す。両者に明確な

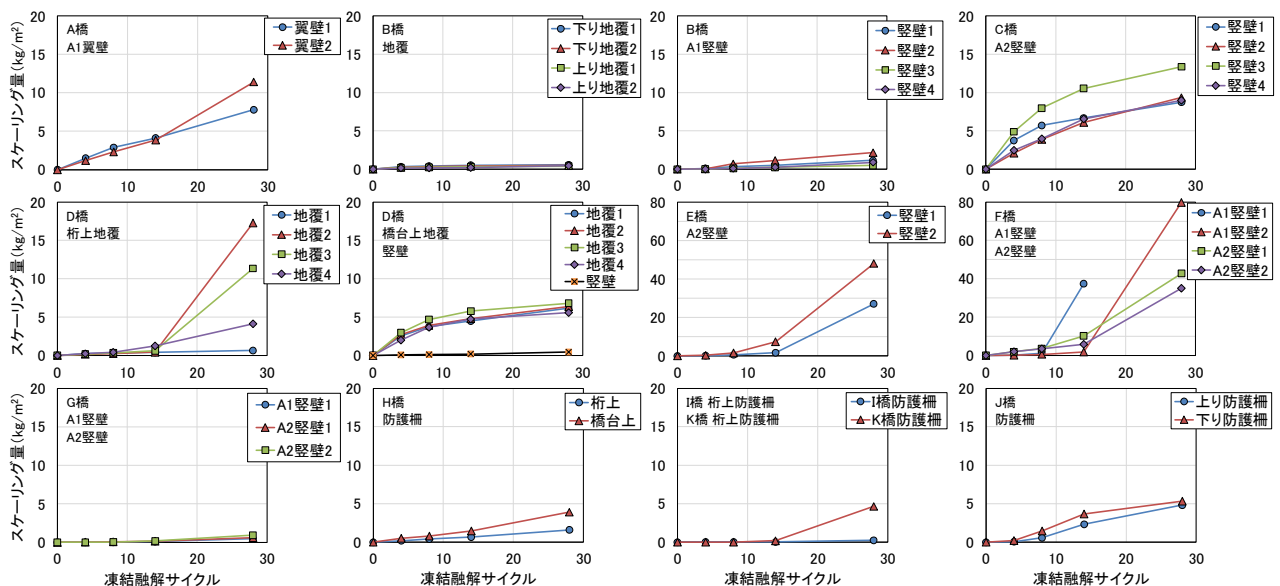


図-6 コア供試体のスケーリング量 (CDF 試験結果)

相関は認められないが、硬化コンクリートの空気量が少ない場合、スケーリング量が極めて多くなる危険性が高くなることが確認できる。

図-8に気泡間隔係数とスケーリング量の関係を示す。気泡間隔係数で評価すると、耐凍害性が向上するとされる250 μm 以下でもスケーリング量が多くなる場合があることが確認できる。これについて、図-4で示した硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係において、気泡間隔係数が同程度でも硬化コンクリートの空気量は幅広く分布しているように、気泡径と各気泡径における空気量の関係を表す気泡分布が大きく異なる場合でも気泡間隔係数が同程度の値を示す場合があるため⁷⁾、スケーリング抵抗性を確保するには、硬化コンクリートの空気量の確保を確実にすることが重要と考えられる。

図-9にコア表層と深部の超音波伝播速度比とスケーリング量の関係を示す。超音波伝播速度比とは、コア表層10mmの速度と表面から最も深い位置（最大100mm）の速度の比であり、表層の速度が深部より低下している場合、速度比は1.0より小さくなる。速度比が0.9を下回るとスケーリング量が極めて多くなる傾向が確認できる。3(2)節でも述べたように、表層の速度低下は、乾燥による水和停滞や微細ひび割れ、塩分供給下での凍結融解作用等による品質低下のためと考えられることから、スケーリングを防止するには、コンクリート表層の品質確保が重要である。また、水掛かりの影響も大きいいため、水掛かりを防止するための対策についても併せて考慮する必要がある。

4. おわりに

本研究では、耐凍害性を確保するための適切な空気量の設定に向けた基礎調査として実橋梁の空気量調査を行い、エントレインドエアの量により凍害の劣化形態が異なる可能性があることを確認するとともに、スケーリングを抑制するには、硬化コンクリートの空気量の確保（目安として3.5%以上）と表層の品質を高めることが重要であり、併せて水掛かりを防止するための対策も考慮する必要があることを確認した。これらの結果を踏まえ、耐凍害性確保に資する対策を提案していきたい。

謝辞：本調査の実施に当たり、国土交通省北海道開発局、および調査、工事関連の各コンサルタント会社や各施工会社に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 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）、2019年改訂版、2019、https://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/190329_shiryou.pdf（2023年1月1

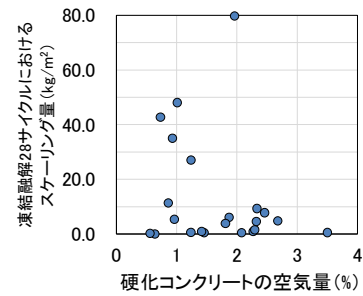


図-7 硬化コンクリートの空気量とスケーリング量

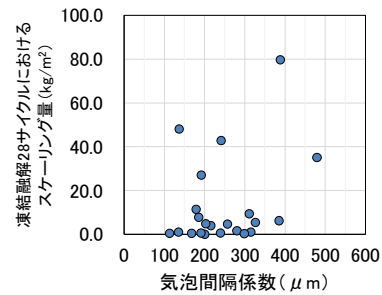


図-8 気泡間隔係数とスケーリング量

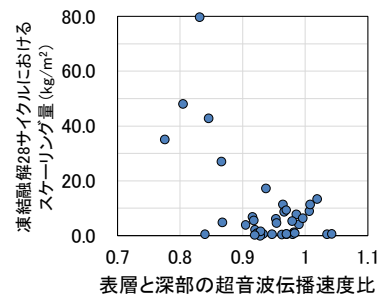


図-9 表層と深部の超音波伝播速度比とスケーリング量

0日閲覧)

2) 吉田行、安中新太郎：異なる試験方法によるコンクリートのスケーリング抵抗性の評価、土木学会第73回年次学術講演会、V-322、pp.643-644、2018.8

3) 国土交通省北海道開発局：令和4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/ud49g70000001tos-att/splaat0000003wal.pdf（2023年1月10日閲覧）

4) 遠藤裕丈：凍結融解と塩化物の複合作用を受けるコンクリートの耐久性設計および維持管理に関する研究、北の交差点、Vol.37、pp.28-31、2019.10

5) 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127、pp.227-239、2021.10

6) RILEM Recommendation: CDF TEST - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - test with sodium chloride solution (CDF), 1996.

7) 坂田昇、菅俣匠、林大介、橋本学：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、第23巻第1号、pp.35-47、2012.1