

地覆のスケーリング程度と抵抗性の関係調査

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 ○佐藤 義臣
吉田 行
島多 昭典

各地で橋梁地覆コンクリートが、想定より早くスケーリング劣化している事例がある。橋梁地覆部の鉄筋はかぶりが薄く、スケーリングが進むと凍結防止剤の影響を受けやすく、鉄筋腐食のリスクが高まる。そこで、地覆コンクリートのスケーリング程度と地覆コンクリートが持つスケーリング抵抗性の関係を把握するため現地調査と採取コアによる試験を行い、スケーリングに影響を及ぼす要因を確認し、スケーリング抑制のための適切な施工管理方法を検討した。

キーワード：地覆、スケーリング、鉄筋腐食、チェックシート、表面含浸材

1. はじめに

北海道開発局では、橋梁の新設、架け替え、補修工事において地覆コンクリートの施工が行われている。これらの工事では、JIS工場から出荷され、仕様を満たしたコンクリートを用いて施工しているが、想定より早期にスケーリング劣化している事例がある。橋梁の地覆コンクリートは鉄筋のかぶりが薄く、スケーリングが発生すると、鉄筋のかぶりがさらに薄くなるため、散布した凍結防止剤の影響を受けやすくなり、鉄筋腐食のリスクが高まる。本報では、地覆コンクリートのスケーリング抵抗性を把握する目的で、近年施工された橋梁の地覆コンクリートの現地調査と採取したコアによる各種試験を行い、考察からBIM/CIMを活用した管理方法について検討した。

2. 現地調査概要

現地調査は、過去に施工記録調査¹⁾を行った15橋の内、11橋(18箇所)で実施した。現地では、地覆コンクリートの劣化状況の目視調査、地覆コンクリートからφ70mmのコア採取および原位置試験として透水量試験を行った。採取したコアについては、各種室内試験を行いスケーリングの程度(以下、SC程度)との関係を分析した。以下に各試験方法の詳細を述べる。

(1) 吸水防止層の厚さ測定

地覆コンクリートに塗布されたシラン系表面含浸材の含浸状況を把握するために、写真-1に示すように、採取した地覆コンクリートのコア側面に霧吹きを用いて水を噴霧し、撥水範囲を確認することで吸水防止層の厚さを測定した。



写真-1 吸水防止層の厚さ測定

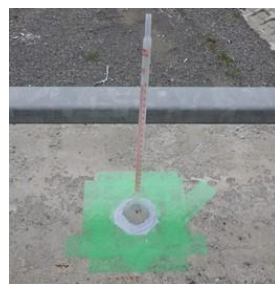


写真-2 透水量試験器具

(2) 透水量試験

JSCE-K571に準拠して写真-2に示すようにロート状の透水試験器具を地覆コンクリート上に設置し、注水から24時間後の透水量を測定した。

(3) 超音波伝播速度測定

図-1に示すように、採取したコア表面側から内部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、1コアにつき直交する2測線で行い、速度の違いから地覆コンクリートの劣化度を評価した。

(4) 気泡分布測定

採取したコア表層部分を厚さ10mm程度にスライスし、表面側の円形面を研磨して気泡分布を測定するための供試体を作製し(写真-3)、直径3μm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コンクリート内に含まれる気泡のサイズと個数をカウントすることで硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数を算出した。

(5) 採取コアのスケーリング試験

地覆コンクリートのスケーリング抵抗性を確認するた

め、一部の採取コア表面から 5cm 厚さの円盤形供試体をコンクリートカッターで切り出し、RILEM CDF 法に準拠したスケーリング試験を行った。

(6) 細孔径分布測定

地覆コンクリートの表層と内部の細孔構造を把握するため、一部の採取コアの表層部分と最も深い部分からコンクリートカッターを用いて 5mm の立方体試料を作製し、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。

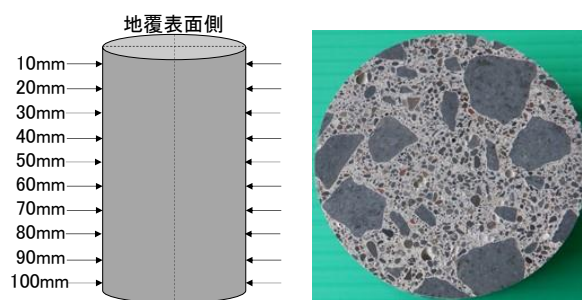


図-1 超音波伝播速度の測定位置 写真-3 研磨した供試体

3. 現地調査結果

(1) スケーリングの影響要因と SC 程度

著者らは、既報¹⁾で、竣工後比較的早期に生じる地覆コンクリートのスケーリング発生要因について施工記録をもとに調査を行い、セメントの種類や日照状況のほか、施工時の湿潤養生期間の確保が影響することを確認している。そこで、図-2 にこれらの影響要因と地覆コンクリートの SC 程度を示す。横軸の項目にある「日向」と「日陰」は現地地覆の日照状況を、「有」と「無」については、本来実施すべき湿潤養生期間に対して実際に行った湿潤養生期間が短い場合にはスケーリングへの影響が大きくなるため、適切な湿潤養生期間と実際の養生期間の乖離の有無を意味している。なお、SC 程度は、劣化度に応じて 1 点（スケーリング無し）～4 点（スケーリング大）と 1 点刻みで数値化して評価した。

セメントの種類では、SC 程度 4 の該当割合は高炉セメント B 種の方が多いが、いずれのセメントも SC 程度 1～4 点と広く分布しており特徴的な傾向はなかった。なお、今回調査した地覆では、普通ポルトランドセメントは 9 月～3 月に実施された工事で、高炉セメント B 種は 6 月～10 月に実施された工事で用いられており、寒中コンクリートの対応が必要な 11 月～3 月までの工事では全て普通ポルトランドセメントが用いられていた。

日照状況では、いずれのセメントにおいても日向の方

が SC 程度は大きくなる傾向があるが、日照状況で差がないケースもみられ、N 橋はどちらもスケーリングが生じておらず、F 橋起点側のどちらも SC 程度は小だったが、G 橋はどちらも SC 程度が大きかった。

湿潤養生日数の乖離の有無については、乖離有でスケーリングが生じていなかったのは F 橋 L 側終点のみであり、それ以外は SC 程度 2～4 だった。F 橋 L 側終点は、日照条件が日陰だったことが影響している可能性がある。一方、乖離無では日向の条件でもスケーリングが生じていないケースがみられたものの、G 橋(L)は乖離無かつ日照条件が日陰でも SC 程度 4 と大きく、これら以外の要因が影響していると考えられる。

図-3 に凍結防止剤の km 当たり散布量と SC 程度の関係を示す。相関は低いが、凍結防止剤の散布量が増加すると SC 程度が大きくなる傾向がある。特に、G 橋は凍結防止剤散布量が 20(t/km) 以上と多いことから、湿潤養生日数の乖離が無く、日陰条件の G 橋(L)でも SC 程度が大きくなったことが考えられる。逆に、スケーリングが生じていなかった F 橋(終 L)、N 橋(L, R)、O 橋は凍結防止剤の散布量が比較的少なかったことも影響していると考えられる。一方、凍結防止剤散布量が少ない F 橋(終点 R)や C 橋(R)は SC 程度は大きく、湿潤養生日数や日照条件が大きく影響したと推察される。

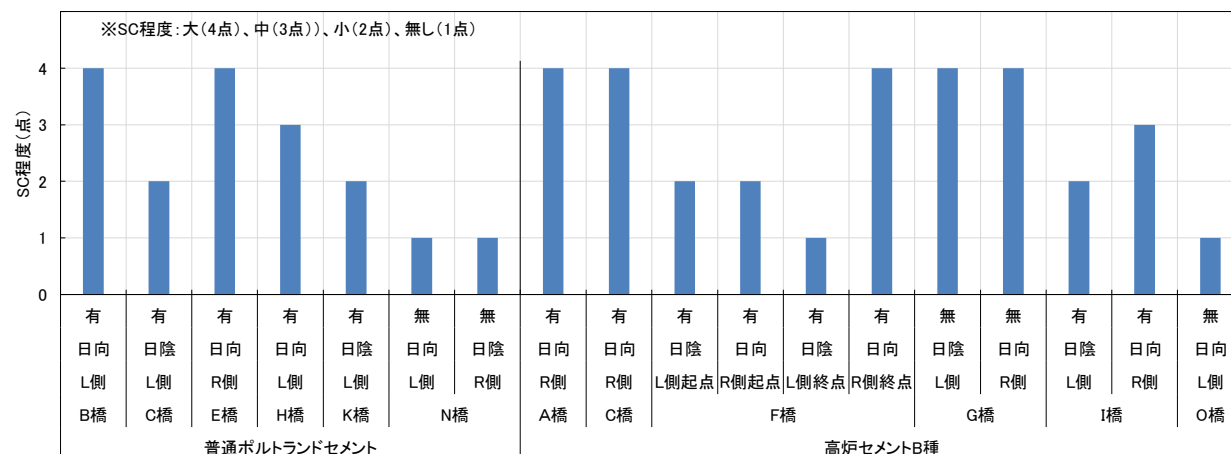


図-2 早期スケーリングの影響要因と実際の地覆コンクリートの SC 程度

(2) 吸水防止層の厚さと SC 程度

図-4 に採取コアの吸水防止層の厚さと SC 程度の関係を示す。なお、既報で実施した施工記録調査¹⁾では、いずれの箇所でもシラン系表面含浸材を施工していることを確認したが、18 箇所から採取したコアのうち 10 箇所では吸水防止層が確認できなかった。図から、相関は低いものの、吸水防止層が 1mm 以上確認されたケースは、ほぼ SC 程度 2 以下であり撥水による効果が一部確認され、1mm より小さくなると SC 程度は大きくなる傾向がある。他方、吸水防止層は確認できなかったがスケーリングが生じていなかった N 橋(L、R)と O 橋(L)は、いずれもコンクリートの湿潤養生日数の乖離がなく適切に養生が行われており、スケーリングの抑制につながったことが考えられる。また、吸水防止層は 1.8mm 確認されたが SC 程度 4 だった C 橋(R 側)は、日照条件が日向で湿潤養生日数の乖離があり、これらが影響したと考えられる。

一方、吸水防止層の調査では、上述のように 10 箇所では吸水防止層が確認できず、確認できた箇所でも 0.6mm ～3.6mm と差が生じていた。国土交通省北海道開発局の道路設計要領第 3 集橋梁第 2 編コンクリート橋の参考資料「B. 道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」によれば、シラン系表面含浸材塗布作業時にコンクリート表面の含水率が高い、コンクリート表面に汚れがある、被膜養生剤が施工されている等により含浸材の浸透性が低下する可能性があることが示されている。また、今回調査した橋梁は全ての箇所でも高周波容量式の表面水分計による含水率管理が行われていたが、このタイプの水分計は表面から深さ 0～40mm 程度の平均誘電率をもとに表面含水率を計測するため、表面が濡れているものの内部は濡れていないケースなど表面と内部で濡れ具合が異なる場合には、表面の含水状態を適切に把握することが困難となる可能性があることが示されており、実際の表面の含水率が測定値よりも高かった場合は、含浸材による吸水防止層形成に影響する可能性がある。

吸水防止層が確認できなかった G 橋地覆コンクリートの表面含浸材塗布直後の状況を一例として写真-4 に示す（施工記録から抜粋）。コンクリート表面に色むらが見られ、表面含浸材の浸透量が多い色の濃い部分と、浸透量が少なく乾燥が早い白い部分を確認できる。写真-5 は現地調査時に G 橋の地覆天端に、水で濡らした刷毛で 4 本の線を引いて水分浸透状況を確認したものである。青矢印部は表面含浸材の効果により撥水し、黄矢印部は少し撥水、橙矢印部は撥水せず水が浸透、赤矢印の付近では既に表層がスケーリングしており、橙矢印部よりも吸水が多かった。このように、表面含浸材の浸透量に差異が生じた場合、浸透が小さい部分ではスケーリングが発生しやすくなると推察される。

以上のことから、吸水防止層のスケーリング抑制効果が一部確認されたものの、吸水防止層の形成不足、日当たり、施工時の湿潤養生不足等、コンクリートの表層品

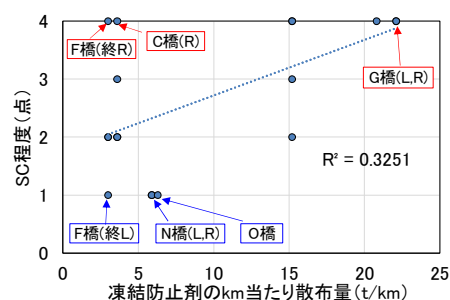


図-3 凍結防止剤散布量と SC 程度の関係

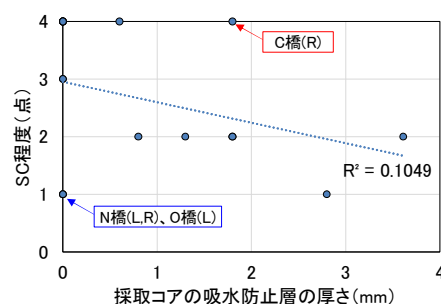


図-4 採取コアの吸水防止層の厚さと SC 程度の関係



写真-4 G 橋の表面含浸材塗布直後の状況

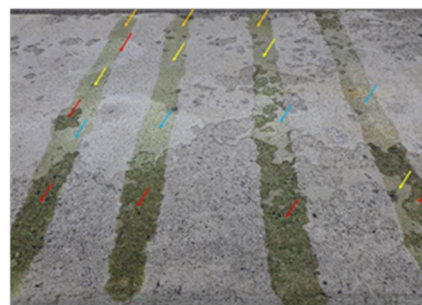


写真-5 現地調査時の G 橋地覆天端の水分浸透状況

質に影響を及ぼす要因が該当する場合、スケーリングの抑制が困難となる場合があることが示唆された。なお、吸水防止層を確保するには、含浸材塗布時に色むらが発生した場合、含浸していない部分がある可能性を考慮した塗り重ねが考えられる。また、コンクリートの含水率測定については、複数箇所でも測定を行って地覆コンクリートの乾燥状態を全体的に確認するとともに、高周波容量式よりもコンクリート表面の含水率の把握が可能な電気抵抗式表面水分計を用いるなど、コンクリート表面の

含水率を適切に把握する必要がある。

(3) 現場透水量と SC 程度

地覆コンクリートの現場透水量と SC 程度を図-5に示す。なお、C 橋(L 側)は、地覆天端のホコリ除去が不十分で、24 時間後の計測時にホコリを伝って水が滲出していたため、ここでは除外して評価した。図から、透水量と SC 程度に相関は確認できなかった。写真-2に示したよう透水量試験では試験器具とコンクリートの境界をシールするが、スケーリング劣化が著しく表面の不陸が大きい箇所ではシールしても漏水するため、劣化が比較的小さい箇所を選んで試験器具を設置している。また、写真-4に示したように含浸材の浸透状況が同一地覆でも箇所により異なると考えられ、これらの影響により、地覆コンクリート全体の SC 程度を表す指標との相関が低くなったと考えられる。

(4) 採取コアの超音波伝播速度

コアの超音波伝播速度を図-6に示す。超音波伝播速度は、1 コアにつき直交する 2 測線で測定した値を平均して図示した。超音波伝播速度は概ね 3000~4500m/s の間に分布し、橋梁やコア採取箇所等により速度の絶対値

は異なっているが、強度が異なれば絶対値も異なるため、ここでは同一橋梁における地覆表面から内部方向の変化に着目した。全体としては概ねコア表層の伝播速度は内部より低下する傾向にあり、表面から深さ 30~40mm まで速度が低下しているケースもあるが、B 橋や E 橋のように表層と内部で変化が小さいケースもみられた。コンクリート表層の速度低下は、凍結融解作用によるひび割れなど劣化の影響による可能性があり、表層の劣化が大きいほど内部と表層の速度差は大きくなると思われる。

図-7に内部と表層の超音波伝播速度の差分と SC 程度の関係を示す。ここでは大まかな傾向を把握する目的で、採取箇所が同じ複数コアの平均値を用いて、内部（表面から深さ 100mm、コア長が 100mm 以下の場合最大深さ）と表層（表面から深さ 10mm）の速度差を算出した。なお、E 橋は内部と表層の速度差が小さく算定上マイナスとなったため、ここでは速度差ゼロとして評価した。内部と表層の速度差が 200(m/s)を超えるものは SC 程度が大きい傾向があり、内部と表層の速度差から劣化状況のある程度判定できると考えられる。他方、0 橋(L)は現地でスケーリングが生じていないにもかかわらず伝播速度の差分は大きく、反対に E 橋(R)や B 橋(L)のように伝播速度の差分が小さくても SC 程度が大きいものもみられた。2

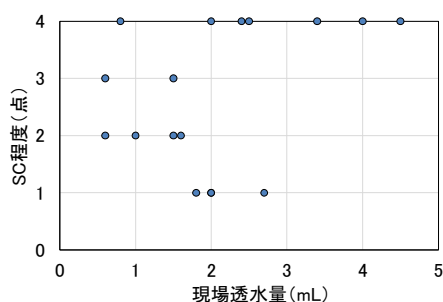


図-5 現場透水量と SC 程度の関係

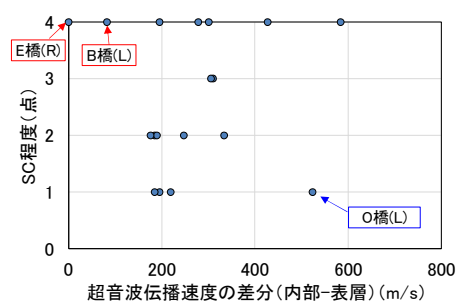


図-7 内部と表層の超音波伝播速度の差分と SC 程度の関係

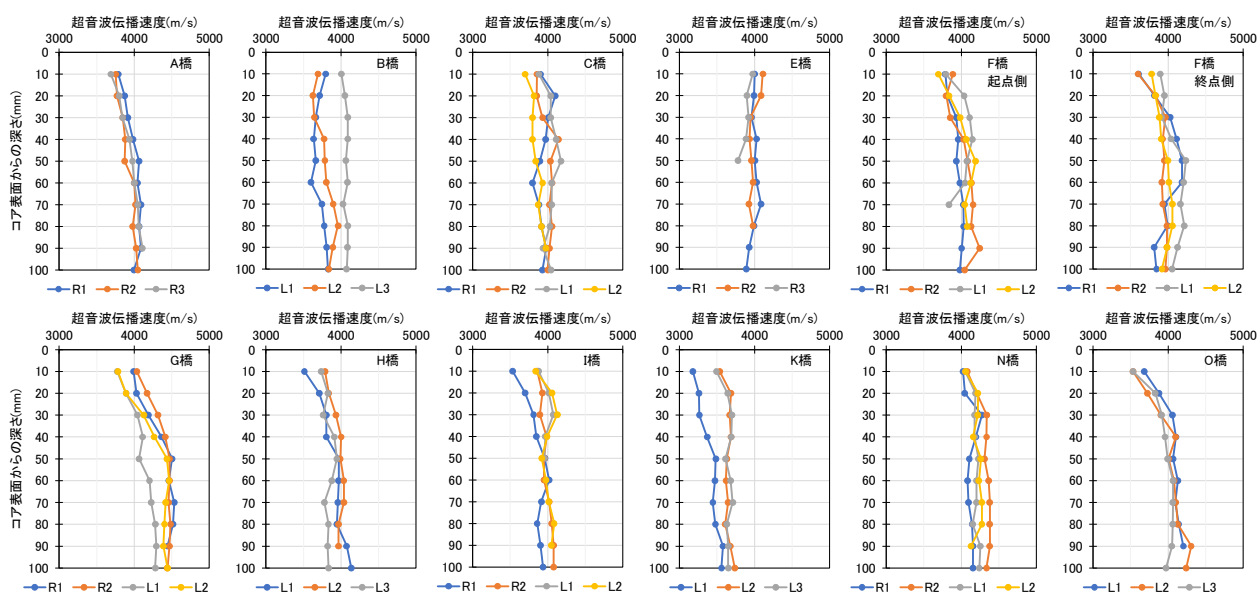


図-6 採取コアの超音波伝播速度

章で示したように、今回の調査では、採取したコア表層から試料を切り出してスケーリング試験を実施する関係から、コアは劣化部近傍の表層剥離が比較的小さい箇所から採取している。このため、コアの超音波伝播速度と実際の SC 程度との関係が必ずしも一致しないものもあると考えられる。また、超音波伝播速度は、凍結融解作用による劣化だけでなく、乾燥による水和停滞や微細ひび割れによる品質低下の影響も受けるため、0橋(L)のように凍害が生じていない場合でも表層部の速度が低下することは十分考えられる。なお、その場合、0橋(L)の表層品質は低下していることを意味するが、適切な湿潤養生期間は確保されており、その原因は特定できなかった。

(5) 採取コアの気泡間隔係数

図-8 に採取コアの気泡分布測定結果から算出した気泡間隔係数と SC 程度の関係を示す。一般に、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ を下回ると耐凍害性が向上するとされている²⁾が、全ての調査箇所で気泡間隔係数は $250\mu\text{m}$ 以下だった。しかし、SC 程度との関係は認められないことから、空気量以外の要因がスケーリングに大きく影響していることが確認できる。

(6) 採取コアのスケーリング抵抗性

図-9 に一部の採取コアで実施したスケーリング試験結果を示す。凡例には橋梁名に続けて地覆の SC 程度を示した。また、図には CDF 試験におけるスケーリング限界量 $1.5\text{kg}/\text{m}^2$ を破線で示している。SC 程度 4 の A 橋は凍結融解サイクルの進行に伴いスケーリング量が増加して限界量を超え、SC 程度 3 の H 橋もスケーリング量が多かった。また、SC 程度 1 の O 橋はスケーリング量が少なく、これらの 3 橋梁は現地地覆の SC 程度と同様の傾向が確認された。一方、B 橋や E 橋は SC 程度 4 だったもののスケーリング量は極めて少なく、SC 程度 2 の K 橋は最もスケーリング量が多くなり、SC 程度とは逆の傾向を示した。図-7 に示したように、B 橋と E 橋は採取コアの内部と表層の超音波伝播速度の差が小さいことから、コアが健全で空気量が確保されていたためスケーリング量が小さかったことが考えられる。

他方、K 橋から採取したコアは吸水防止層が 3.6mm と最も大きかったが、シラン系表面含浸材はスケーリング試験のように常時水に浸かる場合には内部に水が浸透する可能性があることから、効果が小さかったことが考えられる。また、図-10 には K 橋のコア表層と内部から採取したコンクリートの細孔径分布を示している。細孔径 $40\sim 1000\text{nm}$ の毛細管空隙が表層部で多く内部は少ないことから、表層は空隙が多く水が浸透しやすいが内部は緻密なことがわかる。表層に浸透した水が凍結すると未凍結の水は内部方向に移動し、内部が緻密だと未凍結水の移動時に生じる水圧が大きくなるためスケーリングは生じやすくなると考えられる。加えて、K 橋は湿潤養生

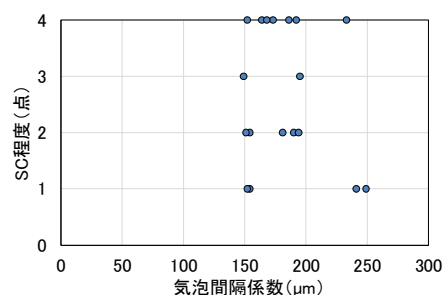


図-8 採取コアの気泡間隔係数と SC 程度の関係

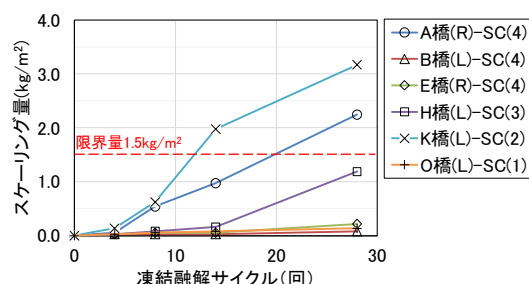


図-9 採取コアのスケーリング試験結果

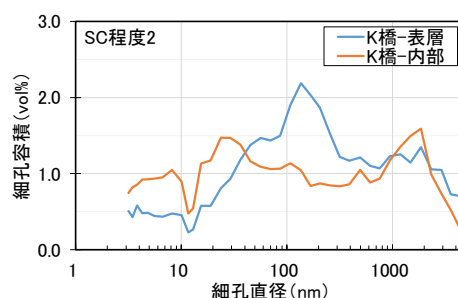


図-10 K 橋の細孔径分布

期間の乖離があることから、これらの影響によりスケーリング量が増大したと推察される。なお、実際の橋梁では常時水に浸かることは少ないため、吸水防止層の厚さが大きいほどスケーリングは抑制されると考えられる。

以上、現地調査結果から、日照条件、施工時の湿潤養生期間、凍結防止剤の散布量に加え、表層品質が地覆コンクリートのスケーリングに影響することを再確認した。また、表面含浸材塗布によるスケーリング抑制効果を高めるには吸水防止層の確保が重要であり、吸水防止層の形成が不足すると、スケーリングの抑制が困難となる場合があることが示唆された。

4. 施工管理方法の検討

施工記録と現地調査から、養生や表面含浸材の塗布作業など施工方法がスケーリングに影響することが確認されたことから、適切な施工管理方法を提案するために、現在取り組まれている BIM/CIM を活用した施工管理方法について検討した。検討にあたり、現在実施されているコンクリートの施工管理項目を把握するため、北海道開

発局で令和4年度に完了したBIM/CIM活用工事のうち、39件の工事を抽出して調査を行った。調査内容は、道路・河川工事仕様書で定められているコンクリートに関する施工管理項目と、BIM/CIMモデルによって実施されるリクワイヤメント（発注者から受注者への要求事項）（表-1）のうち、コンクリートの施工管理項目に関する履行状況とした。

(1) 道路・河川工事仕様書の施工管理基準調査

道路・河川工事仕様書の施工管理基準において、コンクリート構造物の品質に関する項目は、①品質管理、②写真管理、付表に記載された③建設材料の品質記録の保存要領が該当する。①品質管理は、塩化物総量規制、単位水量測定、スランプ試験、コンクリートの圧縮強度試験、空気量測定となっており、施工方法に関する規定はない。②写真管理は、「工種、種別毎に設計図書、施工計画書に従い施工していることが確認できるように適宜」撮影が必要と記載されているが、施工状態を管理する写真の指定はない。③建設材料の品質記録の保存要領では、配合、材料特性（セメント、骨材、混和材料）、コンクリートの品質試験結果、打設関係の4項目あり、施工に係る打設関係には、打設期間、打設数量、打設気温、打設方法、養生方法、打設会社名、運搬時間、ポンプによる圧送距離、使用管径を記録することになっているが、現地調査で懸念された湿潤養生日数、品質が高いコンクリートを作るための施工方法、表面含浸材施工時の乾燥などの項目は含まれていないことを確認した。

(2) BIM/CIMモデル調査

BIM/CIMモデルのコンクリート品質に関する事項は、令和2年度は、後工程における活用を前提とする属性情報の付与、の項目で規定されており、令和3年度以降は属性情報の付与に関する項目が無くなり、その他【属性情報の付与】として記録されている工事があった。属性情報の付与を行った工事は22件あり、半数以上の現場で実施されていた。属性情報の付与は、3次元モデル成果物作成要領（案）（令和4年3月）に定義され、表-2に示すように4階層に分けられている。コンクリートの品質に関する事項は階層4で、必要度は任意となっており、属性管理項目の例示が表-2の記載となっていた。図面に表示された部材名称と材料規格（RC-2-1N等）を表した工事と、配合計画書や品質管理記録（塩化物総量規制、単位水量測定、スランプ試験、コンクリートの圧縮強度試験、空気量測定）を記載した工事があり、属性付与情報量に違いがみられたが、現地調査で懸念された湿潤養生日数、品質が高いコンクリートを作るための施工方法、表面含浸材施工時の乾燥などの項目は含まれていないことを確認した。

以上から、スケーリング抵抗性向上を図るには、施工管理項目に、湿潤養生日数（温度制御養生日数）、表面

表-1 BIM/CIM活用工事のリクワイヤメント

令和2年度	
a)	段階モデル確認書を活用したBIM/CIMモデルの品質確保
b)	情報共有システムを活用した関係者間における情報連携
c)	後工程における活用を前提とする属性情報の付与
d)	工期設定支援システム等と連携した設計工期の検討
e)	BIM/CIMモデルを活用した工事費等の算出
f)	契約図書としての機能を具備するBIM/CIMモデルの構築
g)	異なるソフトウェア間で互換性を有するBIM/CIMモデルの作成
h)	BIM/CIMモデルを活用した効率的な照査
i)	施工段階におけるBIM/CIMモデルの効率的な活用方策の検討
j)	BIM/CIMモデルを活用した効率的な監督・検査
k)	その他【業務特性に応じた項目を設定】
令和3年度、令和4年度、令和5年度	
○	「3次元モデル成果物作成要領（案）」に基づくBIM/CIMモデルを活用した契約図書（2次元図面）に係る照査及び施工計画の検討
a)	BIM/CIMを活用した監督・検査の効率化
b)	BIM/CIMを活用した変更協議等の効率化
c)	リスクに関するシミュレーション（地質、騒音、浸水、既設構造物への影響等）
d)	対外説明（関係者協議、住民説明、広報等）
e)	その他【事業の特性に応じた項目を設定】

表-2 属性情報の階層

階層	階層分けの対象	階層の定義	属性情報付与の必要度	例
階層1	構造全体	構造物の分類（道路土構造物、山岳トンネル、橋梁、橋門・橋管等）	必須	〇〇橋
階層2	構造体	工種に相当する構成要素の集合体	必須	上部構造体
階層3	構成要素	主部材等に相当する部材要素の集合体	必須	地覆
階層4	部材	個別の部材、部品等に相当する最小の階層	任意	地覆コンクリート 25-12-20 N

含浸材を塗布するまでの乾燥日数をBIM/CIMモデルの属性情報に追加することで記録を蓄積し、また、適切な施工を促すとともに将来の規準に反映させていく必要があると考える。また、コンクリートの品質確保の観点から、適切な施工を確実に実施するには、施工状況把握チェックシート³⁾の活用も有効と考えられる。

5. まとめ

現地調査結果から、地覆コンクリートのスケーリングに影響を及ぼす要因を確認し、スケーリングを抑制するには適切な養生による品質の確保や吸水防止層を確実に形成するための表面含浸材の施工など、施工方法の適切な管理が重要なことを確認した。これらのことから、湿潤養生日数（温度制御養生日数）、表面含浸材を塗布するまでの乾燥日数をBIM/CIMモデルの属性情報に追加することで記録を蓄積し、また、適切な施工を促すとともに、将来の基準に反映させることで、補修時には、属性情報に記述された過去の施工方法等に起因する劣化要因は無かったか確認し、問題と思われる劣化要因があれば、配慮した設計・施工を行うことで品質向上を図ることができると考える。

参考文献

- 1) 佐藤義臣、吉田行、島多昭典：コンクリート表面が早期にスケーリング劣化する要因に関する調査、第66回(2022年度)北海道開発技術研究発表会論文、2023.2
- 2) 長谷川寿夫、藤原忠司：凍害、コンクリート構造物の耐久性シリーズ、技報堂出版、pp.62-68、1988
- 3) 森岡弘道、二宮純、細田暁、田村隆弘：地方自治体におけるコンクリート構造物のチェックシートを活用した品質確保の取組み、コンクリート工学年次論文集、Vol.35, No.1, 2013