

基盤 10 積雪寒冷環境下に長期暴露されたコンクリートの耐久性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：島多昭典、菊田悦二、嶋田久俊、
吉田行、清野昌貴、遠藤裕丈、
野々村佳哲、太田日出春、渡辺淳、
鈴木哲

【要旨】

積雪寒冷地では、凍害と塩害の複合作用を受けるため、長期耐久性向上対策の確立が急務となっている。そのためには、実環境下におけるコンクリートの耐久性の検証が必要となるが、その検証には長い期間を要するため、促進試験や短期間での暴露試験結果等により耐久性を予測評価している現状にある。しかし、予測評価した耐久性と実環境下における実際の耐久性については十分な検証がなされていない。

本研究では、暴露実験場や実構造物に暴露した試験体および現場試験施工の経年調査を行い実環境下における長期的な耐久性やその予測評価手法の有効性を検証した。

初代十勝大橋コンクリートの長期暴露経年調査から、中性化は暴露試験以降ほとんど進行していないが、一部で圧縮強度等の低下がみられ凍害による影響が示唆されたため、継続調査が必要なことを確認した。また、中性化速度係数は現在の予測式から算出される値より大きく、セメントの粉末度等の影響を考慮する必要があることを明らかにした。積雪寒冷地における耐久性向上対策として開発した改質セメントコンクリート製品の5年目の調査から、改質セメントを用いた製品は一般製品よりもスケーリング劣化が少なく、塩化物イオンの浸透抑制効果が高いことを確認した。また、実測値から算出した塩化物イオンの拡散係数と提案した予測式から算出した値が乖離しており、さらにデータを蓄積して検証する必要があることを確認した。日本海沿岸に暴露したシラン系表面含浸材を塗布した供試体および実構造物の8～10年経過時の調査から、道路設計要領の仕様を満足するシラン系表面含浸材による塩化物イオンの浸透抑制効果の持続と、提案した予測手法の有効性を確認した。また、道路橋の地覆および剛性防護柵に塗布する場合、塩化物イオンの浸透予測、設計を行う際の吸水防止層の見かけの拡散係数は、母材コンクリートの1/100程度で設定することが妥当なことを明らかにした。

キーワード：積雪寒冷地、長期暴露試験、耐久性、予測評価

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化は、気象・環境条件および使用条件などにより著しく異なる。特に、積雪寒冷地では、凍害と塩害の複合作用を受けるため、長期耐久性向上対策の確立が急務となっている。そのためには、実環境下におけるコンクリートの劣化機構の解明や耐久性の検証が必要となるが、その検証には長い期間を要するため、促進試験や短期間での暴露試験結果等により耐久性を予測評価している現状にある。しかし、予測評価した耐久性と実環境下における実際の耐久性については十分な検証がなされていない。一方、耐寒材料チームでは、気象および環境条件の異なる暴露試験場やその他の地域において、供用50年以上経過後に取り壊された実橋梁

の主桁試験体の耐久性や各種耐久性向上対策の検証のために暴露試験を実施している。このため、実環境下におけるコンクリート構造物の耐久性や新たに提案された耐久性予測評価手法の有効性を検証するには、これら実環境下に長期間暴露された試験体の物性や耐久性に関する実際の状況について定期的にデータを取得し評価する必要がある。

本研究では、実環境下に長期間暴露された種々のコンクリート試験体の物性および耐久性に関するデータを収集し、実環境下における長期的な耐久性やその予測評価手法の有効性を長期的かつ定期的に検証することによって、長期耐久性の予測評価手法の改良・修正を行った。以下に各試験調査から得られた研究の成果を報告する。

2. 初代十勝大橋コンクリートの長期耐久性調査と耐久性予測評価手法の検証

2.1 暴露試験体の物性および耐久性に関する経年調査

2.1.1 長期耐久性試験の概要

初代十勝大橋は昭和16年(1941年)に供用を開始して以来、平成8年(1996年)に解体されるまで50年以上にわたり健全性を保持してきた。

橋梁の解体は平成8~9年(建設後55年経過)にかけて行われたが、冬期には -20°C 以下となることも多い苛酷環境下において、AE剤が使用されていないにもかかわらず、50年以上もの長期間その健全性を保持し続けたコンクリート構造物として貴重な存在であった。また、当時、長期材齢でのコンクリートの耐久性等に関する研究は世界的にも少なかったことから、初代十勝大橋のコンクリート主桁の一部を保存し、完成時から200年(西暦2146年まで)にわたり耐久性等の試験調査を行うことが計画された。

橋梁の解体作業と並行して、コンクリートの初期値として物理試験、物理化学試験および鉄筋調査等の一次調査が行われ^{1,2,3)}、現在は内陸に所在する寒地土木研究所の美々暴露実験場(苫小牧市字美沢)に暴露されており(写真-2.1.1)、5年間隔で圧縮強度試験が、また10年間隔で物理化学試験が継続されている。

本研究では、一次調査から19年経過(建設後74年経過)時まで継続的に実施してきた圧縮強度や中性化深さ等の調査結果から、現時点におけるコンクリートの物性や耐久性について評価した。

2.1.2 試験概要

(1) 試験用供試体の採取

試験用供試体は、直径15cm、長さ78cmの貫通コアを各暴露箇所(屋根なし、屋根あり)と高さ方向の上部と下部から1個ずつ、中部からは物理化学分析用も含め2個ずつ(計8個)採取した(写真-2.1.2)。その後、写真-2.1.3に示すように、貫通コアの表面を含む両端部5cmをコンクリートカッターで切断し、中性化深さの測定に用いた。続けて $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 供試体を切り出し、圧縮強度および静弾性係数の測定に用いた。なお、一次調査後に行われてきた経年調査では、写真-2.1.2に示した表側から採取した長さ40cm程度のコアにより強度や中性化の試験が実施されてきたが、暴露試験体の表側はほぼ北西に面しており、日射の影響を考慮する観点から、今回の調査では暴露試験体両面について調査した。



写真-2.1.1 初代十勝大橋コンクリートの暴露状況



写真-2.1.2 コア採取状況

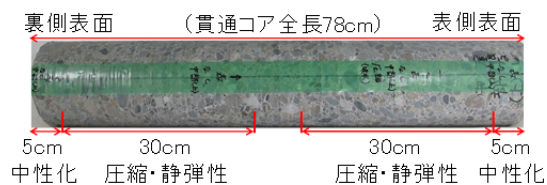


写真-2.1.3 コア切断状況

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数測定

圧縮強度および静弾性係数の測定は、JIS A 1108およびJIS A 1149に準拠して実施した。なお、平成8年に行われた一次調査時には、ひずみゲージを供試体に貼り付けて静弾性係数の測定が行われたが、以降の測定ではコンプレッソメータを使用している。また、一次調査では試験前に供試体を48時間吸水させた後に試験が行われたが、以降の試験では吸水調整は行っておらず、今回の調査時に一部の試験体で吸水の影響を検討したが、明確な傾向は無くバラツキの範囲内であることを確認している。

(3) 超音波伝播速度測定

暴露試験体の表面から内部方向への劣化状況を確認するため、写真-2.1.3に示した切断前の貫通コアを用いて、表側表面から裏側表面に向けて1cm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、現地暴露試験体の鉛直、水平方向に合わせて直交する2測線で行った。

(4) 中性化深さ測定

JIS A 1152 に準拠して、表層部の試料をコンクリートカッターで暴露試験体の鉛直線に沿って切断し、切断面にフェノールフタレインエタノール 1%溶液を噴霧して、1 供試体あたり 10 点（建設後 74 年の調査では 15 点）で中性化深さを測定した。

なお、本文中における中性化は、セメント水和物中のカルシウム化合物がコンクリート中に浸入した二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムに変化する現象である炭酸化と同意であるが、フェノールフタレイン溶液の噴霧により判定される現象を中性化と称し、後述の分析試験により同定される炭酸カルシウムが生じた現象を炭酸化と称する。

(5) X線回折

水和生成物や新規生成物を同定するために粉末X線回折試験を行った。試験は、試料水平型X線回折装置を用い、Ni フィルターを透過した Cu-K α 線（管電圧 40kV、管電流 40mA）にて行った。なお、ゴニオメータの走査速度は、3.0°/min で走査ステップは 0.01° とした。また、半定量分析を行うために粉砕時に酸化マグネシウム (MgO) を 10% 添加して測定した。生成量は 74 μ m 通過粉末の(1+100) 塩酸不溶解残分補正を行いペーストベースで MgO に対する相対ピーク強度で評価した。

(6) 示差熱分析

水和生成物や新規生成物を把握するための別の試験として、熱分析試験を行った。熱分析試験は、熱重量/示差熱分析装置を用い、昇温速度 10°C/min にて 20~1000°C まで測定した。生成物の定量は 74 μ m 通過粉末の(1+100) 塩酸不溶解残分補正を行いペーストベースで行った。

(7) 電子顕微鏡/元素分析 (SEM/EDS)

生成物等の形態観察および構成元素分析による生成物の同定のため、塊状試料にカーボン蒸着し、エネルギー分散型分析計を兼備した走査型電子顕微鏡を用い、加速電圧 5kV および 15kV で観察および元素分析を実施した。

(8) 細孔径分布

コンクリート中のゲル空隙と毛細管空隙を把握するため、水銀圧入による細孔構造の分析を行った。分析は水銀ポロシメータを用いて行い、測定は直径 3nm~10 μ m の細孔を分析した。細孔径分布は、冷

凍真空乾燥 (D-dry) 後の試料を振動ミル粉砕後に (1+100) 塩酸不溶解残分を測定し、その残分補正を行いペーストベースで表わした。

2.1.3 経年調査結果

(1) 圧縮強度と静弾性係数の経年変化

図-2.1.1 に一次調査（建設後 55 年）以降、暴露 19 年目（建設後 74 年目）までの圧縮強度の経年変化を示す。なお、凡例の「表」は、写真-2.1.3 に示した表側表面側のコアを、「裏」は裏側表面側のコアを示している。

全体として、暴露試験体上部よりも下部の方が圧縮強度は高く、施工時のブリーディング等の影響が考えられる。表側の圧縮強度を同一部位（高さ）で比較すると、屋根なしの圧縮強度は屋根ありよりも大きかった。また、経年的には、屋根なしの圧縮強度は建設後 70 年（暴露開始後 15 年）までは概ね増加の傾向を示したが、建設後 74 年では若干低下した。一方、屋根ありの圧縮強度は、上部を除き経年的な強度の増加はみられなかった。

屋根なしの圧縮強度の増加は、水分供給による未水和セメントの水和や細骨材に含まれていた火山灰のポズラン反応によるものと考えられる。なお、未水和セメントの残存や火山灰のポズラン反応が生じていることは、これまでに行われた物理化学分析⁴⁾において確認されている。

一方、水分供給が多い場合、冬期には凍結融解作用を受けやすくなる。図-2.1.1 をみると、屋根なしでは、北西に面している表側コアの方が南東に面している裏側よりも圧縮強度が高く、裏側の方が日射の影響により冬期に凍結融解作用を受けやすいと考え、相対的に裏側の強度が低下した結果と一致する。

しかし、最も水分供給が少ないと考えられる屋根あり裏側の強度が最大となっており、本調査結果だけでは一連の現象を説明できないため、バラツキの

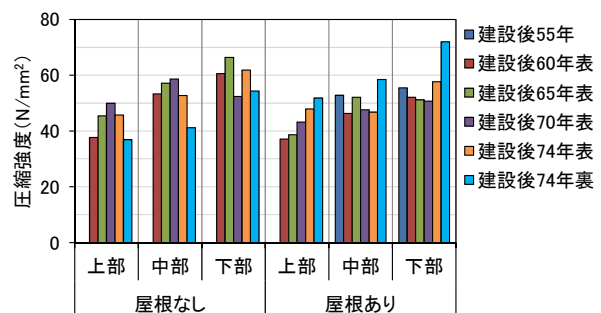


図-2.1.1 各部位における圧縮強度の経年変化

影響も含めて継続的に調査して検証する必要がある。

図-2.1.2 に各部位における静弾性係数の経年変化を示す。静弾性係数は、ほぼ同程度で推移しており、暴露年数の経過に伴う変化は小さかった。一方、圧縮強度と同様、屋根なしでは表側コアの方が裏側よりも静弾性係数が大きい傾向があった。

図-2.1.3 に圧縮強度と静弾性係数（裏側データ含む）の関係を示す。図には2012年制定土木学会コンクリート標準示方書[設計編]⁹⁾に示されている計算式より算出した静弾性係数の値も併記しているが（図中曲線）、圧縮強度あたりの静弾性係数がいずれも示方書の値より高いことを確認した。

(2) コアの超音波伝播速度

供試体直径方向に超音波を透過させ、その伝播速度により暴露試験体の表面から内部方向への劣化状況を評価した。なお、全体のおおよその傾向を簡易的に把握する観点から、現地暴露試験体の鉛直、水平方向に合わせて直交する2測線で測定した値を平均することに加え、表側表面から深さ方向10点ずつを平均化（コア全長78cmに対し、実際には1~2cmの誤差があったため、裏側表面部は6~8点の平均）して評価した。

図-2.1.4 に表側表面から10cm毎に平均した超音波伝播速度を示す。表側表面から内部にかけての超音波伝播速度は、概ね屋根なしの方が屋根ありよりも速く、表側コアの圧縮強度の傾向と一致している。また、屋根なしの上部と中部および屋根ありの上部では、表側表面から裏側表面に向かって超音波伝播速度が低下する傾向がみられたが、その他の部位ではそれらに大きな差は無い。

屋根なしの上部と中部で裏側表面に向かって超音波伝播速度が低下する傾向は、図-2.1.1で裏側コアが表側コアよりも相対的に強度が低下した傾向と一致している。裏側の上部ほど日射の影響を受けやすく、上部は水分供給が多いことを考慮すると、裏側屋根なし上部の速度の低下が大きいのは、凍結融解作用を受けた可能性がある。なお、屋根あり上部でも超音波伝播速度が低下しているが、上部ほど気温変化の影響を受けやすく、凍結融解作用が比較的生じやすい部位と考えられるものの、原因の詳細については今後検討する必要がある。

写真-2.1.4は、実際の暴露試験体の裏側上部に生じた凍害によると考えられる劣化である。劣化が生じている部分は初代十勝大橋の桁と一体で切り出された床版コンクリートの一部であり、継続調査の対

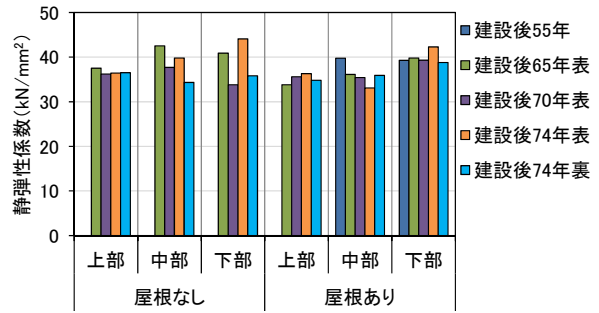


図-2.1.2 各部位における静弾性係数の経年変化

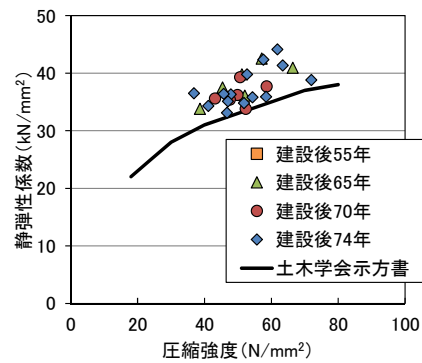


図-2.1.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

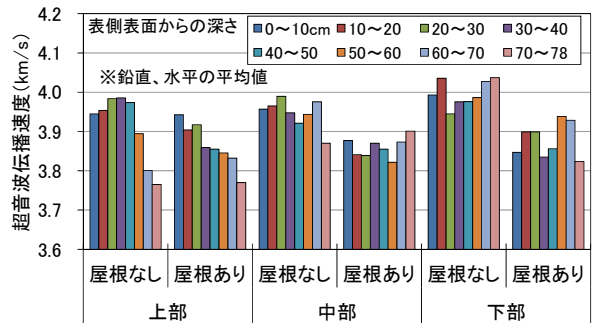


図-2.1.4 表面から10cm毎に平均した超音波伝播速度



写真-2.1.4 暴露試験体裏側上部の凍害劣化

象外の部位であるが、このような劣化は南東に面している裏側にしか見られず、表側では生じていない。このことから、裏側は凍結融解作用を受けやすい環境であることがわかり、表面付近で超音波伝播速度が低下したのは、凍害の影響によると推察される。しかし、目視では桁コンクリートに凍害による表面上のひび割れは確認できていないことから、引き続き経過観察を行う必要がある。

(3) 中性化深さの経年変化

図-2.1.5 に測点 10 点(建設後 74 年は測点 15 点)を平均した平均中性化深さを示す。建設後 74 年裏以外は、表側表面からの中性化深さである。また、建設後 55 年は一次調査時の値であるが、屋根なしの値は上流側外桁の中部から採取したコアによる試験結果を、屋根ありは暴露試験体と同じ上流側中桁の中部から採取されたコアの中性化深さであり、暴露試験以降に曝されたその他の屋根なしのデータとは環境履歴が異なるため参考値である。

平均中性化深さは建設後 70 年の屋根なし下部を除くと 5~20mm 程度であり、いずれの箇所および部位においても、建設後 55 年の一次調査以降経年的に中性化はほとんど進行していないものと判断できる。なお、建設後 70 年の屋根なし下部については、既報⁴⁾において推察したように、施工上の不具合に起因した特異な値と考えられる。

(4) X 線回折による生成物の同定

X 線回折により、未水和セメント(ビーライト)、セメント水和生成物として、カルシウムアルミネート水和物と水酸化カルシウムが確認された。また、コンクリート硬化後に生じた生成物として炭酸カルシウム(カルサイト)が確認されたが、エトリンガイトやモノサルフェートは確認されなかった。

特に強いピーク強度が確認されたのは、水酸化カルシウムと炭酸カルシウムであり、図-2.1.6 に各生成物のコンクリート表面からの深さと相対ピーク強度の関係を示す。なお、X 線回折用の試料は、コンクリート表面より 0~20、40~60 および 90~110mm の深さからそれぞれ採取して試験を行っており、深さの表記は、それぞれの範囲の中間値をとり 10、50、100mm とした。

水酸化カルシウムの生成量は、深さ 50mm 以深では建設後 74 年の屋根あり表側で若干少ないもののほぼ同程度だったが、深さ 10mm では明らかに減少し、屋根ありよりも屋根なしの方が少なかった。また、表側と裏側では、表側の方が少なかった。

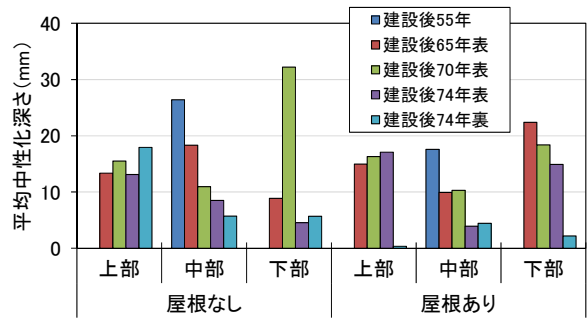


図-2.1.5 中性化深さの経年変化

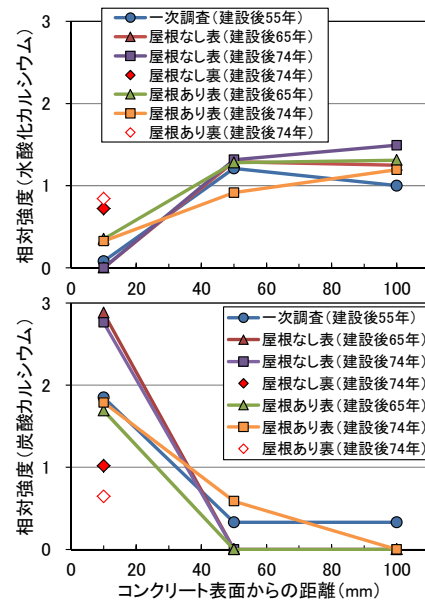


図-2.1.6 各生成物の相対ピーク強度 (X 線回折)

一方、炭酸カルシウムの生成量は水酸化カルシウムの生成量が少ないほど多くなっており、各部位において真逆の傾向となった。

一般に、コンクリート表層部の水酸化カルシウムが減少あるいは消失する原因は、溶解・溶脱および炭酸化による炭酸カルシウムの生成がある。本調査結果については、水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの増減が相反していることから、コンクリートの炭酸化が主要因と考えられる。

一方、コンクリートが乾燥しているほど二酸化炭素が侵入しやすくなるため、炭酸化しやすい。本調査では、コア採取時に高周波容量式の表面水分計によりコンクリートの表面水分率を計測し、屋根あり表側が平均 4.2%、裏側が平均 4.6%、屋根なし表側が平均 3.9%、裏側が 4.3%だった。全体の傾向としては、表面水分率が低い部位ほど水酸化カルシウムが減少し、炭酸カルシウムが多いことから、コンクリートの含水率が中性化に影響を及ぼしている可能

性がある。しかしながら、表面水分率は測定直近の降雨や温湿度に影響されるため、単発的な表面水分率の測定結果により長期的な中性化の傾向を評価することは適切ではなく、実際、建設後70年で測定した表面水分率は、屋根あり（表）が平均4.4%、屋根なしは平均5.5%と屋根なしの方が水分率が高く、今回の調査結果と逆転している。このことから、コンクリートの含水状態は炭酸化に影響していると考えられるが、実際の構造物の水分率で評価するには、季節変動も含めてデータを蓄積するとともに、現地の気象データとも関連づけながら評価する必要がある。

(5) 示差熱分析による生成物の同定

示差熱分析により、カルシウムシリケート水和物、二水石膏、モノサルフェート、水酸化カルシウム、カルシウムアルミネート水和物、炭酸カルシウムが確認された。

図-2.1.7に、代表的な水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの生成量とコンクリート表面からの深さとの関係を示す。深さ10mmにおける水酸化カルシウムの減少や炭酸カルシウムの増加のほか、屋根の有無や表側と裏側の違いと各生成物の生成量との傾向は、X線回折とほぼ同様だった。

X線回折と示差熱分析の結果から同定された生成物を表-2.1.1に示す。屋根あり表の深さ10mmと50mmで石膏が確認されたが、10mmではセメント水和生成物のモノサルフェートが確認されず、50mmでは他の部位よりも水酸化カルシウムが減少し炭酸カルシウムが増加していることから、モノサルフェートの炭酸化により生成されたものと推察される。また、未水和セメントの存在やコンクリート内部における水酸化カルシウム生成量がわずかに増えていることから、原状においても水和が継続している可能性が確認できた。

なお、図-2.1.5に示した中性化深さからは暴露部位の違いによる明確な傾向は確認できなかったが、X線回折と示差熱分析の結果を考慮すると、屋根なしの方が炭酸化しやすい環境にあると考えられる。しかし、裏側は凍害の影響を受けている可能性があるものの、中性化が促進される傾向は確認できず、これらに大きく関係するコンクリートの含水状態についても継続的な調査が必要である。

(6) 電子顕微鏡/元素分析による生成物の同定

電子顕微鏡画像と元素スペクトル分析により、表側深さ50mmと100mmおよび屋根ありの裏側深さ

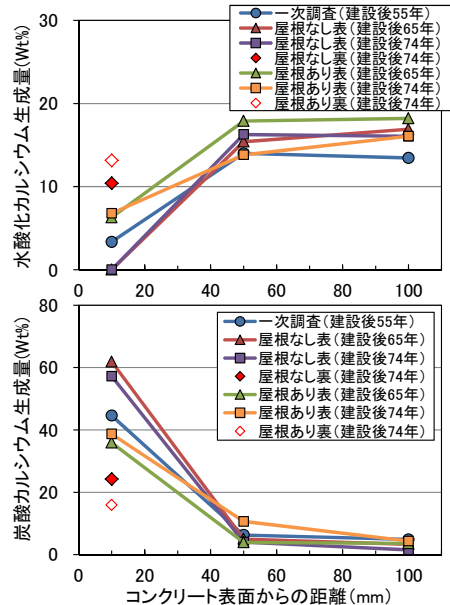


図-2.1.7 各生成物の生成量（示差熱分析）

表-2.1.1 X線回折と示差熱分析で同定された生成物

試料名	表面からの深さ	水酸化カルシウム	カルシウムアルミネート水和物	カルシウムシリケート水和物	モノサルフェート	炭酸カルシウム	未水和セメント	石膏
屋根あり	表	◎	◎	◎		◎	○	○
	50mm	◎	●	◎	●	◎	○	○
	100mm	◎	●	◎	●	◎	○	○
	裏	◎	●	◎		◎	○	
	10mm	◎	●	◎		◎	○	
	100mm	◎	●	◎		◎	○	
屋根なし	表	◎	●	◎	●	◎	○	
	50mm	◎	●	◎	●	◎	○	
	100mm	◎	●	◎	●	◎	○	
	裏	◎	●	◎	●	◎	○	

◎=X線回折、熱分析両方で同定された鉱物
●=熱分析のみで同定された鉱物
○=X線回折のみで同定された鉱物

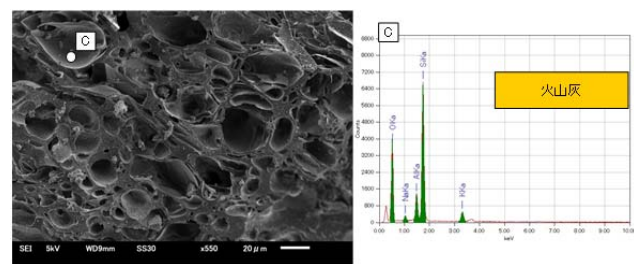


図-2.1.8 屋根あり表側深さ10mmで確認された火山灰

10mmで水酸化カルシウムを、屋根あり表側の全深さと、屋根なし表側の深さ50mmと裏側深さ10mmでモノサルフェートを、深さ100mmで針状のエトリンライトをそれぞれ確認した。

また、細骨材に混入していたと考えられるポーラスな火山灰が多数認められ、火山灰の周辺にはポズラン反応によりカルシウムシリケート水和物が生成して一体化し、緻密な組織を形成していることを確認した。図-2.1.8に電子顕微鏡画像と元素スペクトル分析により確認された火山灰の一例を示す。

さらに、いずれの暴露部位においても深さ 10mm で、また屋根あり表側の深さ 50mm には炭酸カルシウムや炭酸化の影響を受けていると思われるカルシウムシリケート水和物を確認した。

(7) 暴露試験体の細孔構造

図-2.1.9 にコンクリート表面から深さ方向に 10mm、50mm、100mm 位置における細孔径分布を示す。強度が高い屋根なしの細孔容積が少ない傾向がみられたが、裏表で差は無かった。深さ方向では、深さ 100mm の経年変化は小さいが、10mm と 50mm では、細孔径 100nm から 1 μ m 程度の毛細管空隙が経年的に減少する傾向がある。また、深さ 10mm では細孔径 10nm 以下の空隙が少ない。これは、炭酸化によりゲル空隙が粗大化したためと考えられる。しかしその一方で、1 μ m 付近の比較的粗大な細孔もそれほど増加していない。これは、炭酸カルシウムの析出により細孔容積が減少した可能性がある。以上から、水和や炭酸化の影響と考えられる細孔構造の変化が確認できた。

2.2 中性化進行予測評価手法の検証

2.2.1 中性化速度係数

中性化の進行予測は、一般に実験あるいは実測データに基づき求められる中性化速度係数により行われる。図-2.1.10 に実測の平均中性化深さから求めた中性化速度係数を示す。中性化速度係数 α は、中性化深さを材齢の平方根で除した値で定義されるため、全体の傾向は図-2.1.5 に示した平均中性化深さと同じである。暴露試験後の建設後 65 年～74 年の表側の中性化速度係数を暴露箇所毎に平均すると、屋根なし $\alpha = 1.42$ (mm/ $\sqrt{\text{年}}$) (ただし、特異値と考えられる建設後 70 年の屋根なし下部を除いた平均値)、屋根あり $\alpha = 1.71$ (mm/ $\sqrt{\text{年}}$) となる。

2.2.2 中性化進行予測評価手法の検証

既往の研究⁹⁾では、中性化速度係数の推定式として式-2.1 が提案されており、土木学会 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]⁷⁾においても、中性化速度係数を導出する際の参考として記載されている。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0W/B \quad (\text{式-2.1})$$

ここで、 α_p : 中性化速度係数の予測値(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

W/B : 有効水結合材比

初代十勝大橋の桁コンクリートの水セメント比は、示方配合²⁾から 52%である。この値と式-2.1 より算定される中性化速度係数は $\alpha = 1.11$ となり、暴露経年調査結果の平均値から求められた中性化速度係数の方がいずれの暴露箇所においても大きい結果となる。

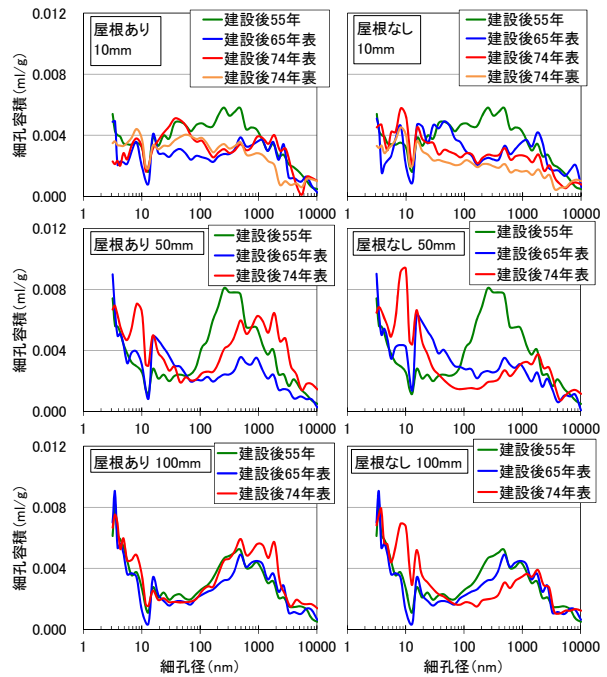


図-2.1.9 各部位における細孔径分布の経年変化

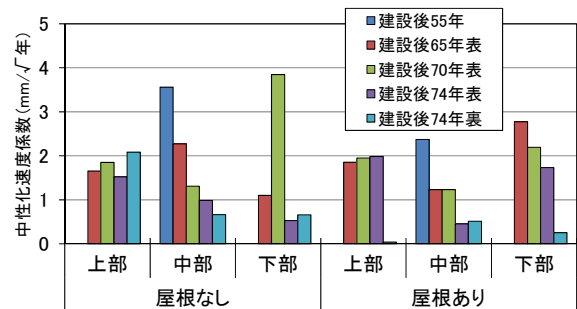


図-2.1.10 中性化速度係数

これについて、初代十勝大橋コンクリートに使われていたセメントは、現在の中庸熱ポルトランドセメントに相当すると考えられており²⁾、上記の予測式は中庸熱ポルトランドセメントも考慮された式ではあるものの、当時のセメントは現在のものよりも粒子が大きいので、セメントの水和速度が遅く、材齢初期には中性化の進行抑制に寄与する水酸化カルシウムの生成量が少なかったと考えられる。また、長期的にも細骨材に含まれていた火山灰のポゾラン反応²⁾によりコンクリート中の水酸化カルシウムが消費され、中性化が進行しやすい状態であったことが推察される。なお、今回の経年調査からも明らかのように、一次調査以降は中性化がほとんど進行していない状況を考慮すると、コンクリートの中性化は供用中の早い段階から進行していたと推察される。また、暴露試験体は内桁であり、供用時には雨水等の影響を受けにくい部位で

あったことから乾燥しやすく、これが中性化の進行を助長したことが考えられる。

2.3 初代十勝大橋コンクリート長期耐久性調査と耐久性予測評価手法のまとめ

200年にわたる長期耐久性試験として実施されている初代十勝大橋コンクリートの暴露試験について、暴露19年(完成後74年)までに実施してきた物理化学試験等の結果から、現時点におけるコンクリートの物性や耐久性を評価した。

コンクリートの中性化は暴露試験開始以降ほとんど進行していないが、試験体の一部で圧縮強度や超音波伝播速度の低下がみられ、凍害による影響が示唆された。また、分析試験の結果から、部位により炭酸化が異なり、コンクリートの含水率が影響している可能性が示唆された。さらに、未水和セメントの存在や、水和や炭酸化の影響と考えられる細孔構造の変化が明らかとなり、今後も継続的な調査が必要なることを確認した。

また、中性化速度係数は現在の予測式から算出される値より大きく、セメントの粉末度や火山灰のポゾラン反応が影響している可能性が示唆された。

3. 改質セメントを用いたコンクリート製品の試験施工経年調査^{8)~12)}と耐久性予測評価手法の検証

積雪寒冷地におけるコンクリートの耐久性向上対策を目的として、改質セメントを用いた高耐久性コンクリートを開発し、実環境下における耐久性等を検証するために、国土交通省北海道開発局の協力により、改質セメントを用いたコンクリート工場製品等を実環境下に試験施工あるいは暴露試験を実施している。具体的な製品の概要を表-3.1.1に、配合を表-3.1.2に示す。試験施工および暴露試験用のコンクリート製品として、北海道十勝管内の国道峠部において凍害と塩害の複合劣化と考えられる著しい劣化がみられていた皿形側溝、北海道オホーツク地方の海水が遡上する河川において塩害等による著しい劣化がみられていたプレキャストコンクリート護岸堤、および札幌近郊の国道の道路縁石とU型側溝を選定している。

本研究では、これら製品のうち、十勝管内の峠部に試験施工した皿形側溝製品と、河川護岸用プレキャストコンクリート製品として現地河川の護岸堤に設置した暴露試験体(以下、護岸製品と記述)について、設置5年経過時に調査を行い、実環境下における物性や耐久性を評価した。

3.1 皿形側溝製品の経年調査

3.1.1 試験施工の概要

皿形側溝の現場試験施工は、十勝管内の一般国道峠部で実施した。この峠部における既設の皿形側溝の一部は、凍結融解と塩化物系凍結防止剤の複合作用と考えられる劣化により崩壊しているものが多数見られていた^{8),9)}。試験施工箇所の選定にあたっては、凍結防止剤の散布が多くなる5合目より上側を条件として、6合目付近の直線部と9合目付近のトンネル手前の2箇所を選定した。各地点における敷設時の状況を写真-3.1.1に示す。

当初敷設した開発品は流込み方式により製造した、

表-3.1.1 製品の概要

種類	寸法(mm)	製造形式	ベースメントの種類	混和材
皿形側溝	750×490×70/170	流込み方式	早強、普通セメント	高炉スラグ微粉末(6000プレーン級)
		即時脱型方式	普通セメント	
縁石I型	200/260×250×790	即時脱型方式	普通セメント	
U型側溝	U360B×2000	流込み方式	普通セメント	
護岸堤	300×300×3000	流込み方式	早強セメント	

表-3.1.2 コンクリート製品の配合

対象製品	製造方式	セメント種類	混和材種類	W/B (%)	空気量 (%)	SP ^{※1} 添加量 (C×%)	s/a (%)	コンクリート単位量 (kg/m ³)					AE剤添加量 (B×%)		
								W	C	S	G ^{※2}			SP	
											(5-15)	(15-25)			
皿形側溝	流込み	普通	S6	60	35	4.5	0.65	147	420	712	1052	2.74	0.0200		
								168	252	684	1368	3.10		0.0200	
								167	277	671	990				
	即脱	普通	-	-	30.6	2.5	0.25	43	160	240	960	477	477	6.00	5A
									110	360	1107	885	-	0.90	-
									529	-	689	(5-20)	3.17	0.0168	
護岸製品	流込み	早強	-	-	30.4	4.5	0.65	212	317	607	(5-20)	3.21	0.0200		
								150	494	607	(5-20)	3.21	0.0200		
U型側溝	流込み	普通	S6	60	35	4.5	1.25	40	183	274	683	(5-20)	5.71	0.274	
									160	240	960	(2.5-5)	(5-25)	6.00	5A

(※1 SP:高性能減水剤、※2 B:結合材、※3 G:括弧書きは骨材寸法、※4 S6:高炉スラグ微粉末6000プレーン)

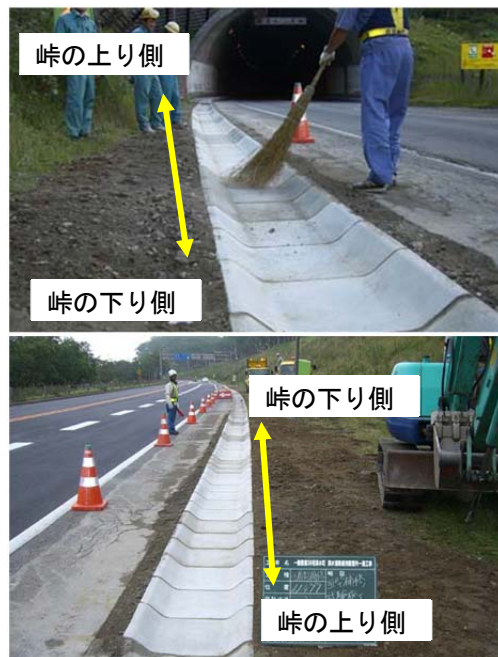


写真-3.1.1 皿形側溝の敷設状況(設置当初)
(上: 9合目付近、下: 6合目付近)

ベースメントが異なる2種類である（以下、流込み型と記述）。なお、現在一般的に用いられている即時脱型方式で製造された製品（以下、即脱型と記述）とも比較するため、**図-3.1.1**に示すとおり即脱型の一般製品を挟むように開発品（開発品1と2、詳細は後述）をそれぞれ3個1組として、1箇所につきそれぞれ4組分を敷設した。

また、製造方法による違いを検証するため、**図-3.1.2**に示すように、敷設1年目で調査のため回収した跡地に、新たに製造した即脱型の改質セメントコンクリート製品（開発品3、詳細は後述）を敷設した。

3.1.2 使用材料、配合条件および製造

上述したように、試験施工では結合材の種類や製造方法の異なる製品を作製し敷設している。

流込み型開発品の結合材は、型枠転用や製品の早期出荷の観点から工場製品での使用が多い早強ポルトランドセメント（以下、早強セメントと記述（記号：HP））とJIS規格値を満足する比表面積6000cm²/gクラスの高炉スラグ微粉末（以下、スラグと記述（記号：S6））を用いている（開発品1）。また、汎用性と経済性を考慮し、普通ポルトランドセメント（以下、普通セメントと記述（記号：NP））とスラグを組み合わせた場合についても比較検討している（開発品2）。細骨材は、十勝産陸砂（表乾密度2.60g/cm³、吸水率2.39%）を、粗骨材は、人舞産陸砂利（表乾密度2.67g/cm³、吸水率1.39%、粗骨材最大寸法Gmax=20mm）を用いた。

また、即脱型で製造した開発品3は、結合材は、普通セメント（比表面積3360cm²/g、密度3.16g/cm³）とスラグ（比表面積6140cm²/g、密度2.89g/cm³）を用いた。細骨材は、白老産陸砂（表乾密度2.66g/cm³、吸水率1.30%、粗粒率2.54）を、粗骨材は、敷生川産砕石（表乾密度2.64g/cm³、吸水率1.30%、Gmax=20mm）を用いた。混和剤は、製品用の高性能減水剤（メラミンスルホン酸塩系）とAE剤（アルキルエーテル系）を用いた。各配合は**表-3.1.2**に示したとおりである。

スラグ置換率はいずれもセメント内割で60%とした。流込み型製品の水結合材比は35%とし、施工性を考慮して目標スランプフローおよび空気量は、45±5cmおよび4.5±1%とした。なお、比較検討した一般製品の即脱型は、水セメント比30.6%の普通セメントを用いたコンクリート製品で、混和剤には、ノニオン系界面活性剤のコンクリートブロック用可

開発品2(普通+スラグ)			一般品1(即脱型)			開発品1(早強+スラグ)		

図-3.1.1 皿型側溝の敷設状況

即脱型開発品敷設箇所（敷設1年後回収跡地）							
敷設2年後回収		敷設5年後回収			2年後回収		5年後回収
開発品3(普通+スラグ：即脱型)				一般品2(即脱型)			

図-3.1.2 即脱型皿型側溝の敷設状況（1箇所分）

逆剤が用いられている。また、即脱型開発品の水結合材比は、一般的な即脱型製品を考慮して30%とし、コンシステンシーの管理は、製造の協力を頂いた製品工場で独自に採用しているテーブル型の振動機による貫入式試験方法により行った。目標コンシステンシーは、この工場で縁石製品の一般管理値として設定している貫入量7cm±3cmとし、目標空気量は一般型の即脱製品と同様に2.5±1.0%とした。

養生は蒸気養生とし、その方法は比表面積6000クラスのスラグを用いた既往の研究¹³⁾を参考にした。

3.1.3 調査・試験概要

(1) スケーリング調査

皿型側溝製品のスケーリングは、現地または回収後に写真撮影した製品の画像データから、スケーリング劣化した部分の面積を測定し評価した。なお、**図-3.1.3**に示すように、皿型側溝の流水部分はR加工部を含んでいるが、本調査ではR加工部を除く平坦部のみを調査対象面として計測し（**図-3.1.3**の斜線部）、対象面積あたりのスケーリング劣化面積をスケーリング面積率として表した。また、開発品の一部には**写真-3.1.2**に示すような除雪車によると考えられる擦り傷が付いたものや、回収作業時に製品端部が一部欠損した部分があったため、劣化面積を測定する際には目視による判断ではあるがその影響を除いて計測した。

(2) 超音波伝播速度計測

超音波伝播速度計測は、超音波非破壊測定器を用い透過法で行った。計測は、回収した製品から採取したコア供試体（φ100×70mm）直径方向に超音波伝播時間を測定、伝播距離はノギスで測定し、伝播距離／伝播時間から伝播速度を求めた。測点は製品の流水面（コア表面とした）から底面（コア裏面と

した) に向かい 10mm の位置からコア裏面方向に 10mm 間隔とした。

なお、超音波伝播速度に及ぼす供試体の水分量の影響を排除¹⁴⁾するため、コア供試体を 1 週間 40℃にて乾燥した後、超音波伝播速度を計測した。また、コア供試体採取にあたっては、製品の配筋間隔が 100mm 以下 (70~90mm) であったため、鉄筋位置が可能な限りコア断面の中心から外れ側面付近位置となるようコアを抜いた。

(3) 塩分浸透量調査

塩化物系凍結防止剤の影響を調査するため、コンクリート内部への塩分浸透量調査を行った。塩分浸透量は、電子線マイクロアナライザー (EPMA) による面分析 (定量分析)¹⁵⁾により測定した。

塩化物イオン(CI)の濃度は、面分析結果からセメントペーストに相当する部分を抽出して算出した質量%に単位セメント量を乗じて、コンクリート 1m³当たりの質量で表記した。セメントペーストに相当する部分の抽出は、反射電子の強度の他に 17.5mass% ≤ CaO ≤ 52.5mass%、および 5.0mass% ≤ SiO₂ ≤ 30.0mass%の条件に当てはまるピクセルのみを選択することにより行った。

3.1.4 皿型側溝の経年調査結果

(1) スケーリング面積率

図-3.1.4に回収した流込み型開発品の5年経過後までのスケーリング面積率の経年変化を示す。箇所毎、種類毎にそれぞれ3個の平均値をスケーリング面積率として経年的に比較した。なお、即脱型は、表層がモルタル層に覆われているため、表層のペースト被膜が剥離しても大きな剥離につながらず、スケーリング面積率としての評価は出来なかったためここでは省略した。

全体として、スケーリング面積率は経年的に増加傾向にあるものの、劣化が大きいものでも面積率は1.3%以下であり、表面上の劣化面積は小さかった。

箇所別でみると2年後までは6合目に設置した方がスケーリング劣化が大きい傾向がみられたが5年後ではほぼ同程度となっている。セメントの種類別でみると「早強+スラグ」の方が僅かに大きい経年劣化はほぼ同程度といえる。

表-3.1.3に ASTM C672 試験における目視によるスケーリング程度の評価等級¹⁶⁾を示す。いずれの製品も3mm以下の剥離深さだったが、流込み型開発品では一部粗骨材の表面が確認された。これは、流込み型の製造方法に起因するもので、製造時に製品の

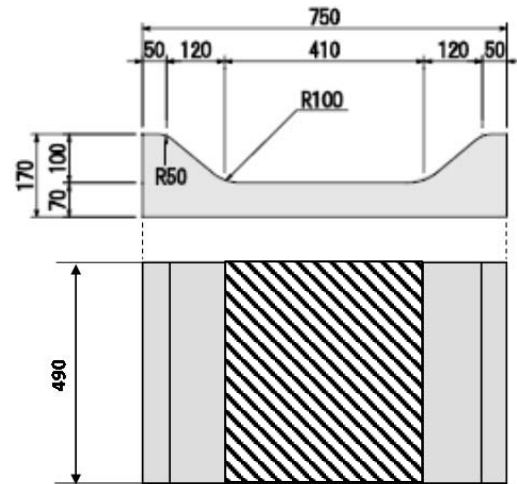


図-3.1.3 皿型側溝の敷設状況

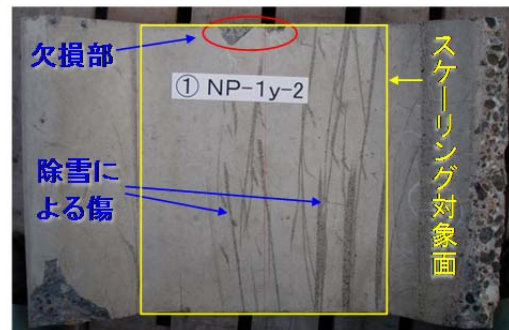


写真-3.1.2 開発品の損傷例

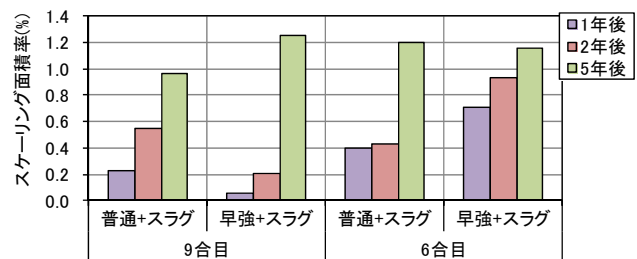


図-3.1.4 スケーリング面積率

表-3.1.3 ASTM試験におけるスケーリング程度の等級¹⁶⁾

点	試験面の劣化状況
0	剥離なし
1	粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	評価1と評価3の中間程度の劣化性能
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	評価3と評価5の中間程度の劣化性能
5	粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

上面が型枠底面となることから粗骨材が集中しやすく、僅かなスケーリングでも骨材が露出する可能性が高くなるためであり、スケーリングの程度としては1点と評価するのが妥当であり、敷設5年経過時

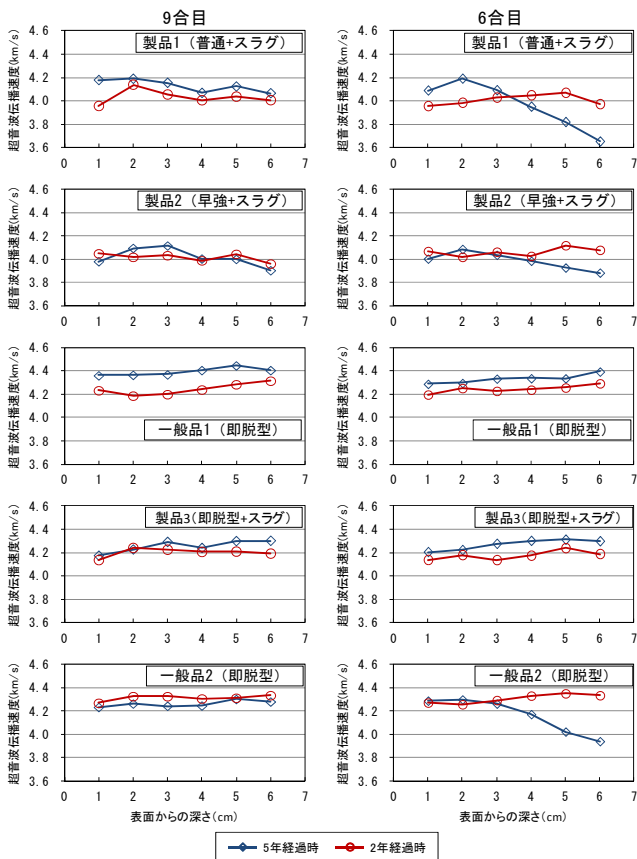


図-3.1.5 超音波伝播速度

点においても表面上の劣化は小さいと言える。

(2) 超音波伝播速度

図-3.1.5に超音波伝播速度計測結果を示す。敷設5年後の超音波伝播速度は、流込み型が概ね4.1 km/s、即脱型が概ね4.3 km/sであり、全体としては、箇所別、種類別ともに、表面からの距離ごとの伝播速度分布の変動は小さく、敷設2年後と比べても流水面（表面）からの劣化の傾向は無い。他方、6合目の製品1「普通+スラグ」や一般品2（即脱型）は、表面からの深さ方向に伝播速度が低下していた。裏面は製品製造時のコンクリート打設面であり、型枠面となる表面より相対的に品質が低下する部位である。このため、隣接する皿形側溝の目地等の隙間から裏面に水分等が侵入し、裏面から品質が低下した可能性がある。しかし、回収した製品の裏面には目視では大きな劣化が確認されていないことから、現地に残存する製品について、継続的な調査が必要である。

(3) 塩化物イオンの浸透状況

図-3.1.6にEPMA面分析（定量分析）により算出したセメントペーストに相当する部分のCl濃度分布を示す。

敷設後5年経過した製品は、既報¹²⁾の2年経過時

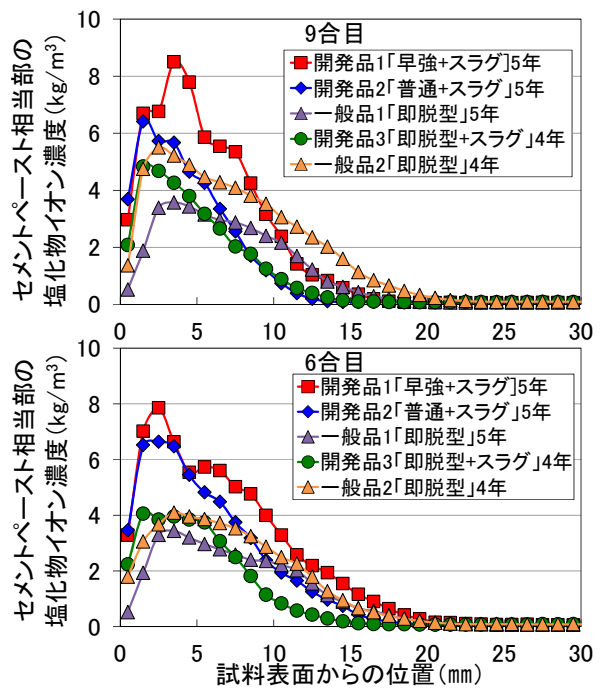


図-3.1.6 セメントペースト相当部分のCl濃度分布

点と比べて、いずれも表面付近の塩分濃度および内部への塩分浸透量は増加していた。また、6合目の「早強+スラグ」を除くと、スラグを用いた開発品は表面部の塩分濃度は高いものの、内部への塩分浸透量は水結合材比が小さい一般の即脱型より少なく、この傾向は2年経過時点と同様であった。他方、敷設箇所の違いでは、6合目に敷設した製品の方が内部への塩分浸透量が若干大きい傾向がみられた。

また、新たに敷設した即脱型のスラグ製品（開発品3）は、塩分濃度、内部への塩分浸透量とも一般の即脱型（一般品2）よりも小さかった。なお、比較した一般品は最初に敷設した一般品とは製造工場が違うため、一般品2と表記している。以上から、製造方法が異なる場合でも、スラグを用いた場合には塩分浸透の抑制効果が高くなることが確認できた。

3.2 河川護岸製品暴露試験体の経年調査

3.2.1 暴露試験の概要

河川護岸製品の暴露試験は、北海道オホーツク地方の海水が遡上する河川において実施した。現地コンクリート護岸堤は、建設後20~30年程度経過しており、海水による塩害や凍害、冬期に河川が結氷した際に流動する氷とのすり減り等、複合的な劣化が多数みられ、劣化の程度に応じて補修等が順次実施されている。本暴露試験は、護岸堤の耐久性向上対策の一つとして、その効果を検証する目的で実施している。暴露試験体の設置状況を写真-3.2.1に、回

回収した暴露試験体の一例を写真-3.2.2に示す。暴露試験体は、海水が遡上する河川の左岸側に、スラグを用いたもの4体(断面0.3×0.3m、長さ3mの角柱)と、比較用の一般品として早強セメントのみのものを1体設置した。試験体は試験体水平方向に打設して作製し、型枠底面が河川側となるように既設護岸堤に設置した。

これまでに、暴露1、2、3年目でスラグ試験体をそれぞれ1体ずつ回収して経年調査を行っており、暴露5年目で残りのスラグ製品1体と一般品1体をそれぞれ回収し調査した。調査にあたっては、写真-3.2.2に示すように、回収した暴露試験体の気中部、干満帯、水中部の各部位から4個ずつコアを採取し(φ10×30cm)、各種試験を実施した。

3.2.2 使用材料、配合条件および製造

護岸製品は、早強ポルトランドセメントとJIS規格値を満足する比表面積6000cm²/gクラスのスラグを組合せた結合材を使用している。水結合材比(W/B)は、既設護岸堤の設計基準強度の60N/mm²を考慮して決定した。スラグ置換率はセメント内割で60%とした。製造は、コンクリートを型枠に流し込む方法で作製し、作業性を考慮し、スランプフロー50±5cmとした。また、目標空気量は耐凍害性を考慮し、4.5±1.5%とした。養生は、皿形側溝製品と同様の蒸気養生を行い、蒸気養生後は、工場の敷地内にある屋外ヤードに暴露開始まで静置した。

3.2.3 護岸製品の経年調査結果

(1) 暴露試験体の外観状況

試験体回収後に目視による外観評価を行った。気中部および水中部は外観上の劣化はほとんど確認できなかったが、干満帯の部位に凍害によると考えられるスケーリング劣化が確認された。写真-3.2.3に干満帯のスケーリング劣化状況を示す。スラグ試験体は表面のモルタルが薄く剥離する程度で軽微だったが、一般品は粗骨材がいくつか露出する程度の劣化が確認された。

(2) 圧縮強度と静弾性係数

図-3.2.1に暴露5年経過した試験体の部位別の圧縮強度と静弾性係数を示す。圧縮強度はいずれも設計基準強度の60N/mm²を上回っており、干満帯を除くとスラグ試験体より一般品の方が若干強度は大きかった。しかし、全体としては、静弾性係数を含めて、部位や結合材の違いによる大きな差はなかった。

図-3.2.2にスラグ試験体の圧縮強度の経時変化を、図-3.2.3にスラグ試験体の静弾性係数の経時変



写真-3.2.1 暴露試験体の設置状況(当初)

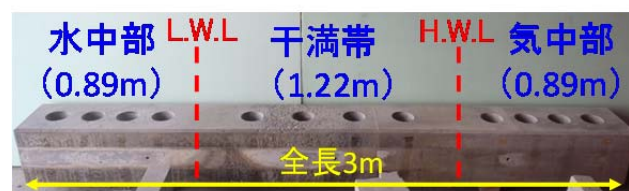


写真-3.2.2 回収した暴露供試体の一例(コア採取後)

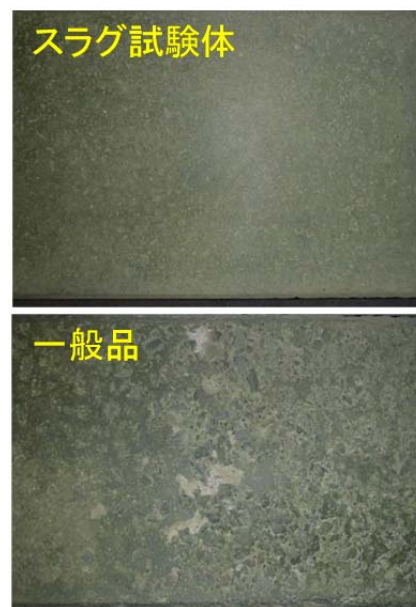


写真-3.2.3 干満帯のスケーリング劣化状況

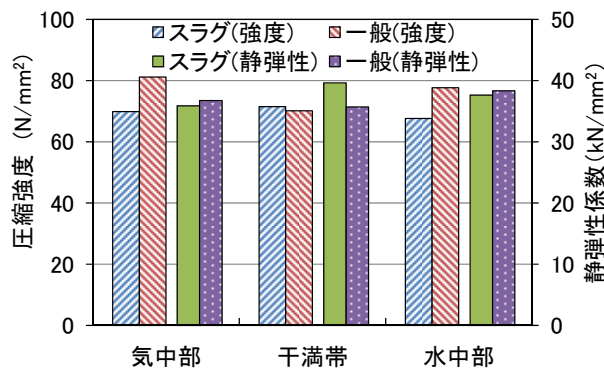


図-3.2.1 圧縮強度と静弾性係数

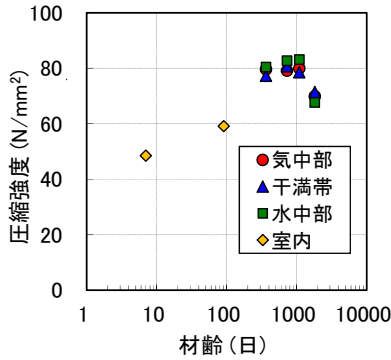


図-3.2.2 スラグ製品の圧縮強度の経時変化

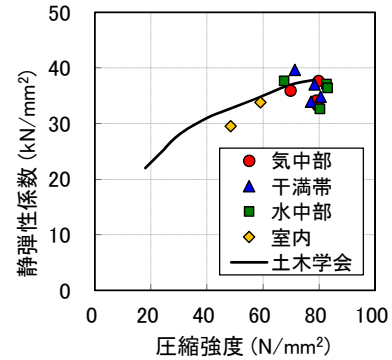


図-3.2.4 スラグ製品の圧縮強度と静弾性係数の関係

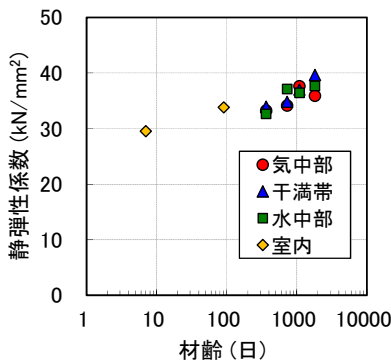


図-3.2.3 スラグ製品の静弾性係数の経時変化

化を示す。なお、凡例の「室内」とは、室内試験用円柱供試体（φ10×20cm）による材齢7日と91日の値である。

圧縮強度は暴露3年までは微増したが、暴露5年目でいずれの部位も低下した。一方、静弾性係数は暴露5年まで若干増加の傾向がみられた。なお、圧縮強度および静弾性係数は、暴露部位の違いによる差はほとんど無かった。

図-3.2.4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。暴露1年で圧縮強度の増加に対する静弾性係数が小さくなったものの、それを除くと土木学会標準示方書[設計編]に示された値⁵⁾とほぼ同程度であった。

(3) 超音波伝播速度

図-3.2.5 に部位別のコア供試体の直径方向に透過した超音波伝播速度を示す。なお、測定はコアの長手方向に1cm刻みで行ったが、全体の傾向把握の観点から、図には両端の値以外の中間点は4点毎に平均した値を示した。縦軸の0cmは河川側の暴露表面であり、30cmは裏面を意味する。

乾燥の影響を受ける気中と干満帯では、表面部の速度が低下する傾向がある。早強セメントのみの使用で水和反応が比較的早い一般品は、表面と内部の速度差は小さい。一方、スラグ試験体は水中部では

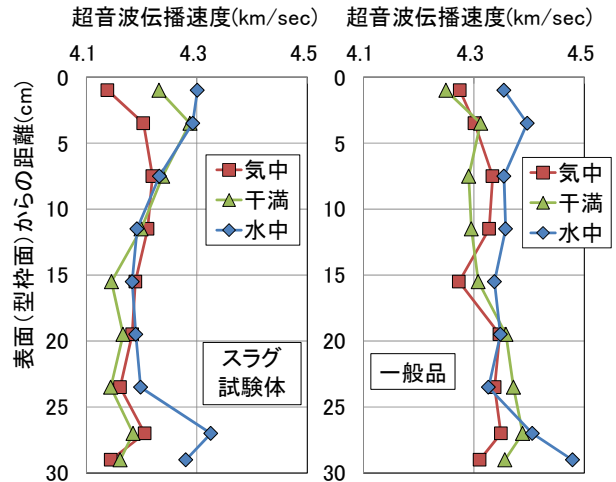


図-3.2.5 コア供試体の超音波伝播速度（透過法）

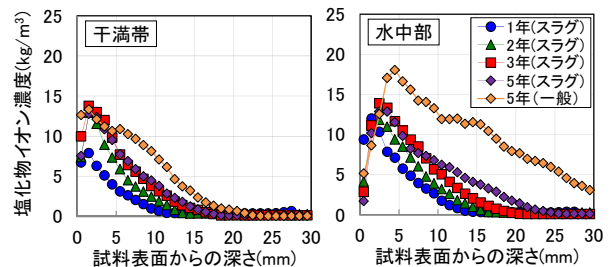


図-3.2.6 塩化物イオンの浸透量

水と接している表面の方が内部より速度が大きく、干満帯では試験体の型枠面（暴露表面）の方が打設面より速度が大きい傾向があり、これはブリーディングの影響が考えられる。全体としては、スラグ試験体の方が一般品よりも速度は小さく粗骨材量が影響していることが考えられるが、大きな劣化の傾向は確認できなかった。

(4) 塩分化物イオンの浸透状況

図-3.2.6 に EPMA 面分析の結果から算定した塩化物イオンの濃度分布の経年変化を示す。なお、EPMA 面分析方法は 3.1.3(3) に示した方法と同様

である。気中部は塩化物イオンの浸透がほとんどなかったため、干満帯と水中部について示している。スラグ試験体の塩化物イオン浸透量は経年的に増大したが、暴露3年から5年の差は比較的小さく、暴露5年目では深さ10から20mm位置の塩化物イオン量が増加する傾向を示した。一方、一般製品はスラグ製品よりも内部方向への塩化物イオン浸透量が多く、特に水中部では深さ30mmで3kg/m³程度の塩化物イオンの浸透がみられた。以上から、スラグコンクリートの塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が高いことが確認できた。

3.3 改質セメントを用いたコンクリートの塩分浸透予測評価手法の検証

改質セメントを用いたコンクリートの塩分浸透量を予測するために提案した、塩化物イオンの実効拡散係数予測式の妥当性を検証するために、経年調査の実測値から求めた拡散係数と予測値を比較した。

検討の手順として、図-3.1.6および図-3.2.6に示した塩化物イオン濃度の実測値を式-3.1に示すフィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて回帰分析し、塩化物イオンの見かけの拡散係数を求めた。また、実効拡散係数の予測値は、式-3.2から算出した。さらに、予測式から算出した実効拡散係数を式-3.3により見かけの拡散係数に変換¹⁷⁾した。なお、スラグ製品の変換にあたっては、高炉セメントB種相当の変換係数を適用した。

$$C(x,t) - C_i = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} \quad (\text{式-3.1})$$

ここに、 x : コンクリート表面からの深さ (mm)、 t : 暴露期間 (年)、 $C(x,t)$: コンクリート表面から深さ x 、暴露期間 t における塩化物イオン濃度 (kg/m³)、 C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)、 C_i : コンクリート中に含まれる初期塩化物イオン含有量 (kg/m³)、 D_d : 塩化物イオンに対する見かけの拡散係数 (cm²/年)、 erf : 誤差関数

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$$

$$D_e = a \cdot (W/B)^b \quad (\text{式-3.2})$$

ここに、 D_e : 実効拡散係数 (cm²/年)、 W/B : 水結合材比、 a, b : 実験値より定まる係数

$$a = 34.6 \cdot \exp(-0.059 \cdot r)$$

$$b = 0.017 \cdot r + 4.35$$

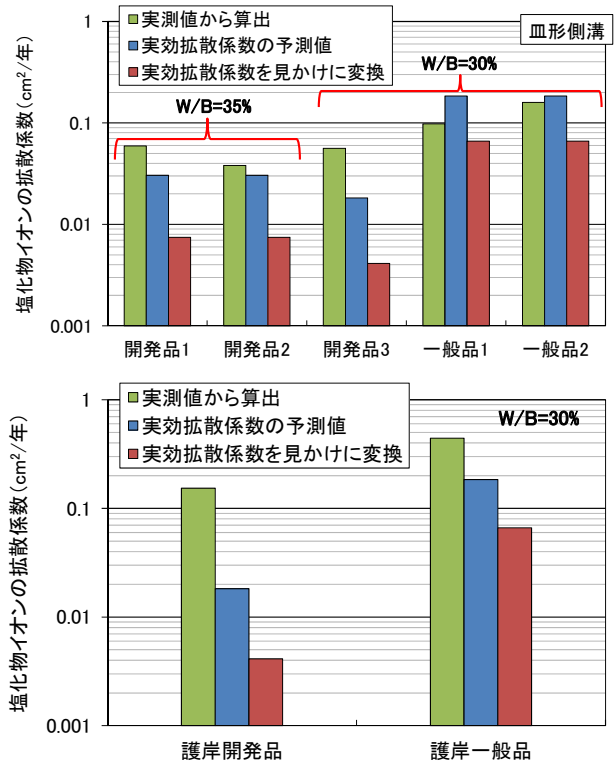


図-3.3.1 塩分拡散係数の実験値と予測値の比較

r : ベースセメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (\text{式-3.3})$$

ここに、 D_{ae} : 実効拡散係数から換算した見かけの拡散係数 (cm²/年)、 D_e : 実効拡散係数 (cm²/年)、 k_1 : コンクリート表面におけるコンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いに関わる係数、 k_2 : セメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象にかかわる係数

・高炉セメントB種相当を使用する場合

$$k_1 \cdot k_2 = 0.14 \exp\{1.6(W/C)\} \quad (0.3 \leq W/C \leq 0.55)$$

図-3.3.1に各製品の塩化物イオンの拡散係数を示す。図には、式-3.2により算出した実効拡散係数の予測値と、式-3.3によりその実効拡散係数を見かけの拡散係数に変換したものを併せて示している。

実測値から算出した拡散係数をみると、いずれのケースにおいても高炉スラグ微粉末を用いた開発品の方が普通または早強セメントを用いた一般品より拡散係数が1/2.5程度に減少し、改質セメントの耐久性向上効果を確認できた。

一方、実測値から算出した拡散係数と予測値を比較すると、皿形側溝では、普通セメントを用いた一

般品の場合、実測値から算出した見かけの拡散係数と実効拡散係数の予測値がほぼ同程度であり、実効拡散係数から換算した見かけの拡散係数は実測値よりも小さかった。これに対して、高炉スラグ微粉末を用いた開発品は、実効拡散係数の予測値が実測値よりも小さく、実効拡散係数から換算した見かけの拡散係数はさらに小さくなり、実測値と大きく乖離した。これらの傾向は護岸製品でも同様であり、高炉スラグ微粉末を用いた開発品は、実測値から算出した見かけの拡散係数と予測値が大きく乖離した。

これらの乖離について、今回は暴露期間5年目の調査であり、コンクリート中への塩分浸透量が比較的少ないこと、また、EPMA 面分析による塩分量の定量では、補正のためのセメントペースト領域の判定条件を仮定している等、試験方法の影響も考えられるため、さらにデータを蓄積して検証する必要がある。

3.4 改質セメントを用いたコンクリート製品の試験施工経年調査のまとめ

峠部に試験施工した皿型側溝製品の実環境下5年後の物性および耐久性について評価した結果、現場敷設5年経過時においてもスラグ製品のスケーリング劣化は微少であり、超音波伝播速度による評価から、流水面からの劣化の傾向は無いことを確認した。しかし、一部の製品では裏面の超音波伝播速度が低下しており、裏面からの品質の低下が示唆されたため、現地に残存する製品について、今後も継続的に調査する必要があることを確認した。また、現場敷設5年経過時においてもスラグ製品の方が一般の製品より塩化物イオンの浸透抑制効果が高いことが示され、スラグ製品の耐久性が高いことを確認した。

海水が遡上する河川に5年間暴露したスラグコンクリートの物性および耐久性等を検証した結果、スラグ製品は暴露5年目で強度は低下したものの、設計基準強度を満足しており、静弾性係数は微増していた。また、一般製品に比べて凍害による表面上の劣化が極めて少なく、塩化物イオンの浸透抑制効果が確認され、改質セメントの使用が耐久性向上対策として有効であることが示された。

また、改質セメントを用いた製品の塩化物イオンの拡散係数は、一般品の1/2.5程度と小さいものの、実測値から算出した拡散係数と過年度に提案した予測式から算出した値の乖離が大きく、さらにデータを蓄積して検証する必要があることを確認した。

4. シラン系表面含浸材を塗布した供試体の暴露試験経年調査と耐久性予測評価手法の検証

コンクリート構造物の塩害や凍害などに対する劣化制御手法の一つとして、外部からの水の侵入を抑制するシラン系表面含浸材の適用が挙げられる。しかしながら、実環境下における長期的な性能に関するデータは少ないのが現状である。また、コンクリート構造物の耐久性評価技術については、塩害や鉄筋腐食などに関して多くの劣化モデルや将来予測手法などが確立されつつあるが、これらのモデルが実環境下における長期的なデータにより検証された事例は少ない。このことを踏まえて、塩害および凍害の複合劣化環境下において、シラン系表面含浸材を塗布した供試体の実構造物における暴露試験を実施している。ここでは、暴露期間10年目の調査結果について述べる。

4.1 試験概要

4.1.1 暴露環境

暴露試験は、一般国道231号石狩市浜益区千代は志別の千代志別橋で実施している。図-4.1.1に千代志別橋の位置、写真-4.1.1に暴露状況を示す。暴露場所は千代志別川の河口で海岸の近傍に位置し、凍結融解と飛来塩分量の複合作用の影響を受けやすい環境にある。



図-4.1.1 千代志別橋の位置



写真-4.1.1 暴露状況

4.1.2 供試体

コンクリートの配合を表-4.1.1に示す。材料およびコンクリートの配合は千代志別橋の建設に用いられた配合と同様のものとした。粗骨材の最大径は40mmである。供試体の寸法は $\phi 125 \times 250\text{mm}$ の円柱とした。シラン系表面含浸材は供試体を28日間、湿潤養生させた後に塗布した。使用したシラン系表面含浸材は水系で、シリコン含有量が80%以上のタイプのものである。塗布量は 200g/m^2 とした。

4.1.3 調査内容

調査は、外観調査、表面水分率の測定、見かけ密度の測定、吸水防止層の厚さの測定、中性化深さの測定、塩化物イオン量の測定を行った。外観調査では水を噴霧し、表面の撥水状況を目視により調べた。表面水分率の測定は、供試体の表面に高周波水分計をあて、水分率を求めた。見かけ密度の測定は、現地で供試体の重量を測定し、体積で除して求めた。吸水防止層の厚さは、供試体を割裂して水を噴霧し、撥水している範囲を含浸部分とみなし、その厚さをノギスで測定した。中性化深さは、供試体の割裂面にフェノールフタレイン(1%)を噴霧し、変色しない範囲の深さを測定した。塩化物イオン量は、コンクリートカッターで供試体を1cm間隔でスライスし、JIS A 1154 に準じて調べた。

4.2 試験結果・考察

4.2.1 外観調査

暴露10年目の供試体を目視で観察したところ、塗布した供試体、無塗布の供試体とも、凍害によるひび割れ、ポップアウト、スケーリングは外観上、見受けられなかった。写真-4.2.1は、撥水性を確認するために供試体に水を噴霧した時の状況である。無塗布の供試体では、噴霧した水が浸透して濡れ色を呈した。これに対して、塗布した暴露10年目の供試体は、明瞭な撥水は示されなかったものの、無塗布に比べると供試体の表面に水が多く滞留し、水だれが確認された。このことは、塗布した供試体は吸水しにくい状態にあることを示している。

4.2.2 表面水分率の測定

図-4.2.1に暴露試験経過年数と表面水分率の関係を示す。同図より、塗布した供試体の方が、無塗布の供試体よりも表面水分率は低い傾向であった。このことは、シラン系表面含浸材によって吸水が抑制されていることを示すもので、外観調査の結果と符合する。

表-4.1.1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	Ex	S	G1	G2
44	43	5.5	138	312	30	765	477	583

- ・C (セメント) : 普通ポルト
- ・Ex (膨張剤) : エトリンガイト系
- ・S (細骨材) : 新十津川産川砂、密度 2.58g/cm^3
- ・G1 (粗骨材 1) : 毘砂別産碎石、密度 2.66g/cm^3
- ・G2 (粗骨材 2) : 毘砂別産碎石、密度 2.65g/cm^3



写真-4.2.1 水を噴霧した後の供試体の外観 (10年目)

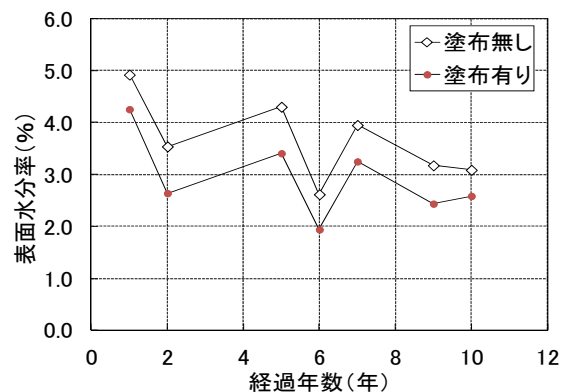


図-4.2.1 表面水分率の経年変化

4.2.3 見かけ密度の測定

図-4.2.2に暴露試験経過年数と見掛け密度の関係を示す。ばらつきはあるものの、見掛け密度は塗布した供試体の方が、無塗布の供試体よりも小さい傾向にあることが暴露10年目においても示された。塗布供試体の密度が小さかった要因として、シラン系表面含浸材の塗布による吸水抑制効果と供試体の内部からの水分蒸発効果の2つが考えられる。

4.2.4 吸水防止層の厚さ

図-4.2.3に暴露試験経過年数と吸水防止層の厚さの関係を示す。同図より、測定毎にばらつきが認

められるが、暴露 10 年目においても吸水防止層が保持されていることを確認することができた。

4.2.5 中性化深さ

図-4.2.4 に暴露試験経過年数と中性化深さの関係を示す。同図には、中性化深さが時間の 0.5 乗に比例するとした回帰式を併せて示した。土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁸⁾では中性化深さの実績値がない場合の中性化進行予測式として次式が示されている。

$$y = (-3.57 + 9.0W/B)\sqrt{t}$$

ここに、 y は中性化深さ(mm)、 W/B は水結合材比、 t は経過年数(年)、式中の $-3.57+9.0W/B$ は中性化速度係数 α である。

W/B が 44% で、セメントの種類が普通ポルトランドセメントの場合の α は 0.39 となる。しかし、現場における α は 1.38 で設計値よりも 3 倍程度大きい値が示された。これは、凍結融解等の影響によるものと考えられる。

塗布有無に着目すると、暴露 10 年目における中性化深さは、塗布しない供試体が 4.3mm であるのに対し、塗布した供試体は 12.9mm と、塗布しない供試体よりも中性化の進行が早く、回帰式の定数である中性化速度係数が 3 倍程度の大きい値となった。既往の調査¹⁹⁾では、塗布後、相対湿度 80% 程度の環境下に置かれた場合でも、含水量が相対湿度 40% の場合に相当する量に抑制されることが確認されている。また、一般に、相対湿度 80% に比べて相対湿度 40% の方が中性化は進行しやすいことが知られている²⁰⁾。暴露 10 年目においても、同様の理由により、中性化が進行している結果が示されたものと考えられるが、前述したように鉄筋腐食の因子の一つである水分の供給抑制効果は持続しており、鉄筋腐食の抑制は図られるものと考えられる。

4.2.6 塩化物イオン量

図-4.2.5 に暴露試験経過年数と全塩化物イオン量の関係を示す。塗布と無塗布を比較すると、塗布した方が全体的に塩化物イオン量は小さく、暴露 10 年目においても塩化物イオンの侵入抑制効果が持続していることが確認できた。なお、暴露 10 年目の試験結果においては、表面からの距離 15mm 以下の範囲では塩化物イオン量が少ない傾向が示されているものの、表面からの距離 15mm 以上の範囲においては、塩化物イオン量が多い結果が示された。この原因として、表層部での中性化の影響によってフリーデル氏塩が分解し、未炭酸化部分に塩化物イオンと

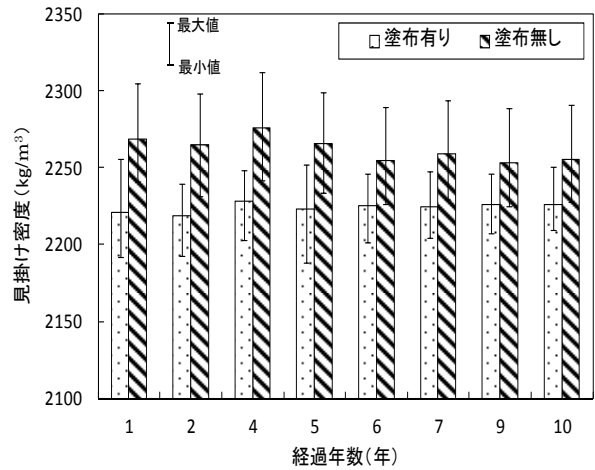


図-4.2.2 見かけ密度の経年変化

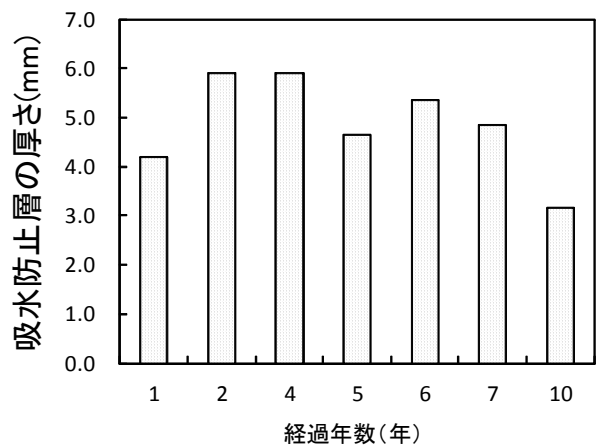


図-4.2.3 吸水防止層の厚さの経年変化

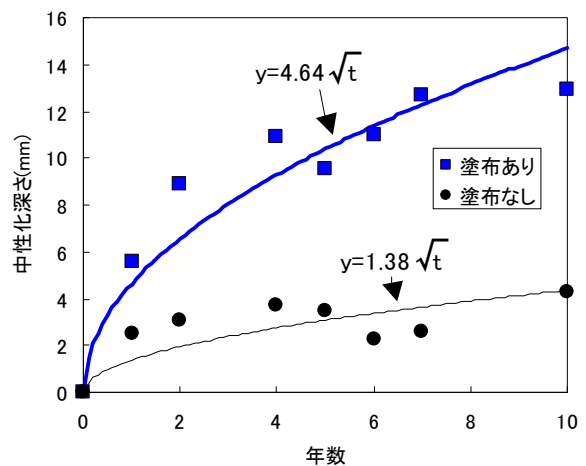


図-4.2.4 中性化深さの経年変化

して侵入し、濃縮したことが考えられるが、さらに調査を継続し、塩化物イオンの濃度分布の変化の傾向の把握につとめる必要がある。

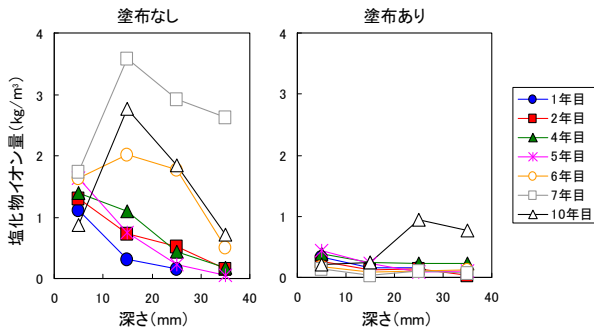


図-4.2.5 塩化物イオン量の経年変化



図-5.1.1 調査箇所

4.3 シラン系含浸材を塗布した実構造物暴露供試体の継続調査に関するまとめ

シラン系表面含浸材を塗布して千代志別に10年間暴露した供試体を調査した結果、撥水性は低下していたが、吸水防止層の性能は保持されていた。また、塗布した供試体の方が、中性化の進行が早い傾向は暴露10年目においてもみられた。

一方、暴露10年目においても、塗布した供試体は遮塩性が保持されていたが、暴露10年目において、表面からの距離15mm以下の範囲では、固定化されていたフリーデル氏塩が分解し濃縮されるため、塩化物イオン濃度が高くなる傾向が認められた。これについては、調査をさらに継続し、塩化物イオンの濃度分布の変化の傾向の把握につとめる必要がある。

5. シラン系表面含浸材を塗布した道路橋地覆での経年調査と耐久性評価手法の検証

本調査では、シラン系表面含浸材の実環境下における効果の検証を目的として、新設もしくは打換えられた実構造物のコンクリートと暴露試験用の供試体にシラン系表面含浸材を塗布し、凍結融解と塩化物の複合作用を受ける環境下に8~10年曝した際の塩化物イオンの浸透抑制効果について調査するとともに、塩化物イオンの浸透予測手法の改良・修正に向けての検討を行った。

5.1 物性および耐久性に関する基礎データの収集

5.1.1 調査箇所

図-5.1.1に調査箇所、表-5.1.1に各箇所に曝されているコンクリートの配合を示す。調査した箇所は、増毛、美幌、むかわの3箇所である。

(1) 増毛（暴露実験場）

寒地土木研究所の実験室で100×100×400mmの供試体を作製した。打設後、湿布養生を7日間行い、材齢14日にシラン系表面含浸材を打設面に塗布した。そして材齢28日に日本海に面する増毛暴露実験

表-5.1.1 コンクリートの配合

	W/C (%)	セメント	単位量(kg/m ³)				
			W	C	E	S	G
増毛	45.0	高B	144	320	—	820	1073
美幌	57.5	普通	145	252	30	713	1144
むかわ	52.9	高B	147	278	30	807	1120

【部材】 増毛…供試体(100×100×400mm)

美幌…一般国道の道路橋地覆

むかわ…高規格幹線道の道路橋剛性防護柵

【略称】 W/C…水セメント比、高B…高炉セメントB種、普通…普通ポルトランドセメント、W…水、C…セメント、E…膨張材、S…粗骨材、G…細骨材(Gの最大寸法は美幌が40mm、増毛とむかわが25mm)



写真-5.1.1 増毛暴露実験場における供試体の据付け状況

場の架台に供試体を据付けた。写真-5.1.1に据付けの状況を示す。水中に浸かる環境にはないが、年間を通じて飛来塩分の影響を受ける。供試体は打設面が海側を向くように据付けた。打設面以外からの塩化物イオンの浸透を防ぐため、打設面以外の5面に

はエポキシ樹脂をコーティングしている。暴露は2005年11月より開始し、約8年経過している。

(2) 美幌（一般国道道路橋地覆）

現場は一般国道39号美幌町に架かる橋長73mの道路橋の地覆である。冬期は凍結防止剤が散布されている。2004年10月に地覆の打換え工事が行われた際、道路側垂直面と天端面および外側面にシラン系表面含浸材を塗布した(写真-5.1.2)。地覆は塗布後、約10年経過している。橋は曲線橋で、横断方向には塗布した地覆に向かって約4%の片勾配がついており、道路側垂直面の下方に雨水や融雪水が集まりやすい環境にある。



写真-5.1.2 美幌の一般国道道路橋地覆での試験施工状況

(3) むかわ（高規格幹線道路橋剛性防護柵）

現場は日高自動車道むかわ町に架かる橋長27mの道路橋の剛性防護柵である。冬期は凍結防止剤が散布されている。剛性防護柵は道路建設期間中の2003年10月に新設された。その2年後の2005年10月に道路側垂直面と天端面にシラン系表面含浸材を塗布した(写真-5.1.3)。そして2006年3月に供用が開始され、現在に至っている。剛性防護柵は建設から約11年、塗布からは約9年経過している。ただし、凍結融解と塩化物の複合作用を受けている期間は供用開始以降の約8.5年である。橋は直線橋で、横断勾配は中央部を頂点とする2%勾配となっている。なお、剛性防護柵と路面の間には幅100mm、深さ40mmの排水用の溝が延長方向に設けられている。そのため、融雪水は滞留しにくく、主に車両通過時に発生する凍結防止剤を含む融雪水の飛散の影響を受ける環境にある。



写真-5.1.3 むかわの高規格幹線道路橋剛性防護柵での試験施工状況

5.1.2 冬期環境

調査箇所にもっとも近い位置のアメダス²¹⁾から調べた2013年11月～2014年3月の日最低気温の推移を図-5.1.4に示す。最小値は増毛が-14.8℃、美幌が-23.3℃、むかわが-18.3℃で、いずれも1～2月に観測された。いずれの地区も日最低気温は12月から1月にかけて大きく低下し、美幌は約-15℃まで低下する状況が3月中旬まで続いた。

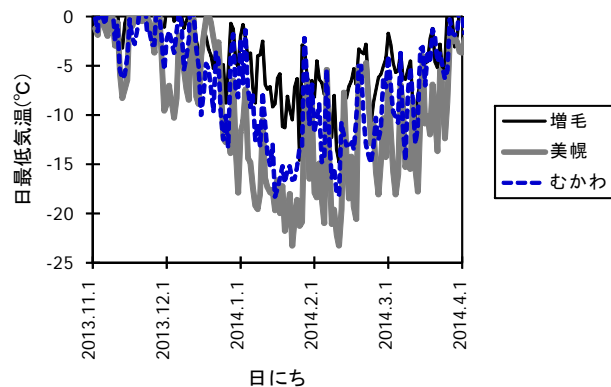


図-5.1.4 日最低気温の推移²¹⁾
(2013年11月～2014年3月)

表-5.1.2は2013年11月～2014年3月の凍結融解日数を示している。ここでは最低気温がコンクリートの凍結温度とされる-2℃²²⁾以下で、最高気温が-2℃より高い日を凍結融解1日としてカウントした。合計日数は約70～100日で、むかわ、美幌、増毛の順に多かった。美幌の日数は12月と3月が特に多く、1月、2月はその半数程度であった。増毛とむかわは12～3月を通じて月による日数の違いはさほどみら

表-5.1.2 凍結融解日数²¹⁾
(2013年11月～2014年3月)

	11月	12月	1月	2月	3月	合計
増毛	2	16	16	17	19	70日
美幌	10	24	10	11	24	79日
むかわ	12	24	19	21	21	97日

れなかった。美幌は最低気温が極めて低いために日中も気温が上がらなかったことが要因と考えられる。

5.1.3 シラン系表面含浸材

増毛で6種類、美幌で5種類、むかわで2種類のシラン系表面含浸材を使用している。暴露実験ならびに試験施工を開始した当時は北海道開発局道路設計要領²³⁾に留意事項がまだ盛り込まれていなかったが、現在は盛り込まれて施工されていることに鑑み、代表して道路設計要領の仕様（水セメント比55%相当のコンクリートにおいてシラン系表面含浸材の含浸深さが6mm以上、塩水浸漬試験による塩化物イオン浸透深さが3mm以下を満足することを標準とする）を満たす1種類について調査した。調査したシラン系表面含浸材は無溶剤系で有効成分量90%、塗布量は400g/m²である。

5.1.4 調査項目

表-5.1.3に調査実施時期を示す。ここでは主に吸水防止層の厚さと塩化物イオン量を調べた。吸水防止層の厚さは、増毛は供試体、美幌は地覆の道路側垂直面、むかわは剛性防護柵の垂直面中央部から採取したコアを割製し、割製面に水道水を噴霧して撥水を呈した部分を含浸域と判断し(写真-5.1.4)、ノギスで厚さを測定した。測定値は5箇所ノギスの平均とした。塩化物イオン量は、採取したコアの表面から深さ5cmの範囲を1cm間隔でカッター切断し、深さ0~1cm、1~2cm、2~3cm、3~4cm、4~5cm（以下、中間位置をとって、それぞれ深さ0.5cm、1.5cm、2.5cm、3.5cm、4.5cmと記す）の塩化物イオン量をJIS A 1154の硝酸銀滴定法に準じて測定した。

5.1.5 調査結果・考察

(1) 増毛（暴露実験場）

増毛で暴露を開始して2、4、8年目に調べた塩化物イオン量を図-5.1.5に示す。無塗布においては、深さ0.5cmの塩化物イオン量が暴露開始後、2年目にかけて約8kg/m³まで急速に増加し、2年目から8年目にかけては緩やかに増加した。深さ1.5cmの塩化物イオン量は2年目から4~8年目にかけてやや多く増加した。一方、塗布は、無塗布とは対照的に、2年目の塩化物イオン量は深さ0.5cmが1kg/m³程度、深さ1.5cm以降は極めて少なく、この傾向は8年経過した現在も続いていることが確認された。この結果は、日最低気温の最小値が-14.8℃、年間の凍結融解日数が70日で水中に浸かりにくく、年間を通じて飛来塩分の影響を受ける地区では、道路設計要領の仕様を満たす材料を適切に選定・施工することで、

表-5.1.3 調査実施時期

	2年目	4年目	6年目	8年目	8.5年目	10年目
増毛	●	○	→	○		
美幌	→	→	●	→	→	●
むかわ	→	→	→	→	●	

【測定項目】 ●…吸水防止層の厚さと塩化物イオン量
○…塩化物イオン量のみ
→…曝すのみ

【備考】 1) ■年目とは、凍結融解と塩化物による複合作用を受けた期間を表している
2) 網掛けは未だ達していない期間を表している（今後、追跡調査を行う予定）



写真-5.1.4 吸水防止層

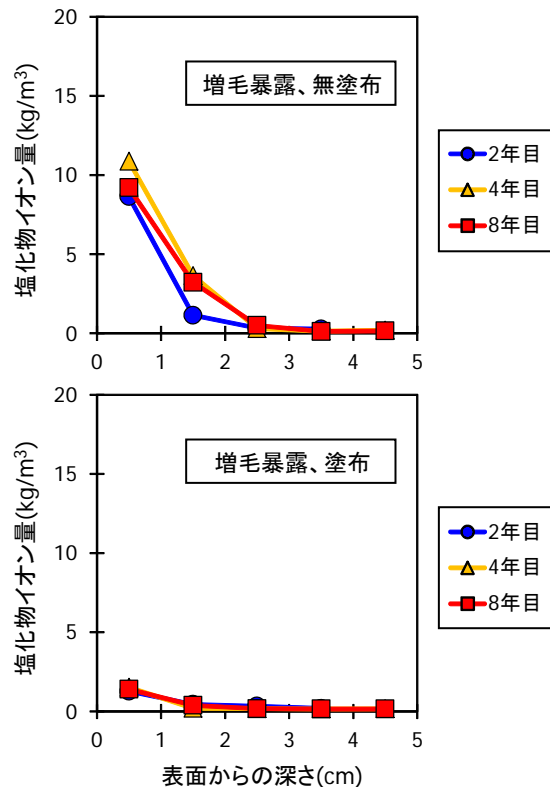


図-5.1.5 塩化物イオン量の測定結果 (増毛暴露、2、4、8年目)

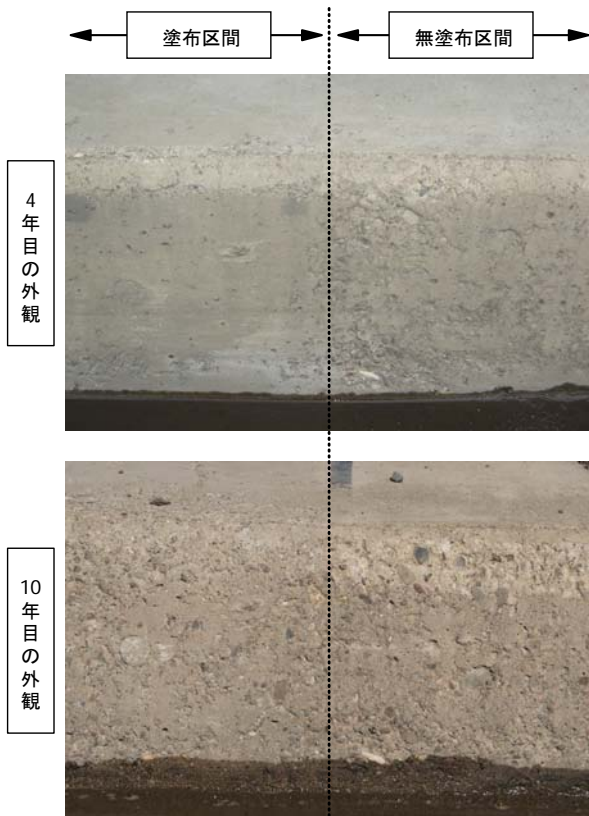


写真-5.1.5 美幌地覆4年目および10年目の状況

少なくとも8年間は塩化物イオンの浸透抑制効果の持続が期待できることを示唆している。

(2) 美幌（一般国道道路橋地覆）

写真-5.1.5は塗布から4年目、10年目に撮影した美幌の一般国道道路橋の地覆の外観を示している。4年目の写真をみると、シラン系表面含浸材の効果によってスケールが抑制されていることが明らかになる。10年目の写真をみると、無塗布区間では隅角部付近に大きなスケールが発生・進行していることが確認できる。一方、塗布区間では、隅角部においてこのような劣化は確認されなかったが、軽微なスケールが部分的にみられた。

写真-5.1.6は、塗布後10年目の美幌の地覆から採取したコアの側面に水を噴霧した様子を撮影したものである。表面から厚さ1cmの範囲が撥水していることが確認された。表-5.1.4は6、10年目に調べた吸水防止層の厚さを示している。軽微なスケールは確認されたが、表層には厚さ7~10mmの吸水防止層が存在していた。表層に形成された吸水防止層は10年経過後も消失せず、残存することがわかった。

図-5.1.6に6、10年目に調べた塩化物イオン量を示す。無塗布の深さ0.5cmは、飛来塩分を通年受ける増



写真-5.1.6 塗布後10年目の美幌の地覆から採取したコアの側面に水を噴霧した様子（表面付近に吸水防止層が見える）

表-5.1.4 吸水防止層の厚さ（美幌地覆）

	6年目	10年目
厚さ	7.7mm	9.0mm

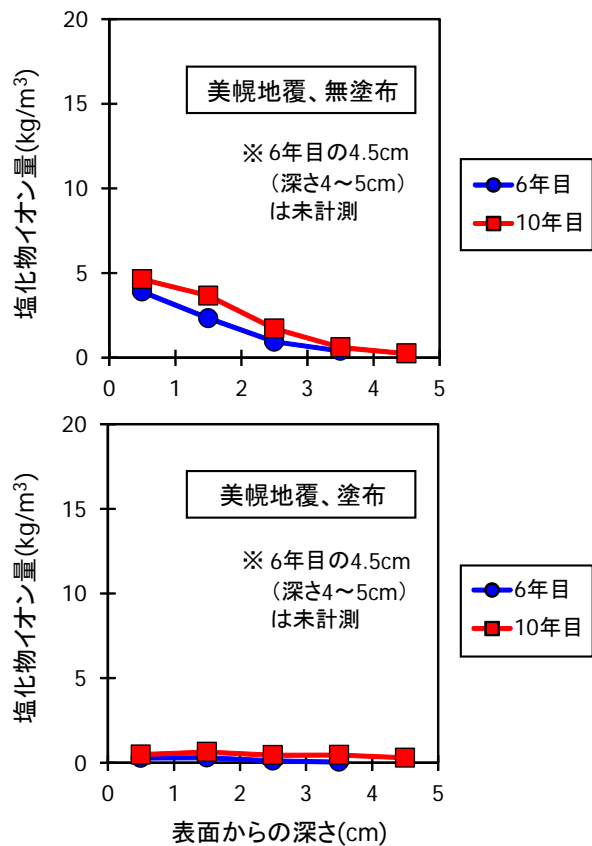


図-5.1.6 塩化物イオン量の測定結果（美幌地覆、6、10年目）

毛の2~8年目が約10kg/m³（図-5.1.5）であったのに対し、冬期のみ凍結防止剤の作用を受ける美幌の6~10年目はその半分の約5kg/m³であった。一方、内部

の深さ2.5cmは増毛の8年目が 0.5kg/m^3 (図-5.1.5)であるのに対し、美幌の6年目は 0.9kg/m^3 で増毛より多かった。美幌は表-5.1.1で示したように増毛に比べて水セメント比が高いこと、高炉セメントB種より拡散係数が大きくなりやすい普通ポルトランドセメント²⁴⁾が使用されていること等が理由に考えられる。一方、塗布した場合は全体的に極めて少なく、塩化物イオンの浸透抑制効果の持続が確認された。これは塗布によってコンクリートの表層に形成された吸水防止層が約10年間、消失せずに残存し、塩化物イオンの浸透抑制に大きく貢献したことを示す。道路設計要領の仕様を満たす材料は、日最低気温の最小が -23.3°C 、年間の凍結融解日数が79日で凍結防止剤の影響を受ける環境下の道路橋地覆において、少なくとも10年間は効果の持続が期待できることがわかった。

(3) むかわ (高規格幹線道道路橋剛性防護柵)

写真-5.1.7はむかわの剛性防護柵の供用8.5年目の状況である。無塗布の剛性防護柵は、下部の斜面にスケーリング、上部に薄皮の剥げ落ちによる荒れや水垂れに起因すると思われる黒っぽい汚れが観察された。塗布した剛性防護柵は無塗布に比べると表面の荒れは小さく、全体的に美観が保持されていた。

写真-5.1.8は塗布面で撮影したコア採取後の孔穴である。表面近くに約5mmの撥水域すなわち吸水防止層が観察され、美幌同様、吸水防止層の残存が確認された。

図-5.1.7に供用8.5年目に調べた塩化物イオン量の測定結果を示す。実測値に着目すると、無塗布よりも塗布の方が少なく、効果の持続が認められた。表面塩化物イオン量は 2.1kg/m^3 で既報²⁵⁾で示されている高規格幹線道の値よりも小さいが、増毛、美幌の結果に鑑みると、表面塩化物イオン量が 2.1kg/m^3 以上の高規格幹線道でも吸水防止層が残存していれば効果は期待できると考えられる。

5.2 コンクリートの長期的な耐久性と予測評価手法の検証および改良・修正

5.2.1 検証方法

北海道開発局道路設計要領に掲載されている留意事項には既報²⁶⁾をふまえた塩化物イオンの浸透予測の考え方が示されている。図-5.2.1に予測の概念を示す。凍害によるコンクリート組織の弛緩の影響を無視すると、一般的なコンクリートにおいては、時間 t (年)経過時の深さ x (cm)における塩化物イオン量の予測値 $C(x,t)$ (kg/m^3)は式-5.1で表される。



写真-5.1.7 むかわ剛性防護柵の供用8.5年目の状況



写真-5.1.8 コア採取後の孔穴
(表面近傍に吸水防止層が見える)

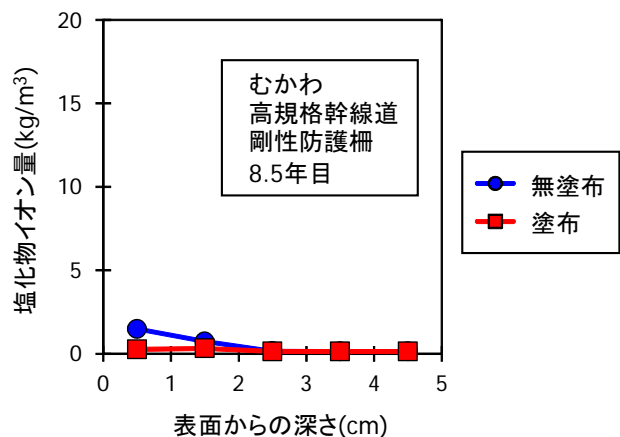


図-5.1.7 塩化物イオン量
(むかわ剛性防護柵、供用後8.5年目)

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) \quad (\text{式-5.1})$$

ここに、 C_0 はコンクリート表面における塩化物イオン量(kg/m^3)、 D_c は母材コンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 erf は誤差関数である。

一方、シラン系表面含浸材を塗布するとアルキル基が含浸・固着し、吸水防止層が形成される。この吸水防止層と母材コンクリートは、塩化物イオンの見かけの拡散係数が異なる。北海道開発局道路設計要領の留意事項には塩化物イオンの見かけの拡散係数の違いを考慮した次の予測式が示されている。

i) $0 \leq x \leq t_h$ の場合

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_h \cdot t}} \right) \right)$$

ii) $x > t_h$ の場合

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{t_h}{\sqrt{D_h}} + \frac{(x-t_h)}{\sqrt{D_c}} \right) \right) \right) \quad (\text{式-5.2})$$

ここに、 t_h は吸水防止層の厚さ（シラン系表面含浸材の含浸深さ）(cm)、 D_h は吸水防止層における塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)である。

予測の精度は、ライフサイクルコストの評価に大きく影響する。そのため、実環境下に曝されるコンクリートのデータを長期的に取得し、予測との整合性を定期的に確認する必要がある。そこで、本研究で得たデータの範囲で予測手法の有効性を検証した。

5.2.2 検証結果

(1) 増毛（暴露実験場）

表-5.2.1は過年度の研究²⁷⁾で調べた2年目の実測値から求めた増毛暴露の予測式の各種パラメータである。このパラメータから8年目の塩化物イオン量の予測を試み、予測手法の有効性を検証した。8年目の調査で得た実測値と予測の比較を図-5.2.2に示す。実測値のマーカーは予測の近傍にプロットされ、予測は実測値と概ね対応した。

(2) 美幌（一般国道道路橋地覆）

表-5.2.2は6年目の実測値から求めた美幌の地覆の予測式の各種パラメータである（ t_h は表-5.1.4の6年目の値）。このパラメータから10年目の塩化物イオン量を予測し、10年目の実測値と比較した。結果を

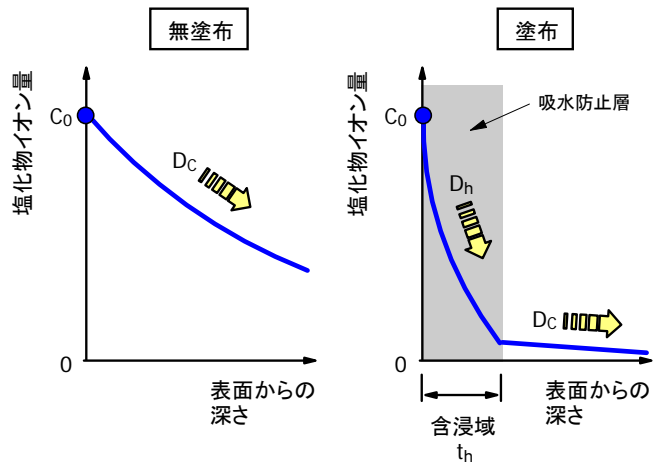


図-5.2.1 塩化物イオンの浸透予測の概念

表-5.2.1 2年目の実測値から求めた増毛暴露の予測式の C_0 、 t_h 、 D_h 、 D_c ⁷⁾

		数値
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m^3)		19.1
吸水防止層の厚さ t_h (mm)		6.6
塩化物イオンの見かけの	吸水防止層 D_h	0.001
拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	母材コンクリート D_c	0.11

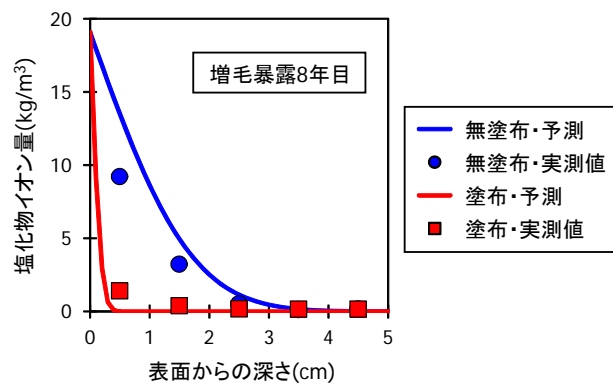


図-5.2.2 塩化物イオン量の予測と実測値（増毛暴露、8年目）

表-5.2.2 6年目の実測値から求めた美幌地覆の予測式の C_0 、 D_h 、 D_c

		数値
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m^3)		6.2
塩化物イオンの見かけの	吸水防止層 D_h	0.002
拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	母材コンクリート D_c	0.17

図-5.2.3に示す。増毛暴露と同様、美幌の地覆でも予測は実測値と概ね良い一致を示した。

この予測をもとに、鉄筋保護に着目した地覆のライフサイクルコストの試算を行った。図-5.2.4に結果を示す。今回の調査結果に鑑み、吸水防止機能を保持するための再塗布のインターバルを10年以上に設定すると、塗布は、初年度は塗布作業に要する費用が加わるため無塗布を上回るものの、長期的には無塗布を下回り、100年後においては無塗布に比べて3.5～6割のコスト削減効果が期待される結果が示された。

(3) むかわ（高規格幹線道道路橋剛性防護柵）

次に、供用8.5年目の実測値からむかわの剛性防護柵における予測式の C_0 、 t_h 、 D_h 、 D_c を調べた。表-5.2.3に結果を、また、実測値との比較を図-5.2.5に示す。むかわにおいても、予測と実測値は良く対応する結果となった。

5.2.3 考察

調査で得たデータの範囲で、吸水防止層の拡散係数 D_h と母材コンクリートの拡散係数 D_c との比について調べたところ、むかわの剛性防護柵における D_h は D_c の1/220倍、増毛暴露は1/110倍、美幌の地覆は1/85倍であった。10年目までの調査結果の範囲ではあるが、道路設計要領の仕様を満足する材料を道路橋の地覆および剛性防護柵に塗布する場合、塩化物イオンの浸透予測、設計を行う際の D_h は D_c の1/100程度で設定することが妥当であると考えられる。なお、約10年経過した現在においても塗布した方が塩化物イオン量は極めて少ない上、外見上の凍害の進行も遅い傾向を示しており、効果はさらに長く続くと考えられる。また、塩化物イオンの浸透量・浸透深さが小さいと、何らかの理由で将来、断面補修を余儀なくされた場合、劣化部分を除去するためのはつり作業におけるはつり深さを減らせる可能性があり、断面補修に要する工期の短縮およびコストの削減につながることも期待される。

5.3 シラン系表面含浸材を塗布した道路橋地覆での経年調査のまとめ

新設もしくは打換えられたコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布し、凍結融解と塩化物の複合作用を受ける環境下に8～10年曝した際の塩化物イオンの浸透抑制効果について調査するとともに、塩化物イオンの浸透予測手法の改良・修正に向けての検討を行った。

その結果、道路設計要領の仕様を満足するシラン系

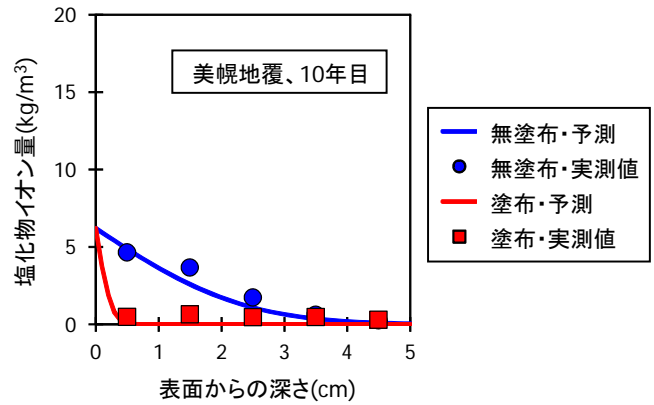


図-5.2.3 塩化物イオン量の予測と実測値
(美幌地覆、10年目)

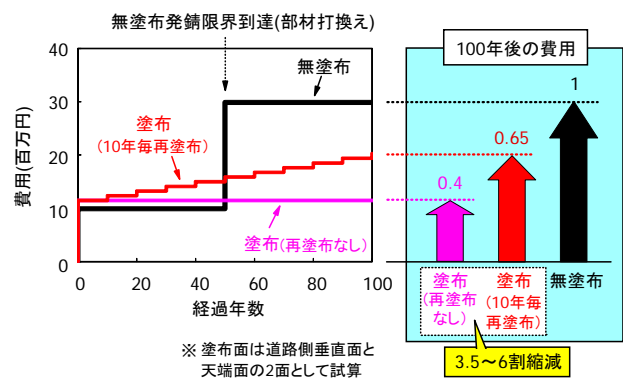


図-5.2.4 鉄筋保護に着目したライフサイクルコストの試算結果（美幌地覆）

表-5.2.3 供用後8.5年目の実測値から求めたむかわ剛性防護柵の予測式の C_0 、 t_h 、 D_h 、 D_c

		数値
表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m ³)		2.1
吸水防止層の厚さ t_h (mm)		5.6
塩化物イオンの見かけの 拡散係数 (cm ² /年)	吸水防止層 D_h	0.0005
	母材コンクリート D_c	0.11

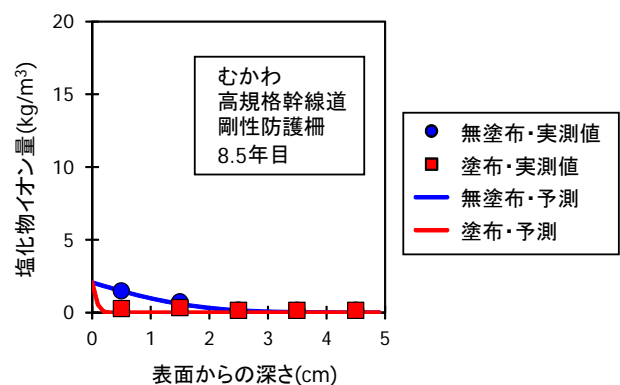


図-5.2.5 塩化物イオン量の予測と実測値
(むかわ剛性防護柵、供用8.5年目)

表面含浸材による塩化物イオンの浸透抑制効果は8～10年経過後も持続しており、塗布後8～10年目までの範囲ではあるが、道路設計要領に記載されている予測手法の有効性を確認した。

また、道路設計要領の仕様を満足する材料を道路橋の地覆および剛性防護柵に塗布する場合、塩化物イオンの浸透予測、設計を行う際の D_h は D_c の1/100程度で設定することが妥当であると考えられる。

なお、実環境下での効果の持続性については今後も調査を継続していく。また、今回示したデータは比較的良好な環境で施工された(写真-5.1.2, 5.1.3)部材から取得したものであり、実際は冬期など厳しい時期に施工が行われることもある。今後は厳しい環境下での施工性や、そのような条件下で施工された部材における効果の持続性も調べる必要がある。

6. まとめ

本研究では、実環境下に長期間暴露されたコンクリート試験体の物性および耐久性に関するデータを継続的に収集し、実環境下における長期的な耐久性やその予測評価手法の有効性を長期的かつ定期的に検証することによって、長期耐久性の予測評価手法の改良・修正を行った。本研究で得た知見をまとめると以下ようになる。

(1) 初代十勝大橋コンクリートの長期耐久性試験

- 1) 暴露19年(完成後74年)までの経年調査結果から、コンクリートの中性化は暴露試験開始以降ほとんど進行していないが、試験体の一部で圧縮強度や超音波伝播速度の低下がみられ、凍害による影響が示唆された。
- 2) 分析試験の結果から、試験体の部位により炭酸塩化が異なり、コンクリートの含水率が影響している可能性が示唆された。
- 3) 未水和セメントの存在や、水和や炭酸塩化の影響と考えられる細孔構造の変化が明らかとなり、今後も継続的な調査が必要なことを確認した。
- 4) 中性化速度係数は、現在一般的に適用されている予測式から算出される値より大きく、セメントの粉末度や火山灰のポゾラン反応が影響している可能性が示唆された。

(2) 改質セメントを用いたコンクリート製品の試験施工経年調査

- 1) 凍結防止剤が散布される峠部で5年間暴露後も、スラグを用いた皿形側溝製品のスケーリング劣化は微少だった。

- 2) 超音波伝播速度から、皿形側溝の一部裏面からの品質低下が示唆されたため、現地に残存する製品について、今後も継続的に調査する必要があることを確認した。
 - 3) 凍結防止剤が散布される峠部で5年間経過後も、スラグを用いた皿形側溝は一般品より塩化物イオンの浸透抑制効果が高いことを確認した。
 - 4) 海水が遡上する河川に5年間暴露したスラグ製品は、暴露5年目で強度は低下したものの設計基準強度を満足しており、静弾性係数は微増していた。
 - 5) 一般製品に比べて凍害による表面上の劣化が極めて少なく、塩化物イオンの浸透抑制効果が確認され、改質セメントの使用が耐久性向上対策として有効であることが示された。
 - 6) 高炉スラグ微粉末を用いた製品の塩化物イオンの拡散係数は、一般品の1/2.5程度と小さく、改質セメントの耐久性向上効果を確認できた。
 - 7) 実測値から算出した拡散係数と過年度に提案した予測式から算出した値の乖離が大きく、さらにデータを蓄積して検証する必要があることを確認した。
- (3) シラン系表面含浸材を塗布した試験体および実構造物の経年調査
- 1) 日本海沿岸の実構造物に10年間暴露した結果、供試体表面の撥水性は低下していたが、吸水防止層の性能は保持されていた。
 - 2) 塗布した供試体の方が、中性化の進行が早い傾向は暴露10年目においても確認された。
 - 3) 暴露10年目においても、シラン系含浸材を塗布した供試体は遮塩性が保持されていたが、暴露10年目において、表面からの距離15mm以下の範囲では、固定化されていたフリーデル氏塩が分解し濃縮されるため、塩化物イオン濃度が高くなる傾向が認められた。これについては、調査をさらに継続し、塩化物イオンの濃度分布の変化の傾向を把握する必要があることを確認した。
 - 4) 日本海沿岸の暴露実験場に暴露した供試体および実構造物の経年調査から、道路設計要領の仕様を満足するシラン系表面含浸材による塩化物イオンの浸透抑制効果は8～10年経過後も持続していることを確認した。
 - 5) シラン系含浸材塗布後8～10年目までの範囲ではあるが、道路設計要領に記載されている予測

手法の有効性を確認した。

- 6) 道路設計要領の仕様を満足する材料を道路橋の地覆および剛性防護柵に塗布する場合、塩化物イオンの浸透予測、設計を行う際の吸水防止層の見かけの拡散係数は、母材コンクリートの1/100程度で設定することが妥当であると考えられる。なお、厳しい環境下での施工性や、そのような条件下で施工された場合の効果の持続性については今後調査する必要がある。

参考文献

- 1) 佐伯昇、熊谷守晃、太田利隆、星俊彦：初代・十勝大橋のコンクリートが示すもの、セメント・コンクリート、No.639、pp.1-9、2000.5
- 2) 熊谷守晃、星俊彦、佐伯昇、太田利隆：50 数年経過したコンクリートの物理、化学的特性と耐久性、土木学会論文集 No.686/VI-52、pp.41-54、2001.9
- 3) 熊谷守晃、太田利隆、佐伯昇、星俊彦：十勝大橋に用いられた鉄筋の特性及び鍛接継手、土木学会論文集 No.693/VI-53、pp.35-46、2001.12
- 4) 吉田行、島多昭典、田口史雄：初代十勝大橋コンクリートの長期耐久性試験、寒地土木研究所月報、No.719、pp.2-13、2013.4
- 5) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕、p.39、2013.3
- 6) 土木学会：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究（最終報告）、コンクリートライブラリー第 64 号、1988.3
- 7) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕、pp.147-148、2013.3
- 8) 吉田行、川村浩二、三井修：改良セメントのコンクリート工場製品への適用性—改良セメントを用いた皿形側溝試験施工—、第 52 回（平成 20 年度）北海道開発技術研究発表会、コ-02、2009.2
- 9) 吉田行、尾形寿、村中智幸、小倉東、佐竹比呂志：室内試験による混和材を用いた高耐久性コンクリートの工場製品への適用性評価、寒地土木研究所月報、No.680、pp.12-20、2010.1
- 10) 吉田行、村中智幸、若林将裕：改良セメントを用いた皿形側溝製品の物性および耐久性評価—実環境下における敷設 1 年後の追跡調査—、第 53 回（平成 21 年度）北海道開発技術研究発表会、コ 13(道)、2010.2
- 11) 吉田行、田口史雄、尾形寿、村中智幸、小倉東、佐竹比呂志：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート工場製品の実環境下での性能評価について、寒地土木研究所月報、No.690、pp.2-14、2010.11
- 12) 吉田行、宮本修司、山本典隆：改質セメントを用いた皿形側溝製品の現地耐久性追跡試験について、第 54 回（平成 22 年度）北海道開発技術研究発表会、ふ 3(道)、2011.2
- 13) 酒井秀昭、横山博司、高野茂晴、前田悦孝：高炉スラグ微粉末 (6000cm²/g) を用いた鋼橋の PC プレキャスト床版の検討、プレストレストコンクリート、Vol.43、No.5、pp.50-57、2001.9
- 14) 林田宏、田口史雄、遠藤裕丈、草間祥吾：超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究、寒地土木研究所月報、No.656、pp.10-15、2008.1
- 15) 小林一輔：図解コンクリート構造物の診断—電子の目で内部を見る—、オーム社、pp.30-33、2006.7
- 16) ASTM C672/C672M-98、Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Structures Exposed to Deicing Chemicals
- 17) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕、pp.154-156、2013.3
- 18) 土木学会：2012 年度制定コンクリート標準示方書「維持管理編」、pp.151-153、2008.6
- 19) 林大介、坂田昇、田口史雄、遠藤裕丈：浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.649-654、2008.7
- 20) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'15「基礎編」、p.31、2015.2
- 21) 気象庁アメダス、2013.11-2014.3
- 22) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'99、p.155、1999.9
- 23) 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、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」
- 24) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02〔基礎編〕、p.40、2002.1
- 25) 北海道土木技術会 コンクリート研究委員会 コンクリート維持管理小委員会：北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き(案)、p.2-49、2006.3
- 26) 文献 25)、pp.5-26 - 5-27
- 27) 遠藤裕丈、田口史雄、宮本修司、村中智幸、後藤浩之、林大介、坂田昇、名和豊春：シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果、土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）、Vol.67、No.1、pp.69-88、2011.2

STUDY ON DURABILITY EVALUATION FOR CONCRETE EXPOSED TO COLD SNOWY ENVIRONMENTS FOR LONG PERIODS

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2015

Team : Cold-Region Maintenance Engineering Research Group (Materials Research Team)

Author : SHIMATA Akinori, KIKUTA Etsuji, SHIMADA Hisatoshi, YOSHIDA Susumu, SEINO Masaki, ENDOU Hirotake, NONOMURA Yoshinori, OOTA Hideharu, WATANABE Jun, SUZUKI Satoshi

Abstract :

Concrete suffers the combined influence of frost and salt damage in cold snowy regions, where the adoption of measures to improve its long-term durability is urged. In this context, the evaluation of concrete durability in the actual environments is necessary, but actual verification takes a very long time. For this reason, durability is predicted/evaluated based on the results of accelerated tests or short-term exposure tests. However, the details of predicted/evaluated durability and actual durability in actual environments have not been fully verified.

In this study, investigations were conducted for years by using exposure test sites, exposed samples of existing structures and on-site test installations to verify the long-term durability of concrete in actual environments and the practicability of prediction/evaluation methods.

From the long-time exposure test results of the first Tokachi Ohashi Bridge concrete, it was confirmed that carbonation of concrete progressed little from the start of exposure test. However, the compressive strength and ultrasonic propagation velocity of concrete decreased in some parts, and they were thought to be caused by frost damage. Thus, the necessity for the extended investigation was assured. As for the carbonation rate, the actual value turned out to be greater than that calculated from the present prediction formula, clearly suggesting that effects of cement properties such as fineness need to be taken into consideration.

According to the investigation conducted five years after the placement of modified cement concrete products with improved durability for cold snowy regions, the modified cement products were less scaling deterioration and higher protective effect against chloride ion penetration in comparison with general products. It was also confirmed that the chloride ion diffusion coefficient derived from measured values disagreed with that from the proposed prediction formula. Thus, more data must be accumulated and examined further.

Based on the investigations on specimens exposed to the coast of the Japan Sea for eight to ten years and existing structures, which were applied silane type surface penetrants, it was verified that silane type surface penetrants which satisfied specifications of the road design manual of Hokkaido Regional Development Bureau carried on a protective effect against chloride ion penetration and that the proposed prediction method worked effectively. Where the silane type surface penetrants is applied to wheel guard and wall rail of a highway bridge, the apparent diffusion coefficient of water-repellent layer was proved appropriate to be set at a hundredth of that of base concrete in predicting or designing chloride-ion penetration.

Key words: cold snowy environments, exposure test for long periods, concrete durability, prediction/evaluation