

8 凍害・複合劣化を受けるインフラの維持管理・更新に関する研究

研究期間：平成 28 年度～33 年度

プログラムリーダー：寒地保全技術研究グループ長 熊谷政行

研究担当グループ：寒地基礎技術研究グループ（寒地構造チーム、寒地地盤チーム）、寒地保全技術研究グループ（耐寒材料チーム、寒地道路保全チーム）、寒地水圏研究グループ（寒地河川チーム、寒冷沿岸域チーム）、材料資源研究グループ

1. 研究の必要性

社会資本の老朽化の進行に対しては、戦略的な維持管理・更新に資する技術研究開発、具体的には、施設に対する荷重や環境条件等の様々な影響を踏まえた劣化状況の把握、施設の重要度に応じた管理水準に基づく計画的な維持管理・更新、一連の技術体系の構築等が早急に必要である。

特に、積雪寒冷地の社会インフラの長寿命化を図るためには、過酷な気象条件等、設置環境や利用状況に応じた技術研究開発が必要であり、凍害・塩害等の複合劣化・損傷に対する点検・診断技術の効率化、補修補強技術の高信頼化や更新・新設時の高耐久化に関する技術開発が必要である。

しかし、積雪寒冷環境下におけるインフラの健全性への著しい低下原因である低温、積雪、結氷、凍上、凍結融解、融雪水、塩分などによる凍害・複合劣化等への対策は未整備で喫緊の課題となっている。

2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、凍害やその複合劣化・損傷メカニズムの特性に応じた点検・診断・評価手法、補修補強、更新・新設時の高耐久化などの横断的（道路・河川・港湾漁港分野）技術開発を行い、体系化することを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築
- (2) 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立
- (3) 凍害・複合劣化等への耐久性の高い更新・新設技術の確立
- (4) 凍害・複合劣化等を受けるインフラに関する点検・診断・評価、補修補強、更新・新設の体系化

このうち、平成 28 年度は(1)、(2)、(3)について実施している。

3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、平成 28 年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

(1) 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

各凍害複合劣化予測式の開発：凍結防止剤が散布される寒冷環境下の道路におけるコンクリートの凍害進行予測技術の開発に向け、凍結防止剤の散布頻度が凍害の進行に及ぼす影響を調べる基礎実験を行った。散布がスケールリングに及ぼす影響は、単に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴う融雪水の塩分濃度の変化もあわせて考慮し、予測を行う必要がある。一方、相対動弾性係数に及ぼす散布頻度の影響は、AE 剤が用いられているコンクリートについては小さいものの、AE 剤が使用されていない可能性のある供用年数が長いコンクリートは影響を受ける可能性が高く、適切な予測の実施が求められる。

橋梁床版の劣化損傷に応じた性能評価技術の開発：北海道において 45 年間供用され、凍害を含む複合劣化の進行が疑われた RC 床版を対象に、劣化状況を把握するための各種調査を実施した。その結果、対象橋梁は凍害・アルカリシリカ反応・疲労の三要因による劣化が複合していることを確認するとともに、コンクリートの力学的特性を明らかにした。また、凍害あるいは ASR に起因する床版の水平ひび割れに関しては、耐荷性・耐久性への

影響を明らかにするため、静的破砕剤を用いて水平ひび割れを模擬的に導入した RC 梁部材の載荷試験を行った。その結果、水平ひび割れの発生位置により部材性能低下への影響度が異なることを明らかにし、凍害を含む複合劣化を受けた RC 床版の性能評価を行う上で、ひび割れの発生深さや密度を考慮する必要があることを示唆した。

各種河川構造物の劣化の最適な点検・診断技術、評価手法の構築：近年、河川構造物の点検要領が新たに整備されたが、凍害との複合劣化等に対する評価方法は未だ確立されていないことから、これらの劣化機構等を解明して最適な点検・評価方法等を構築する必要がある。新たな点検要領で点検が実施された国土交通省北海道開発局の全樋門の平成 28 年度の点検データから、樋門コンクリートの劣化・損傷の発生状況、損傷項目と評価区分等を整理・分析し、損傷や劣化原因の評価に地域差がある等の課題が抽出され、今後の研究を進めるための基礎資料が得られた。

沿岸構造物の老朽化特性の評価手法の提案：氷海域特有の外的環境、とりわけ低温環境や海氷の作用によるコンクリートの劣化損傷機構に着目した文献等を調査し、海氷はコンクリートを摩耗すること、今後積極的に実施すべき研究課題の一つは、海氷による摩耗と凍結融解との複合劣化であること、等を明らかにした。さらに、北海道の港湾・漁港構造物を対象に行った劣化状況に関する大量の調査データの収集整理を行い、今後、詳細な氷海域特有の劣化機構の解明に向けた手がかりを得た。

融雪水が舗装損傷に及ぼす影響の点検評価技術の開発：電気抵抗によって路盤や路床の凍結融解状態や含水状態を把握する手法と、凍結融解作用が舗装混合物に与える影響を定量化する手法について検討を行った。その結果、電気抵抗を計測することで路盤材および路床材の凍結融解状態を判定することが可能なことが判った。また、電気抵抗値は含水比に指数比例する傾向を示すことから、含水状態を把握することが可能であると考え、電気抵抗で路盤や路床の凍結融解状態や含水状態を把握する手法の有効性を確認した。また、融雪水および凍結融解作用が舗装混合物に与える影響を定量化する手法として、蛍光エポキシ樹脂含浸法の適用性を検証した。その結果から、蛍光エポキシ樹脂含浸法はアスファルト混合物に対しても適用が可能であり、凍結融解作用に伴う空隙の増大など内部状況の変化を視覚的に確認できる有用な評価手法と考えられた。

切土のり面における凍上被害の診断・評価技術の開発：寒冷地域における切土のり面は、凍結および融解作用を繰り返すことにより、のり面の変状事例が多く報告されており、効率的な点検・診断・評価技術の確立が急務である。実施工現場における切土のり面安定構造物（地山補強土工）の凍上現象を把握するため、北海道内で地山補強土工の施工予定箇所の実地調査を実施し、試験施工箇所を選定した。また、凍上現象の挙動を検証するため、苫小牧試験施工フィールド内において凍上対策を施した試験施工を実施し計測を開始した。

(2) 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

寒冷環境下における耐寒促進剤の補修への適用技術の開発：耐寒促進剤を用いたコンクリートを対象に、養生時に氷点下となる場合の強度増進特性について検討した。その結果、養生温度が氷点下となる場合でも、コンクリート強度の推定が可能であることを確認した。

複合劣化した RC 床版に対するひび割れ注入工法の適用性検討：複合劣化により RC 床版内部に発生したひび割れを補修する方法について検討した。ひび割れ注入工法に着目し、静的破砕剤を用いて水平ひび割れを模擬的に導入した RC 梁部材に対して、JIS A 6024 および国土交通省土木補修用エポキシ樹脂注入材 1 種に適合する低粘度形エポキシ樹脂の注入を行い、注入前後のコンクリートの超音波伝播速度により充填性の評価を行った。

河川樋門等の最適な補修と部分的構造改良技術の開発：積雪寒冷地の河川構造物特有の劣化等に対する補修対策において、未だ劣化機構等が解明されていない河氷等の摩耗と凍害との複合劣化に対する最適な補修方法の確立は喫緊の課題である。オホーツク地域の結氷する河川の直立護岸において氷塊の衝突実態を把握する現地調査を実施した。その結果、氷塊の衝突の範囲や分布、衝突圧力値を概ね確認できたことから、氷塊の衝突がコンクリート壁面の損傷に影響していることが示唆された。

沿岸構造物の補修工法の提案：凍害や流氷の作用をうける沿岸構造物の有効な補修工法や対策工について、最新の研究成果を含む文献等の調査を行った。幾つか可能性が見出された工法について、これを実証するためにも、おもに現地調査等により、海氷による外力を中心とする物理的な劣化損傷要因・過程等を調べるとともに、おもに摩耗対策として、金属被覆（犠牲鋼板）に着目した各種検討を行い、今後の課題等を明らかにした。さらに、

幾つかの金属の防食法等の氷海域での暴露試験を行い、その劣化損傷状況等を調べた。

低温環境下で耐久性のあるシール材等の補修補強技術の開発：舗装補修技術の開発に向けた取り組みとして、ひび割れ抑制シートによる舗装補修の効果について検証した。現場での追跡調査に基づく評価を実施した結果、ひび割れ抑制シートによって、低温ひび割れと疲労ひび割れの再発が一定程度抑制できている状況が確認できた。ガラス繊維を基材に使用したシートの方が不織布を基材にしたシートよりも経過は良好であることが確認できた。低温ひび割れと疲労ひび割れの補修にひび割れ抑制シートを用いることは有益であり、ガラス繊維シートなどの引張強度が高く伸び率が小さいひび割れ抑制シートを適用することは有効と考えられた。

(3) 凍害・複合劣化等への耐久性の高い更新・新設技術の確立

積雪寒冷環境下における表面含浸材の施工法の提案：水や塩化物イオンの侵入抑制機能をコンクリート表層へ付与するシラン系表面含浸材は、表面保護工法設計施工指針において、気温 5℃以下の環境では適用対象外とされ、多くの製品も常温施工を原則としている。一方、寒冷地では作業工程の関係でやむを得ず厳冬期に塗布することがある。作業を合理的に行うには防寒仮囲いの温度や撤去時期等を適切に定める必要がある。しかし、厳冬期の施工仕様は十分確立されておらず、手探りで行われることもある。このため、低温下での最適な塗布工程の策定に必要な施工要領の整備が急がれる。本研究ではシラン系表面含浸材の冬期施工要領の策定に向けての一環として、低温下での含浸性を調べる基礎実験を行った。

凍塩害複合劣化環境下におけるコンクリートの要求性能・標準仕様の提案：寒冷地の沿岸地域や凍結防止剤散布地域では、凍害によるコンクリート構造物のスケーリング劣化が問題となっている。スケーリング抵抗性を簡易に評価できる試験手法について検討を行った。細骨材の種類、練り上がりの空気量、振動締固め時間を実験要因として、塩水を用いたスケーリング抵抗性の試験を実施した。この結果、空気量が多い配合ほどスケーリング量は小さくなるが、特に微細な空気量と良い対応を示すこと、微細な空気は振動締固めで抜けにくいこと、細骨材の品質もスケーリング量に大きな影響を与えること等が分かった。これらの結果をもとに、スケーリング抵抗性を評価するための試験方法のイメージを構築した。

切土のり面構造物の耐凍害性向上技術に関する研究：寒冷地域における切土のり面は、凍結および融解作用を繰り返すことにより、表層のゆるみや小段排水工の損傷が多く確認されていることから、凍上対策技術の確立が急務である。小段排水工の新技术である「立体網状スパイラル構造排水材」の効果を確認するため、試験施工および計測調査（地中温度、変位等）を開始した。また、切土のり面の安定化を図る目的で設置している特殊ふとんかごと断熱材を組み合わせた試験施工を実施している現場において、地中温度・凍結深さを計測し凍上抑制効果について確認した。

RESEARCH ON THE MAINTENANCE AND RECONSTRUCTION OF THE INFRASTRUCTURE SUBJECT TO FROST DAMAGE AND COMBINED EFFECT OF DETERIORATION

Research Period : FY2016-2011

Program Leader : Director of Cold-Region Maintenance Engineering Research Group
KUMAGAI Masayuki

Research Group : Cold-Region Construction Engineering Research Group
(Structures, Geotechnical)
Cold-Region Maintenance Engineering Research Group
(Materials, Road Maintenance)
Cold-Region Hydraulic and Aquatic Environment Engineering Research Group
(River Engineering, Port and Coast)
Materials and Resources Research Group

Abstract : Extending the lifespan of infrastructure in cold, snowy regions requires research and development of technologies that address frost damage and combined deterioration caused by harsh weather conditions, such as low temperatures, snow cover, freeze-thaw, snowmelt water, and salt.

This research and development program aims at cross-sectoral technological development for various structures and the systematization of inspection, diagnosis and evaluation methods, repair and reinforcement, and renewal and new construction with higher durability, based on the characteristics of the mechanism of frost damage and combined deterioration and damage.

In fiscal year 2016, a basic experiment for the development of technologies to predict the progress of frost damage in concrete was conducted, and data analysis, literature review, laboratory tests, and test installation were performed with regard to inspection, diagnosis and evaluation techniques for various structures, including loading tests of RC beam members with simulated horizontal cracks caused by frost damage and ASR. A laboratory test for the development of techniques for the application of antifreezing admixtures under cold conditions, and a site test for technologies for the repair and reinforcement of various structures were also conducted. Furthermore, a laboratory test and a test installation were performed, including a basic experiment on impregnation with a silane surface penetrant under low temperature, in relation to technologies for the renewal and new construction of various structures.

Key words : frost damage, combined deterioration, concrete structure, road pavement, cut slope

8.1 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

8.1.1 コンクリートの凍害・複合劣化に共通する耐久性向上技術に関する研究（凍害劣化予測式）

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）
研究担当者：島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、
遠藤裕丈

【要旨】

凍結防止剤が散布される寒冷環境下の道路におけるコンクリートの凍害（スケーリング、相対動弾性係数）進行予測技術の開発に向け、凍結防止剤の散布頻度が凍害の進行に及ぼす影響を調べる基礎実験を行った。散布がスケーリングに及ぼす影響は、単に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴う融雪水の塩分濃度の変化もあわせて考慮し、予測を行う必要がある。一方、相対動弾性係数に及ぼす散布頻度の影響は、AE 剤が用いられているコンクリートについては小さいものの、AE 剤が使用されていない可能性のある供用年数が長いコンクリートは影響を受ける可能性が高く、適切な予測の実施が求められる。

キーワード：凍結融解、凍結防止剤、散布頻度、スケーリング、相対動弾性係数

1. はじめに

寒冷地には凍害劣化や、凍・塩害による複合劣化が進行したコンクリート構造物の事例が多い。昨今の厳しい財政事情下で今後、コンクリート構造物の合理的な維持管理の進め方を検討するためには、こうした劣化を予測する技術の開発が求められている。

なお、ひとことに寒冷地と言っても、冬期における寒冷環境の厳しさは地域によって異なる。もちろんコンクリートの配合も一様ではなく、様々なコンクリートが多様な寒冷環境下に曝されている。合理的な劣化予測技術を開発するには、これら種々の条件が劣化の進行に及ぼす影響を詳細に整理する必要がある。例えば、凍結防止剤が散布される道路橋のコンクリート部材における凍害の進行は、凍結防止剤の散布量や散布方法と関係があると考えられるが、具体的な因果関係は未だ不明な点が多く、散布量との定量的な関連づけにより劣化予測を行うことは現時点では困難¹⁾とされている。

そこで、平成 28 年度は、凍結防止剤が散布される寒冷環境下でのコンクリートの凍害進行予測技術の開発に向け、凍害の進行に及ぼす凍結防止剤の散布頻度の影響などを調べるための基礎実験を行った。

2. 各凍害・複合劣化予測式の開発

2.1 実験概要

2.1.1 コンクリート配合・材料

供試体のコンクリート配合を表-1 に示す。セメントは

寒冷地で広く使用される普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の 2 種類とした。水セメント比は内陸部における最大値である 55%²⁾とした。細骨材は苫小牧市錦岡産海砂（表乾密度 2.67g/cm³、絶乾密度 2.65g/cm³、吸水率 0.87%、粗粒率 2.80、除塩処理済み）、粗骨材は小樽市見晴産砕石（表乾密度 2.67g/cm³、絶乾密度 2.64g/cm³、吸水率 1.66%、粗粒率 7.04）を使用した。粗骨材の最大寸法は 25mm とした。

土木学会コンクリート標準示方書によると、寒冷地で AE コンクリートの使用が原則となったのは昭和 42 年³⁾からで、それ以前の示方書では「AE コンクリートを用いるのが望ましい」とのみ記載され、原則とはなっていない⁴⁾。そのため、供用年数が長いコンクリート部材の一部は AE コンクリートではない可能性があるため、AE 剤を使用しないケースも設けた。AE 剤を使用する場合の空気量は内陸部で一般的な 4.5±1.5%²⁾とした。

2.1.2 コンクリート配合・材料

図-1 に供試体を示す。供試体は 100mm×100mm×400mm の角柱とした。打設後、材齢 7 日まで湿布養生を行った後、材齢 28 日まで恒温恒湿室（温度 20℃、湿度 60%）に静置した。静置期間中に発泡スチロールを使用して高さ 10mm、幅 5mm の枠を作製し、材齢 21 日にエポキシ樹脂とシリコーンを用いて枠を打設面（100mm×400mm、以下、試験面と記す）に据え付けた。

表-1 コンクリート配合と圧縮強度および凍結融解試験における温度・時間

記号※	コンクリートの配合条件						材齢 28 日 圧縮強度 (MPa)	凍結融解試験に おける温度・時間	
	使用 セメント	水セメント 比(%)	単位量 (kg/m ³)						AE 剤※※
			水	セメント	細骨材	粗骨材			
N-n-18	普通 ポルト ランド セメント	55	158	287	872	1058	不使用	47.0	凍結：-18℃で16時間 融解：23℃で8時間 (1日1サイクル)
N-a-18			150	273	864	1057	使用	38.0	
N-n-40			158	287	872	1058	不使用	47.0	凍結：-40℃で16時間 融解：23℃で8時間 (1日1サイクル)
N-a-40			150	273	864	1057	使用	38.0	
B-n-18	高炉 セメント B種		155	282	875	1058	不使用	35.7	凍結：-18℃で16時間 融解：23℃で8時間 (1日1サイクル)
B-a-18			147	267	865	1058	使用	33.0	
B-n-40			155	282	875	1058	不使用	35.7	凍結：-40℃で16時間 融解：23℃で8時間 (1日1サイクル)
B-a-40			147	267	865	1058	使用	33.0	

※) コンクリート配合の記号は、セメントの種類 (N、B)、AE 剤の使用有無 (n、a)、凍結融解試験における凍結温度の絶対値 (18、40) の組み合わせで構成。

※※) 使用した AE 剤の種類、使用量は以下の通り

- AE 減水剤：成分はリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
 $\text{使用量(ml/m}^3\text{)} = \text{セメント量(kg/m}^3\text{)} \times 2.5\text{ml/kg}$
- AE 助剤：成分は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤で、1% 希釈溶液として使用
 $\text{使用量 (1\% 希釈溶液) (g/m}^3\text{)} = \text{セメント量(kg/m}^3\text{)} \times 2.5\text{(g/kg/A)} \times 1.7 \sim 2.3\text{(A)}$
 上記の式における単位「A」は、目標空気量によって定まる値 (配合試験により決定)

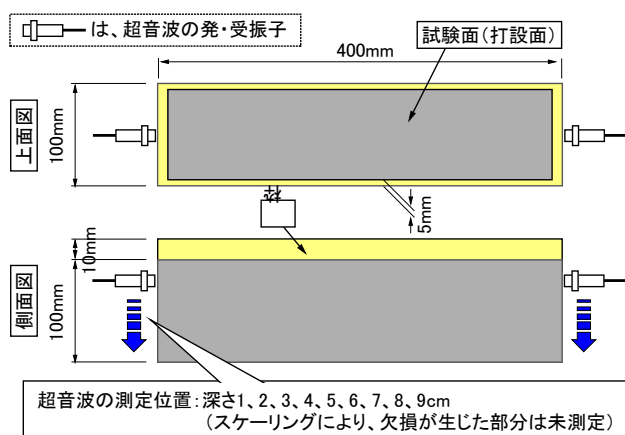
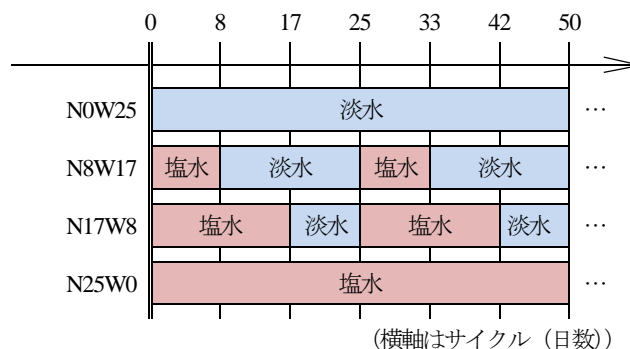


図-1 供試体



記号：25 サイクル周期で試験水の張り方を決めていることをふまえて、25 サイクルあたりの塩水 (N) を張る日数と淡水 (W) を張る日数の組み合わせで構成。

図-2 試験水の張り方

2.1.3 凍結融解試験

凍結融解試験は材齢 28 日から開始した。劣化因子が部材の一面から供給される実際の状態を模擬し、ここでは ASTM C 672 を参考に、試験面に試験水を深さ 6mm 張って 1 日 1 サイクルの凍結融解作用を与えた。ASTM C 672 では -18℃で 16 時間、23℃で 8 時間の 1 日 1 サイクルの凍結融解作用を与えることになっているが、冬期における環境の厳しさが地域により異なることに着目し、ここでは北海道で最も厳しい最低気温に相当する -40℃⁹⁾ で 16 時間、23℃で 8 時間の凍結融解作用を与えるケー

スを設けた (表-1)。

試験水は淡水と凍結防止剤に見立てた濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液 (以下、塩水と記す) の 2 種類を準備した。試験水の張り方は図-2 に示すように、散布の機会が全くない路線を想定した常時淡水を使用するケース、散布がほぼ毎日行われる路線を想定した常時塩水を使用するケース、散布の頻度に幅がある路線を想定し、塩水 8 日間→淡水 17 日間→…を繰り返すケース、塩水 17 日間→淡水 8 日間→…を繰り返すケースの 4 ケースとした。

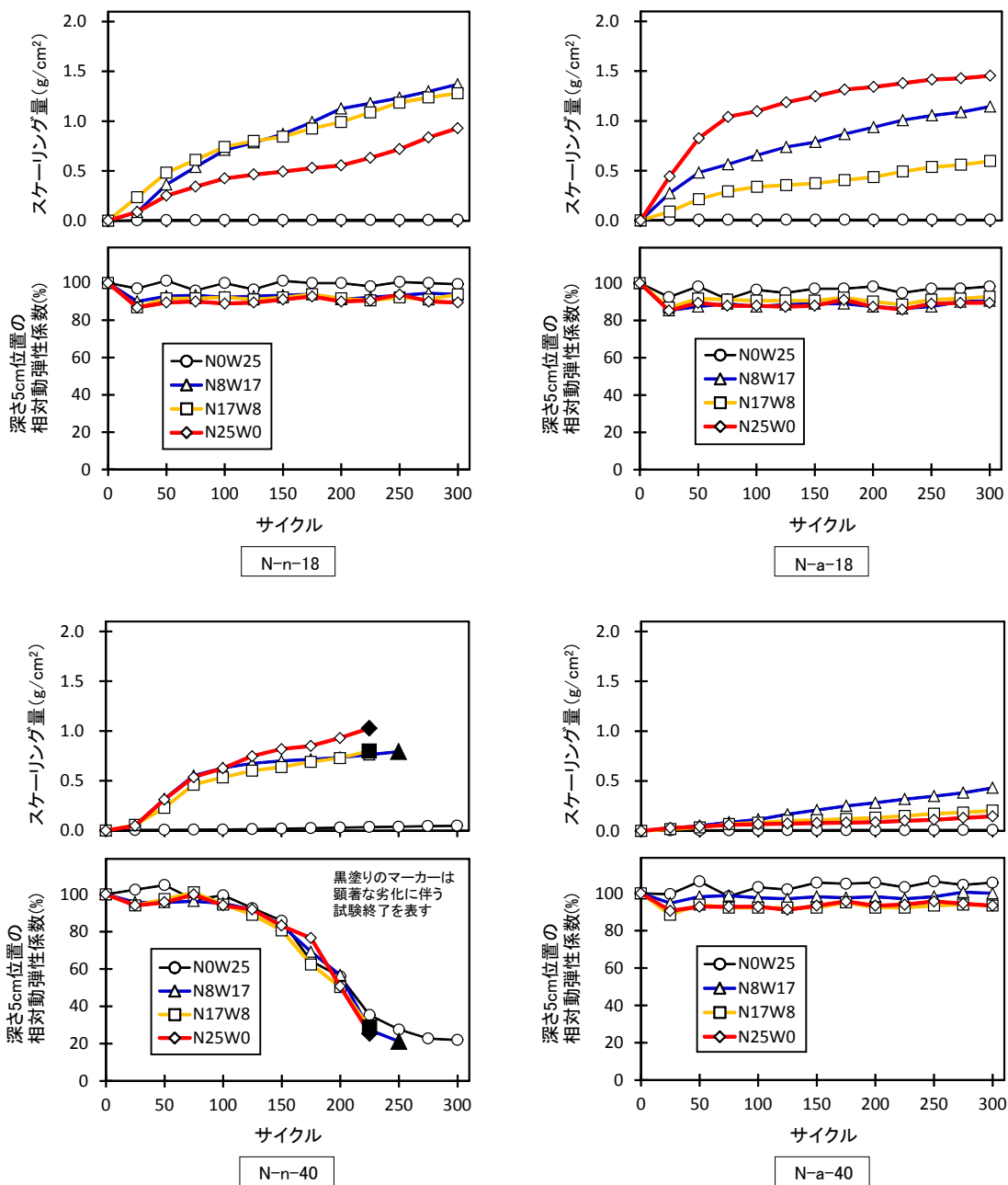


図-3 スケーリングおよび相対動弾性係数の推移（普通ポルトランドセメント使用）

2.1.4 測定内容

凍結融解試験は 300 サイクルまで行うこととし、25 サイクルおきにスケーリング量と相対動弾性係数の測定を行った。スケーリング量と相対動弾性係数ともに測定値は供試体 3 個の平均とした。また、3 個のうち 1 個でも劣化が著しく進行し、測定が困難となった時点で試験を終了することとした。

スケーリング量は試験面から剥離片を採取し、110℃で乾燥させた後、剥離片の質量を測定して求めた。

相対動弾性係数は超音波測定器を使用して求めた。図-1 に示す要領で供試体の両側面（100×100mm）に超音波の発・受振子をあてて深さ 10、20、…、90mm 位置の超音波伝播速度を測定し、式(1)⁶⁾、(2)からそれぞれの測定深さに対する相対動弾性係数を求めた。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (1)$$

$$RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (2)$$

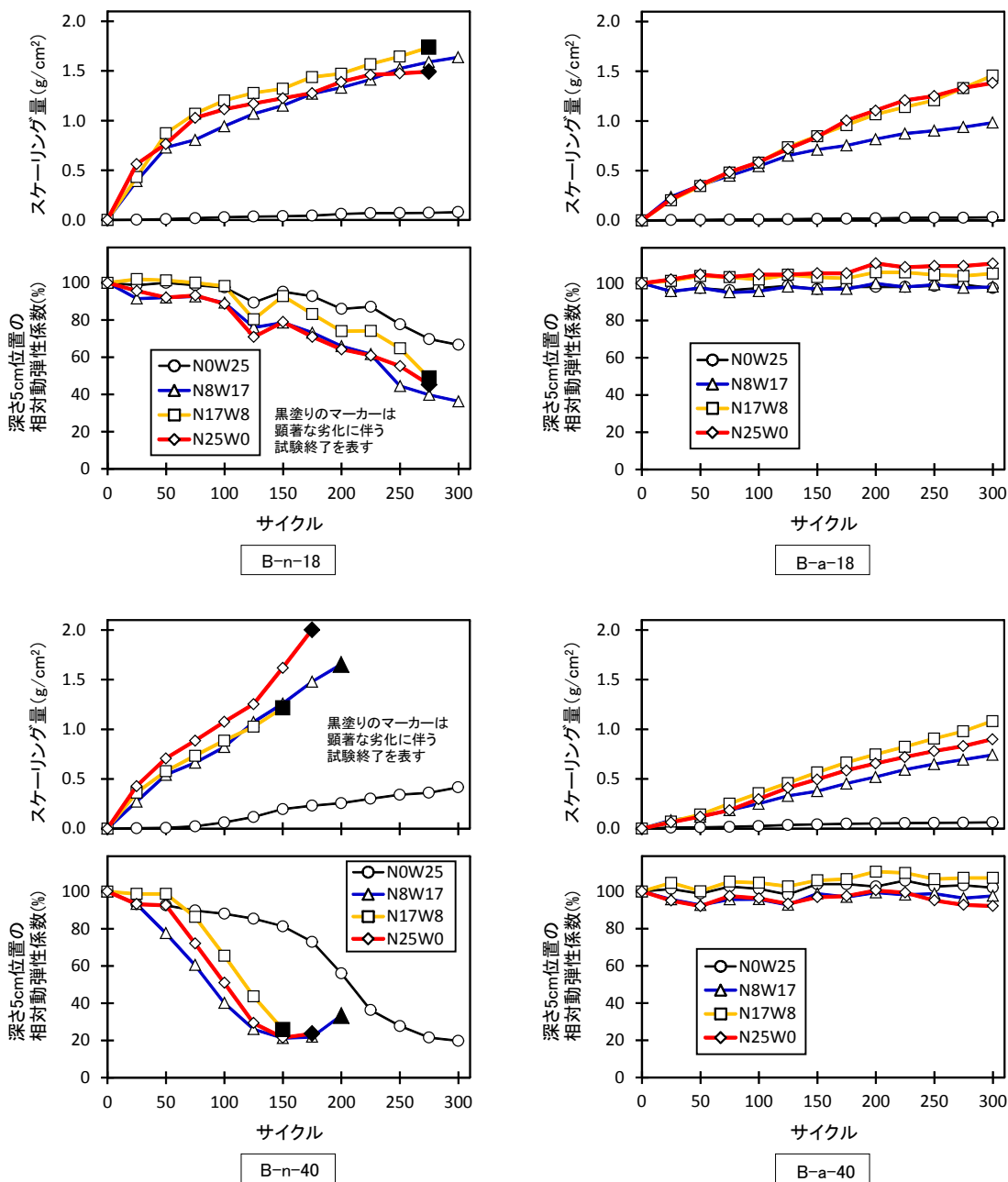


図-4 スケーリングおよび相対動弾性係数の推移 (高炉セメントB種使用)

ここに、 E_{dn} は n サイクル後の動弾性係数(GPa)、 V_n は n サイクル後の超音波伝播速度(km/s)、 RE_d は n サイクル後の相対動弾性係数(%)、 E_{d0} は凍結融解を受けていないコンクリートの動弾性係数(GPa)である。一般に E_{d0} は 0 サイクル、すなわち凍結融解試験前の供試体の測定値が使用されるが、ここでは水和反応の過程が動弾性係数に及ぼす影響を極力排除する理由から、別途製作した供試体を、試験水の張り方のみ図-2 にならい、凍結融解試験期間と同じ期間中、温度 20℃、湿度 60%の一定下に存置した後、測定した動弾性係数を E_{d0} として用いた。

2. 2 実験結果・考察

2.2.1 凍害の進行状況

図-3 に普通ポルトランドセメントを使用した供試体のスケーリングと相対動弾性係数の推移を示す。相対動弾性係数は代表して供試体中心の深さ 5cm の値を示した。淡水のみの N0W25 と塩水を使用した N8W17・N17W8・N25W0 を比較すると、スケーリングはN-n-18、N-a-18、N-n-40、N-a-40 のいずれも淡水のみの N0W25 が明らかに小さい結果となった。一方、相対動弾性係数はN-n-40 以外は 85%以上の値で推移した。N-n-40 は塩

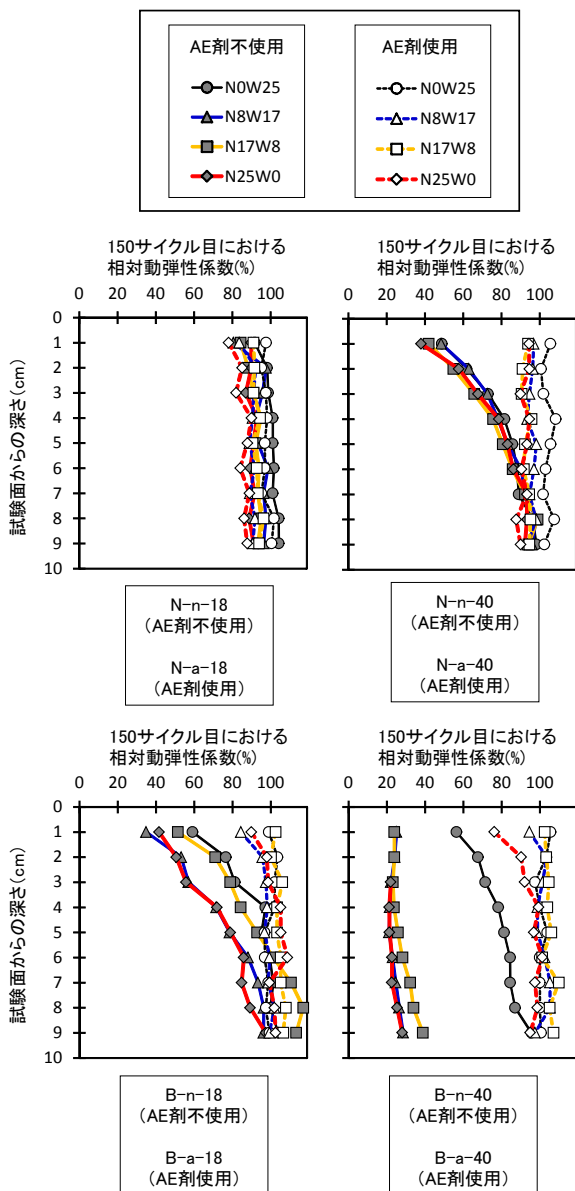


図-5 相対動弾性係数の分布 (150 サイクル目)

水の使用有無を問わず、相対動弾性係数が 150 サイクル以降、経時的に大きく低下し、塩水を使用した供試体は 225～250 サイクルにおいて試験面に張った試験水が供試体の側面に発生した亀裂から漏れ出す程の顕著な劣化に至ったため、試験を途中で終了させた。

図-4 は高炉セメント B 種を使用した供試体の結果である。図-3 と同様に、スケーリングは N0W25 が最も小さかった。相対動弾性係数は B-a-18、B-a-40 が 85%以上の値で推移したのに対し、B-n-18、B-n-40 はいずれの供試体においても値の低下が確認され、塩水を用いた供試体は B-n-18 の N8W17 以外は試験途中で終了に至った。

図-5 は 150 サイクル目における供試体内部の相対動

弾性係数の分布を示している。最終の 300 サイクル目ではなく、途中の 150 サイクル目のデータを用いた理由は、試験が最も早く終了に至ったのが B-n-40 の N17W8 で、その終了時期が 150 サイクル目であり、150 サイクル目までは全ての供試体で測定が行われ、同一サイクルでの比較が可能なデータが揃っているためである。

AE 剤不使用の供試体に着目すると、普通ポルトランドセメントを使用した場合、最低温度を -18°C に設定したものは相対動弾性係数がさほど低下しなかったものの、 -40°C に設定したものは表面に近い測定位置ほど相対動弾性係数の低下が大きいことが確認された。高炉セメント B 種を使用した場合、 -18°C に設定したものは表面に近い測定位置ほど大きな相対動弾性係数の低下がみられ、 -40°C に設定したものは全体的に低下が確認された。最低温度が低くなるほど凍結水量が増大し、膨張圧が高まること、特に AE 剤を使用しない場合はこの影響が顕著に表れることは広く知られている。相対動弾性係数に及ぼす最低温度の影響は、この知見と良く対応している。また、最低温度が同じ場合は高炉セメント B 種を用いた方が相対動弾性係数の低下は大きかった。一般に高炉スラグ微粉末が混入された高炉セメントは透水しにくく、水密性も高まることから、凍害によって発生したひび割れを介して内部に侵入・蓄積された凍結余剰水は、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べるとコンクリート組織を流動しづらく、流動の際に大きな水圧が発生し、相対動弾性係数の大きな低下に至ったと考えられる。高炉セメント B 種を用いた供試体をみると、相対動弾性係数の低下は塩水を用いたケースで顕著に表れていた。これは塩水が内部に供給されたことで、凍結の際に大きな膨張圧を引き起こす浸透圧が発生した可能性を示唆する。

一方、AE 剤を使用した供試体は塩水の使用有無にかかわらず相対動弾性係数の低下は小さかった。スケーリングについても図-3、4 で示したように、N-n-18、N-a-18 の N25W0 でのみ AE 剤の効果が表れなかったが、それ以外のすべての供試体では AE 剤を使用した方がスケーリング量が少なかった。散布環境下での凍害予測に際し、AE 剤の使用有無は重要な指標と言える。

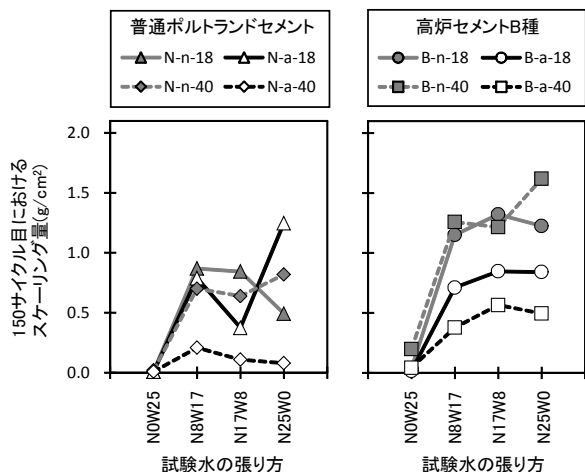


図-6 散布頻度がスケーリングに及ぼす影響 (150 サイクル目)

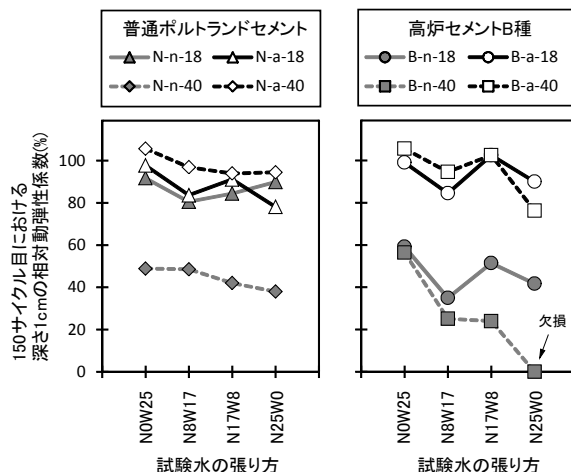


図-7 散布頻度が深さ1cmの相対動弾性係数に及ぼす影響 (150 サイクル目)

2.2.2 散布頻度がスケーリングに及ぼす影響

図-6 は散布頻度がスケーリングに及ぼす影響を示している。図-5 同様、スケーリング量は150 サイクル目のデータを使用した。NOW25 と N8W17 を比較すると、スケーリング量は N8W17 の方が明らかに大きいことがわかる。一方、N8W17、N17W8、N25W0 をみると、セメント種別、AE 剤有無、最低温度のそれぞれのケースでばらつきはあるものの、試験水の張り方毎にみると、スケーリング量がほぼ同程度と言える。N8W17 が塩水の供給を受ける期間は N25W0 の 3 割程度であるが、今回の実験では濃度 3%の塩水が繰り返し供給される場合、塩水と接する期間が全期間の 3 割程度でもスケーリングは大きく進行することが確認された。スケーリングの促進に繋がる表層の亀裂は短期間で急速に形成されることが伺える。

今回の実験では試験面に張る塩水の濃度を常時 3%としているが、実際の路面は凍結防止剤を含む融雪水の塩分濃度が急速に変化しやすく¹⁰⁾、必ずしも常時一定とは限らない。スケーリングが最も促進されやすい塩水の濃度は約 3%¹¹⁾とされ、散布回数が多いほど融雪水の塩分濃度が高い状態は長く続きやすく、スケーリングの進行にも影響すると思われるが、今回の実験のようにコンクリートに作用する塩水の濃度が常に 3%の環境下では、繰り返される散布の回数がわずかでも大きなスケーリングに至ることが示された。このように、スケーリングに及ぼす凍結防止剤散布の影響は、単に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴うコンクリートへ供給される融雪水の塩分濃度の変化もあわせて考慮した上で予測を行う必要があると言える。

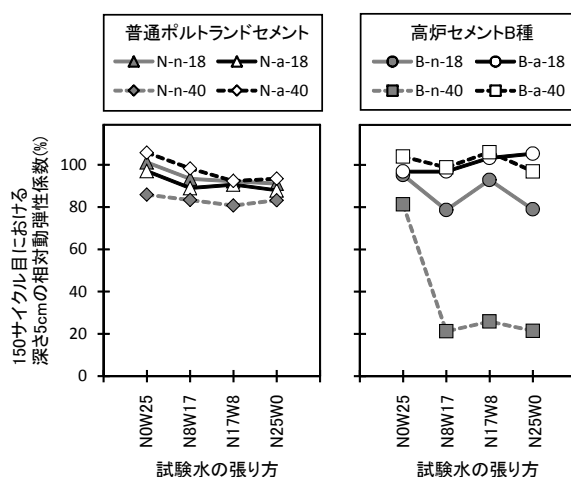


図-8 散布頻度が深さ5cmの相対動弾性係数に及ぼす影響 (150 サイクル目)

2.2.3 散布頻度が相対動弾性係数に及ぼす影響

図-7、8 は散布頻度が相対動弾性係数に及ぼす影響を、それぞれ測定深さ 1cm、5cm について示したものである。前節と同様に、ここでも 150 サイクル目のデータを使用した(スケーリングによって深さ 1cm のコンクリート組織が欠損に至った一部の供試体における深さ 1cm の相対動弾性係数は 0%と表示している(図-7))。

AE 剤を用いた供試体に着目すると、深さ 1cm は塩水を張った方がばらつきはあるが値は低下しているように見受けられる。一方、深さ 5cm をみると、塩水の使用有無を問わず、値が 90~100%前後であった。なお、N8W17、N17W8、N25W0 の 3 者をみると前節同様、散布回数との関係は明確ではなかった。このことから、凍害に及ぼす塩分の影響は表層付近に集中的に及んでいることがわ

かる。

これに対し、AE 剤を用いていない場合は、散布回数との関係は明確でないものの、高炉セメント B 種を用いた供試体で塩分による相対動弾性係数の低下への影響が表れている。さらに、普通ポルトランドセメントを用いた供試体では 150 サイクル目の段階では明確でないが、**図-3**で示したように試験が途中で終了する等、塩分の影響を受けている。以上のことから、AE 剤が使用されていない可能性のある供用年数が長い部材については特に散布の影響を受ける可能性が高く、適切な劣化予測に基づく対応が求められる。

3 まとめ

凍結防止剤が散布される寒冷環境下でのコンクリートの凍害進行予測技術の開発に向けて、平成 28 年度は凍害の進行に及ぼす凍結防止剤の散布頻度の影響を調べる基礎実験を行った。得た成果を以下に示す。

- (1) スケーリングに及ぼす散布の影響は、単に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴う融雪水の塩分濃度の変化を考慮して予測を行う必要がある。
- (2) 相対動弾性係数は、AE 剤が使用されていない可能性のある供用年数が長い部材では散布の影響を強く受ける可能性が高く、適切な劣化予測に基づく対応が求められる。

平成 29 年度は供給される塩水の濃度に着目した実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 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, p.3-コ 7-5, 2016.4
- 2) 文献 1), p.3-コ 2-4
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書解説【昭和 42 年版】, p.32, 1967.7
- 4) 土木学会: 昭和 31 年土木学会制定コンクリート標準示方書解説, p.26, 1958.12
- 5) 気象庁アメダス
- 6) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002.6
- 7) 山下英俊: コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究, 北海道大学学位論文, pp.116-121, 1999.3
- 8) 依田彰彦: 技術フォーラム「資源の有効利用とコンクリート」(第 5 回) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.4, pp.72-82, 1996.4
- 9) Pigeon, M. and Pleau, R. : Durability of Concrete in Cold Climates, E&FN SPON, pp.16-17, 1995.
- 10) 佐野弘: 定置式凍結防止剤自動散布装置の研究開発, 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」第 14 号, 第 1 編調査研究報告, pp.20-27, 2001.7
- 11) Verbeck, G. J. and Klieger, P. : Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin, No.150, pp.1-13, 1957.

8.1 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

8.1.2 構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究（橋梁）

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地構造）、
寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：西弘明、今野久志、佐藤孝司、佐藤京、角間恒、
島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、林田宏

【要旨】

凍害・複合劣化等により損傷した橋梁床版の性能評価技術を開発するため、北海道において45年間供用され、凍害を含む複合劣化の進行が疑われたRC床版及び床版供試体を対象に、劣化状況を把握するための各種調査、試験を実施した。その結果、対象となった実橋梁は凍害・アルカリシリカ反応・疲労の三要因による劣化が複合しコンクリートの力学的性能が低下するとともに、水平ひび割れ等（以下、水平ひび割れに加え、ある厚みの範囲で水平方向に展開する一連のひび割れを指す。）が発生していることが確認された。さらに水平ひび割れ等の発生が室内実験により再現され、その発生深さが応力状態により変化する可能性を示唆する結果を得た。水平ひび割れ等による耐荷性・耐久性への影響を明らかにするため、静的破砕剤を用いて水平ひび割れ等を模擬的に導入したRC梁部材の載荷試験を行い、水平ひび割れ等の発生位置により部材の性能低下への影響度が異なることを明らかにし、さらに凍害を含む複合劣化を受けたRC床版の性能評価を行う上で、ひび割れの発生深さや密度を考慮する必要があることを示唆する結果を得た。

キーワード：疲労、床版、ひび割れ、水平ひび割れ、コア、蛍光エポキシ樹脂

1. 実橋梁床版の劣化度調査

1.1 調査概要

北海道において凍害およびASRによる複合劣化を受けたRC床版について、劣化状況を把握するための各種調査を実施した。

1.2 対象橋梁

調査対象橋梁は、RC床版を有する橋長34mの2径間単純合成鉄桁橋の曲線道路橋であり、調査時点で供用後45年が経過している。写真-1は対象橋梁の床版下面の状況であるが、部分的なコンクリートの濡れ色および白色析出物が見られた。過去に床版を対象とした補修は実施されていないが、地覆前面から道路センター方向に200mm程度までの範囲ではシート系防水層の設置が確認できた。

1.3 調査項目

ここでは、実施した各種調査のうち、撤去床版を対象とした切断面の外観調査、蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートの微細ひび割れ調査、コンクリートコアによる圧縮・静弾性係数試験、ゲルフルオレッセンス法によるASR反応性診断の結果について記載する。

1.4 調査結果

写真-2に、床版切断面およびコンクリートの微細ひび

割れの状況を示す。本床版においては床版上面から最大60mm程度の範囲でコンクリートの土砂化が確認されたほか、下側鉄筋までの範囲には粗骨材の界面に沿って進展する水平方向のひび割れが多数見られた。



写真-1 対象橋梁の床版下面の状況



(a) 切断面

(b) 微細ひび割れ

写真-2 コンクリートの劣化状況

図-1 に、現地から採取したコアの静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。コンクリート標準示方書²⁾での関係と比較すると、一部のコアを除き静弾性係数の低下が顕著であり、凍害や ASR などによる内部欠陥の影響を受けていることがわかる。

図-2 は、ゲルフルオレッセンス法による ASR の反応性診断における発光状況であり、若干ではあるが粗骨材周辺に発光が見られ、ASR による反応性有と判定できる。なお、別途実施した走査型電子顕微鏡観察においても、アルカリシリカゲルの発生が確認されている。

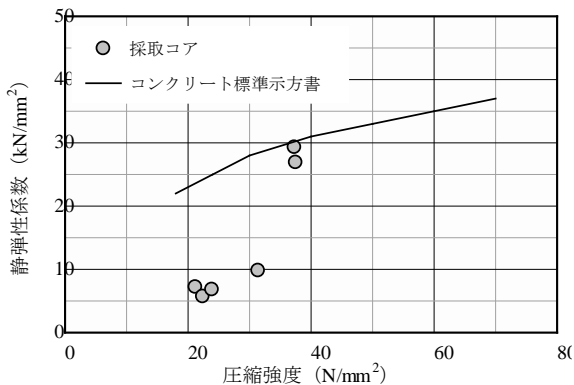
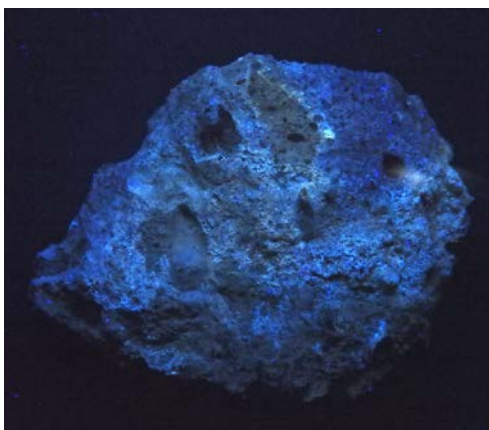


図-1 コンクリートの圧縮強度・静弾性係数



(a) 白色灯下



(b) 紫外線灯下

図-2 ASR 反応性の診断結果

2. 輪荷重走行試験による水平ひび割れ等の再現

2.1 実験概要

2.1.1 床版供試体

実橋で確認された道路橋 RC 床版の水平ひび割れ等を実験室内で再現するため、床版供試体を用いた輪荷重走行試験を行った。

床版供試体は、平面寸法が3000×2000mm、厚さが160mmであり、昭和39年の道路橋示方書に準拠して設計されている。

2.1.2 輪荷重走行試験

載荷荷重は110kNで一定とした。輪荷重走行試験は引張側コンクリートを無視したたわみ設計値に達した時点で終了した。そのため、床版供試体は破壊には至っていない。試験終了時のひび割れ状況を図-3に示す。

2.1.3 ひび割れ調査

図-3に示す位置からφ100mmのコアを採取し、蛍光エポキシ樹脂を含浸させた後、マイクロスコープを用いて微細ひび割れのレベルまで観察を行った。

2.2 実験結果

図-4に示すように、E2、E3、E4、E5に水平ひび割れ等が生じている。なお、これらのコアは図-3に示すように走行範囲内のコアであり、走行範囲外のE1には水平ひび割れ等は生じていない。

ひび割れ本数については、E2とE5は概ね1本の水平ひび割れしか生じていない。一方、E3とE4は複数本の水平ひび割れ等が生じており、縦方向のひび割れとつながっている水平ひび割れ等もある。

ひび割れ発生位置については、E2とE5の水平ひび割れは上側主鉄筋から上方に離れた位置にある。一方、E3とE4については、複数の水平ひび割れ等のうち上側の水平ひび割れは、概ねE2やE5と同様の位置にあり、下側の水平ひび割れは、概ね主鉄筋の上縁位置付近にある。

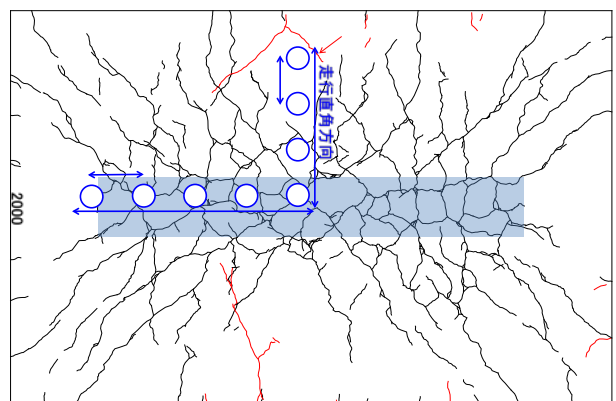


図-3 輪荷重走行試験終了時のひび割れ状況

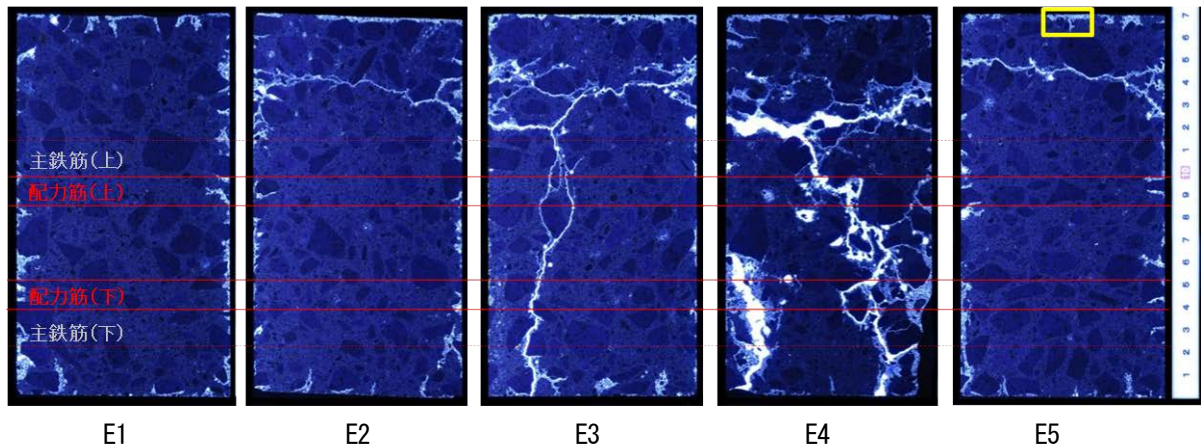


図-4 走行方向のコア断面

3. 水平ひび割れ等によるRC部材の性能低下に関する試験

3.1 試験概要

凍害あるいはASRに起因する床版の層状ひび割れに関しては、耐荷性・耐久性への影響が明らかになっていない。本項目では、水平ひび割れ等によるRC部材の性能低下を把握するために、性状が異なる水平ひび割れ等をあらかじめ導入したRC梁7体の載荷試験を実施した(表-1)。

3.2 試験方法

試験には図-5に示す曲げ破壊型の梁試験体を使用した。劣化試験体では、静的破砕剤をコンクリートに散布あるいは添加することで水平ひび割れ等を導入した。試験体表面のひび割れ幅は0.2~0.5mmに分布する傾向であった。また、この時点での透過法によるコンクリートの超音波伝播速度の測定結果を表-2に示す。本測定では水平方向ひび割れの影響を考慮するため、梁の高さ方向を透過方向にした。

3.3 試験結果

表-1 試験体一覧

試験体	ひび割れ性状		
	形態	上面からの位置 (mm)	イメージ図
N (基準)	なし	—	—
L/50	局所的	50	
L/150		150	
L/50+150		50, 150	
D/50	分散	0~50	
D/100		0~100	
D/200		0~200	

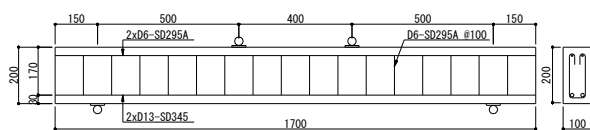


図-5 試験体

図-6に、各試験体の荷重と試験体中央の鉛直変位の関係を示す。いずれの試験体も鉄筋降伏後に等曲げ区間で上縁コンクリートの圧壊が生じて荷重低下に至った。

表-2 超音波伝播速度 (m/sec)

N	L/50	L/150	L/50+150	D/50	D/100	D/200
3,520	3,177	3,217	2,735	2,182	2,429	1,903

※ひび割れ導入部での平均値を記載

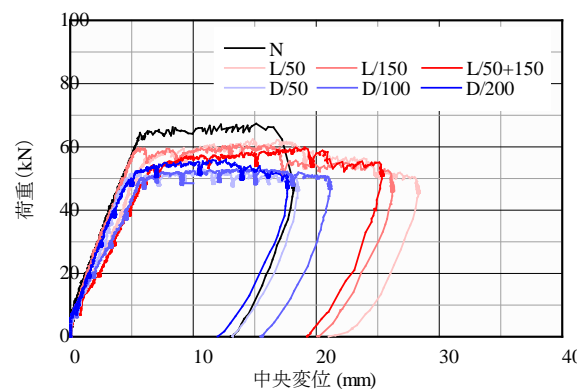


図-6 荷重と試験体中央変位の関係

表-3 劣化試験体の耐荷性能

試験体	荷重比		降伏時剛性比
	降伏荷重比	最大荷重比	
L/50	0.88	0.93	0.73
L/150	0.93	0.90	0.90
L/50+150	0.84	0.89	0.64
D/50	0.80	0.78	0.85
D/100	0.78	0.79	0.68
D/200	0.81	0.83	0.76

※数値はいずれも基準供試体との比

表-3は、各試験体の降伏荷重、最大荷重、降伏時剛性を基準試験体との比により整理した結果であり、劣化試験体において降伏荷重が78～93%まで、曲げ剛性が64～90%まで低下した。これは、水平ひび割れ等による応力伝達機構の低下や劣化部コンクリートの静弾性係数の低下による中立軸位置の上昇に起因するものである。

図-7に、試験終了時におけるひび割れ状況の一例を示す。L/50+150においては、基準試験体と比較して曲げひび割れの発生範囲が小さく、上方への進展が等曲げ区間に限られる。

また、せん断区間では水平ひび割れ等の位置において曲げせん断ひび割れが不連続に進展する性状が見られた。D/100においては、L/50+150と同様に下縁におけるひび割れ範囲の減少および曲げひび割れ進展の局所化が見られ、さらに、劣化部では先行して導入したひび割れを起点としてひび割れが進展する傾向があった。

4. まとめ

以上の多角的な調査、実験により得た現時点における成果を以下に示す。

- 1) 道路橋床版の劣化度調査の結果において、床版が凍害とASRによる複合劣化を受けていると判断されたが劣化の支配的要因を特定するには至らなかった。
- 2) 実橋で確認された道路橋 RC 床版の水平ひび割れ等を、輪荷重載荷試験により実験室内で再現することができた。また床版供試体の位置により、水平ひび割れ等の発生深さが異なることが観察され、その発生深さが応力状態により変化する可能性を示唆する結果となった。
- 3) 水平ひび割れ等による RC 部材の性能低下に関する試験結果から、水平ひび割れ等により RC 部材の曲げ耐荷性能が低下することを確認した。

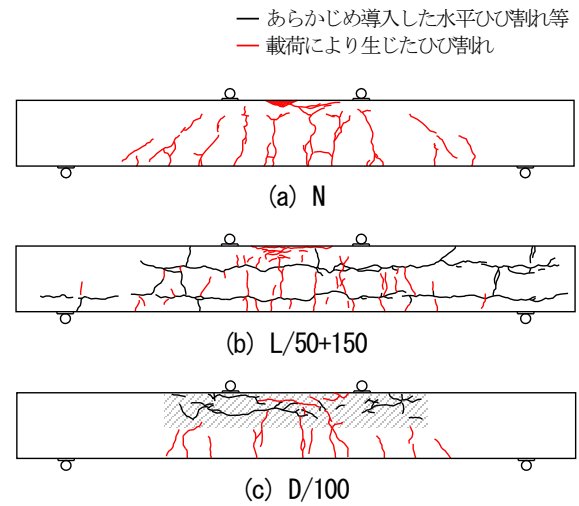


図-7 ひび割れ状況の例

今後は、1)、2)については、凍害およびASRの影響度を明確にするため調査を継続するとともに、撤去部材を使用した載荷試験により、複合劣化を受けたRC床版の構造性能評価を行う予定である。

また3)については、実際の構造物においては、橋梁毎に劣化深さや水平ひび割れ等の密度など劣化状況が異なることから、劣化状況の違いによる部材性能低下への影響を把握するための追加試験を実施する。また、床版を対象とした試験による耐久性の評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 参納千夏男、丸山達也、山戸博晃、鳥居和之：ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.973-978、2013.
- 2) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書、2013.

8.1 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

8.1.3 構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究（河川構造物）

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒地河川）、寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

担当研究者：矢部浩規、前田俊一、島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、内藤 勲

【要旨】

各種河川構造物の劣化の最適な点検・診断技術、評価手法の構築について、近年、河川構造物の点検要領が新たに整備されたが、凍害との複合劣化等に対する評価方法は未だ確立されていないことから、これらの劣化機構等を解明して最適な点検・評価方法等を構築する必要がある。新たな点検要領で点検が実施された国土交通省北海道開発局の全樋門の平成28年度の点検データから、樋門コンクリートの劣化・損傷の発生状況、損傷項目と評価区分等を整理・分析し、損傷や劣化原因の評価に地域差がある等の課題が抽出され、今後の研究を進めるための基礎資料が得られた。

キーワード：凍害・複合劣化、樋門、特殊堤、河氷の衝突・摩耗、点検・診断・評価

1. 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

1.1 各種河川構造物の劣化の最適な点検・診断技術、評価手法の構築

近年、河川構造物の老朽化対策・長寿命化施策が推進され、国土交通省において、平成24年度に「樋門等構造物周辺堤防詳細点検要領¹⁾」の改定、平成27年度に「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領²⁾」の改定、さらに平成28年度には「堤防等河川管理施設の点検結果評価要領³⁾」が策定されるなど、河川構造物の点検・診断・評価は整理されてきている。しかしながら、主に凍害による劣化・損傷を受ける積雪寒冷地の河川構造物は、樋門、水門、コンクリート製の特殊堤等の各種構造物のそれぞれの部位によって劣化形態は異なり、特に河氷等の衝突や摩擦が作用する部位では凍害との複合劣化が生じているが、このような複合劣化の詳細なメカニズム等は未だ解明されていないことから、このような複合劣化に対する詳細な点検・診断技術や評価手法の確立が喫緊の課題となっている。

本研究初年度である平成28年度は、既存の点検データにおける点検・評価等の課題の抽出と、河氷の衝突や摩擦が作用する部位と凍害との複合劣化に対する予備検討を実施した。

まず、点検・評価等の課題抽出については、国土交通省北海道開発局の直轄河川において、新たに整理された点検要領で点検が実施された平成28年度の全河川にお

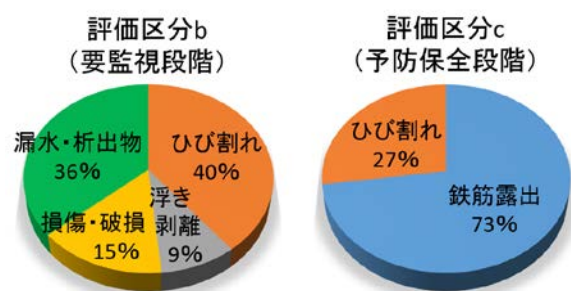


図-1 同一河川の評価区分bおよびcにおける損傷項目とその発生割合の例

ける樋門の点検データの分析・整理を行った。樋門の各評価区分における損傷項目の発生割合を河川毎に求めて、樋門コンクリートの劣化・損傷がどのような状態で発生しているか、および各河川において各評価区分の損傷項目や点検・評価内容に相違があるか等を分析した。

例えば図-1では、同一河川の全樋門において、要監視段階である評価区分bと予防保全段階である評価区分cそれぞれの損傷項目とその発生割合は大きく異なっているが、「ひび割れ」の損傷項目は両方の評価区分に存在している。この「ひび割れ」は、ひび割れの程度や進行状態、構造的な重要度等によってランク分けされているが、劣化原因による判定は明確には表現されていない。劣化原因や構造的な重要度は樋門の耐久性に大きく影響してくることから、定期点検においても明確な判定基準等が必要であると考えられる。今回、これらの点検データを個々に分析・整理したことで、点検・診断・評価における課

題等が明らかになってきた。今後、次年度の点検データも分析・整理し、劣化原因や劣化進行に関してマルコフ連鎖モデル等による解析を行い、点検・診断・評価の最適な方法を検討していく予定である。また、樋門コンクリートが凍害劣化によって脆弱化した状態における耐震設計照査分析を次年度以降に実施し、構造的な重要度の診断・評価および改善策を検討する予定である。

さらに、河氷の衝突・摩耗と凍害との複合劣化箇所における点検・診断技術、評価手法の検討、および最適な補修方法等を検討するため、河氷や流水が流れるオホーツク地域にある特殊堤（護岸の機能も備えたコンクリート矢板構造の堤防）において、劣化状況や河氷等が衝突する状態を把握する現地調査を実施している。現地調査の詳細については、8.2.3 に後述するが、次年度以降も同一箇所での現地調査を継続し、このような複合劣化における最適な点検・診断技術、評価手法を検討・構築する予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 治水課：樋門等構造物周辺堤防詳細点検要領、2012.5
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領、2016.3
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：堤防等河川管理施設点検結果評価要領、2017.3

8.1 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

8.1.4 構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究（沿岸構造物）

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒冷沿岸域）

研究担当者：中嶋雄一、増田亨、木岡信治、本間大輔

【要旨】

沿岸構造物の老朽化特性の評価手法を提案するため、氷海域特有の外的環境、とりわけ低温環境や海水の作用によるコンクリートの劣化損傷機構に着目した文献等を調査し、海水はコンクリートを摩耗すること、今後精力的に実施すべき研究課題の一つは、海水による摩耗と凍結融解との複合劣化であること、等を明らかにした。さらに、北海道の港湾・漁港構造物を対象に行った劣化状況に関する大量の調査データの収集整理を行い、今後、詳細な氷海域特有の劣化機構の解明に向けた手がかりを得た。

キーワード：海水、摩耗、暴露試験

1. 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

1.1 沿岸構造物の老朽化特性の評価手法の提案

沿岸構造物は、気象作用、化学的・物理的作用によって複合的な劣化損傷を受ける。特に寒冷地の沿岸構造物は、凍害、海水等の衝突や摩擦作用が加わり、過酷な環境に曝されるが、その複合的な劣化メカニズムは、未だに解明されていない。本節では、文献等から劣化損傷特性を整理しつつ、大量の現地調査データを収集整理すると共に、今後の課題等を明らかにした。

まず、資料や文献等により、積雪寒冷地における沿岸域コンクリート構造物の一般的な劣化要因やその発生環境・位置条件等を整理した（表-1）。さらに、氷海域特有の外的環境、とりわけ低温環境や海水の作用によるコンクリートの劣化損傷機構に着目した最新の研究成果を含む国外文献^(例えば1)~3)やISO等を調査および精査し、研究の

現状、複合劣化要因・メカニズム、劣化進行（摩耗量）の推定方法などを整理した。殆どの文献が海水はコンクリートを摩耗すると結論付けているほか、海水と凍結融解との複合劣化が重要であると推察する文献も複数見られたが、具体的な試験研究は実施されていないことが判明し、今後精力的に実施すべき研究課題として、海水による摩耗と凍結融解との複合劣化を抽出した。

加えて、北海道の港湾・漁港構造物を対象に行った劣化状況に関する大量の調査データの収集整理を行い、今後、詳細な氷海域特有の劣化機構の解明に向けた手がかりを得た。

参考文献

- 1) S. Houvinen et al., The abrasion of concrete in arctic offshore structures, Proc. of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic

表-1 積雪寒冷地における沿岸構造物の劣化現象の要因と劣化に影響を与える位置条件

劣化現象名	劣化要因	劣化原因（形態）	劣化が起きる位置・環境条件		
			海域	鉛直方向	その他
凍害	凍結融解を伴う気象	水の氷結による膨張に伴う水圧または浸透圧による膨張・収縮	全海域	海上大気中 ～干満帯	—
	コンクリート中の水分及び塩化物	塩化物は凍害を早く進行させる触媒的な役割			
塩害 中性化	塩化物イオン、酸素、水（鉄筋の腐食）と二酸化炭素（中性化）	鉄筋の腐食による膨張とひび割れ	全海域	飛沫帯～海水中	—
摩 耗	波浪 砂、波浪	エロージョン	—	—	砂浜海岸の汀線付近
	水流 砂、水流	エロージョン	—		
	海氷 海氷、海氷中の砂	水流・波浪・潮汐による摩擦・衝突	氷海域	干満帯～海水中	—

Engineering (OMAE), Vol.3, pp.233-240, 1988.

- 2) J.E. Janson, Long term resistance of concrete offshore structures in ice environment, Proc. of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol.3, pp.225-231, 1988.
- 3) Y. Itoh et al., Estimation method for abrasion of concrete structures due to sea ice movement, Proc. of 4th International Offshore and Polar Engineering, Vol.2, pp.545-552, 1994.

8.1 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

8.1.5 凍上・凍結融解を受ける舗装や切土のり面の耐久性向上技術に関する研究(舗装)

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）

研究担当者：木村孝司、丸山記美雄、安倍隆二、
星卓見、上野千草、田中俊輔

【要旨】

本研究は、凍上・凍結融解等を受ける舗装の効率的点検・診断・評価技術を開発・導入することを目的としている。平成 28 年度は、融雪水が舗装損傷に及ぼす影響の点検評価技術の開発を行った。その結果、電気抵抗によって路盤や路床の凍結融解状態や含水状態を把握する手法の有効性を確認した。蛍光エポキシ樹脂含浸法によって、融雪水および凍結融解作用がアスファルト混合物の空隙等の増加などの影響を及ぼすことを視覚化できることを確認した。

キーワード：融雪水、凍結融解、電気抵抗、含水、蛍光エポキシ樹脂含浸

1. はじめに

積雪寒冷環境下においては、凍上・凍結融解等の要因に加え、交通繰返し荷重による疲労や摩耗が複合的に作用した舗装損傷の被害が顕在化している。そこで、本研究は、凍上・凍結融解等を受ける舗装の効率的点検・診断・評価技術を開発・導入することを目的としている。平成 28 年度は、融雪水が舗装損傷に及ぼす影響の点検評価技術の開発を行った。

2. 融雪水が舗装損傷に及ぼす影響の点検評価技術の開発

2.1 路盤や路床の凍結融解状態や含水状態を把握する手法の検討

2.1.1 計測の原理と特徴

凍結した土は、凍結していない土に比べて電気抵抗等が大きく変化することが知られている¹⁾³⁾。この原理を利用して、舗装体内部に埋設した電極間の電気抵抗を計測し、路床土および路盤材の凍結・融解状況を把握しようというものである。図-1 に示すように、電極を 5cm 等間隔で多点的に配置した棒状のセンサ(以下、凍結融解深度計)を試作した。電極に電導性銅箔テープを用い、硬質ポリ塩化ビニル管(以下、VP 管)に等間隔で巻き付け、VP 管の側面に孔を開け、管の内側からリード線を接続している。隣り合う電極間に繋がるリード線の先端に、LCR メータを接続し、周波数 100Hz の交流のときのインピーダンス(以下、電気抵抗値)を計測する。電気抵抗値の計測には本検討ではハンディタイプの LCR

メータ(GW Instek 製 LCR-916)を使用した。ちなみに、交流での計測が可能な自記記録装置を接続すれば、任意の深さの凍結融解状態をリアルタイムで、任意の時間間隔で計測できる。土中に埋設する際は、凍結融解深度計を鉛直方向に立てて、深さ方向に電極が並ぶ形となり、5cm 程度の等間隔で舗装体内部深さごとの凍結および融解状態を判別できるよう意図している。従来の凍結融解判定手法であるメチレンブルー凍結深度計、地中温度測定、開削、水分計による方法などと比べて、非破壊、深度方向の連続した計測可能、計測の自動化、といった利点があると考えられる。

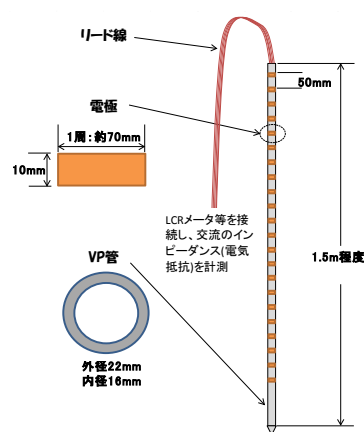


図-1 凍結融解深度計の概要

2.1.2 試験方法

作製した凍結融解深度計によって凍結融解状態の把握が可能かを確認するため、凍結融解確認試験、含水比測定試験の2種類の評価試験を実施した。

試験試料は、当研究所所有の苫小牧寒地試験道路より採取した路盤材（切込砕石 40mm 級）および路床土（レキ質土）の計2種類を用いた。試験試料は図-2に示すように木箱に納め、この中に凍結融解深度計を埋設した。

凍結融解確認試験は、事前に試験試料の含水比を、路盤材は約5%、路床土は約5%および約20%となるよう調整してある。試験試料を凍結させるため、凍結融解深度計を埋設した木箱を-20℃の低温室にて養生して凍結させ、電気抵抗を計測した。その後、木箱を常温の部屋に移し6時間養生して融解させ電気抵抗を計測した。なお、試料の乾燥を防ぎ、かつ試料の凍結状態を目視で観察できるように、試料上面を透明のアクリル板で覆った。

含水比測定試験は、前述の試験で用いた路床土と路盤材を用い、試料をバットに薄く敷均し、100℃の高温乾燥炉にて12時間養生して絶乾状態とし、常温に冷却する。その後、所定の含水比となるようメスシリンダーを用いて計測した適量の水を十分に試料と混合し、試料の中に凍結融解深度計を埋設し、電気抵抗を計測した。以上の手順を含水比条件分繰り返した。

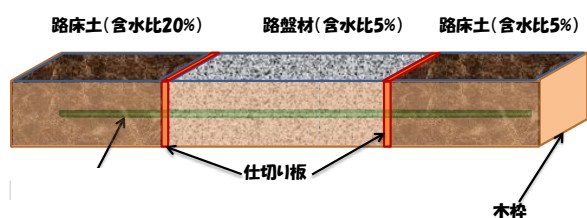


図-2 試験試料および凍結融解深度計の埋設状況

2.1.3 試験結果

(1) 凍結融解確認試験結果

凍結前（常温）、凍結後（-20℃）および常温養生6時間後に、LCRメータを用いて隣り合う電極間の電気抵抗を計測した結果を表-1に示す。

路盤材含水比約5%および路床土含水比約20%の条件では、凍結前と比較して凍結後は電気抵抗値が一桁上昇し、その差が顕著であり、凍結の判断が可能な状況であった。これは、凍結前に存在した水が、凍結後には氷となり、電気抵抗が上昇したためと考えられる。一方、路床土含水比約5%の条件では、電気抵抗の差はほとんど見られず、凍結を判定することは困難な状況であった。こ

の要因として、凍結前の段階で水がほぼ土粒子内に吸着されており、土粒子の表面が乾燥状態に近く、凍結前から電気抵抗が高い状態であったことから、凍結前後に差が現れなかったと推察される。

また、凍結後に常温で6時間養生し融解させた後の電気抵抗値を表-1右列に示す。路盤材では、電気抵抗値が一桁低下し、ほぼ凍結前の電気抵抗に戻っていることが確認できる。これは、凍結していた路盤材が融解したためと考えられる。一方、路床土では、電気抵抗値に大きな変化が見られなかった。この要因として、路床土含水比約20%の条件では、路床土融解が内部まで進んでおらず凍結状態のままであったためと推測され、路床土含水比約5%の条件では、常温養生6時間後も土粒子の表面が乾燥状態に近かったためと推測している。

以上より、今回作製した凍結融解深度計では、ある程度の含水比を有し湿潤状態にある材料であれば、凍結融解を判別できる可能性が示された。ただし、材料の含水比が低く乾燥に近い場合には凍結融解状態の判別が困難であるなど、材料の種類・含水比が、凍結、融解の判定に大きく影響することも分かった。実際の舗装内に埋設する際には、事前に材料を採取してキャリブレーションを行い、凍結融解を判定するための基礎データをあらかじめ取得しておく必要があると考えられる。

表-1 計測結果

試料名	含水比	電気抵抗値 (kΩ)		
		凍結前(常温)	凍結後(-20℃)	常温養生6h後
路盤材	5%	1.46×10^2	1.06×10^3	1.55×10^2
路床土	5%	5.85×10^2	5.42×10^2	8.98×10^2
	20%	7.60×10^1	6.01×10^2	6.07×10^2

(2) 含水比測定結果

試験結果を図-3,4に示す。なお、路盤材については含水比が10%を超えると試料と水が分離してしまったため、含水比を10%までとし、測定間隔は2%刻みとした。路床土においては、含水比を5%刻みで45%まで計測を行った。

凍結融解深度計で計測した電気抵抗値は、路盤材、路床材ともに含水比に指数比例する結果となった。決定係数も各々0.89と0.95であり指数関数で精度よく近似できている。凍結融解深度計を用いることで、含水率もある程度計測可能であり、含水率の傾向を把握することができる可能性を見いだした。

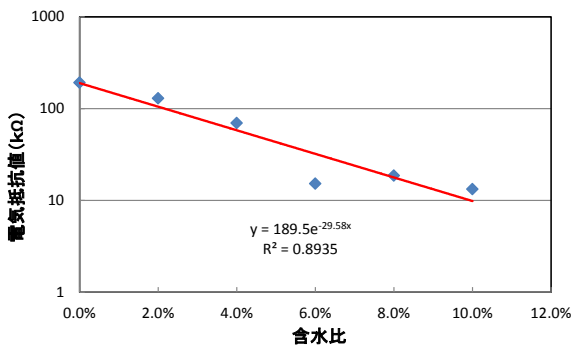


図3 凍結融解深度計による電気抵抗値と含水比(路盤材)

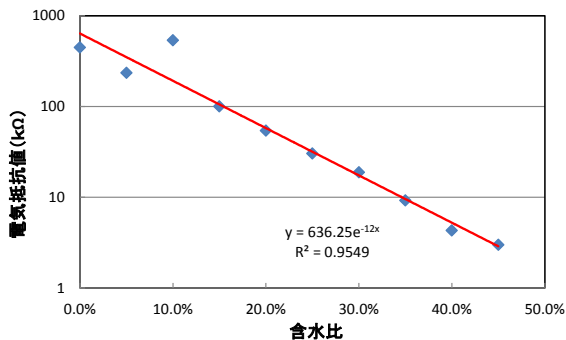


図4 凍結融解深度計による電気抵抗値と含水比(路床土)

2.1.4 まとめ

(1) 舗装体内部の電気抵抗を計測する原理を有する凍結融解深度計により、路盤材および路床材の凍結融解状態を判定することが可能と考えられる。ただし、電気抵抗値は材料の種類や含水状態に影響され、含水比が一定程度ある場合には凍結融解状態を判別することが可能である一方、材料の含水比が低く乾燥状態である場合には凍結融解の判別が難しい面があることも分かった。

(2) 凍結融解深度計を用いて計測した電気抵抗値は含水比に指数比例する傾向を示すことから、含水状態を把握することが可能であると考えられる。

2.2 融雪水が舗装混合物に与える影響の評価手法

積雪寒冷地においては、舗装混合物は融雪水および凍結融作用によって、空隙率が大きくなる、チェーン等の打撃による摩擦抵抗性が低くなる、など物理性状面での変化が起こることが知られている⁴⁾。しかし、混合物内部に実際にどのような空隙が発生しているのか、また、どの様に拡大進行していくのかなどの微視的な現象面での理解が十分に得られているとは言えない。そこで、コンクリートの微細ひび割れを観察する手法として用いられている蛍光エポキシ樹脂含浸法をアスファルト混合物

に適用し、凍結融解に伴う混合物内部の変化を評価する新たな手法について検討を行った。

2.2.1 検討の方法

(1) 蛍光エポキシ樹脂含浸法

検討を行った蛍光エポキシ樹脂含浸法とは、手順を図-5に示すとおり、超低粘度の蛍光エポキシ樹脂中に供試体を浸漬し、減圧脱泡装置にかけて減圧環境下で空隙や微細ひび割れ内部の気体を脱泡除去しながら蛍光樹脂を浸透・硬化させ、その後コンクリートカッタで供試体を切断して観察断面を露出させ、その観察断面に紫外線を照射することで内部のひび割れ等の発生状況等をカメラ撮影、記録、観察する手法である。コンクリートに対して開発された手法であり、コンクリート内部の微細なひび割れ、多孔質化、凍害による変化の詳細が観察できることが報告されている^{5),6),7)}。本検討では、アスファルト混合物が凍結融解作用を受けた結果、内部にどのような変状が発生しているのかを観察するために蛍光エポキシ樹脂含浸法の適用を試みた。アスファルト混合物への先行適用事例はなく、エポキシ樹脂の硬化反応に伴って発生する熱によってひび割れや空隙の閉塞や自癒等が引き起こされることが懸念されたため、減圧脱泡装置内に0℃程度の氷水を張り減圧脱泡を行い、脱泡後は氷水を張った断熱容器内で2~3日低温養生して発熱を抑制し、樹脂の硬化時間を長くとりよう配慮した。減圧時の気圧は260mmHg(0.34気圧)とした。

(2) 試験用供試体および凍結融解作用の付与

試験に用いた混合物の配合は、密粒度アスファルト混合物13Fで、針入度が80-100のストアスを使用、設計アス量5.4%、空隙率3.7%、F/A=1.7である。φ10cm、高さ6.35cmの円柱状供試体を6個作成し、そのうち3個に凍結融解作用を500サイクル与え(所要時間約3ヶ月)、残り3個を凍結融解サイクル500回に要する期間と同等の約3ヶ月間水浸状態に置いた。凍結融解を与える際は、円柱状供試体を写真-1に示すように一個ずつ個別容器に入れて容器内部を水で満たし、凍結融解装置のブライン(不凍液)に浸けて凍結融解作用を与えた。凍結行程は+4.5℃→-18℃で約2時間、融解行程が-18℃→+4.5℃で約1時間の計約3~4時間を1サイクルとして500サイクル繰返した。500サイクルに達した後の凍結融解後供試体2個および水浸供試体2個を、ひび割れや空隙内の水分を除去するために20℃程度の常温で2週間以上乾燥させ、図-5に示す手順の蛍光エポキシ樹脂含浸法

に供した。

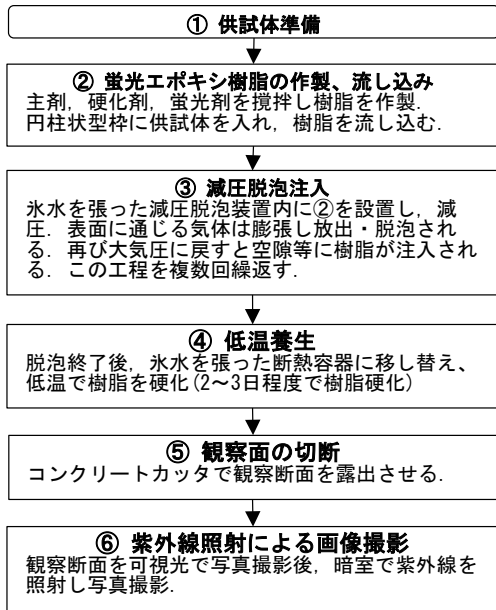


図-5 蛍光エポキシ樹脂含浸法の手順



写真-1 円柱状供試体の凍結融解状況
(注：他目的の供試体を含む)

2.2.2 検討結果

(1) 空隙率の増加結果

水浸環境においた供試体と凍結融解環境においた供試体の空隙率測定結果を表-2に示す。水浸環境においた供試体の空隙率が3.9%であるのに比べて、凍結融解作用を500サイクル受けた後では、空隙率が9.0%に増加していることが分かる。

表-2 空隙率測定結果

水浸約3ヶ月後	500サイクル後 (約3ヶ月)
3.9%	9.0%

(2) 蛍光エポキシ樹脂含浸法の結果

水浸後と凍結融解サイクル500回後の供試体に蛍光エ

ポキシ樹脂含浸法を施した切断面の撮影結果の一例を写真-2、写真-3に示す。青白い部分が蛍光エポキシ樹脂が表面から浸入した部分である。黒く見える部分のうち暗色が濃い部分が粗骨材、暗色が少し薄い部分がアスファルトモルタルである。写真-2に示す水浸後の供試体は、表面から1cm程度以内の空隙にまばらに蛍光エポキシ樹脂が浸入している程度である。一方、写真-3に示す凍結融解作用を500サイクル受けた供試体は、樹脂が浸入して蛍光を発している範囲が広がっており、表面から3cm程度の深さまで樹脂が浸入していることが分かる。拡大部分に着目すると、粗骨材の周囲に蛍光エポキシ樹脂が回っており、粗骨材とアスファルトモルタルの境界面にすき間が発生していたことが鮮明に確認できる。凍結融解作用によって、空隙が増加することは既知事項であるが、その空隙は、アスファルトモルタル内部だけでなく、粗骨材とアスファルトモルタルの境界面に沿って形成されている点が特徴的である。これは、骨材とアスファルトモルタルの付着が損なわれる、いわゆる”はく離”が凍結融解作用によって引き起こされていることを示唆するものと推定されるが今後検証していく必要がある。

2.2.3 まとめ

蛍光エポキシ樹脂含浸法はアスファルト混合物に対しても適用が可能であり、凍結融解作用に伴う空隙の増大など内部状況の変化を視覚的に評価確認できる有用な評価手法と考えられる。なお、本手法は凍結融解に伴う変化の観察に留まらず、微細なひび割れやはく離、層間付着の悪化を確認する場合にも適用可能と推測される。

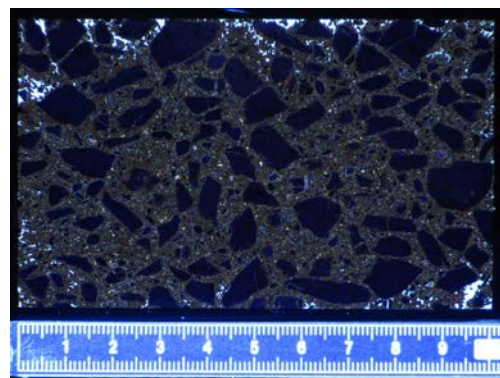


写真-2 水浸後のアスファルト混合物に対する
蛍光エポキシ樹脂含浸試験結果例

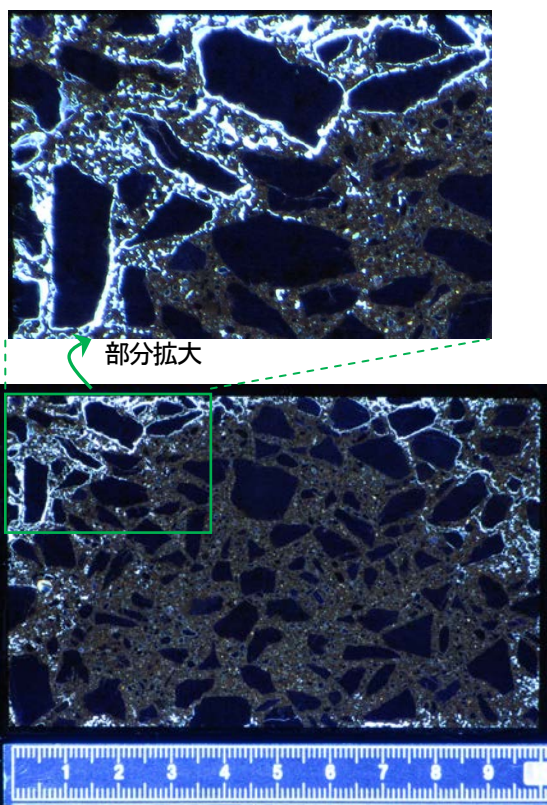


写真-3 凍結融解作用を受けたアスファルト混合物に対する
蛍光エポキシ樹脂含浸試験結果例

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：舗装工学ライブラリー15「積雪寒冷地の舗装に関する諸問題と対策」, pp.32-33, 2016.
- 2) 地盤工学会北海道支部地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学, pp. 21-28, 2009.
- 3) 原田敏一郎, 福田正己, 石崎武志：北海道大学低温科学研究所業績第 3512 号, 凍土の電気比抵抗値の測定, pp.57-67, 1992.
- 4) 丸山記美雄・高橋守人・早坂保則：表層用アスファルト混合物の凍結融解作用に対する抵抗性, 土木学会第 55 回年次学術講演会, V-69, 2002.
- 5) 岩城圭介・加藤享司・平間昭信・塩谷智基：微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集 Vol26, No.1, pp.999-1004, 2004.
- 6) 手塚喜勝・朝倉啓仁・中村眞一・佐々木元茂：蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法, 土木学会北海道支部平成 16 年度論文報告集(第 61 号), V-10, 2008.
- 7) 近藤悦郎・関下裕太・朝倉啓仁・手塚喜勝：蛍光エポキシ樹脂含浸法による微細ひび割れ観察の適用事例, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-367, 2014.

8.1 凍害・複合劣化等の効率的点検・診断・評価手法の構築

8.1.6 凍上・凍結融解を受ける舗装や切土のり面の耐久性向上技術に関する研究(切土のり面)

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地地盤）

研究担当者：林憲裕、佐藤厚子、野上敦、久慈直之

【要旨】

寒冷地域における切土のり面は、凍結および融解作用を繰り返すことにより、のり面の変状事例が多く報告されており、効率的な点検・診断・評価技術の確立が急務である。

平成28年度は、実施工現場における切土のり面安定構造物（地山補強土工）の凍上現象を把握するため、北海道内で地山補強土工の施工予定箇所の現地調査を実施し、試験計測箇所を選定した。また、凍上現象の挙動を検証するため、苫小牧試験施工フィールド内において凍上対策を施した試験施工を実施し計測を開始した。

キーワード：凍上、凍結融解、切土のり面安定構造物、現地確認調査、試験施工

1. はじめに

切土のり面安定構造物の効率的な点検・評価手法の構築を目的とした技術開発に向け、北海道内における切土のり面安定構造物について、現地確認調査、関連資料収集および道路管理者へのヒアリングを実施し、試験計測箇所を選定した。

さらに、凍上および融解作用を受けるのり面の変状メカニズムについて、凍上現象の挙動を検証するため、苫小牧試験施工フィールド内での実験を開始したので報告する。

2. 地山補強土工の試験計測について

2.1 試験計測箇所を選定

試験計測箇所を選定にあたり、その計測箇所における凍上可能性の有無が重要となる。凍上現象は凍上の3要素と呼ばれる「温度」「水分」「土質」の条件が揃うことで発生する¹⁾。つまり、この3要素のうちどれか1つ欠けると凍上は発生しないことになる。また、気象や地形条件により「温度」や「水分」は影響を受け凍上の発生は大きく左右される。特に北海道のような寒冷地では、「積雪」の影響についても考慮する必要がある²⁾ことから、試験計測箇所を選定には十分な検討が必要となる。

これらを踏まえ、冬期間も含めた現地確認調査を実施するとともに、過去の降雪・積雪状況や地形・地質条件について、実際に道路を管理している道路事務所担当者へのヒアリング調査の実施や、切土のり面安定構造物の設計報告書・地質報告書を参考にしながら、試験計測箇所を選定した。

2.2 試験計測箇所

試験計測箇所は「一般国道227号せたな町美谷地区」のグラウンドアンカー施工予定箇所を選定した。試験計測箇所を図-1、現地状況を写真-1にそれぞれ示す。せたな町美谷地区は道路防災事業として、別線にてトンネル工事を実施しトンネル坑口付近の切土のり面においてグラウンドアンカー工を実施中である。試験計測箇所は日本海側沿岸に位置し、海風が強く、土質は風化が進んだ凝灰質砂岩であること、切土のり面背後からの湧水の恐れなど、凍上現象が発生する可能性が考えられたため、試験計測箇所として選定した。

今後、施工に合わせ計測機器を設置し凍上に伴うアンカーへの荷重変化、受圧板やコンクリート法枠の影響、



図-1 試験計測箇所



写真-1 現地状況

切土のり面内の温度や凍結深さを計測する。

3. 苫小牧施工試験フィールド内における試験施工について

3.1 試験施工箇所

試験施工箇所について、施工箇所を図-2、現地状況を写真-2にそれぞれ示す。



図-2 施工箇所



写真-2 施工状況

3.2 試験施工概要

凍上現象の挙動を詳細に把握するため、模型アンカーを苫小牧施工試験フィールド内のコンクリート土槽に設置した。アンカー先端をコンクリート土槽底面に固定し、受圧板と荷重計、変位計、温度センサーおよび凍結深度計を設置した。側面図と計器設置状況を図-3および写真-3にそれぞれ示す。

また、アンカーの施工条件を土質および凍上対策ごとに設定して、それぞれ地中温度、凍結深さ、荷重の変化、受圧板の変位について平成28年12月より計測を開始した。施工条件を表-1、配置平面図および施工条件ごとの状況を図-4と写真-4にそれぞれ示す。今後、計測データの回収および解析を行い、凍上被害の診断・評価技術の開発について検討を進める。

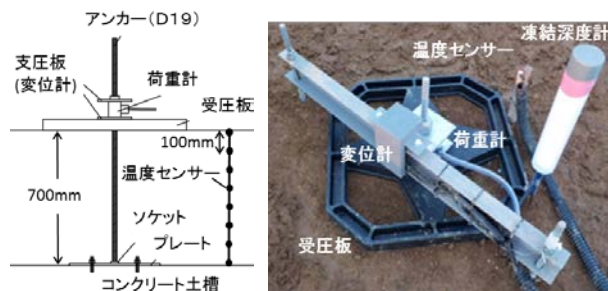


図-3 側面図

写真-3 計器設置状況

表-1 施工条件

設定	土質	凍上対策内容
A	砂利	なし
B	レキ質土	受圧板下断熱材t=50mmを敷設
C	レキ質土	なし
D	レキ質土	断熱材t=50mm内装の箱(900×1200×1000mm)でアンカー全体を覆う

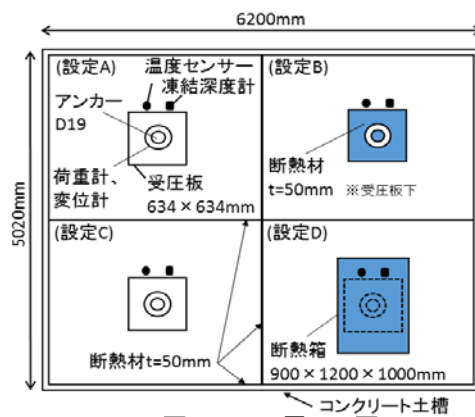


図-4 配置平面図



写真-4 施工条件ごとの状況

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路土工要綱、平成21年6月
- 2) 社団法人 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学-凍上被害とその対策-、平成21年12月

8.2 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

8.2.1 構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究（耐寒促進剤）

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：島多昭典，安中新太郎，菊田悦二，嶋田久俊，
吉田行，野々村佳哲

【要旨】

寒冷環境下における耐寒促進剤の補修への適用技術を開発するため、耐寒促進剤を用いたコンクリートを対象に、養生時に氷点下となる場合の強度増進特性について検討した。その結果、養生温度が氷点下となる場合でも、コンクリート強度の推定が可能なことを確認した。

キーワード：耐寒促進剤，積算温度，強度推定

1. コンクリート

1.1 概要

冬期にコンクリートを施工する場合、コンクリートの強度発現の遅延や凍結による初期凍害の発生を避ける目的で、雪寒仮囲いおよびヒーター等による給熱養生を行うことが一般的であり、通常のコンクリートの養生に比べ、温度管理などに特別な配慮が必要となる。一方、コンクリート用混和剤の一種である耐寒促進剤を用いることで仮囲いや給熱養生を省略し、簡易なシート養生にて施工することが可能になる。

耐寒促進剤の場合、強度管理の方法として、現場養生した供試体による管理と積算温度による推定の2種類の方法が規定されている¹⁾。しかし、規定策定当時の実験結果において、標準養生と現場養生とで積算温度と圧縮強度の関係が一致しなかったため、積算温度によって強度管理を行う場合には、事前検討試験の実施が求められており、積算温度を用いて強度推定する場合の負担が非常に大きくなっている。これは、当時の積算温度式では氷点下の温度域の補正をしていなかったためである。

そこで本研究では、耐寒促進剤を使用したコンクリートを対象として室内試験を行い、氷点下温度を考慮した積算温度式の適用性について確認した。その後、指針策定当時の現場施工実験結果を再評価し、積算温度によ

って耐寒促進剤を使用したコンクリートの強度を推定できることを確認した。

1.2 試験方法

コンクリートの配合を表-1に示す。耐寒促進剤は日平均気温 -10°C まで施工できるという、現在流通している中で最も低い外気温に対応している2製品を使用した。

養生は、 $+5, -5, -10$ の3種類の温度で材齢28日まで封緘養生した。なお、氷点下養生を行う供試体は、国内指針に定める期間に準じて、打設後から24時間経過するまで $+5^{\circ}\text{C}$ の部屋に静置する形で、前養生を行っている。

試験材齢に到達後、JISA1108に準拠して圧縮強度試験を実施した。

1.3 試験結果

積算温度による圧縮強度の推定は、一般に、次式によって計算される²⁾。

$$M = \Sigma(\theta + 10)\Delta t \quad (1)$$

ここで、 M ：積算温度($^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$)、 θ ： Δt 時間中のコンクリート温度($^{\circ}\text{C}$)、 Δt ：時間(日)である。

このとき、式(1)は養生温度 0°C 以上の実験で得られた式であり、養生温度が 0°C 以下の場合には適用できない³⁾。そのため、日本建築学会では、養生時に氷点下となる場合にも適用できる積算温度式として、次式を提案し

表-1 コンクリートの配合

記号	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 ($\text{C} \times \%$)		耐寒剤 ($\text{C} \times \text{リットル}$)		スランプ (cm)	Air (%)
				W	C	S	G	AE 減水剤	AE	耐寒剤 A	耐寒剤 B		
B45-A	高炉	45	42	150	333	781	1072	0.13	0.057	0.04	0	7.1	5.0
B45-B								0.13	0.055	0	0.04	8.0	4.9

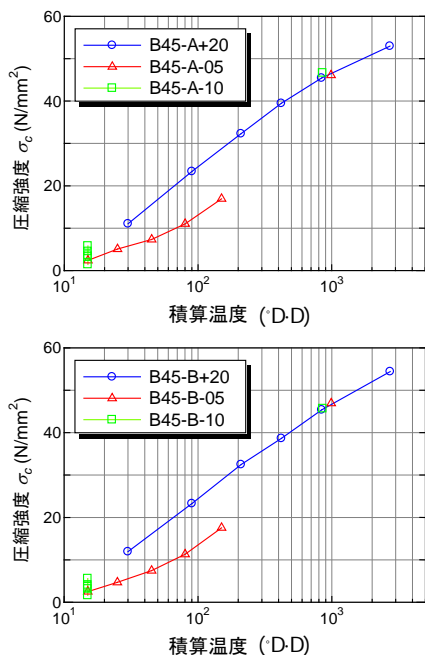


図-1 積算温度－圧縮強度関係（従来式）

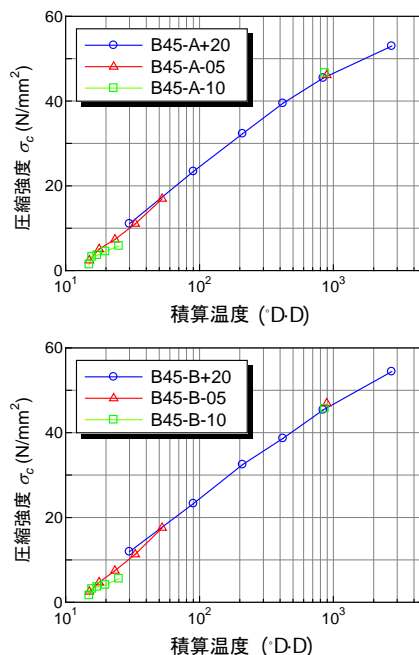


図-2 積算温度－圧縮強度関係（日本建築学会式）

ている⁴⁾。

$$\Delta t \geq 0$$

$$M = \sum (\theta + 10) \Delta t$$

$$\Delta t < 0$$

$$M = \sum 10 \times \exp(-0.60 \times (-\theta)^{0.74}) \Delta t \quad (2)$$

ここで、 M : 積算温度(°D-D), θ : Δt のコンクリート温度(°C), Δt : 温度測定間隔(日)である。

式(1)による積算温度-圧縮強度関係を図-1に、式(2)による積算温度-圧縮強度関係を図-2に示す。図-2を見ると、よい精度で強度推定できている。そのため、耐寒促進剤を用いたコンクリートであっても、式(2)を用いて積算温度を評価することにより、氷点下の積算温度を適切に評価し、圧縮強度の推定ができると考えられる。

1. 4 既往試験の再評価

土木分野で利用されている耐寒剤施工指針¹⁾では、耐寒促進剤を使用した場合の積算温度による強度推定の例として、図-3が示されている。図-3は、平成2年に当研究所で実施した現場施工実験に基づいている。当時は式(2)に示す氷点下の積算温度式が提案される前であったため、積算温度は式(1)によって算定されており、積算温度による強度推定でバラツキが生じている。この結果を受けて、積算温度による強度管理を行う場合には、予想される環境条件を考慮した事前検討試験を行うことが指針に規定されることになった。

そこで当時の施工報告書のデータを用い、氷点下での

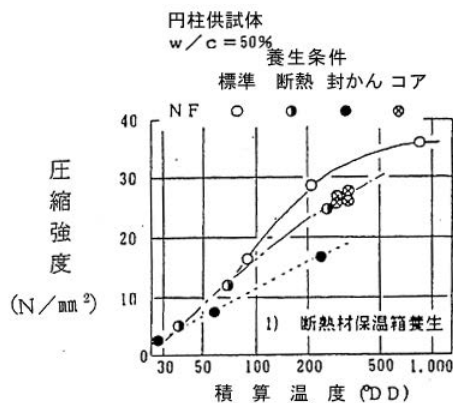


図-3 積算温度と圧縮強度の関係¹⁾

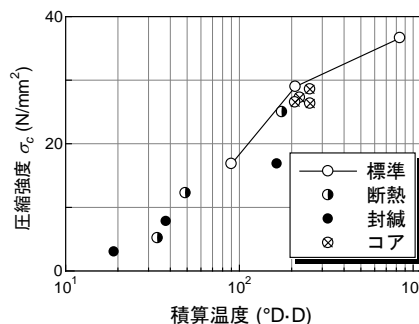


図-4 圧縮強度の再評価結果

積算温度算定式(式(2))によって図-3を再評価した結果を図-4に示す。一部の封緘養生の積算温度がやや大きくなっているものの、各種養生の試験結果は、ほぼ同一線上となっている。したがって、氷点下を含む積算温度算

定式(式(2))を用いることで低温養生の影響を考慮できるため、耐寒剤施工指針で指摘されている「予想される環境条件を考慮した実験」を省略することができると考えられる。

2. まとめ

寒中コンクリートにおける強度管理方法の1つである積算温度について、耐寒促進剤を使用したコンクリートを対象に、室内試験および現場施工実験の結果を用いて検証した結果、以下の知見が得られた。

1. 日本建築学会で提案されている積算温度式を用いることにより、耐寒促進剤を使用したコンクリートについても、養生温度が氷点下となる場合のコンクリート強度を推定することができる。
2. 日本建築学会の積算温度式を用いることにより、耐寒剤施工指針で指摘されている事前確認試験を省略できる可能性がある。

参考文献

- 1) 通年施工推進協議会：耐寒剤を用いる寒中コンクリート施工指針, 1999.
- 2) (公社)土木学会：コンクリート標準示方書[施工編], p.158, 2013.
- 3) (社)日本建築学会：寒中コンクリート施工指針, p.169, 2010.
- 4) (社)日本建築学会：寒中コンクリート施工指針, p.171, 2010.

8.2 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

8.2.2 構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究（橋梁）

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地構造）、寒地保全技術研究グループ（耐寒材料、寒地道路保全）

研究担当者：西弘明、今野久志、佐藤孝司、佐藤京、角間恒、島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、林田宏、木村孝司、丸山記美雄、星卓見

【要旨】

寒冷地の構造物には、厳しい環境作用等によって健全性が著しく低下している事例が多いが、この要因として考えられる凍害・複合劣化（作用）への対策は未整備のため、構造物の安全性確保、性能保持および長寿命化に向けた対策が喫緊の課題である。

橋梁床版に関しては、既設橋梁の両寿命化に向けて、劣化損傷特性を踏まえた、評価手法を構築し、対策（補修・補強・舗装等）技術を開発することを目的としている。

本検討では、床版において層状に発生・進行したひび割れを補修する方法としてひび割れ注入工法に着目し、複合劣化した床版の補修方法としての適用性を検討するための施工試験を実施した。また、舗装技術については、降雨や融雪水等の水分が床版へ浸入する経路となる舗装端部の止水技術に着目し、実態の把握と課題の抽出を行った。

キーワード：RC 床版、目地、止水

1. はじめに

寒冷地の構造物には、厳しい環境作用等によって健全性が著しく低下している事例が多いが、この要因として考えられる凍害・複合劣化（作用）への対策は未整備のため、構造物の安全性確保、性能保持および長寿命化に向けた対策が喫緊の課題である。

橋梁床版に関しては、既設橋梁の長寿命化に向けて、劣化損傷特性を踏まえた、評価手法を構築し、対策（補修・補強・舗装等）技術を開発することを目的としている。

本研究のうち、床版に関しては、床版において層状に発生・進行したひび割れを補修する方法としてひび割れ注入工法に着目し、複合劣化した床版の補修方法としての適用性を検討するための施工試験を実施した。

舗装技術に関しては、降雨や融雪水等の水分が床版へ浸入する経路となる舗装端部の止水技術に着目し、実態の把握と課題の抽出を行った。

2. 複合劣化した RC 床版に対するひび割れ注入工法の適用性検討（寒地構造）

2.1 概要

RC 床版の劣化形態は多岐にわたるが、材料劣化に

起因するものの多くは劣化が床版内部で発生・進行し、特に凍害や ASR に関して言えば、水平ひび割れが層状に発生・進行する特徴がある。本検討では、床版において層状に発生・進行したひび割れを補修する方法としてひび割れ注入工法に着目し、複合劣化した床版の補修方法としての適用性を検討するための施工試験を実施した。

2.2 試験体

施工試験には図-1 に示す、幅 100mm、高さ 200mm、長さ 2000mm の RC 梁試験体を使用した。試験体中央の 800mm の範囲には凍害あるいは ASR を想定した複数の水平ひび割れを導入する劣化部を設け、劣化深さを上面から 50、100、200mm とした。この水平ひび割れは、劣化部分に打設するコンクリートの練り混ぜ時に静的破砕剤を添加し、練り混ぜ水との反応による膨張圧を利用して導入したものである。試験直

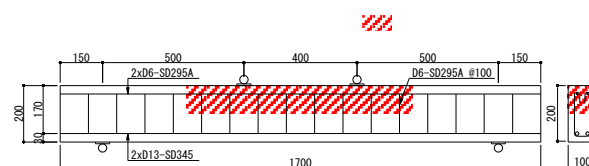


図-1 試験体

前に測定した表面のひび割れは、幅 0.2~0.5mm に分布する傾向であった。

2.3 ひび割れ注入の方法

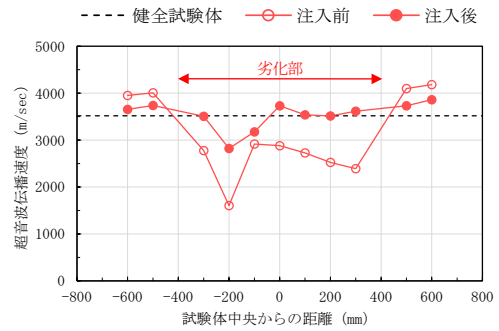
上記方法により水平ひび割れを導入した試験体に対してひび割れ注入を行い、注入材の充填状況の確認を行った。本試験における注入材には、JIS A 6024 および国土交通省土木補修用エポキシ樹脂注入材 1 種に適合する低粘度形エポキシ樹脂を使用し、試験体上面から樹脂注入孔を削孔し、孔内の清掃を行った後、スプリングバネ式の注入器具を使用して低圧低速で試験体内に注入した。注入孔の設置間隔は 200mm、孔深さは 170mm とし、試験体上面から垂直に削孔した。なお、試験体側面には注入材の漏れ出しを防ぐためにアクリル板を設置したが、上面および下面にシール材塗布等の処理は行っていない。注入開始後には試験体を屋内で 1 週間養生し、注入器具を撤去した。

2.4 超音波伝播速度の測定

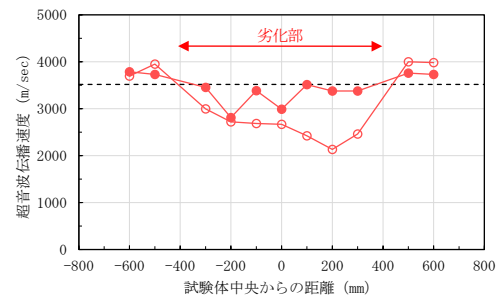
注入材の充填性は、ひび割れ注入の前後で測定した超音波伝播速度により評価する。超音波伝播速度の測定は透過法により実施し、梁高さ方向に透過させる場合と梁幅方向に透過させる場合について実施した。前者は水平ひび割れに対する充填性を、後者は深さ方向への充填性を調査する目的がある。

図-2 には、梁高さ方向に透過した場合の測定結果を示す。図中の破線は劣化部を有さない健全試験体で測定した超音波伝播速度の平均値であり、劣化深さ 50 および 100mm においては試験体全体で概ね健全試験体と同等まで超音波伝播速度が改善されている。一方で、劣化深さ 200mm においては試験体内で注入材の充填性にばらつきが見られ、試験体中央から

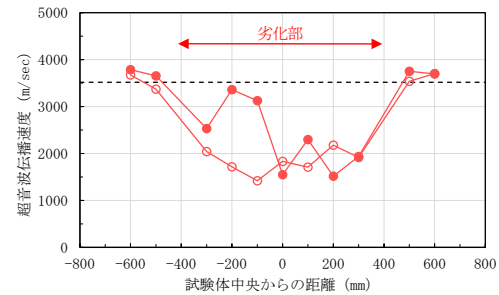
+300mm の範囲では超音波伝播速度の改善がほとんど見られていない。これには試験体毎のひび割れ性状のばらつきが影響していると考えられ、ひび割れ



(a) 劣化深さ 50mm

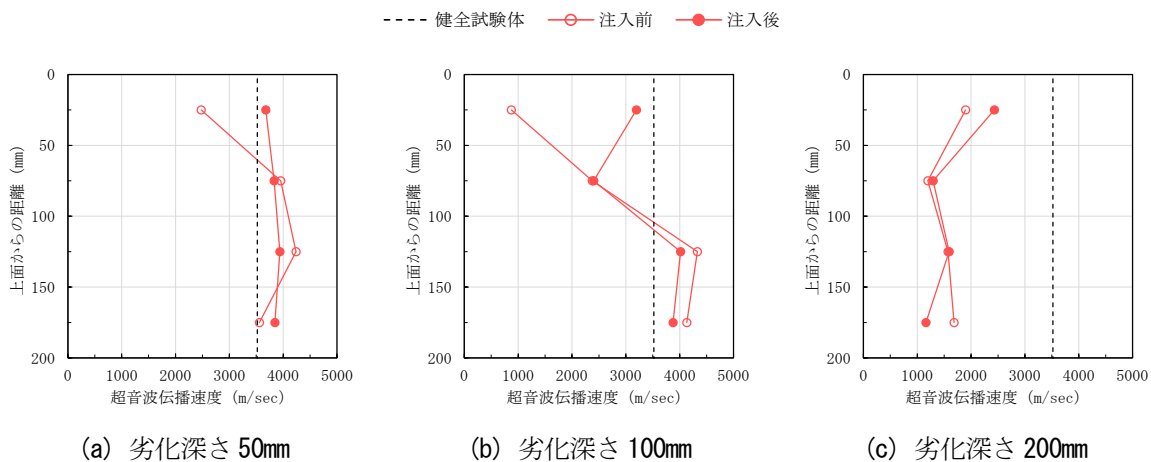


(b) 劣化深さ 100mm



(c) 劣化深さ 200mm

図-2 超音波伝播速度（梁高さ方向に透過）



(a) 劣化深さ 50mm

(b) 劣化深さ 100mm

(c) 劣化深さ 200mm

図-3 超音波伝播速度（梁幅方向に透過）

幅が小さいまたは閉塞していること、ひび割れが内部で不連続となっていることなどの複数の要因によって充填性が低下したと推察される。

図-3 に梁幅方向に透過した場合の測定結果の例として、試験体中央における測定結果を示す。いずれの試験体も注入前には劣化部の超音波伝播速度が1600~2200m/sec程度であったが、劣化深さ50mmにおいては、劣化部において超音波伝播速度が3700m/secまで増加しており、注入材が十分に充填されたことがわかる。一方、劣化深さ100および200mmにおいては、試験体上面のみで部分的に超音波伝播速度が改善する傾向であるが、健全部と同等までは改善されていない。本試験では、水平ひび割れの補修を想定して試験体上面から垂直方向に注入孔を設置して注入を行ったが、2試験体においては梁を割裂する鉛直方向のひび割れが多数発生しており、これらに注入材が充填されなかったことが、超音波伝播速度が改善されなかったことに影響していると推察される。

2. 5 RC床版に関する試験結果のまとめ

劣化深さが浅い試験体については注入材が十分に充填され、超音波伝播速度が健全時と同等まで改善されたが、試験体によってはひび割れ性状に起因すると考えられる注入材の充填不足が確認された。

3. 橋面舗装端部の止水対策技術に関する検討（寒地道路保全）

降雨や融雪水等の水分が床版へ浸入する経路となる舗装端部の止水技術に着目し、実態の把握と課題の抽出を行った。

文献¹⁾に平成16年度からの橋梁定期点検により蓄積されたデータから損傷原因と損傷種類の傾向の分析を行った結果が示されている。橋梁定期点検要領（平成16年3月国土交通省道路局国道・防災課）に基づき実施した1巡目と2巡目の定期点検結果を取りまとめたものである。

平成16年から平成20年にかけて行った1巡目の診断結果で対策区分が「損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない」「状況に応じて補修を行う必要がある」と受けた橋梁の部位・部材に対し、平成21年から平成25年にかけて行った2巡目の診断結果で1巡目の同一部位・部材に対し、対策区分が「速やかに補修を行う必要がある」「詳細調査の必要がある」と損傷が進展した原因を図-4に引用して示す。なお、主要部材とは損傷を放置し

ておくと橋の架け替えが必要になると想定される部材を指し、主桁、横桁、床版、橋脚、橋台、基礎等が該当する。

主要部材の損傷原因として、コンクリート部材の凍害が最も多く、次いで防水・排水工不良、塩害という結果が見られている。ここで「防水・排水工不良」とは、床版防水層の未設置や施工不良が床版への損傷原因になっていること、および伸縮装置、排水管からの漏水が影響し、主要部材への損傷原因となっていることを表す。

凍害、塩害およびアルカリシリカ反応は、コンクリート部材に対して水が媒介して引き起こされる劣化現象であることから、防水・排水工不良を含めると損傷原因全体の約6割以上が水の供給を起因として、主要部材の損傷が進行しているとされている。

また、現地の損傷実態を確認すると、降雨や融雪水等の水分が、アスファルト混合物の空隙やひび割れ部のほかに、地覆・縁石とアスファルト混合物が接する目地部から浸入し、床版が損傷した橋梁も見受けられる（写真-1）。

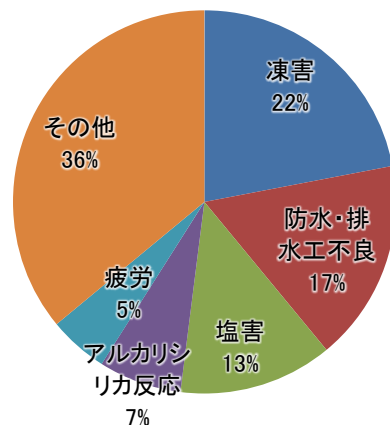


図-4 橋梁主要部材の損傷原因¹⁾



写真-1 舗装端部からの水分の浸入によるRC床版の損傷例

RC床版上の舗装は、床版の不陸等に対するレベリングを兼ねた基層と表層で構成され、交通荷重、雨水・融雪水等の気象作用などから床版を保護し、車両の走行性を確保する役割を担うものであるが、水の浸入は、RC床版および舗装の双方にとって損傷を引き起こす大きな要因となる。

これらの実態より、目地材料の水密性、目地材料の地覆や縁石とアスファルト混合物との接着性に着目し、舗装端部に施工される目地部の止水性を改善し、水分の浸入を軽減する対策が重要と考えられる。

このことから今後、橋梁地覆部の止水処理に関して、目地材料に着眼した止水効果の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 北海道開発局道路計画課、道路建設課、道路維持課、
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 寒地
基盤技術研究グループ 寒地構造チーム、寒地保全技
術研究グループ 寒地道路保全チーム：北海道開発局
における道路施設の老朽化に関する取り組み報告（第
2報）《指定課題》、第59回（平成27年度）国土交通
省北海道開発技術研究発表会、平成28年2月

8.2 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

8.2.3 構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究（河川構造物）

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒地河川）、寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

担当研究者：矢部浩規、前田俊一、島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、内藤 勲

【要旨】

河川樋門等の最適な補修と部分的構造改良技術を開発するため、積雪寒冷地の河川構造物特有の劣化等に対する補修対策において、未だ劣化機構等が解明されていない河氷等の摩耗と凍害との複合劣化に対する最適な補修方法の確立は喫緊の課題である。オホーツク地域の結氷する河川の特特殊堤において氷塊の衝突実態を把握する現地調査を実施した。その結果、氷塊の衝突の範囲や分布、衝突圧力値を概ね確認できたことから、氷塊の衝突がコンクリート壁面の損傷に影響していることが示唆された。

キーワード：凍害・複合劣化、樋門、特殊堤、河氷の衝突・摩耗、圧力測定シート、ADCP

1. 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

1.1 河川樋門等の最適な補修と部分的構造改良技術の開発

積雪寒冷地の河川構造物における補修対策は、断面修復工法や表面被覆工法等の一般的な補修工法が適用されているが、過酷な環境下においては写真-1のような再劣化が生じているケースもある。過年度の研究成果において、適切な補修実施を目的とした「コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）¹⁾」を策定しており、さらに樋門については、その独特の形状に対応した補修後の再劣化抑制対策の提案²⁾を行っている。しかし、河氷等による摩耗と凍害との複合劣化に対する最適な補修対策、さらに樋門の劣化後の耐震性能の回復を含めた構造的な改良や補修補強等は、積雪寒冷地の河川構造物の劣化対策における喫緊の課題である。

平成 28 年度は、過年度の研究データ等を整理して補修後に再劣化が生じている樋門の現況確認等を行い、樋門における既往補修箇所等の抽出を行った。また、



写真-1 特殊堤の補修後の再劣化状況

河氷等による摩耗と凍害による複合劣化が生じているオホーツク地域の結氷する河川の特特殊堤（護岸の機能も備えたコンクリート矢板構造の堤防）において、劣化・損傷等に関する現地調査を行った。

河氷の衝突に関する現地調査では、河川を漂流する河水や流氷等の氷塊が特殊堤に衝突する実態を観測するため、特殊堤の壁面に圧力測定シートを貼り付けて氷塊の衝突範囲、衝突圧力の測定を実施した（図-1）。また、ADCP（超音波ドップラー式流速計）による氷塊の厚さ測定及びその精度検証も行った（図-1）。

その結果、図-2に示すように、氷塊が特殊堤に衝突した範囲は垂直方向に 30cm 程度の幅であったが、川面の波や潮位変動等により衝突する位置が上下に変化するため、垂直方向に幅 60cm 程度の範囲で特殊堤に衝突していることが確認できた。最大衝突圧力は 63.8MPa と測定されたが、使用した圧力測定シートの最大圧力値のため、実際にはそれ以上の衝突圧力がかかっていたと思われる。また、圧力測定シートの圧力跡（圧力による発色部分）から、氷塊表面の細かい凹凸のために、圧力シートに衝突する際に氷塊が壁面に接触している面積は比較的小さいことがわかった。そのため、氷塊の突起によって部分的に集中荷重がかかって壁面に衝突していることが確認できた。

今回の衝突圧力測定において、氷塊衝突時の最大衝突圧力の本値を測定出来なかったため、次年度以降にさらに上限値の高い圧力測定シートを用いて最大衝突圧力を

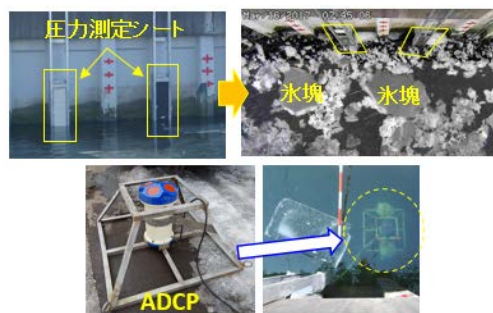


図-1 圧力測定シートと ADCP

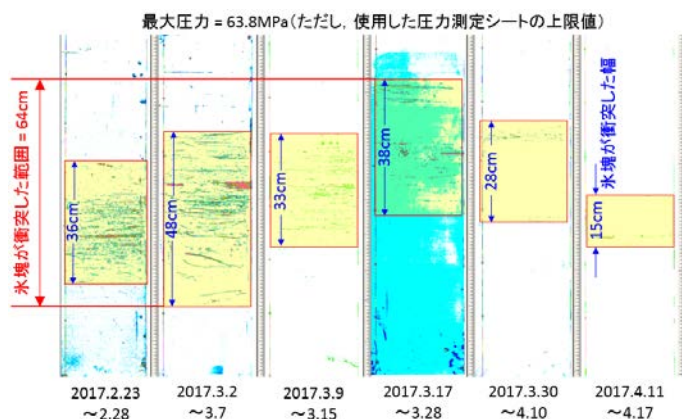


図-2 圧力測定シートによる圧力分布の結果

把握する必要があるが、氷塊の衝突圧力値の範囲に幅があることがわかった。また、圧力測定シートを固定する金具に氷塊が先に衝突する場面が多かったことから、圧力測定シートに直接衝突する場面が多くなるように改良する必要がある。さらに、現地での ADCP による氷厚の測定精度は、橋場ら³⁾が実施した室内実験の精度よりかなり低く、今後、氷厚の計測手法の改善、もしくは新たな計測・推定手法の導入が必要である。

今後、これらを踏まえて測定精度および本値を得るため、次年度以降に現地での再測定に加えて室内による検証実験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）、土木研究所資料、第 4343 号、2016.8
- 2) 土木研究所 寒地土木研究所：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案）、第 4 回改訂、pp. 参 8-25 - 参 8-27、2017.5
- 3) 橋場雅弘、白井博彰、吉川泰弘：河川解氷時における河水の底面変動と流下速度の測定に関する現地観測、B-4、土木学会北海道支部論文報告集、第 66 号、2010.2

8.2 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

8.2.4 構造物固有の凍害・複合劣化のメンテナンス技術に関する研究（沿岸構造物）

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒冷沿岸域）

研究担当者：中嶋雄一、増田亨、木岡信治、本間大輔

【要旨】

沿岸構造物の補修工法の提案：凍害や流氷の作用をうける沿岸構造物の有効な補修工法や対策工について、最新の研究成果を含む文献等の調査を行った。幾つか可能性が見出された工法について、これを実証するためにも、おもに現地調査等により、海水による外力を中心とする物理的な劣化損傷要因・過程等を調べるとともに、おもに摩耗対策として、金属被覆（犠牲鋼板）に着目した各種検討を行い、今後の課題等を明らかにした。さらに、幾つかの金属の防食法等の氷海域での暴露試験を行い、その劣化損傷状況等を調べた。

キーワード：海水、摩耗、暴露試験

1. 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

1.1 沿岸構造物の補修工法の提案

寒冷地の沿岸構造物は、過酷な環境に曝され、その複合的な劣化メカニズムは、未だ解明されておらず、有効な補修工法や対策工も確立されていない。しかし、最新の研究成果を含む海外文献等^{1)~3)}から、コンクリート構造物の氷の摩耗対策として、金属被覆が経験的にも有効であるほか、よく知られる凍害抑制や強度向上の試みが氷の摩耗対策にも有効であるという知見を得た。これを実証するためにも、おもに現地調査等により、海水による外力を中心とする物理的な劣化損傷要因・過程等を調べるとともに、おもに摩耗対策として、金属被覆（犠牲鋼板）に着目した各種検討を行い、今後の課題等を明らかにした。

沿岸構造物の海水による劣化損傷は、既往の研究⁴⁾より、海水に含まれる砂等の固形分による研磨作用に起因するアブレシブ摩耗が大きな損傷要因となり得ることが分かっている。過年度より継続して、海水の固形分含有量調査をオホーツク沿岸部において実施し、現場の不確実性を考慮した損傷プロセスモデル等、統計的推測に必要なデータを蓄積した。

また、オホーツク海に面した北海道斜里漁港防砂堤の矢板部（水深約 4m、約 300m 沖合側）に荷重計を取り付け、海水による接触荷重を計測した。荷重形態が準静的な荷重（10kPa オーダー）から短い接触時間での衝突的な荷重（1MPa オーダー）まで多岐に及ぶことや、振動的な荷重が大半なこと、特に金属材料にとっては、疲労

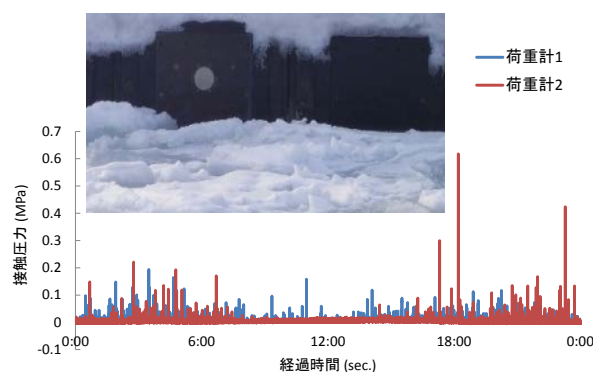


図-1 氷海域での海水接触荷重の計測例

損傷や腐食疲労といった新たな技術課題等が明らかとなった（図-1）。

さらに、同防砂堤防において、過年度より長期間のモニタリングが必要となっている、①重防食被覆（ウレタンエラストマー被覆）、②主に鋼材の集中腐食部やコンクリートを被覆に供する犠牲鋼板(SS400、溶接の被覆材として水中硬化エポキシ樹脂)、③形状と取り付け方法、配置等を改良した新たな流電陽極、など、既存並びに新たな防食工法や対策工法等の耐氷性確認のための暴露試験を引き続き実施し、その劣化損傷過程を調べた。

参考文献

- 1) S. Houvinen et al., The abrasion of concrete in arctic offshore structures, Proc. of the 7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol.3, pp.233-240, 1988.
- 2) J.E. Janson, Long term resistance of concrete offshore structures in ice environment, Proc. of the 7th

International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAЕ), Vol.3, pp.225-231, 1988.

- 3) Y. Itoh et al., Estimation method for abrasion of concrete structures due to sea ice movement, Proc. of 4th International Offshore and Polar Engineering , Vol.2, pp.545-552, 1994.
- 4) 木岡、竹内、遠藤、成田：固形分を含んだ海水の摩擦による鋼構造物の損耗機構に関する研究、土木学会論文集 B3(海洋開発)、Vol. 70、No2、L_780-L_785、2014

8.2 凍害・複合劣化等に対する信頼性の高い補修補強技術の確立

8.2.5 凍上・凍結融解を受ける舗装や切土のり面の耐久性向上技術に関する研究（舗装）

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）

研究担当者：木村孝司、丸山記美雄、安倍隆二、星卓見、
上野千草、田中俊輔

【要旨】

本研究は、凍上・凍結融解等を受ける舗装の要対策箇所に対する信頼性や耐久性の高い補修補強技術を開発し、導入に向けた提案を行うことを目的としている。平成 28 年度は、ひび割れ抑制シートによる舗装補修の効果について、現場調査に基づく評価を実施し有効性を確認した。

キーワード：融雪水、凍結融解、ひび割れ抑制シート、低温ひび割れ

1. はじめに

積雪寒冷環境下においては、凍上・凍結融解等の要因に加え、交通繰返し荷重による疲労や摩耗が複合的に作用した舗装損傷の被害が顕在化している。そこで、本研究は、凍上・凍結融解等を受ける舗装の要対策箇所に対する信頼性や耐久性の高い補修補強技術を開発し、導入に向けた提案を行うことを目的としている。平成 28 年度は、ひび割れ抑制シートによる舗装補修の効果について、現場調査に基づく評価を実施し有効性を確認した。

2. 低温環境下で耐久性のあるシール材等の舗装補修技術の開発

低温・凍上・凍結融解等の影響を受ける積雪寒冷地において、既存の舗装を活かし、有効に活用するための一手法として、舗装補修時にシール材やひび割れ抑制シートを使用する方法が存在する。

ひび割れ抑制シートはこれまでも現場において活用されてきている。特に、不織布を基材としたタイプのひび割れ抑制シートを用いることが従来は多かったが、その効果に関する定量的な追跡調査データは少なく、費用対効果が明らかとはいえない点が課題といえる。さらに近年では、ガラス繊維などの強度の高い基材を用いたシートの出荷実績が多くなっており、これらのタイプのシートのひび割れ抑制効果についても明らかにしていく必要があると思われる。

そこで、積雪寒冷地の道路で良く見ることができない低温ひび割れと疲労ひび割れの補修を対象に、ひび割れ抑制シートのひび割れ抑制および発生遅延効果について、現場調査に基づく評価を実施し有効性を検証した。

2. 1 ひび割れ抑制シートとは

2.1.1 ひび割れ抑制シートとは

ひび割れ抑制シートは、概ね図-1 に示すような断面構造をしており、布状やシート（薄い板）状やメッシュ（網目）状の基材の表面に、特殊アスファルトや特殊ゴムアスファルトを含浸または被膜させて 1mm～3mm 程度のシート状にしたものである。ひび割れ抑制シートを既設舗装のひび割れ直上に貼り付けることで、既設舗装のひび割れが上層に舗装する層に伝播しないようにしてひび割れの再発（以下、リフレクションクラックと称す）を抑制する。

ひび割れ抑制シートの性質は、基材のタイプ、被膜する特殊アスファルトの性質、材料の厚さと幅、貼付け方法（接着方式、流し貼り方式、鋸止め方式など）などによって影響されるため、単純に分類できない面があるが、本報文では基材の材質に応じて大まかに以下の 4 種類のタイプに分類している。

- a. 合成繊維不織布を基材とするタイプ
- b. ガラス繊維メッシュまたはシートを基材とするタイプ
- c. ビニロン繊維メッシュを基材とするタイプ
- d. ステンレス繊維メッシュを基材とするタイプ

現在市場に出回っている製品を上記の 4 種類のタイプに分けて、各々のタイプの長手方向と幅方向の引張強度のカタログ値を整理した結果を図-2 に示す。図-2 からは、合成繊維不織布を基材とするタイプよりも、ガラス繊維を基材とするタイプの引張強度が高い傾向にあるなど、基材の材質によってひび割れ抑制シートの強度が異なる

ことが分かる。各々のタイプの特徴を表-1に示すが、一般的な傾向として不織布を基材とするタイプは引張強度は小さいが伸び率が高く、各種の繊維メッシュやシートを基材とするタイプは不織布を基材とするタイプに比べて引張強度が高く伸び率が小さいのが特徴である。

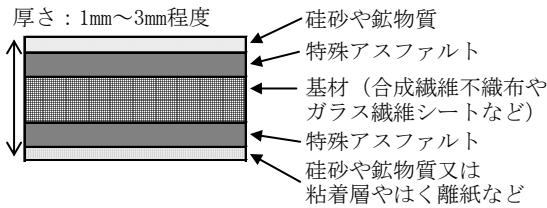


図-1 ひび割れ抑制シートの断面概要図

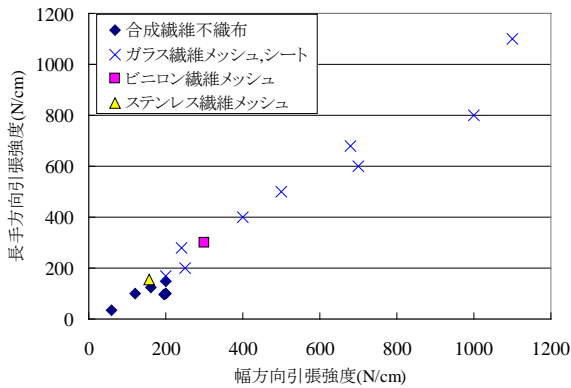


図-2 ひび割れ抑制シートの引張強度(基材の材質別)

表-1 ひび割れ抑制シートの特徴(基材の材質別)

基材の種類	特徴
合成繊維不織布	引張強度は比較的小さい傾向(50～200N/cm程度) 伸び率が高く(30%以上)、変形や伸びに追随する
ガラス繊維メッシュ	直交する繊維方向の引張強度が高く(200～1000N/cm程度) 直交する繊維に対して斜め方向の引張強度は小さい傾向にある 伸び率は小さい(数%程度) 柔軟性があり、切削面などの凹凸に追随しやすい
ガラス繊維シート	直交する繊維方向の引張強度が高く(200～1100N/cm程度) 直交する繊維に対して斜め方向の引張強度も比較的良好 伸び率は小さい(数%程度) ハリがあり、切削面などの凹凸に追随しにくく空隙が残ることがある
ピニロン繊維メッシュ	直交する繊維方向の引張強度が高く(300N/cm程度) 直交する繊維に対して斜め方向の引張強度は小さい傾向にある 伸び率は小さい(数%程度)
ステンレス繊維メッシュ	直交する繊維方向の引張強度が高く(150N/cm程度) 直交する繊維に対して斜め方向の引張強度は小さい傾向にある 伸び率は小さい(数%程度)

2.1.2 ひび割れ抑制シートの室内試験による評価

ひび割れ抑制シートの効果について、室内試験によって検証した結果を筆者らの既報¹⁾から抜粋し、図-3に示す。室内試験によってリフレクションクラックが貫通するまでの時間を調べたものであるが、試験方法の詳細は既報¹⁾に記載してあるので省略する。表層混合物が同じもの同士を比較すると、ひび割れ抑制シートが無い場合に比べて、ひび割れ抑制シートがあるものはリフレク

ションクラックが貫通するまでの時間が遅い。さらに、シートの基材が不織布の場合に比べて、シートの基材がガラス繊維の場合のほうが、リフレクションクラックが発生するまでの時間が遅い。このように、ひび割れ抑制シートはリフレクションクラックの発生を遅延させる効果があり、シートの基材にガラス繊維を使用したものの方が効果が高いことを室内試験では確認している。ちなみに、表層混合物にストアス混合物に変えてポリマー改質Ⅱ型、またはⅢ型混合物を用いることによって、舗装体のひび割れ抑制効果が高まることも見て取れる。

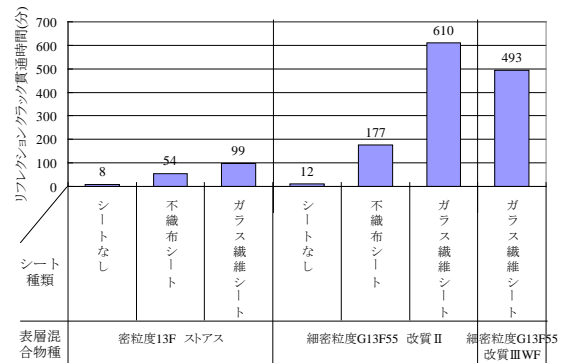


図-3 リフレクションクラック貫通時間

2.2 低温ひび割れ補修箇所での長期追跡調査

北海道の道路における積雪寒冷地特有の舗装損傷現象のひとつに写真-1に示すような低温ひび割れがある。このひび割れは、急激な温度低下に伴う舗装体の収縮に起因し、北海道の中でも冬の寒さが厳しい地域に多く発生する特徴がある²⁾。低温ひび割れはそのまま放置すると、ひび割れ開口部から雨水等が進入し、路盤、路床の破壊にまで至り平坦性が悪化することがあるため³⁾、適切に補修する必要がある。低温ひび割れの補修工法としては、ひび割れ開口部へのシーリング材注入後、ひび割れ抑制シートを敷設し、その上にオーバーレイする工法が標準的に行われている。しかし、低温ひび割れ発生地域の中でも特に寒さの厳しい地域では、上述のような標準的補修工法の施工後1冬を経過した時点で再びクラックが発生してしまうことがある。

本報では、寒さが厳しい地域における低温クラック発生箇所において、標準的補修工法を含む2種類の補修工法を用いて試験的に補修を行い、1冬経過後、4冬経過後、10冬経過後の現地調査からひび割れ再発抑制効果の持続性を検証した。



写真-1 低温ひび割れ

2.2.1 低温ひび割れ補修箇所の概要

調査対象箇所は、国道 275 号幌加内町 KP=162~163、交通量区分 N4 (100 以上 250 台未満、旧 A 交通) の区間であり、**図-4** に試験施工の区間割りを示す。同一車線上に隣接して、合成繊維不織布を基材としたシートを用いた補修区間(以下、合成繊維不織布シート区間)と、ガラス繊維シートを基材としたシートを用いた補修区間(以下、ガラス繊維シート区間)の 2 種類の区間を設けて、補修後のひび割れ再発状況を比較している。

ちなみに、合成繊維不織布シート区間は、**図-5** 右図に示すように、既設舗装にシール材注入+ひび割れ抑制シート A (合成繊維不織布を基材、幅 W=330mm) 敷設+レベリング層(粗粒度アスコン平均厚 32mm)+表層(密粒度アスコン t=30mm)で補修している。本補修工法は、低温ひび割れの補修として最も標準的に用いられており、実績も多い工法である。一方、ガラス繊維シート区間は、**図-5** 左図に示すように、シール材注入+ひび割れ抑制シート B (ガラス繊維シートを基材 幅 W=500mm) 敷設+レベリング層(粗粒度アスコン平均厚 32mm)+表層(密粒度アスコン t=30mm)で補修している。本シートは、ガラス繊維

繊維を一方方向に引きそろえた薄肉シートを積層し、両面に改質アスファルトを塗布したものである。

試験施工位置近傍の 1980 年(昭和 55 年)~2000 年(平成 12 年)の凍結指数の平均値は 943°C・日と、北海道内の観測地点の平均値 585°C・日よりも高く厳しい寒さに晒される箇所といえる。

表-2 に、各区間の補修前の既設舗装における低温ひび割れ本数を示す。補修前の低温ひび割れ発生状況はどちらの区間も 100m 当り 11.5 本とほぼ同程度であったことが分かり、補修後のひび割れ再発を追跡比較するのに好都合である。

2.2.2 低温ひび割れ補修箇所調査結果

施工後 1 冬を経過した後の各区間のひび割れ再発状況を**図-6** に、ひび割れ再発本数と再発率を**表-3** に示す。**図-6** および**表-2**、**表-3** から、合成繊維不織布シート区間では補修前のひび割れ本数 23 本に対して 8 本が再発し、再発率が 35%であることが分かる。本調査箇所のような非常に厳しい低温環境下では低温ひび割れ補修手法として実績のある合成繊維不織布シートでは低温ひび割れ抑制効果に限界があるものと考えられる。一方で、ガラス繊維シート補修区間の方がひび割れ再発率は 13%と低い。ひび割れ幅についても、合成繊維不織布シート区間では最大 3mm 程度、ガラス繊維シート区間では最大 1mm 程度と差があった。ひび割れ部の角欠けや損傷の広がりを防止するために、合成繊維不織布シート区間に発生した 3mm 程度のひび割れにはシール材の注入処理の手間を要している。

次に、施工後 4 冬経過後の各区間のひび割れ再発状況

表-2 補修前の低温ひび割れ本数

	ガラス繊維シート区間(L=270m)	合成繊維不織布シート区間(L=200m)
補修前 全ひび割れ 本数(本)	31	23
補修前 単位本数 (本/100m)	11.5	11.5

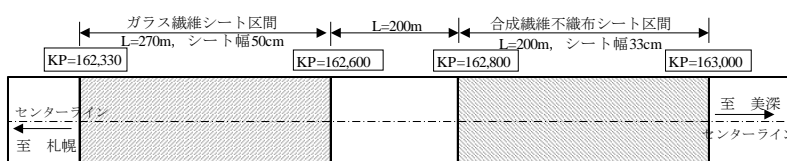


図-4 低温ひび割れ補修箇所の平面図

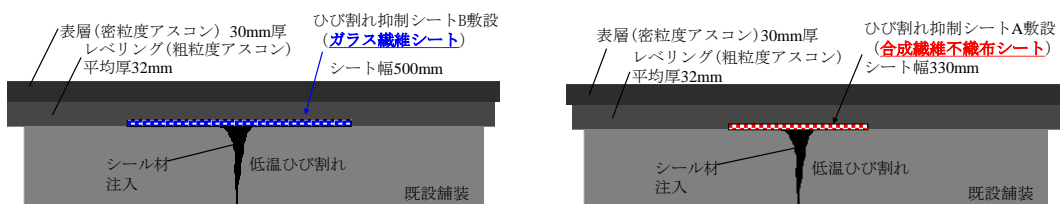


図-5 低温ひび割れ補修 各区間の概略図(左: ガラス繊維シート区間 右: 合成繊維不織布シート区間)

図を図-7に、ひび割れ再発本数を表-4に示す。両工区とも、1冬経過時点よりもひび割れ再発本数が増加しているが、ガラス繊維シート区間の方がひび割れの再発本数が少なく、再発率が低い傾向に変わりはない。

10冬経過時点のひび割れ再発状況図を図-8に、ひび割れ再発本数を表-5に示す。合成繊維不織布シート区間の再発率が61%であるのに比べ、ガラス繊維シート区間の再発率は52%と低いが、両工区の差は10%以下に縮まってきた。ここで、再発したそれぞれのひび割れに維持的な対応が行われた状況に違いがある事を述べておく。合成繊維不織布シート区間のひび割れは開口幅が大きい傾向にあり、1冬経過時点でシール材注入の処置がなされたが、4冬経過時点までにシール材は剥離飛散し、その後ひび割れ部分が角欠けしてポットホールが生じるなどして混合物による補修が行われたひび割れが5本あるのに比べて、ガラス繊維シート区間のひび割れはひび割れ開口幅が小さく、現在まで維持的な対応を要していない。

これらのことから、ひび割れ抑制シートの種類によつ

て効果に若干の違いが認められ、ガラス繊維シートは合成繊維不織布シートよりも良好な経過を示していると言える。ただし、いずれのシートもひび割れの再発を抑制・遅延させる効果があり、若干の程度の差があるだけと評価することもできる。また、いずれのシートもひび割れ開口部からの雨水の浸入を抑制し、路盤や路床の破壊を抑制している点は評価できる。本試験施工箇所の場合、経済性の面では、ガラス繊維シート補修は、合成繊維不織布シートより5%程度工事費が高くなるが、その後の維持補修費を含めたライフサイクルコスト(LCC)が有利となっているかどうかは、まだ断定することはできない。

2.3 疲労ひび割れ補修箇所での長期追跡調査

2.3.1 疲労ひび割れ補修箇所の概要

ひび割れ抑制シートの疲労ひび割れ補修効果を検証する目的で、平成19年度に試験施工を行っている。試験施工箇所は国道36号苫小牧市美々、交通量区分はN7(3,000台以上、旧D交通)の路線箇所である。この試験施工区間においては、平成2年に交通量区分N5(250以上1,000

表-3 1冬経過後のひび割れ再発本数と再発率

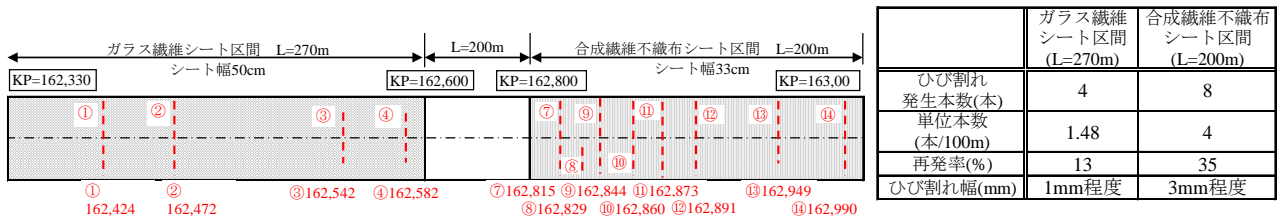


図-6 1冬経過後のひび割れ状況図

表-4 4冬経過後のひび割れ再発本数と再発率

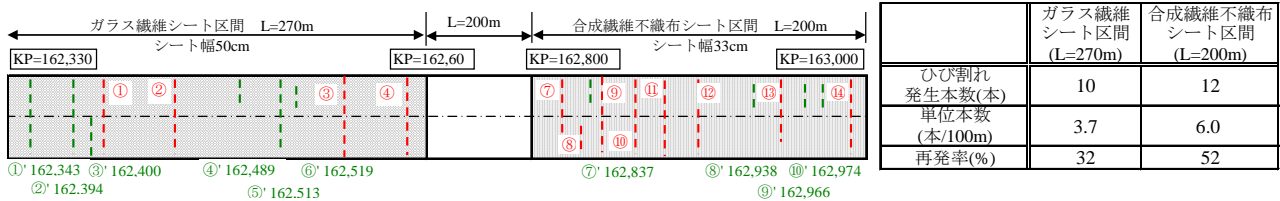


図-7 4冬経過後のひび割れ状況図

表-5 10冬経過後のひび割れ再発本数と再発率

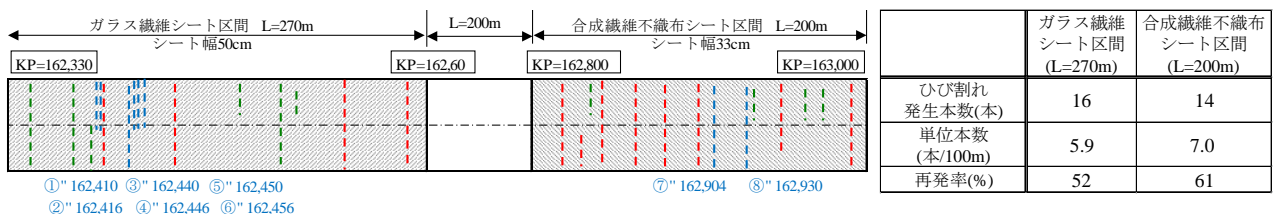


図-8 10冬経過後のひび割れ状況図

台未満、旧B交通) 対応の国土交通省北海道開発局舗装標準断面(表層4cm、基層5cm、上層路盤6cm)を試験的に延長60m 設けていたが、平成13年3月に疲労ひび割れの発生が観測され、その後、平成14年3月に切削4cm+オーバーレイ4cmが施工された。さらにその後、平成19年度の時点で図-9に示すような亀甲状の疲労ひび割れが全区間に亘って発生し、ひび割れ率が26%、わだち掘れ量が16.5mmと補修が必要な状況となったことから、補修に際して前述した目的の試験施工を行ったものである。補修工事は平成19年10月末に実施され、補修後に一般交

通に供用されて約9年2ヶ月経過している(平成28年12月末時点)。

補修方法の概要を図-10に示す。既設舗装の表層を4cm 切削後、ガラス繊維シートを基材に用いたひび割れ抑制シートを既設舗装の基層表面タイヤ通過位置に1m幅で縦断方向に連続して流し貼りし、表層に細密粒度ギャップアスコン13F55(改質II型)を4cm 舗設している。したがって、疲労ひび割れが発生した既設舗装は、シートの下にそのまま残存した状態である。ひび割れ抑制シート貼り付け後の状況を写真-2に示す。追跡調査項目は表

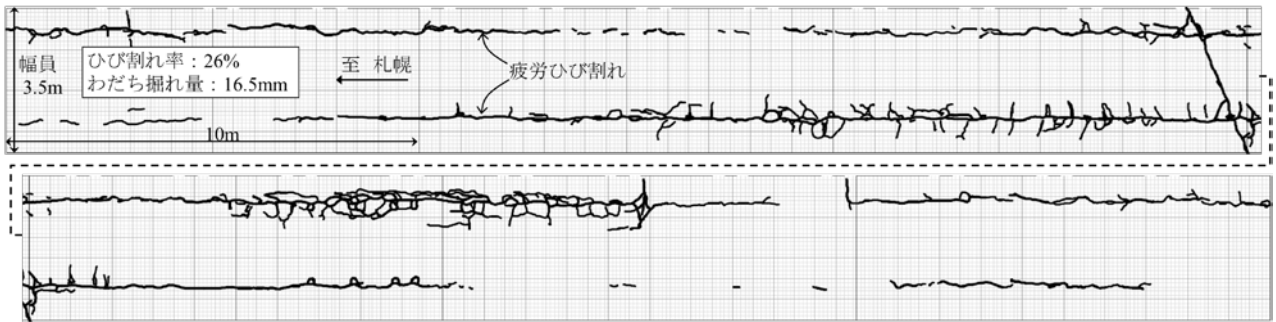


図-9 補修前の路面の疲労ひび割れ状況(幅員3.5m、延長60m区間)

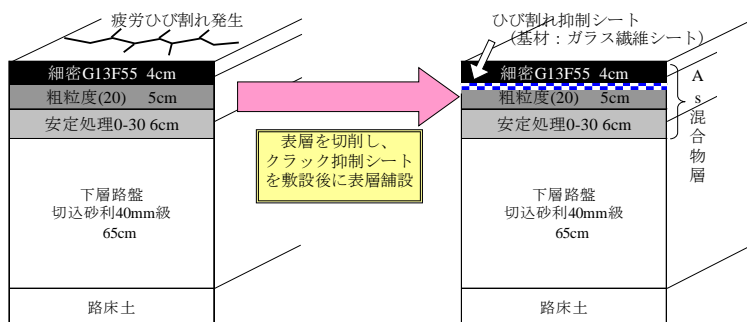


図-10 疲労ひび割れ補修方法概要図



写真-2 ひび割れ抑制シート貼り付け後の状況

表-6 追跡調査項目

わだち掘れ量
平坦性
ひび割れ率
交通量及び輪荷重
FWDによるたわみ量

表-7 路面性状追跡調査結果

測定年月	H19.11	H20.10	H21.10	H22.10	H23.10	H24.10	H25.10	H26.10	H27.10	H28.10
測定項目										
わだち掘れ量(mm)	0.8	2.9	3.7	4.5	5.3	6.2	6.6	7.9	9.5	11.2
平坦性(mm)	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5
ひび割れ率(%)	0	0	1.4	1.4	1.4	2.7	3.7	4.5	—	6.6

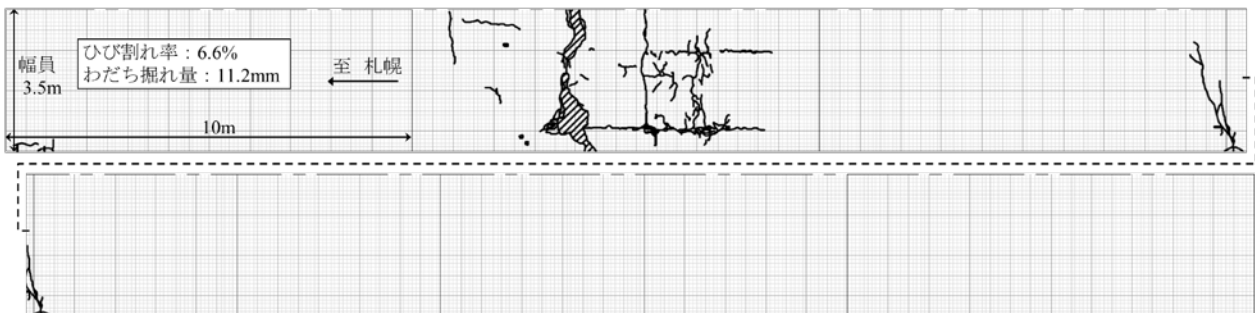


図-11 補修後9年経過時点のひび割れ再発状況(幅員3.5m、延長60m区間)

-6に示すとおりであるが、試験目的がひび割れ抑制シート
の疲労ひび割れ補修効果を検証することであるから、
本報では特にひび割れの再発状況に重点を置いて述べる。

2.3.2 疲労ひび割れ補修箇所調査結果

供用後約9年間のわだち掘れ量、平坦性、ひび割れ率
などの路面性状追跡調査結果を表-7に示す。特にひび割
れ率に着目すると、約9年経過時点でもひび割れ率は
6.6%に留まっている。供用後9年経過時点の路面のひび
割れ再発状況を図-11に示す。図-9に示した補修前の既
設舗装のひび割れ状況と比較すると、ガラス繊維シート
を基材にしたひび割れ抑制シートによって、ひび割れの
再発が抑制されていることが分かる。若干ひび割れの再
発がみられ、ポットホールが発生した部分もあるが、今
後の供用にはまだ十分に耐える状態であると判断される。

図-12には、平成14年に施工した切削オーバーレイ後
のひび割れ率追跡調査結果と、平成19年にひび割れ抑制
シートを施工した後のひび割れ率追跡調査結果を対比し
て示した。切削オーバーレイでは施工後約2年でひび割
れの再発が目立つようになり、約6年後には30%近くに
まで進展して補修が必要となったのに比べて、ひび割れ
抑制シート工法のひび割れ進行速度は緩やかであり、ひ
び割れの再発を抑制・遅延する効果が認められる。

参考として、当該箇所の交通量および車両重量調査結
果を表-8に示す。日当りの大型車交通量は約1,700台/
車線、輪荷重の49kN換算輪数は日当たりで約1,300輪/
車線である。したがって、補修工事実施後、約9年2ヶ月
経過までの間の累計49kN換算輪数は520万輪(平成28
年12月現在値)に達している。交通量区分N5(250以上
1,000台未満、旧B交通)の疲労破壊輪数は100万輪/10
年である⁴⁾のに対して、約9年2ヶ月経過までの間に既
に疲労破壊輪数の5倍を上回る49kN換算輪数が通過して
いることになる。

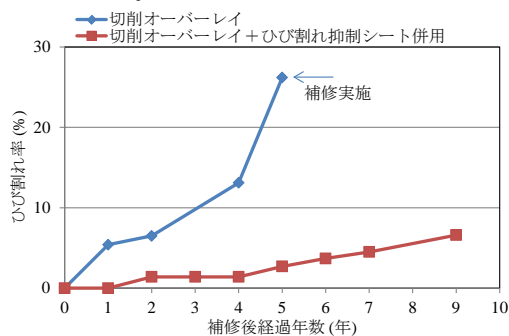


図-12 工法別のひび割れ率の推移比較

表-8 交通量および車両重量調査結果

測定年	交通量調査結果(台/日)		輪荷重測定結果(輪/日)
	全交通量	大型車	日49kN換算輪数
2007年(H19)	5,678	1,652	1,480
2008年(H20)	5,635	1,634	1,518
2009年(H21)	5,788	1,507	1,126
2010年(H22)	5,722	2,167	1,245
平均	5,706	1,740	1,342

ガラス繊維シートを基材にしたひび割れ抑制シートを
用いることで、疲労ひび割れが進行した既設の舗装体を、
疲労破壊輪数が5倍以上超える期間、供用可能とした効
果は高く評価できる。また、1,700台/日の大型車交通量
に対して約9年供用に耐える状態を保っていることから、
交通量区分N5(250以上1,000台未満、旧B交通)の大
型車交通量上限1,000台/日の場合には単純計算で9×
1.7=15.3年までのひび割れ抑制効果が確認できたこと
になり、交通量の面からも十分な耐久性を示したと評価
できる。

2.4 適用方法の検討

2.4.1 低温ひび割れに対しての適用方法検討

低温ひび割れの動きは温度差が大きい場合には一日
2mm程度開口幅が変化すると言われている³⁾。このよう
な挙動を示す低温ひび割れをシートとオーバーレイで完
全に抑制することは困難であり、ひび割れ再発はある程
度受容することが前提となる。ひび割れの再発を受容し
た上で、再発率を少なくすること、再発を遅らせること、
再発したひび割れの開口幅を小さくすること、再発した
ひび割れ周辺の損傷を進展しにくくすること、再発ひび
割れ開口部から路盤や路床に水が浸入しにくいようにす
ること、といった視点を持つことが、既存の舗装資産の
延命化と有効活用につながると思われる。

上述した視点に立脚すると、ひび割れ抑制シートの敷
設により、ひび割れ開口部から浸入する水が遮断され、
路盤や路床に及ぶ悪影響が軽減されると考えられるので、
シートの敷設は有益である。そして、シートの種類につ
いては、10冬経過時点でのひび割れ再発率が不織布シー
トで61%、ガラス繊維シートで52%と大きな差があるとは
言えないが、再発したひび割れの開口幅が少なく、ひび
割れの発生が遅く、ひび割れ部分に発生する角欠け損傷
が少ないという点も含めて評価すると、ガラス繊維シー
トなどの引張強度が高く伸び率が小さいシートを適用す
ることは有効であると考えられる。

経済性については、ガラス繊維シートを使用した場合、
施工時の費用(材工共)は約5%程度の増加と試算される。
再発したひび割れ部分のシーリング注入や角欠け損傷への対
応などの維持費も含めたライフサイクルコストを考慮す

れば、5%の施工費用の増加は回収可能とも考えられるが、明らかな経済的優位性を確認するには至っていない。

2.4.2 疲労ひび割れに対する適用方法検討

疲労ひび割れに対しては、ガラス繊維シートを基材としたひび割れ抑制シートの敷設によるひび割れ抑制効果は高いと評価できる。シートを用いずに切削オーバーレイを施した場合は5年で再補修が必要な状態になったのに比べて、ひび割れ抑制シートを敷設した場合は9年経過した現時点においても供用に問題がない状況である。

経済性については、タイヤ走行位置に1m幅のガラス繊維シートを張り付ける場合、シートを用いない切削オーバーレイと比較すると施工時の費用(材工共)は約70%程度の増加と試算される。しかし、供用後の年数は9年/5年=1.8倍で、少なくとも約80%延命できたと考えると、施工費の70%の増加は既に回収できているといえる。

以上のことから、疲労ひび割れが発生している箇所においては、単純に切削オーバーレイするのではなく、シートを併用すること、更にシートにはガラス繊維シートを基材としたひび割れ抑制シートを適用することが有益である。

ただし、疲労ひび割れ発生箇所にシート工法を適用するのは、経済的な制約等があり、既設の舗装体を有効に活用する方法をとらざるを得ない場合である。疲労ひび割れが発生している状態は、舗装体が疲労破壊しており所定の支持力を有していない状態と判断されるため、本来ならば、破損部分を撤去してアスファルト混合物層全層を打ち換えるのが望ましい。しかし、舗装維持修繕費が限られる中で、現在ある舗装資産の延命化を図り有効に活用するという観点では、ガラス繊維シートなどの引張強度が高く伸び率が小さいシートを活用することが有効であるという事である。

3. まとめ

(1)低温ひび割れ補修箇所における追跡調査結果から、ひび割れ抑制シートによって、低温ひび割れの再発がある程度抑制できている状況が確認できた。ガラス繊維を基材に使用したシートの方が不織布を基材にしたシートよりも経過は良好であり、再発したひび割れの開口幅も狭い状況が確認できた。低温ひび割れの補修にひび割れ抑制シートを用いることは有益であり、ガラス繊維シートなどの引張強度が高く伸び率が小さいひび割れ抑制シ-

トを適用することは有効と考えられる。

(2)疲労ひび割れ補修箇所における追跡調査結果から、ガラス繊維シートを基材に用いたひび割れ抑制シートによって、疲労ひび割れ部のリフレクションクラックの発生を抑制する効果が見られた。疲労ひび割れが発生している箇所においてひび割れ抑制シートを用いる場合には、ガラス繊維シート等を基材としたひび割れ抑制シートを適用することが有効と考えられる。

参考文献

- 1) 丸山、金子、熊谷：舗装補修に使用するひび割れ抑制シートの効果、第54回(平成22年度)北海道開発技術研究発表会、コ-7、2011年2月
- 2) 菅原、久保、森吉：寒冷地舗装に発生する横断ひび割れ、道路、pp.37-40、1978年8月
- 3) 阿部、小笠原、野竹：アスファルト舗装の低温クラックの評価と補修工法について、第21回日本道路会議論文集、pp.706-707、1995年
- 4) 日本道路協会：舗装設計便覧、p.30、2006年2月

8.3 凍害・複合劣化等への耐久性の高い更新・新設技術の確立

8.3.1 コンクリートの凍害・複合劣化に共通する耐久性向上技術に関する研究（表面含浸材）

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、
遠藤裕丈

【要旨】

水や塩化物イオンの侵入抑制機能をコンクリート表層へ付与するシラン系表面含浸材は、表面保護工法設計施工指針において、気温 5℃以下の環境では適用対象外とされ、多くの製品も常温施工を原則としている。一方、寒冷地では作業工程の関係でやむを得ず厳冬期に塗布することがある。作業を合理的に行うには防寒仮囲いの温度や撤去時期等を適切に定める必要がある。しかし、厳冬期の施工仕様は十分確立されておらず、手探りで行われることもある。このため、低温下での最適な塗布工程の策定に必要な施工要領の整備が急がれる。本研究ではシラン系表面含浸材の冬期施工要領の策定に向けての一環として、低温下での含浸性を調べる基礎実験を行った。
キーワード：コンクリート、シラン系表面含浸材、低温、含浸深さ

1. はじめに

シラン系表面含浸材（以下、シランと記す）は、水や塩化物イオンの侵入抑制機能をコンクリート表層へ付与する浸透性の保護材である。施工性や経済性に優れ、寒冷地ではコンクリートの凍・塩害抑制対策として使用されている¹⁾。シランは気温 5℃以下の環境では適用対象外²⁾とされ、多くの製品も常温施工を原則としている。一方、寒冷地では作業工程の関係でやむを得ず厳冬期に塗布することがある（写真-1）。作業を合理的に行うには防寒仮囲いの温度や撤去時期等を適切に定める必要がある。しかし、低温下での含浸性に関する情報が少なく、厳冬期の施工仕様は十分確立されておらず、手探りで行われることもある。このため、低温下での最適な塗布工程の策定に必要な施工要領の整備が急がれる。本研究ではシランの冬期施工要領の策定に向けての一環として、平成 28 年度は低温下でのシランの含浸性を調べる基礎実験を行った。



写真-1 厳冬期における防寒仮囲い内でのシラン塗布状況の一例（手前の黒板は画像処理を行っている）

表-1 コンクリートの配合・圧縮強度

使用セメント	水セメント比	単位量 (kg/m ³)				圧縮強度 (MPa)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
普通	55%	145	264	879	1067	25.4(11日)
早強						22.9(7日)

普通…普通ポルトランドセメント、早強…早強ポルトランドセメント、圧縮強度は図-1の養生終了時に調べた値（カッコは材齢）

2. 寒冷環境下における表面含浸材の施工法の提案

2.1 実験概要

表-1に配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメントもしくは早強ポルトランドセメントを使用した。水セメント比は55%とし、細骨材は除塩処理済の海砂（密度 2.69g/cm³、吸水率 1.19%）、粗骨材は砕石（密度 2.67g/cm³、吸水率 1.80%、最大粒径 25mm）を用いた。供試体の寸法は 100mm×100mm×200mm とした。供試体は冬期施工を想定して寒中コンクリートとして作製

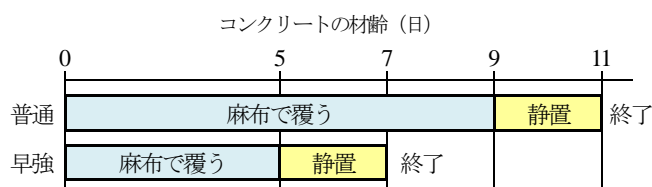


図-1 コンクリートの養生工程（養生温度は開始から終了まで 5℃）

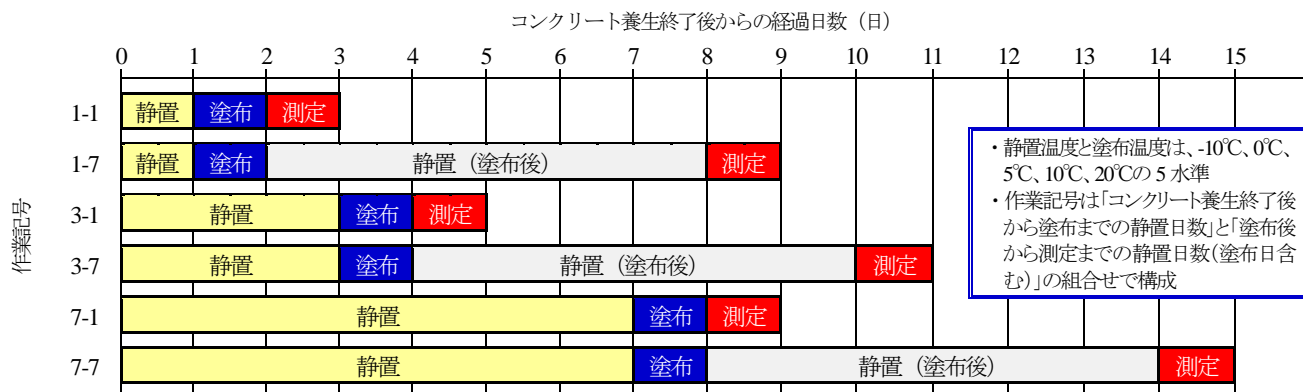


図-2 塗布作業および測定作業の工程



写真-2 -20℃の環境に1日静置したシランの外観

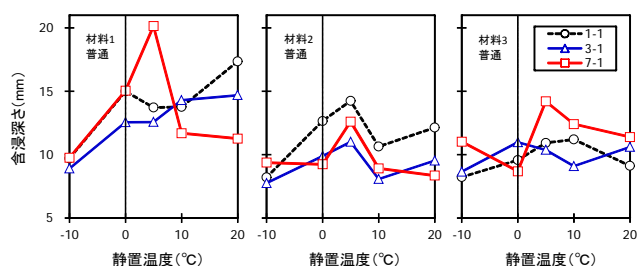


図-4 含浸深さの測定結果 (普通ポルトランドセメント、塗布翌日に測定)

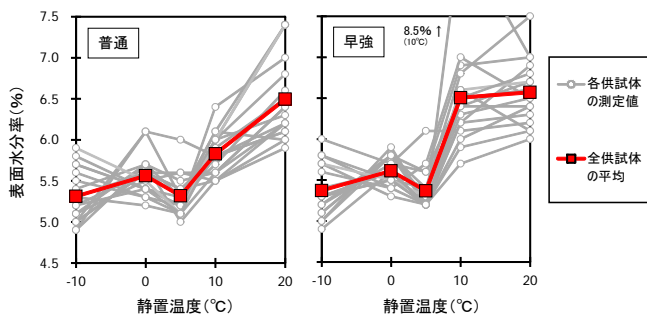


図-3 シラン塗布時における
コンクリート表面水分率

することとし、養生工程を図-1³⁾のように設定した。養生温度は5℃とした。養生終了後、図-2に示す工程でシランの塗布、含浸深さの測定を行った。静置・塗布温度は-10℃、0℃、5℃、10℃、20℃の5水準とした。シランは、0℃以下で塗布を行うため水系を検討対象から除外し、北海道開発局道路設計要領の基準¹⁾を満たす無溶剤系3製品(材料1、材料2、材料3と記す)を選定した。これら3製品は-20℃でも凍結しないことを予備実験で確認している(写真-2)。塗布量は統一せず、各製品メーカー指定の標準量とした。塗布面は打設面(100mm×200mm)とした。含浸深さは供試体を割裂し、割裂面に水を噴霧して撥水を呈した範囲をシランの含浸域と判断し、ノギスを用いて測定した。

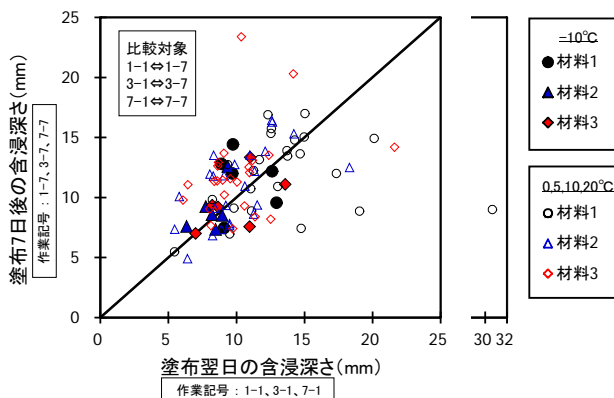


図-5 含浸に及ぼす塗布後の経過日数の影響
(普通と早強の両セメントの結果を一括表示)

2.2 実験結果・考察

図-3は高周波式水分計で調べたシラン塗布時のコンクリート表面水分率である。常温下は約6.5%、低温下は約5.5%で常温下の方が大きかった。実験室では人工的に低温の空気をつくり出すとき、強制的に除湿が行われるため、低温下では表面近傍の水分が外気に奪われたことが考えられる。

図-4は普通ポルトランドセメントを用いた供試体の

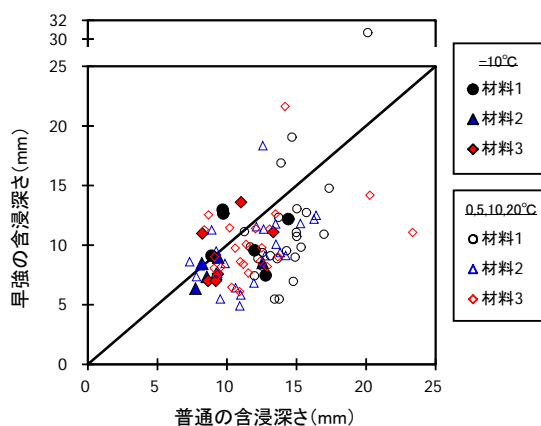


図-6 含浸に及ぼす使用セメントの影響
(全ての作業記号のデータを一括表示)

作業記号 1-1、3-1、7-1 (塗布翌日に測定) における含浸深さの測定結果である。今回選定したいずれの材料においても、表面水分率が 5.5~6.5%程度で、静置温度が -10~20°Cの範囲では、含浸深さに及ぼす温度および塗布前の静置期間の影響はみられなかった。

図-5 は含浸に及ぼす経過日数の影響を示している。全ての温度・材料水準の 6 割は塗布 7 日後の方が平均 2.5mm 大きい傾向を示したが、塗布翌日の段階でも 10mm 近く含浸している。施工条件によるが、本実験の範囲では -10°Cでも塗布後静置 1 日で十分な厚さの吸水防止層が形成される結果となった。

図-6 に含浸に及ぼす使用セメントの影響を示す。全体的に早強ポルトランドセメントを使用した方が含浸深さは小さい結果となった。養生後の静置において早強ポルトランドセメントを使用した供試体の強度が増進⁴⁾し、

含浸経路に相当する空隙が減少した可能性がある。なお、縦軸に着目すると、早強ポルトランドセメントを使用した場合も -10°Cで平均約 9mm 含浸しており、低温の影響は小さいと言える。

3. まとめ

寒中コンクリートとして作製した供試体 (100mm×100mm×200mm) に北海道開発局道路設計要領の基準¹⁾を満たす無溶剤系 3 製品を塗布し、含浸深さを調べた。その結果、下記の知見を得た。

- (1) 表面水分率 5.5~6.5%程度、静置温度 -10~20°Cでは含浸に及ぼす温度の影響は小さい。
- (2) 普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べ、早強ポルトランドセメントを使用すると、含浸深さは小さくなる場合がある。

平成 29 年度は、低温下での含浸に及ぼす供試体寸法や表面水分率の影響を調べる予定である。

参考文献

- 1) 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」
- 2) 土木学会: 表面保護工法設計施工指針 (案) [工種別マニュアル編], コンクリートライブラリー119, p.162, 2005.4
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], p.162
- 4) 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.9, 1999

8.3 凍害・複合劣化等への耐久性の高い更新・新設技術の確立

8.3.2 コンクリートの凍害・複合劣化に共通する耐久性向上技術に関する研究（要求性能）1

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：島多昭典、安中新太郎、菊田悦二、嶋田久俊、林田宏、内藤勲、吉田行、遠藤裕丈、野々村佳哲

【要旨】

積雪寒冷環境下における複合劣化に対する耐久性の高い更新・新設技術の確立と対策の体系化を目標として、凍塩害複合環境下のコンクリートの要求性能と評価試験方法の関係を解明し、その対策と評価試験方法を提案する。平成 28 年度は、水セメント比や空気量がスケーリングに与える影響と、スケーリング抵抗性を評価する試験方法について各種試験を実施した。その結果、微細で良質な空気量が多いほどスケーリング劣化が抑制されることがわかった。また、異なるスケーリング劣化促進試験方法でも統一的に評価できる可能性があることを確認した。

キーワード：凍害、複合劣化、スケーリング抵抗性、空気量、促進試験

1. はじめに

積雪寒冷地の社会インフラには、凍害や各種複合劣化（凍害と塩害、ASR、疲労、摩耗）により、健全性が著しく低下している事例が多い。このため、各種コンクリート構造物（橋梁、河川構造物、沿岸構造物、農業水利施設等）に共通する耐久性向上技術を開発し、効果的に適用していくことが必要である。本研究では、複合劣化に対する耐久性の高い更新・新設技術の確立と対策の体系化に向けて、凍塩害複合環境下におけるスケーリングの抑制対策と評価試験法の提案を目的として、各種検討を行った。

2. 凍塩害複合劣化を模擬した促進試験法の検討

近年、積雪寒冷地では、塩化物系凍結防止剤等により凍害が促進されて生じるスケーリング劣化が顕在化している。スケーリングは、鉄筋までのかぶりコンクリートを減少させるとともに、コンクリート表層に微細なひび割れが生じれば、塩化物イオンの浸透を速めることにもつながるため対策が必要である。また、現状においては、スケーリング抵抗性を評価する標準的な試験法が確立されておらず課題となっている¹⁾。そこで、本研究では、スケーリング抑制対策としての水セメント比の低減や空気量増加の効果を、異なる二つのスケーリング試験法により評価した。

2.1 実験概要

2.1.1 使用材料および配合

セメントは、土木での使用実績が高く、普通ポルトランドセメントに比べて、塩分浸透に対する抵抗性は高いが、凍結融解作用によるスケーリング劣化が低いとされる高炉セメント B 種（密度 3.05g/cm^3 、比表面積 $3,750\text{cm}^2/\text{g}$ 、以下、記号 B）を用いた。細骨材は、苫小牧樽前産の海砂（密度 2.70g/cm^3 、吸水率 0.90% 、粗粒率 2.82 ）を、粗骨材は、小樽市見晴産砕石（密度 2.68g/cm^3 、吸水率 1.72% 、粗骨材最大寸法 25mm ）を用いた。また、スランプと空気量を調整するために、AE 減水剤（リグニンスルホン酸塩系）と AE 助剤（樹脂酸塩系）を用いた。コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は 55% を中心に、一部 45% と 65% でも試験を実施した。目標空気量は 3.0% を下限として、 1.5% 刻みで 7.5% まで 4 水準、目標スランプは $8.0\pm 2.5\text{cm}$ に設定したが、単位水量を全配合で統一したため、目標空気量が多いケースではスランプの実測値が一部目標管理範囲より大きかった。

2.1.2 実験項目と供試体

凍結融解作用によるスケーリング抵抗性を評価するた

表-1 配合

記号	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				AE 減水剤 C×%	AE 助剤 C×%	実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G				
B45A30	45	3.0	43	155	344	815	1073	0.20	0.00250	8.7	2.9
B45A45		4.5				798	1050	0.20	0.00500	10.0	4.1
B55A30	3.0	45	282		878	1066	0.10	0.00375	9.1	2.7	
B55A45	4.5				860	1045	0.05	0.01000	9.1	4.6	
B55A60	6.0	842			1022	-	0.01625	9.5	6.0		
B55A75	7.5	824			1001	-	0.02500	10.7	7.6		
B65A45	4.5	47			238	916	1026	-	0.01000	8.2	4.6
B65A60	6.0					897	1005	-	0.01625	11.9	6.5

めの促進試験法については、現状ではJISに規定されておらず、RILEM CDF法やASTM C672により検討されることが多いため、これら二つの試験法によりスケーリング抵抗性を評価した。

ASTM法では、 -18°C を16時間、 23°C を8時間の1日1サイクルで凍結融解作用を与えた。供試体は、 $220 \times 220 \times 100\text{mm}$ の角柱供試体を用い、1配合当たり3供試体で評価した。供試体の養生は、凍結融解試験として一般的に実施されているJIS A 1148 A法と同様に材齢28日まで水中養生を行った。試験面は打設面($220 \times 220\text{mm}$)とし、試験面には土手を設けて3%NaCl水溶液を湛水した。

CDF試験では、 $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C まで10K/hの定速で4時間冷却し、 -20°C を3時間保持後、同じ定速で 20°C まで4時間加熱した後、 $+20^{\circ}\text{C}$ 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、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を中央で切断したものを用い、1配合当たり2供試体で評価した。供試体の養生は、材齢7日まで 20°C 水中養生を行い、その後材齢28日まで温度 20°C 、相対湿度60%の恒温恒湿室内で気中養生した。その後、試験面(打設面)に3%NaCl溶液を7日間吸水させてから試験を開始した。試験面はASTM法と同様に打設面とし、スケーリング量は、凍結融解6、14、28、56サイクルで測定した。

また、一般的な物性として、圧縮強度を材齢7日と28日で測定した。また、試験面の表面強度を把握するため、 $220 \times 220 \times 100\text{mm}$ 角柱供試体の打設面で、1配合当たり2供試体(各2カ所)で建研式引張試験器により表面接着強度試験(接着治具面積 $40 \times 40\text{mm}$)を材齢28日に行った。なお、供試体の養生は、いずれも各試験材齢まで 20°C 水中養生とした。

併せて、硬化コンクリートの気泡組織を把握するため、リニアトラバース法による気泡分布測定を行った。

2.2 試験結果および考察

2.2.1 圧縮強度と試験面の表面接着強度

図-1に材齢7日と28日の圧縮強度を示す。横軸の数値は目標空気量を示している。いずれの材齢においても、水セメント比が小さく空気量が少ないほど圧縮強度が大きいことが確認できる。図-2に試験面の表面接着強度を示す。水セメント比(W/C)45%で表面強度は大きかったが、W/C=55%と65%で強度に大きな差はなかった。また、W/C=55%では、空気量が少ないほど表面接着強度が高くなる傾向が概ねみられたが、それ以外のW/Cでは、空気量が多いほど接着強度も大きくなっており、

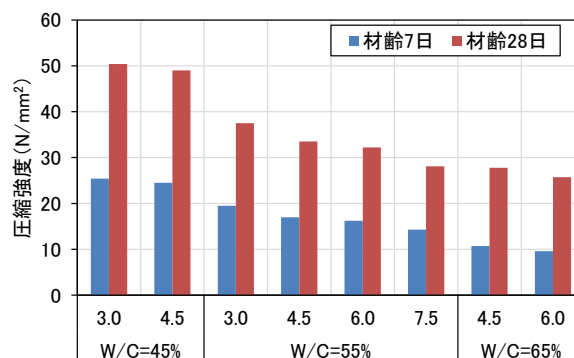


図-1 圧縮強度

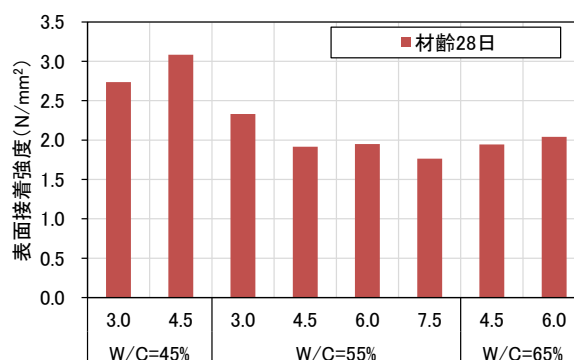


図-2 表面接着強度

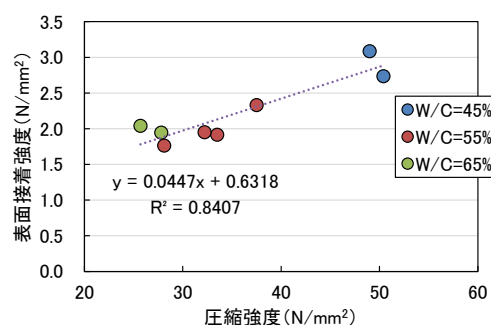


図-3 圧縮強度と表面接着強度の関係

空気量の多少が表面接着強度に及ぼす明確な傾向は確認できなかった。図-3に材齢28日における圧縮強度と表面接着強度の関係を示す。全体としてみると、圧縮強度が大きいほど表面接着強度も大きくなる傾向が確認できる。

2.2.2 各試験法によるスケーリング量と強度の関係

図-4にASTM法によるスケーリング量と凍結融解サイクルの関係を示す。凡例の記号は表-1に示した通りである。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、特に目標空気量3% (記号A30)でスケーリング量は増加したが、いずれの水セメント比においても空気量の増加によりスケーリング量は減少する傾向を示

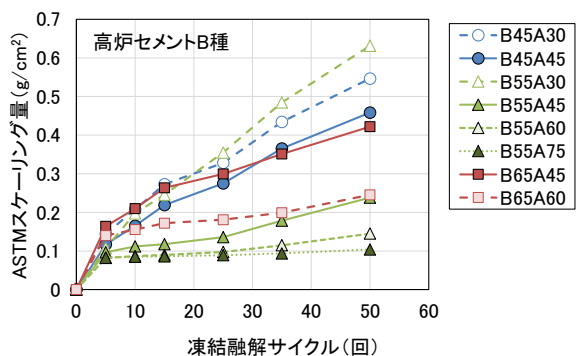


図-4 ASTM 法によるスケーリング試験結果

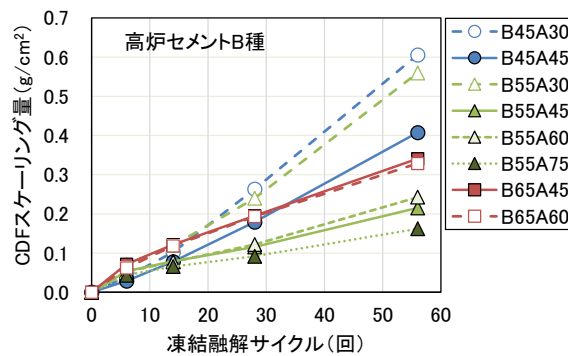


図-5 CDF 法によるスケーリング試験結果

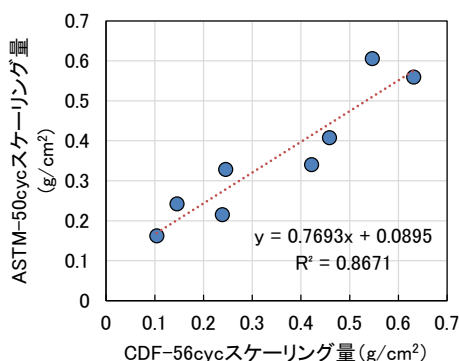


図-6 ASTM 法と CDF 法のスケーリング量の関係

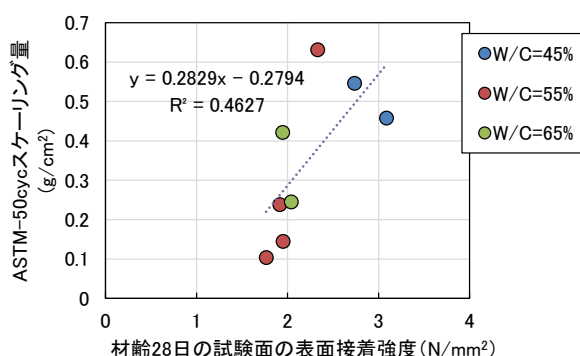


図-7 表面接着強度と ASTM 法スケーリング量の関係

した。一方、水セメント比で比べると、同じ空気量では水セメント比 65%よりも 55%の方がスケーリング量は減少したが、本試験においては水セメント比 45%のスケーリング量が同じ空気量の条件で最大となり、水セメント比の低下による抑制効果²⁾が確認できなかった。

図-5 に CDF 法によるスケーリング量と凍結融解サイクルの関係を示す。水セメント比 65%では空気量による差がないものの、概ね ASTM 法によるスケーリング量と同様の傾向であり、目標空気量 3%のスケーリング量が大きく増加したが、空気量の増加によりスケーリング量は低下する傾向を示した。

図-6 に ASTM 法の凍結融解 50 サイクル後のスケーリング量と CDF 法の凍結融解 56 サイクル後のスケーリング量の関係を示す。今回の試験では試験開始前の養生が異なっているが、両者には良い相関があり、異なる試験法でも統一的に評価することができる可能性が示唆された。

図-7 に材齢 28 日における試験面の表面強度と凍結融解 50 サイクル後の ASTM 法によるスケーリング量の関係を示す。表面強度が高いほどスケーリングは抑制されると考えられるが、本研究においては、両者に強度が高いほど圧縮強度は増加する傾向となった。

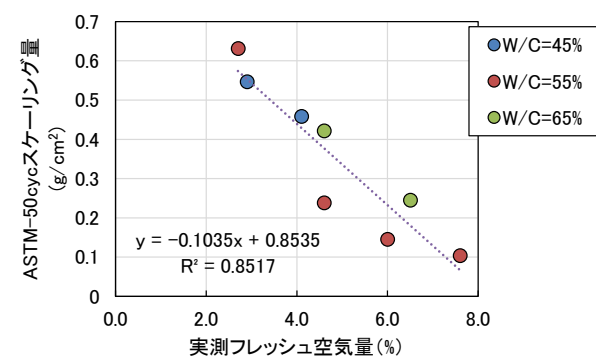


図-8 練上がり空気量と ASTM 法スケーリング量の関係

2.2.3 スケーリング量と空気量の関係

図-8 に練上がり時のフレッシュコンクリートの実測空気量とスケーリング量の関係を示す。水セメント比によらず、空気量とスケーリングには良い相関があり、空気量が多いほどスケーリングは抑制される傾向が確認できる。

図-9 は硬化コンクリートで測定した気泡間隔係数とスケーリング量の関係を示しているが、気泡間隔係数が小さいほどスケーリング量は減少する傾向があり、本研究の範囲では、良質な空気量の確保が、塩分供給下での凍結融解作用によるスケーリング劣化を抑制できた主要

因であったと考えられる。

3. まとめ

- (1) 微細で良質な空気量が多いほど、塩分供給下での凍結融解作用によるスケーリング劣化が抑制されることがわかった。
- (2) 異なるスケーリング劣化促進試験方法でも統一的に評価できる可能性があることを確認した。
- (3) 本研究においては、水セメント比の低下が必ずしもスケーリングの抑制につながらなかったため、その原因に関するより詳細な検討とともに、スケーリング劣化の標準的な促進試験法について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書設計編、pp.157-160、2013.3
- 2) 遠藤裕丈、田口史雄、嶋田久俊：塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けたコンクリートのスケーリング特性、土木学会論文集、No.725/V-58、pp.227-244、2003.2

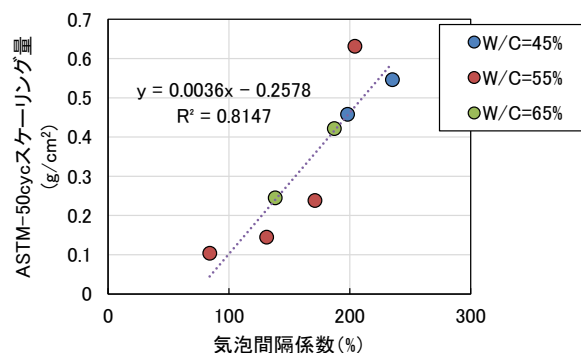


図-9 気泡間隔係数とスケーリング量の関係

8.3 凍害・複合劣化等への耐久性の高い更新・新設技術の確立

8.3.3 コンクリートの凍害・複合劣化に共通する耐久性向上技術に関する研究（要求性能）2

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：古賀裕久、片平博

【要旨】

寒冷地の沿岸地域や凍結防止剤散布地域では、凍害によるコンクリート構造物のスケーリング劣化が問題となっている。スケーリング抵抗性を簡易に評価できる試験手法について検討を行っている。平成 28 年度は、細骨材の種類、練り上がりの空気量、振動締固め時間を実験要因として、塩水を用いたスケーリング抵抗性の試験を実施した。この結果、空気量が多い配合ほどスケーリング量は小さくなるが、特に微細な空気量と良い対応を示すこと、微細な空気は振動締固めで抜けにくいこと、細骨材の品質もスケーリング量に大きな影響を与えること等が分かった。これらの結果をもとに、スケーリング抵抗性を評価するための試験方法のイメージを構築した。
キーワード：凍結防止剤、スケーリング抵抗性、棒状バイブレータ、細骨材の品質

1. はじめに

コンクリートの凍結融解抵抗性に関しては、古くから様々な研究が行われている。その結果、コンクリート中に 4.5%程度の空気量を混入することで高い耐久性が得られることが分かっており、適切な配合設計がなされている¹⁾。しかしながら近年、沿岸部や凍結防止剤散布箇所の構造物において、コンクリート中に浸透した塩化物イオンが凍結融解による劣化作用を促進させ、それによるスケーリング劣化が問題となっている。

このスケーリング劣化に対しては、単に空気量のみならず、気泡の分布形態が大きな影響を及ぼすという研究報告²⁾があり、解明が進んでいるが、研究実績としては必ずしも十分とはいえない状況と考える。

一方、コンクリート中の空気量は一般的には JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」によって測定されている。この試験方法では、エアメータ内に詰め込んだコンクリートのスランプが 8cm 以上の場合は、締固めは突き棒によって行うよう定められている。一方で、構造体へのコンクリートの打ち込みには棒状バイブレータが用いられており、この振動締固めによって構造体中のコンクリートの空気量は JIS A 1128 の方法による測定値よりも低下することが知られている²⁾。

これらのことから、振動締固めを行ったコンクリートのスケーリング抵抗性を簡易に求めるための試験方法の検討を行うものである。

平成 28 年度は、細骨材の種類、練り上がりの空気量、

振動締固め時間を実験要因として、真水または塩水を用いたスケーリング抵抗性の試験を実施した。また、硬化後の供試体に対してリニアトラバース法による気泡分布の測定を実施し、気泡分布の特性と、これがスケーリング抵抗性に与える影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 コンクリート供試体の作製

平成 28 年度の実験では、表-1 に示すように、コンクリートに用いる細骨材の種類を 3 種類、練上りの目標空気量を 3 水準設定してコンクリートを練り混ぜた。コンクリートの使用材料を表-2 に、コンクリートの標準的な配合を表-3 に示す。表-3 の配合を基本として、AE 助剤の量を変えることで、目標空気量を 3、5 および 7% にそれぞれ調整した。

練り上がったコンクリートは、スランプ試験 (JIS A 1101) と空気量試験 (JIS A 1128) を実施後、100×100×400mm の鋼製型枠に詰めて、JIS A 1132 に従って、突き棒による突き固めで供試体を作製した。また、表-1 に示すように、振動を 3 秒または 10 秒与えたコンクリートについても同様に供試体を作製した。振動の与え方としては、エアメータの容器内にコンクリートを詰め、そこに棒状バイブレータを挿入して振動を 3 秒または 10 秒与え、そのコンクリートをいったんエアメータ容器から取り出して、その試料を角柱型枠に詰め、最後は突き棒による突き固めで供試体を作製した。なお、エアメータ容器で、振動を 3 秒または 10 秒与えた状態で空気量

も測定した。

表-1 実験要因

細骨材の種類	3種類
練上り空気量(%)	3, 5, 7(%)
振動時間(秒)	0, 3, 10(秒)

表-2 使用材料

水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント、密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	A: 石灰砕砂、絶乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.61% B: 川砂(標準)、絶乾密度 $2.53\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 1.60% C: 川砂(低品質)、絶乾密度 $2.45\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 3.95%
粗骨材	硬質砂岩、最大寸法 20mm 、絶乾密度 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.50%
AE減水剤	標準型(I類) リゲニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
AE助剤	AE剤(I類) 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-3 コンクリート配合(細骨材B使用、目標空気量5%)

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				化学混和剤 (ml/m^3)	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤
55	45	5.0	171	311	788	999	778	6

角柱供試体は条件ごとに4本ずつ作製した。また、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体も1本ずつ作製した。作製した供試体は翌日に脱型し、材齢28日まで水中養生を行った。

角柱供試体4本に対しては2.2の凍結融解試験を実施した。円柱供試体1本は2.3の気泡分布の測定に用いた。

2.2 凍結融解試験方法

凍結融解試験の方法としては、JISA 1148 コンクリートの凍結融解試験方法のA法(水中凍結水中融解法)に従って実施した。なお、JISA 1148の方法では、ゴム容

器内にコンクリート供試体を格納したうえで、ゴム容器と供試体との間の空間を水(以下、真水という)で満たして試験を行うが、真水を入れる実験とは別に3%NaCl水溶液(以下、塩水という)を入れることで、塩分環境下の凍結融解の条件を模した試験も行った。

真水の試験、塩水の試験とも供試体2本に対して実施した。凍結融解は300サイクルまで行い、数サイクルごとに供試体をゴム容器から取り出し、質量減少率を測定した。スケーリング抵抗性はこの質量減少率で評価することとした。

2.3 気泡分布の測定方法

円柱供試体は、高さ方向の2箇所を切断し、その切断面を研磨した。この切断面($\phi 100\text{mm}$ 、2面)に対して、ASTM C 457に従って、リアトラバース法による気泡分布の測定を行った。測定結果から、気泡の粒子径ごとの空気量を求めた。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ時の空気量

フレッシュ時に測定した空気量を図-1に示す。練り上がりの目標空気量は3、5および7%であり、これに対して振動を3秒または10秒与えることで空気量は減少した。なお、練上り空気量が3%のものに振動を10秒与えた場合、空気量は約1/3程度まで低下したのに対して、空気量7%のものに振動を10秒与えた場合の空気量は1/2程度までの減少に留まっており、練り上がりの空気量が多いほど、空気量の減少率は小さくなる傾向を示した。

なお、これらの傾向について、細骨材の違いによる差は、認められなかった。

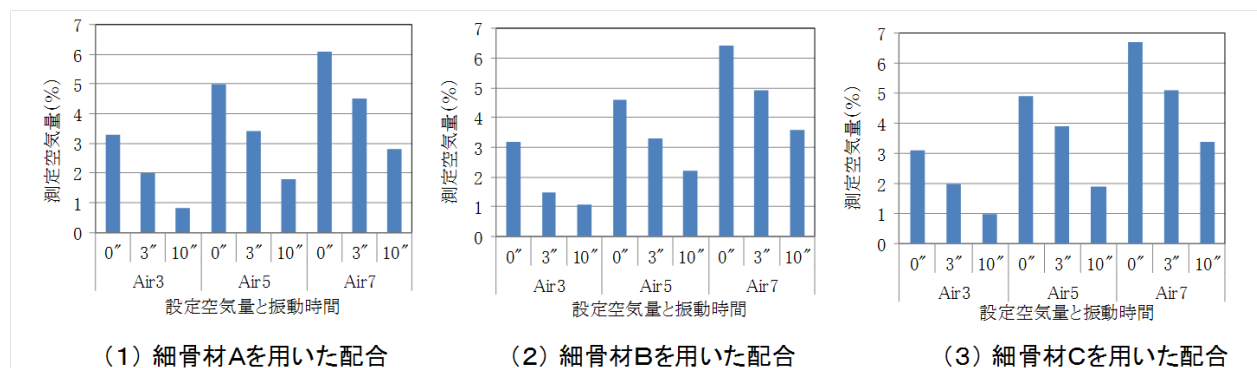
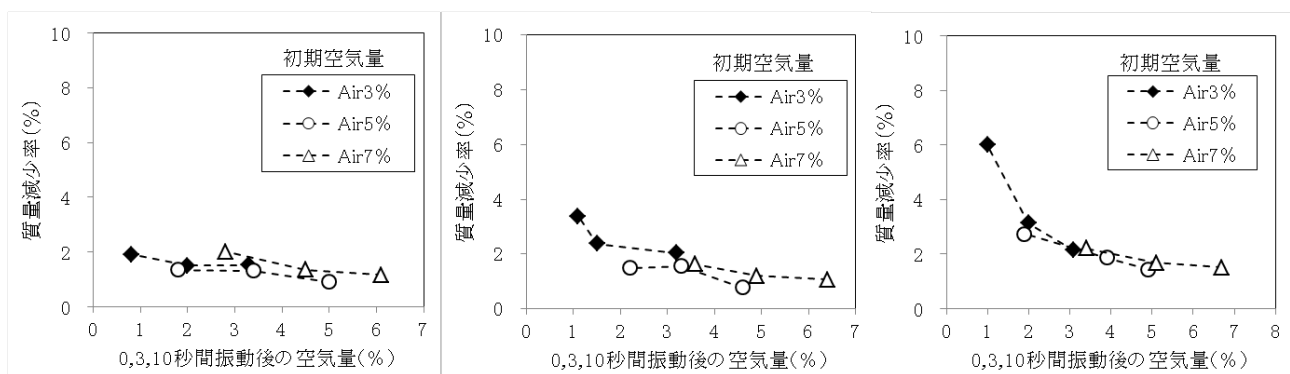
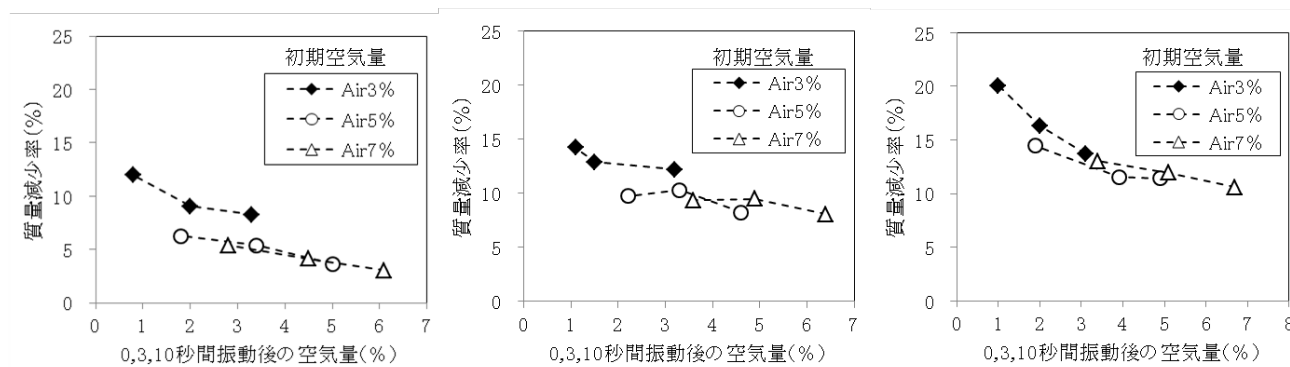


図-1 フレッシュ時に測定した空気量



(1) 細骨材Aを用いた配合 (2) 細骨材Bを用いた配合 (3) 細骨材Cを用いた配合

図-2 空気量と質量減少率の関係(真水の試験、300サイクル)



(1) 細骨材Aを用いた配合 (2) 細骨材Bを用いた配合 (3) 細骨材Cを用いた配合

図-3 空気量と質量減少率の関係(塩水の試験、100サイクル)



(1) 質量減少率3% (2) 質量減少率10% (3) 質量減少率16%

写真-1 供試体の表面の状況

3.2 凍結融解試験結果

図-2は、真水の凍結融解試験の結果として、300 サイクル時点の質量減少率を、フレッシュ時の空気量(0、3、10 秒間振動後の空気量)と比較したものである。これによれば、空気量が多いほど、質量減少率は僅かながら小さくなる傾向を示し、練り上がりの設定空気量に関係なく、0、3、10 秒間振動後の空気量と質量減少率とは良い対応関係を示した。また、細骨材の違いについては、細骨材Cで空気量が2%以下の領域で質量減少率がやや大きかったものの、それ以外の質量減少率の値は小さ

かった。

図-3は、塩水の試験結果として100 サイクル時点の質量減少率とフレッシュコンクリートの測定空気量との関係を示したものである。塩水の試験も300 サイクルまで実施したが、サイクルが進むにつれて、質量減少率の増加が緩慢となる傾向を示した。これは、質量減少率が大きくなると、供試体を格納するゴム容器内に入れる水(塩水)の量が多くなり、水の比熱はコンクリートよりも大きいことから、十分な凍結融解作用が与えられなくなっていることが一因として考えられる3)。このため、図-3では100 サイクル時点での質量減少率を示した。真水を用いた試験結果(図-2)と比較すると、サイクル数が1/3であるにもかかわらず、質量減少率は非常に大きな値を示した。参考に、質量減少率が3、10、16%程度となった供試体の表面を写真-1に示す。

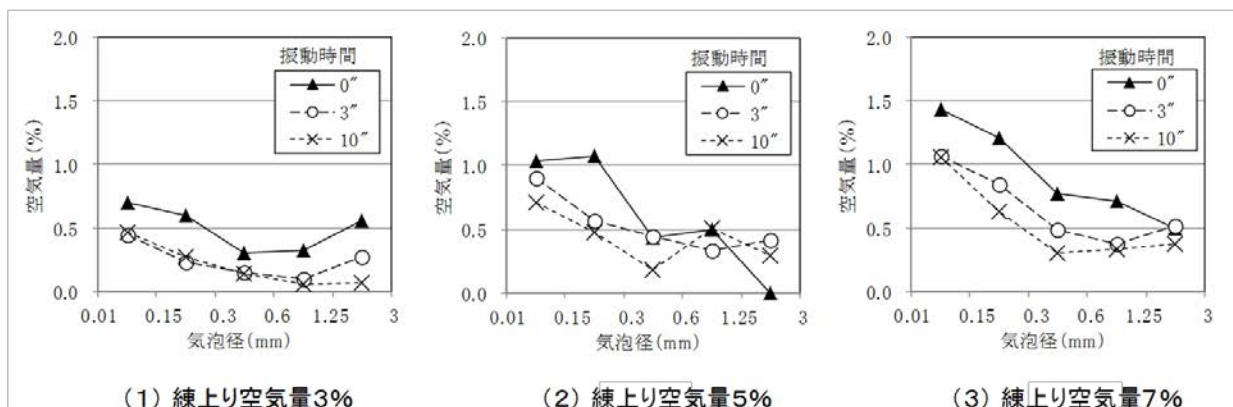


図-4 気泡径の分布(細骨材Bを用いた配合)

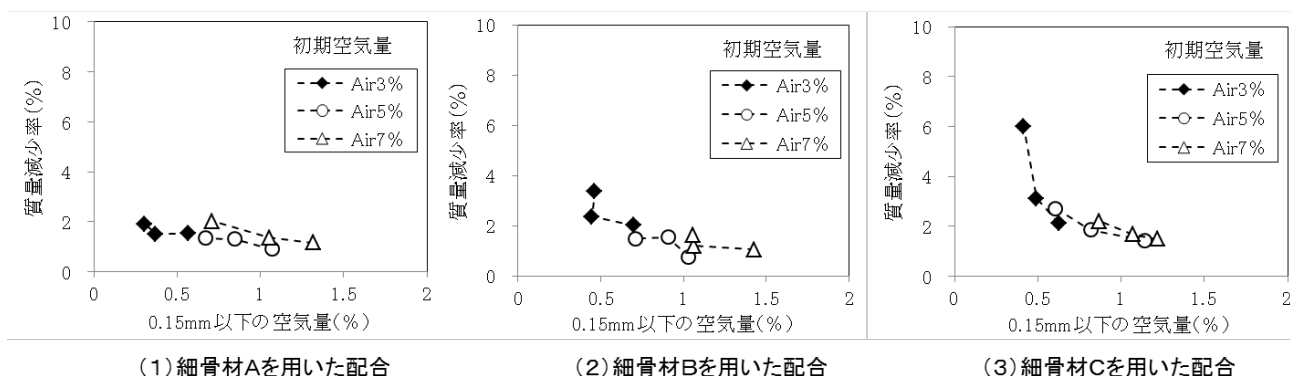


図-5 0.15mm以下の空気量と質量減少率の関係(真水の試験、300サイクル)

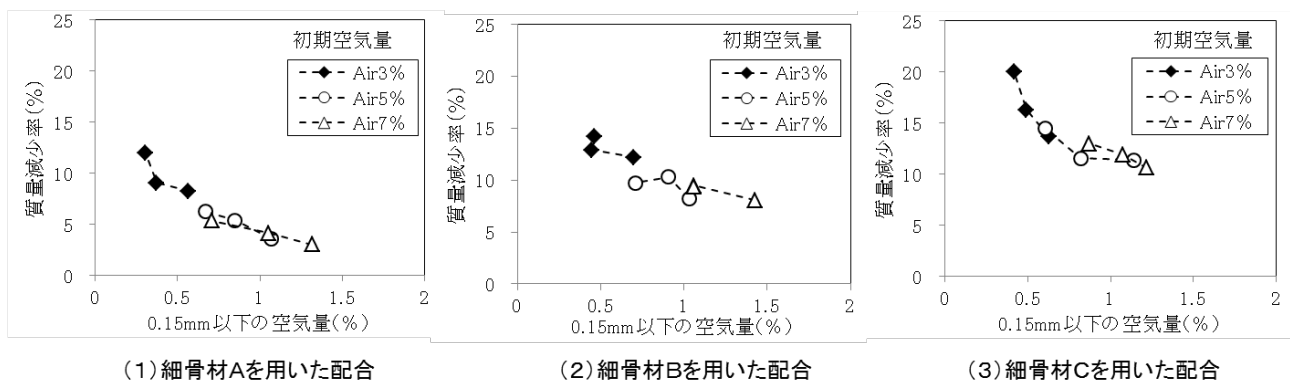


図-6 0.15mm以下の空気量と質量減少率の関係(塩水の試験、100サイクル)

空気量と質量減少率との関係としては、図-2と同様に、空気量が大きくなるほど、質量減少率がやや小さくなる傾向を示したが、練り上がりの設定空気量が3%の質量減少率(図中の◆)だけ、5または7%のものと同傾向が異なり、質量減少率が大きな値となった。また、細骨材の違いによる質量減少率の差は大きく、空気量が4~7%の範囲でみると、細骨材Aに対して細骨材Cを用いた配合の質量減少率は約3倍に達した。

3.3 気泡径分布の測定結果

気泡分布の測定結果から、気泡径の範囲ごと(0.01~0.15mm、0.15~0.3mm、0.3~0.6mm、0.6~1.2mm、1.2~3mm)の空気量を求めた。細骨材Bを用いた配合の分布図を図-4に示す。なお、細骨材AとCを用いた配合も概ね同様の傾向であった。まず、振動締め0"の場合、初期設定空気量が高いものほど、小さな径の空気量が多くなる傾向を示した。これに対して振動を3"、10"

と与えると、空気量は減少する傾向を示すが、小さな径の空気量は比較的抜けにくい傾向が確認できた。

そこで、0.15mm以下の空気量に着目して、凍結融解試験から得られる質量減少率との関係を見ると図-5および図-6のようであり、真水の試験結果、塩水の試験結果ともに、0.15mm以下の空気量と質量減少率とは良い対応関係を示した。ただし、塩水の試験の場合、細骨材の品質の違いによる影響は、やはり大きいことが確認できた。

4. 評価試験方法の検討

平成28年度の試験結果をもとに、沿岸部や凍結防止剤散布地域での、耐凍害性（スケーリング抵抗性）を簡単に評価するための試験方法について、そのイメージを検討した。

スケーリング劣化に対しては、微細な空気量の確保が重要であることが分かった。また、微細な空気は振動締固めによっても比較的抜けにくいことが分かった。そこで、図-7に示すように、JISA 1128によって空気量試験を行う際、振動パイブレッタによって所定の振動を与え、その後の空気量を測定することで、スケーリング抵抗性に有効な微細な空気量を多く含む配合であるか否かを判定できるのではないかと考える。

また、細骨材の品質もスケーリング量に大きな影響を与えることも分かった。このため、スケーリング劣化の環境の厳しい地域では、骨材品質の見直しも必要ではないかと考える。

5. まとめ

- (1) 空気量が多い配合ほどスケーリング量は小さくなるが、特に微細な空気量と良い対応関係を示した。
- (2) 微細な空気は振動締固めで抜けにくい傾向を示した。
- (3) 細骨材の品質もスケーリング量に大きな影響を与える結果が得られた。
- (4) スケーリング抵抗性を評価するための試験方法のイメージを構築した。

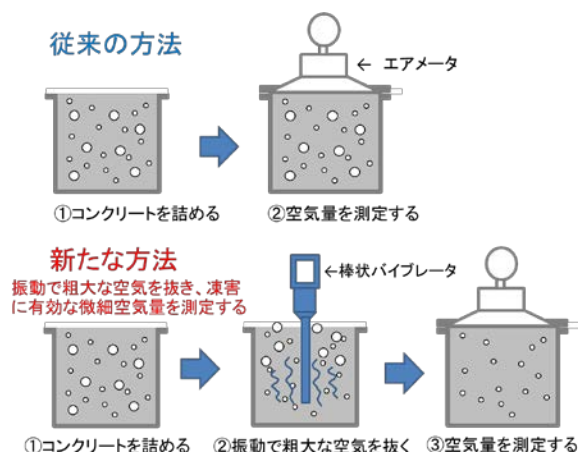


図-7 新たな空気量測定試験方法のイメージ

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [設計編]、土木学会、2012.12
- 2) コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究会報告書、日本コンクリート工学会、2016.6
- 3) 片平博、古賀裕久：振動締固めが凍結融解・スケーリング抵抗性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、pp.999-1004、2016.7

8.3 凍害・複合劣化等への耐久性の高い更新・新設技術の確立

8.3.4 凍上・凍結融解を受ける舗装や切土のり面の耐久性向上技術に関する研究(切土のり面)

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地地盤）

研究担当者：林憲裕、佐藤厚子、野上敦、久慈直之

【要旨】

寒冷地域における切土のり面は、凍結および融解作用を繰り返すことにより、表層のゆるみや小段排水工の損傷が多く確認されていることから、凍上対策技術の確立が急務である。

平成28年度は、小段排水工の新技術である「立体網状スパイラル構造排水材」の効果を確認するため、試験施工および計測調査（地中温度、変位等）を開始した。また、切土のり面の安定化を図る目的で設置している特殊ふとんかごと断熱材を組み合わせた試験施工を実施している現場において、地中温度・凍結深さを計測し凍上抑制効果について確認した。

キーワード：凍上、凍結融解、小段排水溝、特殊ふとんかご、断熱材

1. はじめに

寒冷地の道路や切土のり面の小段に施工されるU型排水溝は、寒冷地特有の問題である凍上現象や凍結融解現象により損傷し、排水機能が低下していることが北海道内各地から報告されている¹⁾。寒冷地における道路排水溝の凍上対策については様々な研究や試験がされてきたが、決定的な凍上対策工法はまだ確立されていないのが現状である。今年度は、凍上現象により排水機能が低下した道路排水溝を補修する現場において、のり面の排水材料として実績のある²⁾「立体網状スパイラル構造排水材」を用いた排水溝を試験施工し、計測調査を開始した。

また、切土のり面は時間経過とともに風化、侵食等の影響を受けることになる。特に寒冷地域においては凍結および融解作用を繰り返すことにより表層部がゆるみ切土のり面が不安定となるため、迅速かつ確実に安定化させることが重要な課題となっている³⁾。そこで、切土のり面の安定化を図る目的で「断熱材を併用した特殊ふとんかご」を施工した現場で、地中の温度、凍結深さを計測した。

2. 立体網状スパイラル構造排水溝の試験施工

2.1 試験方法

立体網状スパイラル構造排水溝の試験施工は2箇所を実施し、比較のためのU型排水溝も併せて道路に施工した。各試験施工箇所の状況を写真-1に示す。各排水溝は厚さ3cmの敷砂と切込材80mm級を使用した厚さ10cmの基礎材の上に設置し、雨水枠で接続して排水機能

を確保した。なお、立体網状スパイラル構造排水溝の側面及び底面には防水シート（厚さ1.2mm）を敷設した。各排水溝の断面図を図-1、配置図を図-2にそれぞれ示す。また、各施工箇所の土質については粒度分布の凍上性判定⁴⁾より、凍上しやすい土質であることを確認した。なお、立体網状スパイラル構造排水溝は2種類の網状スパイラル構造材を組み合わせて製作したものであり、構造材の物性を表-1、立体網状スパイラル構造排水溝を写真-2にそれぞれ示す。



試験施工箇所①



試験施工箇所②

写真-1 各試験施工箇所の状況

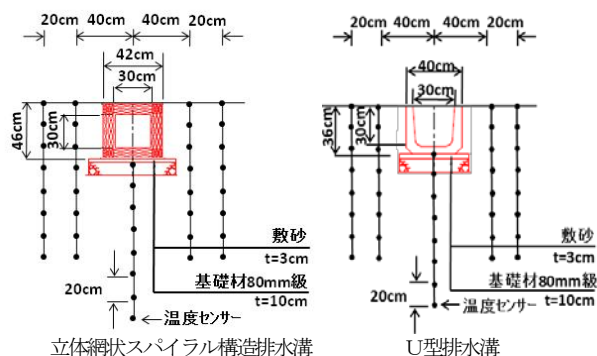


図-1 各排水溝の断面図

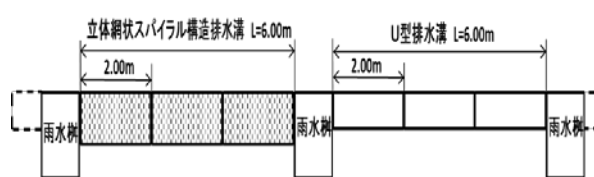


図-2 配置図

表-1 立体網状スパイラル構造材の物性⁵⁾

材質	ポリプロピレン
重量(kg/m)	2.1
空隙率(%)	87

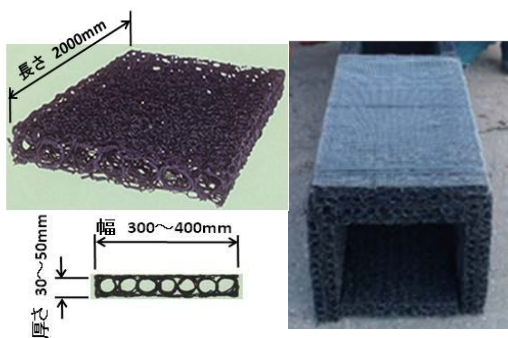


写真-2 立体網状スパイラル構造排水溝

各排水溝に温度センサーを図-1に示すように5箇所設置し、1箇所につき地表面から深さ140cmまで20cm間隔で1時間ごとに自動計測した。計測期間は平成28年12月から平成29年5月までとした。また、各排水溝の変位を確認するため天端高、天端幅および横断方向の傾斜を計測した。計測箇所は各排水溝とも雨水桝に接続していない中間部の排水溝において2箇所とし、天端高は4箇所測量、天端幅は定規にて2箇所、傾斜はスランートルールにて2箇所計測した。各排水溝の計測箇所の詳細について図-3に示す。計測期間は平成28年12月から平成29年3月までは月2回、4月および5月は月1回計測した。

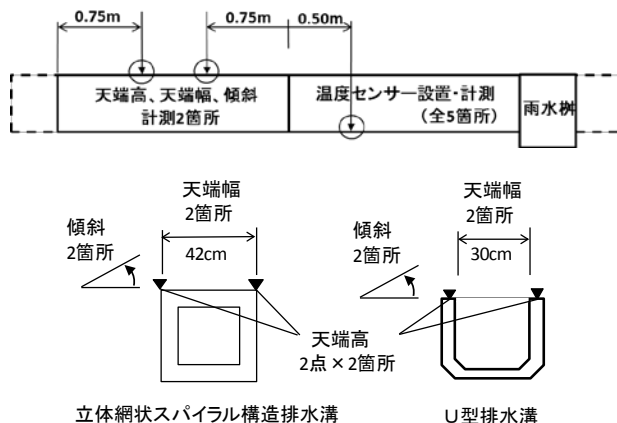


図-3 各排水溝の計測箇所

2.2 試験結果

各施工箇所の外気温の平均値と凍結指数を図-4に示す。また各排水溝の凍結深さの推移について平成28年12月から平成29年3月までの毎月10日の凍結深さを図-5に示す。各排水溝ともに12月から3月までの期間に凍結が発生していることが確認出来た。また、凍結深さの推移は施工箇所①は排水溝中心にほぼ左右対称に凍結が発生し、施工箇所②は各排水溝とも道路側より山側(道路の反対側)の凍結深さが小さかった。これは、施工箇所①は外側(道路の反対側)が平地のため排水溝に外気が入り易く、施工箇所②は排水溝が切土のり面に近接していることから、山側からの外気の入り方は小さくなるためと考えられる。次に各施工箇所における各排水溝の天端高の変位を図-6、天端幅の変位を図-7、傾斜の変位を図-8にそれぞれ示す。天端高は立体網状スパイラル構造排水溝が4~6cm程度、U型排水溝は2~4cm程度の変位を確認したが、外気温がプラスとなる3月下旬より各排水溝とも変位が減少することを確認出来た。天端幅の変位は、立体網状スパイラル構造排水溝が気温の低くなる1月から3月上旬にかけて1cm程度小さくなったが、U型排水溝の天端幅はほとんど変位しなかった。また傾斜については立体網状スパイラル構造排水溝が最大で3度傾いたが、3月中旬から変位は減少して当初の形状に近づくことが確認出来た。これは、立体網状スパイラル構造排水溝が周面からの地盤の変動に対して、追従が可能な構造によるものと考えられる。U型排水溝の傾斜の変位は最大で1度となった。また、各排水溝の傾斜方向については施工箇所①が道路側に、施工箇所②が山側に傾いた。これは、各排水溝の凍結深さの推移の結果で述べたように、各施工箇所の地形の違いより外気の入りの大きさが異なることによるものと考えられる。なお、各排水溝とも雨水桝接続部および排水溝継目箇所

における損傷やクラックの発生は現時点で確認されなかった。

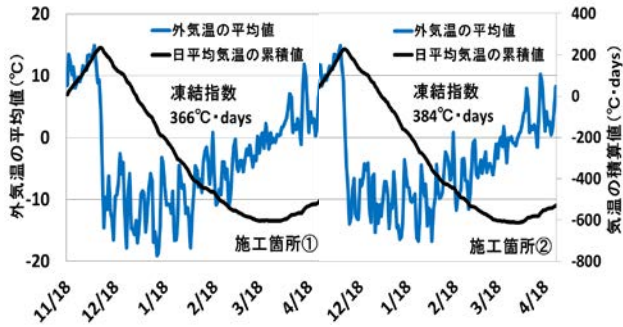


図-4 各施工箇所の外気温の平均値と凍結指数

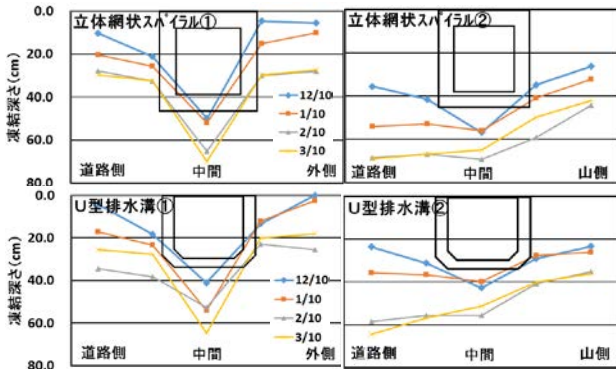


図-5 各排水溝の凍結深さの推移

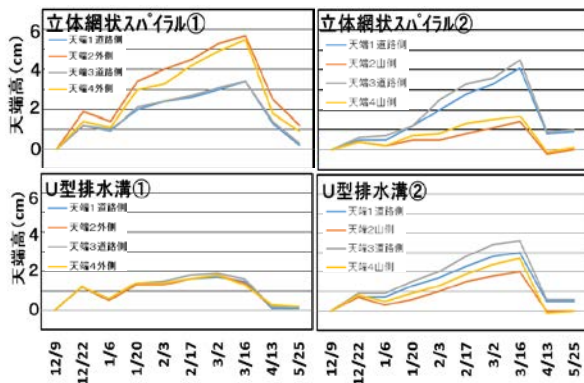


図-6 各施工箇所における各排水溝の天端高の変位

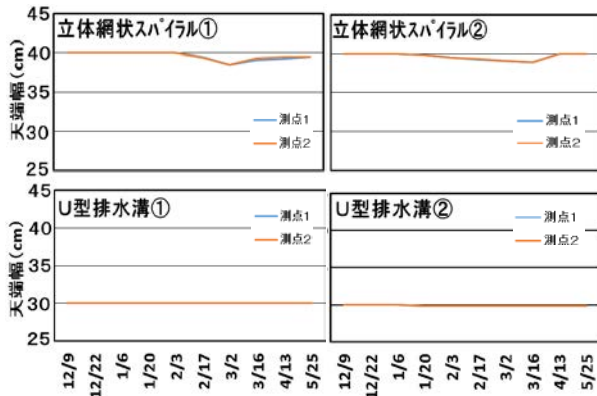


図-7 各施工箇所における各排水溝の天端幅の変位

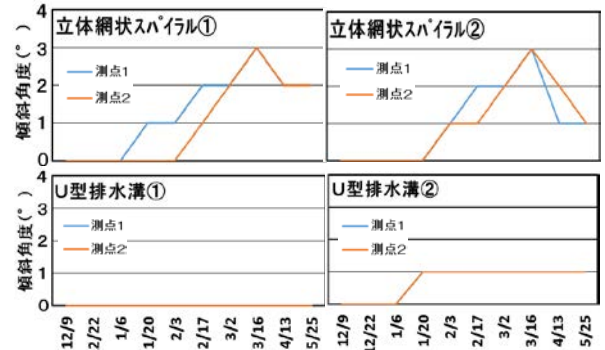


図-8 各施工箇所における各排水溝の傾斜の変位

2. 3 まとめ

道路排水溝の凍上対策として、立体網状スパイラル構造排水溝を試験施工し凍結深さや排水溝の変位を計測した。立体網状スパイラル構造排水溝は軽量かつ柔軟性があるため、U型排水溝と比較して変位は大きかった。また、1シーズンの短期間だが各排水溝とも雨水樹接続部および排水溝継目箇所の損傷は無かった。なお、立体網状スパイラル構造排水溝は軽量のため人力による運搬・設置が可能で施工性に優れていることも確認出来た。引き続き各試験施工箇所の地形条件を踏まえつつ、各排水溝の変位計測、継目箇所の状態および排水機能の確認を行い、立体網状スパイラル排水溝の凍上対策としての有効性について検証を進める。

3. 断熱材を併用した特殊ふとんかごの試験施工

3. 1 試験方法

試験施工箇所は、切土工事でのり面の安定性を図る目的として特殊ふとんかごを設置する現場であり、凍上による変状の可能性が予測されたことから、試験的に特殊ふとんかごに断熱材を併用し、地中の温度を計測して断熱効果を確認した。試験施工箇所の切土のり面の土質の基本物性値を表-2に示すが、非常に凍上しやすい土質である。特殊ふとんかごは、切土のり面からの排水を促しその重量により切土のり面の変状を抑制する工法として北海道で広く施工されている。しかし、厚さが25cmであることと中詰材が熱伝導率の高い砂利であることから、寒冷地では特殊ふとんかご下の地盤が凍結して切土のり面が変状することが懸念される。そこで、断熱材を併用した特殊ふとんかごを施工することにより切土のり面の凍上を抑制する工法を試験した。なお、この工法は既往研究⁶⁾において試験的に施工されたもので、過年度から継続観測を行っているものである。

次に、現地で施工した特殊ふとんかごの規格は標準タイプ 1000×250×2000mm で中詰材は切込材 80mm 級を使用し、勾配 1 : 1.5 ののり面に施工した。断熱対策として

特殊ふとんかごの下面に厚さ 50mm の断熱材を敷設した。断熱材は写真-3 に示すように透水性を有する発泡スチロールであり、その基本物性値を表-3 に示す。なお、断熱対策は特殊ふとんかごの上面に施工することが効果的であるが、断熱材は紫外線の影響を受けること、非常に軽量であることから特殊ふとんかごに密着しないことが考えられたので、特殊ふとんかごの下面に敷設した。

表-2 土質の基本物性 (熱物性値)

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.281
含水比 W_n (%)	39.90
熱伝導率 λ (W/m·K)	1.128
土質分類	砂質シルト



写真-3 透水性を有する断熱材

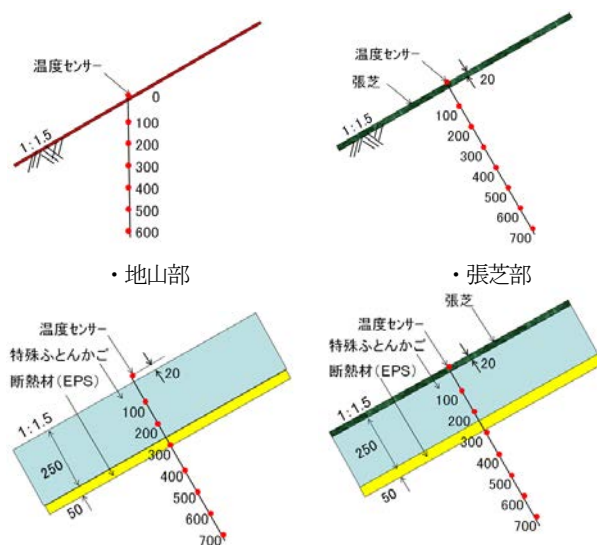
表-3 断熱材の基本物性値⁷⁾

密度 (kg/m ³)	25
空隙率 (%)	25
熱伝導率 λ (W/m·K)	0.039
透水係数 (cm/sec)	0.2

また、地山に張芝を施工した箇所、断熱効果を比較するため張芝を施工しない地山部も設定した。現地の状況について写真-4 に示す。以降、張芝のみの箇所を「張芝部」、断熱材の上に特殊ふとんかごを施工した箇所を「特殊ふとんかご+断熱材」、断熱材の上に特殊ふとんかごと張芝を施工した箇所を「張芝+特殊ふとんかご+断熱材」、何も施工していない箇所を「地山部」と称する。温度を計測した箇所の断面図を図-9 に示す。



写真-4 試験施工箇所の状況



・特殊ふとんかご+断熱材 ・張芝+特殊ふとんかご+断熱材

図-9 温度を計測した箇所の断面図 (単位 : mm)

地表面 (特殊ふとんかご上面より 2cm 上側) と地表面からのり面に対して垂直に深さ 70cm までの 10cm 間隔で全 8 カ所の温度をデータロガ (TR-71U) により 1 時間ごとに自動計測した。平成 28 年度冬期の計測値については整理中のため、本報告の計測期間は平成 27 年 12 月から平成 28 年 4 月までの冬期間である。また、地山部については地表面から鉛直に深さ 60cm までの 10cm 間隔で全 7 ヶ所の温度を 1 時間ごとに自動計測した。計測期間は前述と同様の理由から平成 27 年 12 月から平成 28 年 4 月である。なお、検討するにあたり 1 時間ごとの温度データを 1 日平均に換算して取りまとめた。また地山部については、のり面に対して垂直になるように深さを補正して温度データを取りまとめた。

3.2 試験結果

冬期間での積雪について、平成 27 年 12 月、平成 28 年 1 月および 2 月の状況を写真-5 に示す。張芝部、特殊ふとんかご+断熱材および地山部はいずれの時期も積雪はほとんど無いことから、各断面とも積雪による断熱効果⁴⁾ は無いと考えられる。



平成 27 年 12 月



平成28年1月



平成28年2月

写真-5 積雪状況

次に張芝部および特殊ふとんかご+断熱材部の深さ10cmと30cmの温度と平均外気温の変化を図-10および図-11にそれぞれ示す。張芝部と特殊ふとんかご+断熱材部の深さ10cmの温度はほぼ同じである。また、特殊ふとんかご+断熱材部の深さ30cmの温度では、若干0℃以下となった時期があったが、切土のり面はほとんど凍結することなく断熱材の効果は大きいといえる。また、凍結深さと凍結指数（日平均気温の累積値）を図-12に示す。凍結指数は337℃・daysで、張芝部の凍結深さは約40cmとなった。なお、地山部の凍結深さは50cm以上となった。このことから、張芝による断熱効果も確認できた。なお、ここでの凍結深さとは地山表面からの深さを表している。



図-10 張芝部の地中および平均外気温の変化 (平成27年度)

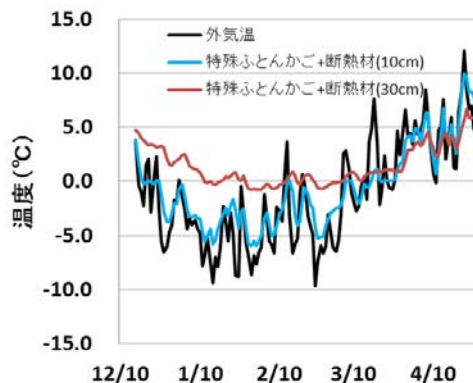


図-11 特殊ふとんかご+断熱材の地中および平均外気温の変化 (平成27年度)

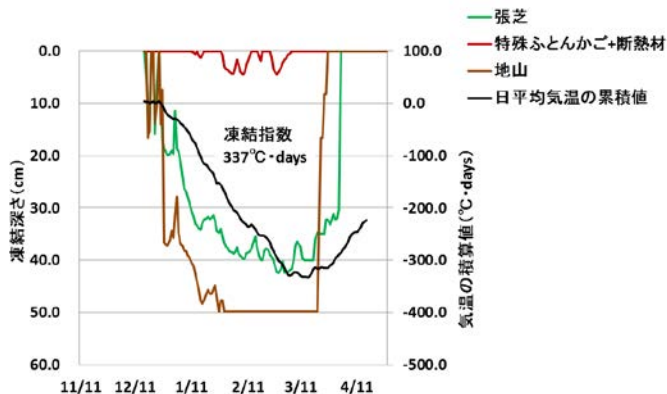


図-12 凍結深さと凍結指数 (平成27年度)

また、積雪が確認された張芝+特殊ふとんかご+断熱材の積雪状況を写真-6、張芝部および張芝+特殊ふとんかご+断熱材の地表面における温度変化を図-13に示す。降雪が確認された期間において、張芝+特殊ふとんかご+断熱材の地表面の温度が張芝部より高いことから、積雪に伴う断熱効果が考えられる。



写真-6 張芝+特殊ふとんかご+断熱材の積雪状況写真

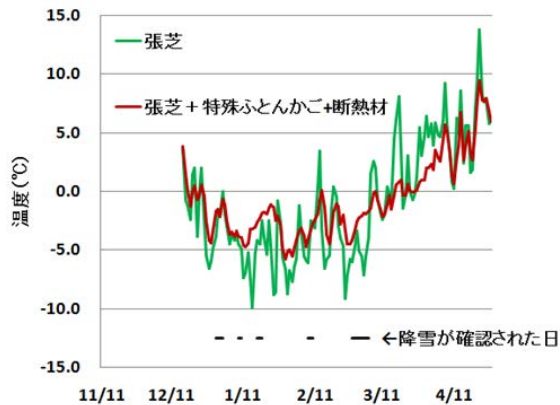


図-1.3 張芝部および張芝+特殊ふとんかご+断熱材の地表面の温度変化

土木研究所, pp. 1-14, 2016

7) 株式会社 J S P 発泡ポリスチレン製排水材チップドレン
カタログ

8) 社団法人 日本道路協会：道路土工要綱，平成 21 年 6 月

3. 3 まとめ

温度は、凍上に影響を与える大きな因子の 1 つである⁸⁾。特殊ふとんかごに断熱材を施工して熱の流れを制御することにより、切土のり面の凍結を抑え凍上を抑制する効果が期待できることが明らかとなった。また、景観や環境面に配慮して地山や特殊ふとんかご上面に施工した張芝についても凍結を抑制する効果が期待できると考えられる。なお、張芝の場合は芝の育成の程度も影響することが考えられる。さらに、現地では積雪が確認されていることから、積雪による断熱効果も十分考えられる⁴⁾ ため、引き続き計測および現地調査を行い、凍上対策としての有効性について検証を進める。

参考文献

- 1) 外塚信, 豊田邦男, 水野津与志, 佐藤幸久, 萬隆: 寒冷地における切土のり面小段工の凍上対策に関する検討, 公益社団法人地盤工学会北海道支部 技術報告集 第 46 号, pp. 291-296, 2006.
- 2) 安達隆征, 中村大, 川口貴之, 山下聡, 川尻俊三, 山梨高裕, 佐藤厚子: 立体網状スパイラル構造の排水材を応用した耐凍上性を有する小段排水溝の開発, ジオシンセティックス論文集, Vol. 29, pp. 161-168, 2014.
- 3) 社団法人 日本道路協会: 道路土工 切土工・斜面安定工指針, 平成 21 年 6 月
- 4) 社団法人 地盤工学会北海道支部: 寒冷地地盤工学-凍上被害とその対策-, 平成 21 年 12 月
- 5) 株式会社吉原化工 立体網状スパイラル構造体「もやいドレーン」 カタログ
- 6) 寒地地盤チーム: 積雪寒冷地域における切土のり面の崩壊危険度評価に関する研究, 国立研究開発法人 土木研究所 寒地