

積雪寒冷地における床版防水層の機能低下に関する実験的研究

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○角間 恒
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 澤松 俊寿
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 岡田 慎哉

道路橋RC床版の耐久性を確保するために、床版内部への水の浸入を防ぐ床版防水の重要性が認識されている。特に、積雪寒冷地では、床版上面の凍害劣化抑制の観点から床版防水の果たす役割は極めて重要である。本研究では、積雪寒冷地における防水層の機能低下要因である、施工前の床版上面処理や施工時温度、供用中の凍結融解作用が防水層の接着性能に及ぼす影響について、屋外での施工試験および引張接着試験により評価した。

キーワード：床版防水層、RC床版、引張接着試験

1. はじめに

道路橋 RC 床版の劣化要因は主に大型車の輪荷重による疲労や床版内部への水の浸入とされている¹⁾。積雪寒冷地においてはこれらの劣化要因に加え、凍害や凍結防止剤の散布による塩害の影響を受けた劣化損傷が、比較的交通量の少ない路線においても顕在化してきている。

凍害による RC 床版の劣化損傷では、コンクリート内部に浸入した水分の凍結融解の繰り返し作用により床版表面にスケーリングが発生した後に、ポップアウト、砂利化へと進展し、最終的には押し抜きせん断破壊による床版の陥没に至ったと考えられる事例も報告されている²⁾。また、床版上面が凍害等により 1cm 程度劣化するだけでも床版の破壊が数十倍の速さで進行することが実験的に示されている³⁾。このため、RC 床版の長期的な健全性を確保するためには、床版内部へ水を浸入させないことが求められるが、特に積雪寒冷地においては凍害の誘因を除去する観点からも非常に重要である。

このような背景から、床版防水の重要性が強く認識されてきている。しかしながら、橋面全面への床版防水層（以下、防水層）の設置が基準化されたのは近年のことであり⁴⁾、多くの既設橋梁で防水層が未設置か部分的な設置にとどまっているのが現状である。また、比較的新しい建設年次で防水層が設置されている橋梁においても床版下面に漏水や遊離石灰が確認されており、防水層の機能低下が懸念されている。防水層の現状把握を目的として、北海道内の防水層が設置された RC 床版を有する 15 橋について引張接着試験が実施されている。その結果、架設年次によらず多くの橋梁で基準値を満たさず、防水層の機能低下の可能性が示されている⁵⁾。所要の引張接着強度を確保していない箇所の中には、**図-1**

のように舗装および床版コンクリートに対する付着が全く確保されておらず、適切な防水効果が得られていないものも確認されている。

積雪寒冷環境下や多交通量路線において RC 床版の劣化損傷を防ぎ円滑な交通を確保するためには、凍結融解や輪荷重の繰返し作用に対して、舗装、防水層および床版の三位一体の構造をもって床版の劣化損傷を抑止し、さらに橋面に流入した水を速やかに排水するための排水設備までを含めた高耐久の床版防水システムの構築が重要と考えられる。

筆者らは、高耐久床版防水システムの確立を目的として、防水層の品質評価方法や規格値、床版の施工面処理方法や施工管理規定等について検討を行っている。本論では、基礎検討として、現地調査から確認されている防水層の劣化損傷事例を分析し、損傷状況や機能低下要因等について整理した。整理した機能低下要因のうち、防水層施工前の床版上面の処理条件や防水層施工時の温度条件の影響を検討するために、厳冬期において屋外での施工試験を実施し、引張接着試験により防水層の接着強



図-1 防水層の損傷例

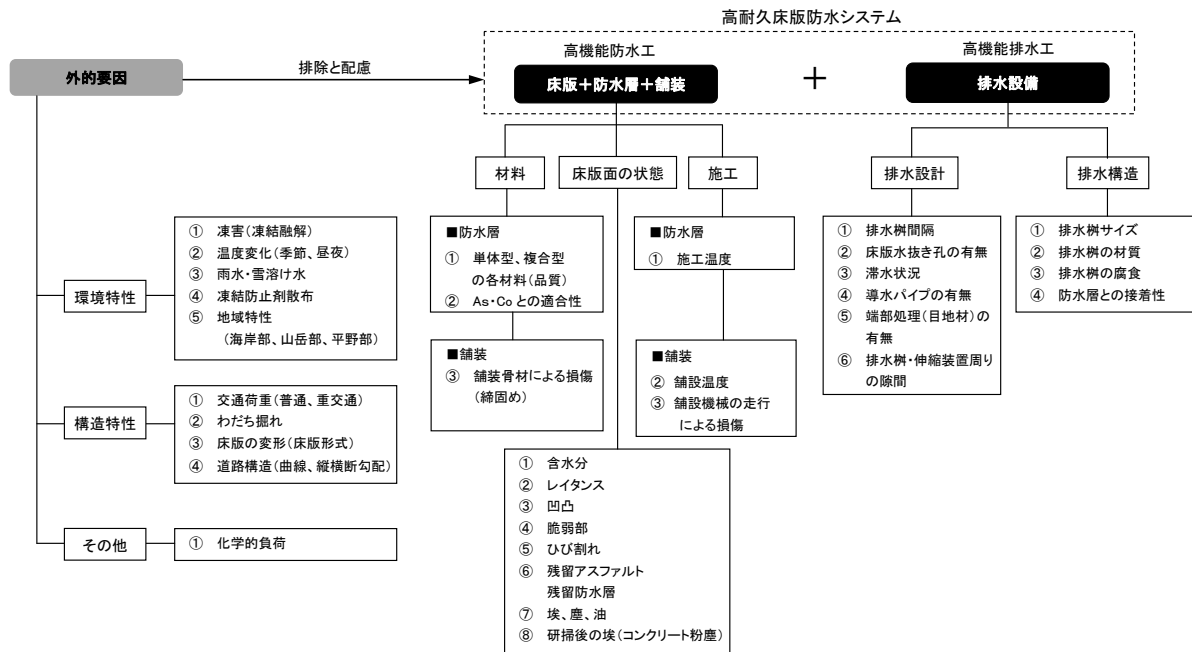


図-2 防水層の機能低下要因と高耐久床版防水システム (例)

度を評価した。また、冬から春にかけての凍結融解期の終了後に再び引張接着試験を実施し、凍結融解の繰り返し作用の影響について検討した。

2. 防水層の機能低下要因と高耐久床版防水システム (例)

文献5)で実施された防水層の調査結果を整理すると以下のとおりである。

供用開始後数年の橋梁を含め、架設年次によらず多くの橋梁で引張接着強度が基準値を満たしていない。

一般部よりも、橋梁端部のように滞水しやすい箇所では引張接着強度が基準値を満たしていない傾向にある。このような箇所では凍害による床版の損傷も顕著である。供用後10年程度が経過して防水層を追加した橋梁で引張接着試験を実施した結果、極めて低い引張接着強度で床版コンクリート部で破壊した。

これらの調査結果を踏まえると、積雪寒冷地における防水層の機能低下要因は大きく以下のように分類されたと考えられる。

①外的要因

積雪寒冷地特有なものを含む外的要因が想定より大きい、または想定していない。例えば、道路橋床版防水便覧⁶⁾では防水層の材料試験における低温側の試験温度は -10°C と、調査を実施した地域の冬期の気温である -20°C 程度に対応できていない。また凍結融解の繰り返し作用は考慮されていない。

②防水層の材料、床版面の状態を含めた防水層の施工

積雪寒冷地特有なものを含む外的要因に対して防水層

の材料としての抵抗性が十分でない。また、防水層施工前の床版面の状態、および施工時期等の防水層の施工方法に関する問題がある。

③排水設備

排水設備の構造、設計上の問題や、経年劣化等による排水設備の機能低下により凍害の誘因となる水を速やかに排出できていない。

これらの機能低下要因を系統的に細分化すると図-2のようになると考えられ、これらの機能低下要因に対応できる高機能床版防水システムを確立する必要がある。

3. 屋外における施工試験

(1) 試験概要

防水層の機能低下要因の「床版面の状態」、「施工」、「環境特性」のうち、それぞれ床版面の研掃の有無、防水層施工時の施工温度、凍結融解が防水層の機能に与える影響について検討するために、北海道江別市内の屋外試験ヤードにおいて厳冬の施工試験を実施した。本試験では材料や構造特性の異なる4種類の防水層を用い、①施工直後、②冬から春にかけての凍結融解期を経た後の2度にわたって引張接着試験を実施した。

(2) 試験方法

a) 供試体の製作方法

図-3に示すような $3.00\text{m} \times 21.05\text{m}$ の範囲で床版を模擬した厚さ 160mm のコンクリートを基礎砂利上に打設した。コンクリートの配合は、北海道の国道橋のRC床版に一般的に用いられる、設計基準強度 24N/mm^2 、スラン

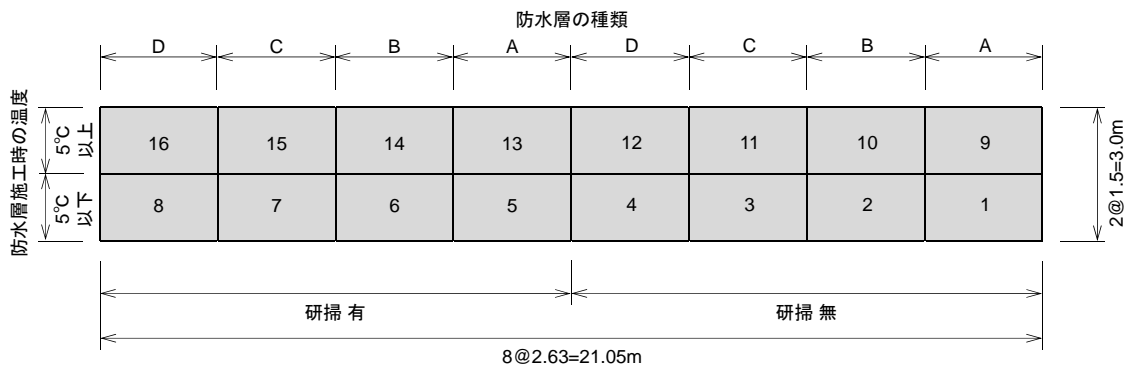


図-3 試験ヤードと試験パラメータ



(a) コンクリート表面の研掃の状況



(b) 小型研掃機

図-4 コンクリート表面の研掃

ブ 8cm、最大骨材寸法 25mm とした。

コンクリート硬化後、コンクリートを打設した半分の面積にあたる 3.00m×10.52m についてコンクリート表面の研掃を実施した。研掃には図-4 に示す小型研掃機（研削加重 300kg、研削ディスク速度 600~1200rpm）を用い、コンクリート表面のレイタンスを確実に除去できるように 2mm 程度の厚さを削り取った。

防水層は、材料特性や構造の異なる 4 種類（図-3 に示す A~D）を用いた。具体的には、A：アスファルト加熱型塗膜系、B：浸透系複合防水、C：反応樹脂型塗膜系（ウレタン樹脂）、D：反応樹脂型塗膜系（メタクリル樹脂）の 4 種類である。本研究では、防水層個別の性能の評価は目的としていないことから、ここでは試験に用いた防水層の詳細は示していない。

防水層の施工は外気温の低下する冬期に行い、施工温度は防水層施工時の目安である 5°C⁹⁾を基準として 5°C 以上および 5°C 以下の 2 種類となるよう実施した。試験ヤードには、床版コンクリート全体を覆うように防寒仮囲いを設置し、図-3 の 9~16 の区画についてはジェットヒータによる温度養生を実施した状態で防水層を施工した。1~8 の区画については、仮囲いの一部を開放して外気に曝した状態で防水層を施工した。放射温度計で測定した防水層施工時の床版上面温度は、1~8 の区画の平均が 2.8°C、9~16 の区画の平均が 7.0°C であった。また、

高周波容量式水分計で測定した防水層施工前のコンクリートの水分量は平均で 6.2% であった。

防水層施工後に、厚さ 40mm で粗粒度アスファルト（改質 II 型）を打設した。

b) 引張接着試験

防水層とコンクリートおよび舗装との接着性を確認するために引張接着試験を実施した。試験方法は道路橋床版防水便覧⁹⁾に準拠した。

試験は施工直後の 2011 年 3 月 14~19 日、冬から春にかけての凍結融解期を経た 2011 年 10 月 14 日の 2 度において実施した。試験は 1~16 の区画についてそれぞれ 3 本ずつ実施している。なお、2011 年 3 月 14~19 日の試験は原位置において実施したため引張接着試験時の温度は道路橋床版防水便覧に規格値が明示されている試験温度である 23°C および -10°C と異なる。そこで、本研究では、試験結果を解釈するために次式を用いて 23°C および -10°C の規格値を線形補間した σ_{at} を目安値とした。

$$\sigma_{at} = \frac{\sigma_{a(23)} - \sigma_{a(-10)}}{23 - (-10)} (t - (-10)) + \sigma_{a(-10)} \quad (1)$$

ここに、 σ_{at} は試験直後の供試体破断面の温度で補正した引張接着強度の規格値、 $\sigma_{a(23)}$ は 23°C における規格値で 0.6N/mm²、 $\sigma_{a(-10)}$ は -10°C における規格値で 1.2 N/mm²、 t は試験直後の供試体破断面の温度である。以後、単に

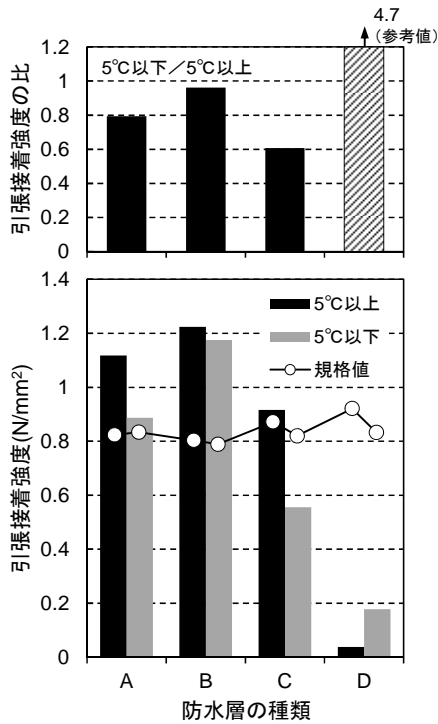


図-5 引張接着強度と防水層施工時の床版上面温度の関係 (研掃有)

「規格値」という場合には、この σ_{ad} のことを指すこととする。

また、2011年10月14日は原位置で実施した2011年3月14～19日の試験と試験温度を整合させるために、現位置でコアを採取した後に、10°Cに温度調整した室内において試験を実施した。

4. 試験結果

(1) 防水層施工時の床版上面温度の影響

防水層施工時の床版上面温度が異なる場合の試験結果に関して、施工直後の2011年3月14～19日の引張接着試験の結果を図-5に示す。図中の下段は、各区画で実施した3本の試験結果の平均値、上段は防水層施工時の床版上面温度5°C以上のケースの引張接着強度に対する5°C以下のケースの比を示している。なお、放射温度計で測定した引張接着試験直後の供試体破断面の温度は平均で約10.0°Cであった。

図より、防水層Dを除くと温度が低いほど引張接着強度が小さいことがわかる。また、防水層Cでは5°C以上では規格値を満足しているが、5°C以下では下回っている。5°C以上に対する5°C以下のケースの引張接着強度の比は、防水層A～Cでそれぞれ0.79、0.96、0.61である。なお、引張接着強度の施工時温度依存性のメカニズムについては、化学的な観点を含めて今後検討を行う必要がある。

図-6は引張接着試験後に確認した供試体破断面の破

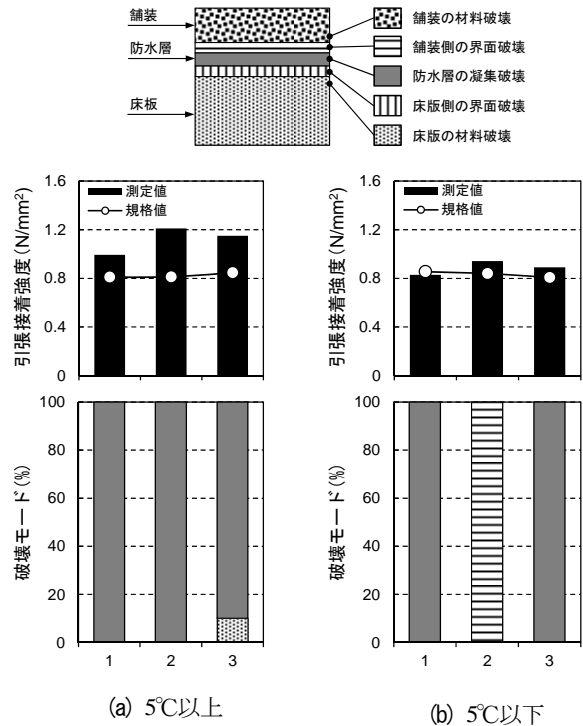


図-6 破壊モードと防水層施工時の床版上面温度の関係 (防水層A、研掃有)

壊モードである。破壊モードは図中の凡例のように5種類に分類し供試体断面積に対する面積比として示した。ここで、界面破壊とは材料間の界面で剥離した状態を、凝集破壊とは材料の層内部で破壊した状態を意味する。なお、紙面の都合から一例として防水層Aの結果を示している。図より、5°C以上のケースでは、3供試体でほぼ防水層の凝集破壊を示している。対して5°C以下のケースでは3供試体中の1つが舗装側の界面破壊、2つが防水層の凝集破壊である。凝集破壊の2供試体について言及すれば、防水層施工時の床版上面温度が低温になることに伴う引張接着強度の低下は、防水層の材料自体の強度が低下したことによるものと考えられる。なお、5°C以下のケースの1供試体で舗装側の界面破壊を示したが、5°C以上のケースから破壊モードが移行している理由についてはさらなる分析が必要である。

本試験結果で特筆すべきは、施工時の温度の差は5°C以下のケース(平均2.8°C)と5°C以上(平均7.0°C)のケースで4.2°Cとそれほど大きくないものの、引張接着強度に大きな影響を与えていることである。このことは、防水層の接着強度は防水層施工時の気温に影響されることから、特に低温下の施工においては温度管理を確実にを行う必要があることを示している。また、防水層の種類によって引張接着強度が大きく異なることがわかる。施工時温度等の環境条件によっては、寒冷地では適さない材料がある可能性も有り、寒冷地での防水層の適用に当たっては、施工条件を踏まえた材料の選定が重要であると考えられる。

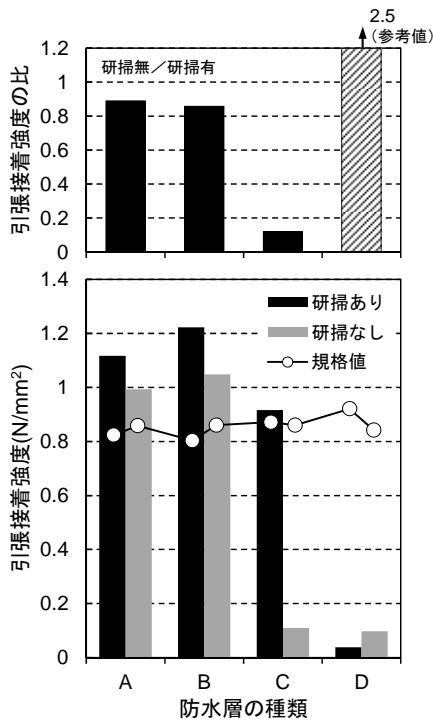


図-7 引張接着強度と研掃の関係（防水層施工時の床版上面温度5°C以上）

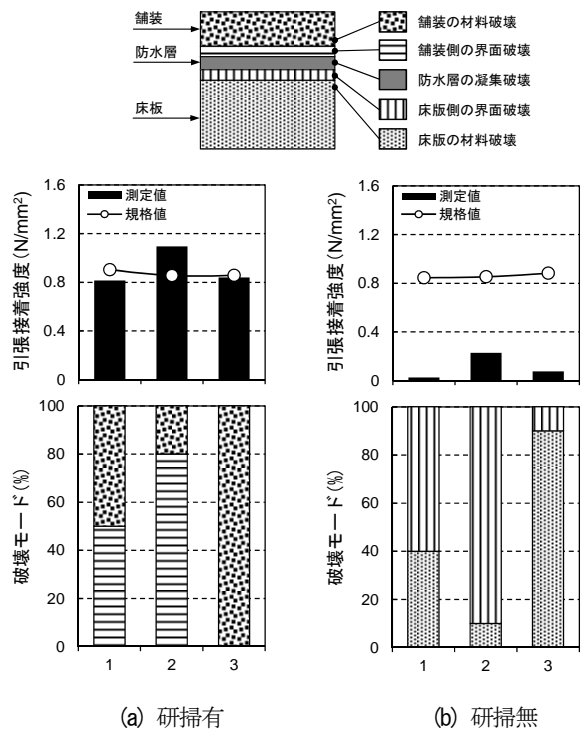


図-8 破壊モードと研掃の関係（防水層C、防水層施工時の床版上面温度5°C以上）

防水層施工時の床版上面温度	5°C以下（平均2.8°C）		5°C以上（平均7.0°C）	
	無	有	無	有
研掃				

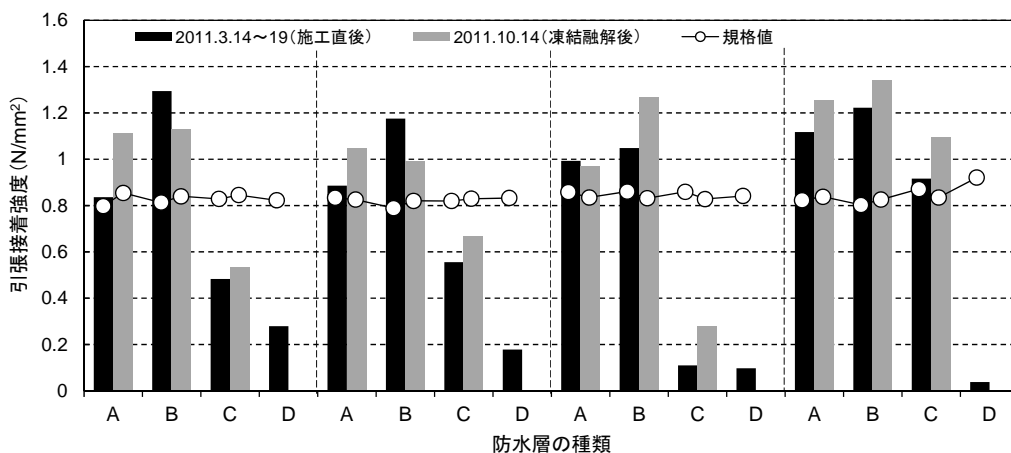


図-9 引張接着強度と凍結融解の関係

(2) 研掃の影響

図-7 は施工直後の2011年3月14～19日の試験結果であり、下段は各区画で実施した3本の試験結果の平均、上段は研掃有のケースの引張接着強度に対する研掃無の比を示している。防水層Dを除くと、研掃有のケースより研掃無のケースの引張接着強度が小さいことがわかる。研掃有に対する研掃無のケースの引張接着強度の比は、防水層A～Cでそれぞれ0.89、0.86、0.12である。

図-8 に供試体破断面の破壊モードを示す。ここでは、研掃の有無により引張接着強度が顕著に異なった防水層

Cの結果を示している。研掃有のケースでは、舗装の材料破壊および舗装側の界面破壊が卓越している。これに対し、研掃無では床版側の界面破壊および床版の材料破壊が顕著に生じている。研掃有のケースでは、床版上面のレイタンスが取り除かれたのに対し、研掃のないケースでは床版上面のレイタンスが弱層となり小さな付着強度しか発揮されなかったものと考えられる。このことは、防水層の付着強度を確保するためには、防水層施工前の床版上面の処理が非常に重要であることを示している。これは、新設の床版に限ったことではなく、既設床版へ

の防水層設置時においても同様である。例えば、凍害により上面のコンクリートが劣化した床版においては脆弱化したコンクリートを確実に取り除く必要がある。この工程をおろそかにすると防水層の付着が確保されないために再び床版が劣化する可能性がある。

(3) 凍結融解の影響

施工直後の 2011 年 3 月 14～19 日、冬から春にかけての凍結融解期を経た 2011 年 10 月 14 日に実施した引張接着試験の結果を図-9 に示す。なお、各区分ともに供試体 3 本の平均値を示している。

試験ヤードと同一市内にあるアメダス（江別）の記録によると、2011 年 3 月 14 日から春にかけて 0°C を 22 回往復している（この間の時間最低気温の最低値は -10.1°C、0°C を下回っていた間の時間最低気温の平均は -4.3°C）。本試験結果については、凍結融解作用により引張接着強度が低下するような傾向は認められない。ただし、これらの結果はごく短い凍結融解期間中の暴露の結果であることから、今後も継続的に調査を行う予定である。

5. まとめ

本研究では、高耐久床版防水システム確立のための基礎検討として、積雪寒冷地における防水層の機能低下要因等について整理した。また、整理した機能低下要因をもとに、防水層施工前の床版上面の処理条件や防水層施工時の温度条件、供用時の凍結融解の繰り返し作用が防水層の接着性に与える影響について実験的に検討した。本研究の結果の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 現地調査から確認されている防水層の劣化損傷状況を整理し、防水層の機能低下要因を分類した結果、①外的要因、②防水層の材料、床版面の状態を含めた防水層の施工、③排水設備に大別された。
- (2) 屋外試験ヤードにおいて実施した施工試験の結果、防水層の材料によって引張接着強度が大きく異なった。施工時温度等の環境条件によっては寒冷地では適さない材料がある可能性もあり、材料の選定が重要であると考えられる。

(3) 防水層施工時の床版上面温度が 5°C 以上の場合と比較して 5°C 以下の場合に引張接着強度が小さい傾向があり、0.61 倍の値しか示さないものも認められた。これは、特に低温下での施工においては温度管理を確実にを行う必要があることを示している。

(4) 床版上面を研掃しない場合、床版上面のレイタンスが弱層となり小さな接着強度しか発揮されず、研掃した場合と比較して 0.12 倍の引張接着強度しか示さないものもあった。このことは、防水層施工前の床版上面の処理が非常に重要であることを示している。これは、新設の床版に限らず、凍害等で劣化損傷した床版の補修時においても同様である。

(5) 冬から春にかけての凍結融解作用による引張接着強度の低下は認められなかった。ただし、ごく短い期間の暴露の結果であり、今後も継続して調査を行う必要がある。

本論は防水層の機能低下要因のうち主に施工温度と施工面の状態に着目したものであり、高耐久防水システムの確立を目的としてその他の機能低下要因についても、さらなる検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、(独)土木研究所寒地土木研究所が大阪工業大学と共同で実施した「橋梁の床版構造および防水構造における性能評価に関する研究」における成果の一部であり、関係各位に多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版株式会社、2007。
- 2) 三田村浩、佐藤京、本田幸一、松井繁之：道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響、構造工学論文集、Vol.55A、pp.1420-1431、2009。
- 3) 三田村浩、佐藤京、西弘明、渡辺忠朋：積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命化手法について、構造工学論文集、Vol.56A、pp.1239-1248、2010。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編、pp.102-103、2002。
- 5) 吉田英二、三田村浩、石川博之：積雪寒冷地における床版防水工の性能評価に関する検討、平成 20 年度土木学会北海道支部論文報告集、Vol.65、2009。
- 6) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007。