

論文

舗装，床版防水層およびコンクリートからなる構造体の 凍結融解抵抗性に関する実験的検討

澤松俊寿*，岡田慎哉**，西弘明**，嶋田琢磨***，松本高志****，松井繁之*****

*国土交通省北海道開発局網走開発建設部（〒093-8544 北海道網走市新町2丁目6-1）

**博(工)，(独)土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34）

***前北海道大学大学院工学院（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

****Ph.D.，北海道大学大学院工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

*****工博，大阪大学名誉教授，(一財)災害科学研究所（〒541-0043 大阪市中央区高麗橋4-5-13）

凍結融解作用に対する舗装、防水層およびコンクリートからなる構造体の劣化損傷の傾向を確認するために凍結融解試験を実施した。試験では床版防水層を用いた供試体に対して、気中凍結水中融解試験機により30サイクルの凍結融解を与えた後に引張接着試験を実施して引張接着強度と破壊モードを評価した。その結果、凍結融解により舗装・防水層・コンクリート構造体の引張接着強度が低下することを確認した。このとき、防水層によってはその上下の界面の劣化が進行するものが認められた。修復性の観点からは、舗装、防水層、コンクリート構造体の中で最も補修が容易な舗装で破壊を生じさせるように制御することが望ましいと考えられる。

キーワード：床版防水層，凍結融解，道路橋床版

1. はじめに

積雪寒冷地の道路橋RC床版においては、疲労と凍害の複合作用によるものと考えられる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。道路橋床版の長期的な健全性を確保する観点から、床版の劣化要因の1つであり、特に積雪寒冷地においては凍害の誘因となる水の浸入を抑制するための床版防水層（以下、「防水層」という。）が非常に重要視されている。

このような状況に鑑みて、土木学会鋼構造委員会道路橋床版の維持管理評価に関する検討小委員会は2012年に道路橋床版防水システムガイドライン（案）を発刊している¹⁾。その中において、交通条件や環境条件に応じて防水層に求める性能を分類しており、積雪寒冷地ではその環境条件を踏まえた耐久性を有していることが求められている。一方で、防水層の凍結融解抵抗性に関する既往の研究は少なく、その劣化損傷メカニズムや確保すべき性能の考え方および性能の水準に対して今後さらなる検討を実施していく必要があると考えられる。

最近の現地調査結果によると、積雪寒冷地においては凍結融解を繰り返しやすい融雪期において、写真-1に示すような凍結融解に起因する舗装のポットホールが発生しやすいことが明らかとなっている²⁾。これは橋面

においても例外でなく、車両走行の快適性・安全性および道路橋床版の耐久性の確保に障害となるものである。

本論文では、凍結融解作用に対する舗装、防水層およびコンクリートからなる構造体の劣化損傷の傾向を確認するために、凍結融解を与えた供試体に対する引張接着試験を実施した。また、試験結果を踏まえて融雪期のポットホールの発生を抑制する観点から防水層に求められる機能について考察した。



写真-1 積雪寒冷地における融雪期の舗装損傷



(a)防水工



(b)舗装工

写真-2 供試体の製作状況

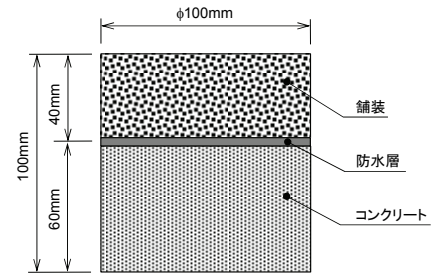


図-1 供試体

2. 凍結融解試験の方法

2.1 供試体

供試体には舗装、防水層およびコンクリートからなるコアを用いた。供試体の製作に当っては実施工の条件を試験ヤードにおいて再現することとし、特に厳しい施工条件である冬期に、北海道江別市に位置する試験ヤードにおいて実施した。

コンクリートは北海道の道路橋の RC 床版に一般的に用いられる配合とした。防水層は材料や構成の異なる 5 種類を用いた。舗装は密粒度アスファルト混合物 13F (改質 II 型) とした。8.2m×3.5m の範囲に厚さ 60mm のコンクリートを打設した。コンクリート上面を回転式ダイヤモンド研削機により研掃した後に、防水層を施工した。舗装合材をフィニッシャーにより敷き均し、質量 3,000kg、起振力 20.6kN のタンデム振動ローラで締固めた。写真-2 は防水工および舗装工の状況である。防水工および舗装工においては温度養生は行っていない。放射温度計で測定した防水層施工前のコンクリート上面の温度は 3.6℃、電気抵抗式水分計³⁾で測定したコンクリートの水分量は 210 カウント (表面乾燥状態)、温度計で測定した舗装時の気温は 4.9℃であった。

舗装完了後にコアカッターを用いて図-1 に示すようなφ100mm、高さ 100mm の舗装、防水層およびコンクリートからなるコアを採取し供試体とした。文献 1) では凍結融解試験に用いる供試体の防水層の位置の上下 20mm を止水テープで被覆することとしている。これは、防水層付近で鉛直方向の 1 次元の浸透場を再現するために、供試体の周面から水を浸入させないことを目的としたものである。一方で地覆や伸縮装置の近傍は一般に橋面の勾配の低い側に位置していることから滞水しやすく、さらに防水層と平行な方向からも水が浸入するものと考えられる。このような条件を考慮するために、本実験では止水テープによる被覆は行っていない。

2.2 凍結融解負荷

凍結融解負荷には凍結装置、給水装置、温度測定装置からなる気中凍結水中融解試験機を用いた。供試体内部

の空隙を水で飽和させるために、供試体を常温水で満たした真空脱気装置に入れ、0.02MPa 以下で 120 分間減圧した。試験対象とする供試体と材料および形状・寸法が同一なダミー供試体の温度により温度制御を行った。ダミー供試体の温度測定位置は舗装とコンクリートの接合面の中心としている。コア供試体を凍結装置内に設置し、凍結装置の運転を開始した。ダミー供試体の温度が最低設定温度 (-20℃) まで低下すると、凍結装置の運転が停止し給水装置により凍結装置内に自動的に水温 23℃の水が供給される。その後、ダミー供試体温度が最高設定温度 (5℃) まで上がると給水装置の運転が停止し、凍結装置内の水が抜かれた後に凍結装置の運転を再開する。これらの一連の動作を所定のサイクルとなるまで繰り返した。

2.3 引張接着試験

凍結融解を与えた供試体に対して引張接着試験を実施した。引張接着試験の方法は道路橋床版防水便覧⁴⁾に準拠した。また、試験温度は 23℃とした。試験治具が供試体に接着できる状態とするために、供試体を凍結融解試験機から取り出して 24 時間程度自然乾燥させた。

引張接着試験結果は引張接着強度と破壊モードにより評価した。引張接着強度 σ_t は次式により与えられる。

$$\sigma_t = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

ここに、 P_{\max} は引張荷重の最大値、 A は供試体の断面積である。試験後の供試体破断面の破壊モードを a) 舗装の材料破壊 M_{As} 、b) 舗装と防水層の界面破壊 I_{AsW} 、c) 防水層の凝集破壊 M_w 、d) 防水層とコンクリートの界面破壊 I_{WS} 、e) コンクリートの材料破壊 M_s の 5 種類に分類し、供試体断面積に対する各破壊モードの面積の割合とした。ここで、界面破壊とは材料間の界面で剥離した状態、凝集破壊とは防水層の層内部で破壊した状態を意味する。

2.4 試験ケース

表-1 は試験ケースの一覧である。防水層は 5 種類である。筆者らが実施した舗装、防水層およびコンクリート構造体の凍結融解試験結果によると、凍結融解 30 サ

表-1 試験ケース

防水層	凍結融解サイクル (回)	供試体数 N
Case1 アスファルト加熱型塗膜防水		
Case2 浸透系複合防水		
Case3 反応樹脂型塗膜防水 (メタクリル樹脂)	0, 30	3
Case4 反応樹脂型塗膜防水 (ウレタン樹脂) A*		
Case5 反応樹脂型塗膜防水 (ウレタン樹脂) B*		

*反応樹脂型塗膜防水 (ウレタン樹脂) A および B では防水材と舗装の間の接着剤に異なる材料が用いられている。

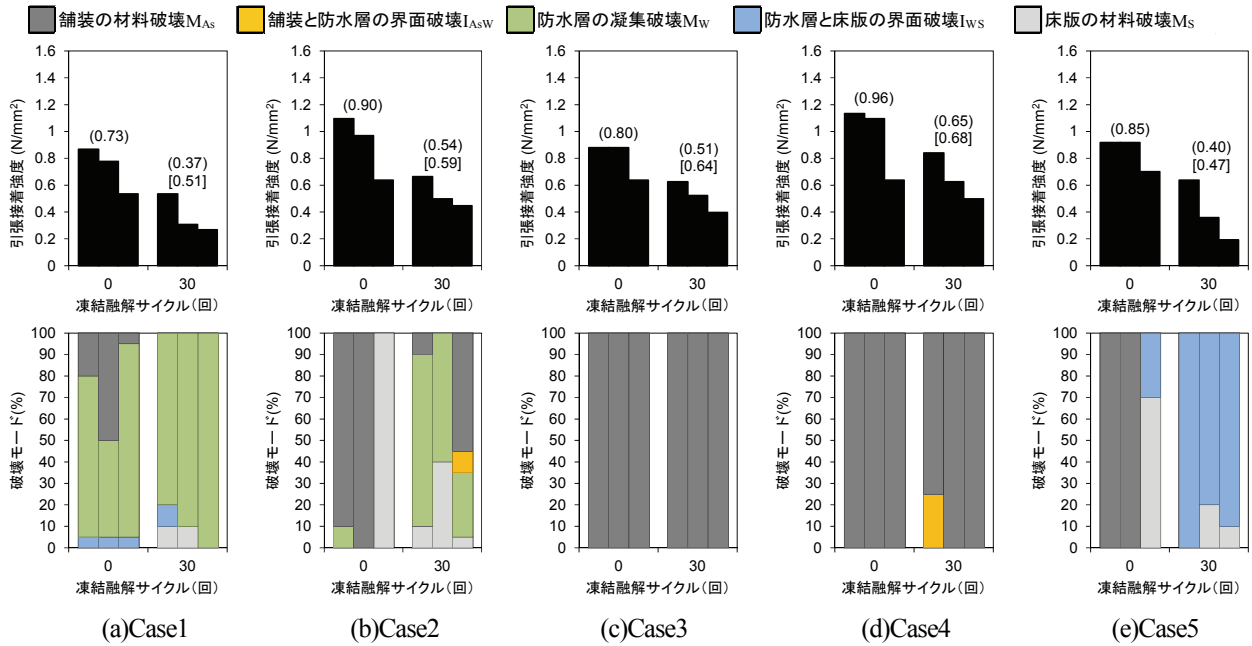


図-2 引張接着強度および破壊モード (図中の()内は引張接着強度の3本平均, []内は0サイクルに対する30サイクルの引張接着強度の割合)

サイクルまでで引張接着強度が低下し、それ以降は概ね頭打ちとなる傾向が認められた⁵⁾。これを参考に凍結融解負荷は30サイクルとした。また、凍結融解負荷の影響を確認するために、0サイクルすなわち凍結融解負荷を与えていないケースについても試験を実施した。

試験は1ケース当り3供試体について実施した。

3. 凍結融解試験の結果

3.1 引張接着強度と破壊モード

図-2 は各ケースにおける引張接着強度と破壊モードである。全ての防水層において凍結融解0サイクルに対して30サイクルの引張接着強度が0.3~0.5N/mm²程度低下している。

破壊モードに着目すると、Case1 では防水層の凝集破壊 M_W が卓越しており、凍結融解によりさらに増加する傾向が認められる。その他のケースにおいては、凍結融解0サイクルにおいて舗装の材料破壊 M_{AS} またはコンクリートの材料破壊 M_S が卓越している。さらに、Case3 お

よびCase4 では凍結融解30サイクルにおいてもその破壊モードは0サイクルとほぼ同様であり、舗装の材料破壊 M_{AS} を示している。これは、30サイクルの凍結融解負荷に対して、防水層およびその上下の界面の劣化の進行が舗装の劣化の進行と比較して緩やかであることに他ならない。一方で、Case2 は凍結融解30サイクルで防水層の凝集破壊が、Case5 は凍結融解30サイクルで防水層とコンクリートの界面破壊 I_{WS} がそれぞれ増加している。

以上の結果より、舗装、防水層およびコンクリートからなる構造体に凍結融解負荷を与えると、防水層とその上下の界面における劣化が進行する場合があり、その程度は防水層の材料によって異なる。ただし、凍結融解により舗装の引張強度も低下しており、構造体の凍結融解抵抗性を評価するためには、系の中の材料相互の強度比較を行う必要があると考えられる。

3.2 舗装および防水層の破壊に対する凍結融解の影響

図-3 は各ケースにおける引張接着強度と防水層およびその上下の界面の破壊モードの割合 I_{ASW}+M_W+I_{WS} の関

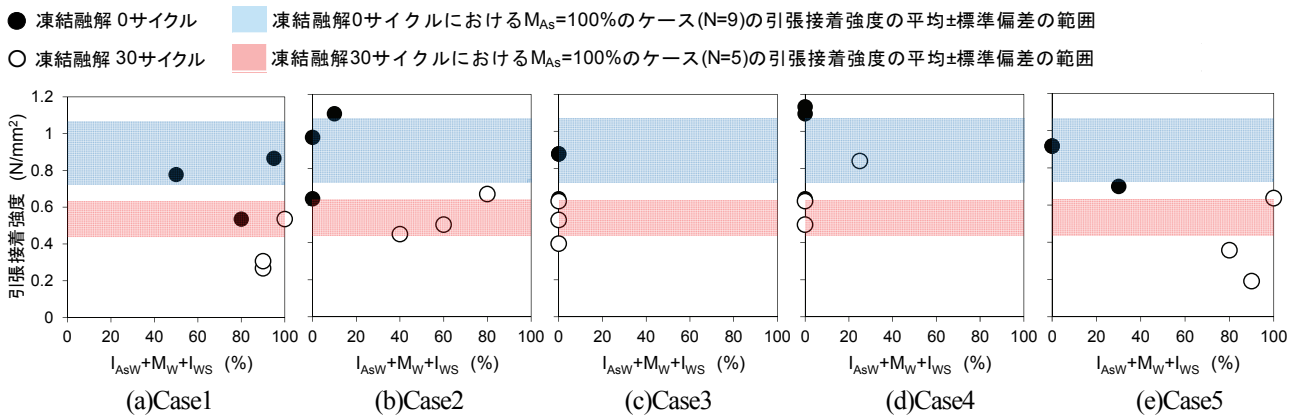


図-3 引張接着強度と防水層の凝集破壊および界面破壊 ($I_{AsW}+M_W+I_{WS}$) の割合の関係

表-2 舗装の材料破壊 $M_{As}=100\%$ の場合の引張接着強度の平均と標準偏差

凍結融解 サイクル (回)	標本数	平均 (N/mm^2)	標準偏差 (N/mm^2)
0	9	0.90	0.17
30	5	0.53	0.10

係を示したものである。ここでは、舗装の引張強度をベンチマークとすることとし、引張接着試験において舗装の材料破壊 $M_{As}=100\%$ のケースに対して引張接着強度の平均および標準偏差を表-2 のとおり算出し、平均±標準偏差の範囲を図-3 にハッチングで示した。同図においては、左上から右下に行くほど防水層とその上下界面が凍結融解により劣化し引張接着強度が低下していることを意味する。Case1, Case2 および Case5 では、凍結融解 0 サイクルに比べて 30 サイクルの場合に引張接着強度が低下し、かつ $I_{AsW}+M_W+I_{WS}$ が増加していることがわかる。ただし、Case2 では凍結融解 30 サイクルの引張接着強度は舗装の材料破壊 $M_{As}=100\%$ の場合の引張接着強度の平均-標準偏差を下回ってはならず、構造体において防水層とその上下の界面が著しく弱点となるような劣化は進行していないと判断できる。

4. 考察

防水層の種類により程度が異なるが、凍結融解負荷により舗装、防水層、コンクリート構造体の引張接着強度が低下することが明らかとなった。一方で、凍結融解負荷により舗装の引張強度も同様に低下する。修復性を考慮すると、舗装、防水層、コンクリート構造体の中で最も補修が容易な舗装で破壊を生じさせるように制御することが望ましいと考えられる。特に積雪寒冷地においては、凍結融解を繰り返しやすい融雪期において凍結融解に起因する舗装のポットホールが発生しやすいこと

が調査結果より明らかとなっている²⁾。融雪期における舗装のポットホールの発生を抑制するためには、防水層の強度は舗装の強度を上回っていることが最低限の条件であり、これが凍結融解に対して防水層に求められる要求性能であると考えられ、これを満たすように設計されるべきである。そのため、具体的な性能の水準は用いられる舗装の特性に依存されるべきであろう。

5. まとめ

本論文の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 凍結融解により舗装・防水層・コンクリート構造体の引張接着強度が低下した。
- 2) 防水層の材料によっては 30 サイクルの凍結融解により防水層とその上下の界面の劣化が進行する。
- 3) 修復性の観点からは、舗装、防水層、コンクリート構造体の中で最も補修が容易な舗装で破壊を生じさせるように制御することが望ましいと考えられる。この場合、防水層の強度は舗装の強度を上回っていることが最低限の条件である。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版防水システムガイドライン，2012
- 2) 丸山記美雄，安倍隆二，熊谷政行：融雪期に発生する舗装のポットホールの実態と発生メカニズムの検討，寒地土木研究所月報，No.730，pp.2-13，2014.3
- 3) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集，Vol.59A，pp.1112-1123，2013
- 4) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧，2007.3
- 5) 澤松俊寿，三田村浩，松井繁之：舗装・防水層・床版からなる構造体の凍結融解抵抗性に関する一検討，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，pp.1183-1184，2012.9