

14.1 高機能防水システムによる床版劣化防止に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地構造）

研究担当者：西 弘明、今野久志、岡田慎哉、佐藤 京、表 真也、澤松俊寿

【要旨】

積雪寒冷環境や重交通に対応した床版防水システムを確立するために各種の検討を行った。防水層の現状把握を目的として、現地調査および現地で採取した供試体に対する試験を実施した。輪荷重作用時の防水層の応力性状および影響要因を把握するために 3 次元 FEM 解析を実施した。防水層の損傷事例の多い伸縮装置近傍に着目し、水浸状態での舗装、防水層、コンクリートの構造体のせん断疲労試験を実施した。伸縮装置や地覆近傍において、防水層下側に水の存在が確認される部分があった。現地で採取した供試体に対して引張接着試験を実施した 46 箇所のうち 76%が規格値未満、46%が引張接着強度ゼロであった。FEM 解析の結果、舗装高温でその厚さが薄く、また床版の剛性が小さいほど防水層に大きなせん断応力が発生することが示された。水浸状態でのせん断疲労試験の結果、乾燥状態と比べて水浸状態では、疲労耐久性が 1/10 程度に低下する結果を得た。

キーワード：床版防水、床版防水システム、RC 床版、FEM 解析、せん断疲労試験

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」という。）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、

防水層の低機能が懸念されている。

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耐久性の高い床版防水システム（以下、「高耐久防水システム」という。）の構築が重要と考えられる。

本報では、防水層の現状を確認するために実橋における現地調査を実施し、劣化損傷の特性について検討した。また、供用中における防水層に対する主な作用の 1 つである車両走行に対して、輪荷重作用時の防水層の応力特性および応力特性への影響要因を把握するためのアプローチとして 3 次元 FEM 解析を実施した。さらに、防水層の劣化損傷事例の多い伸縮装置近傍等の滞水しやすい箇所について、劣化損傷要因として水の影響に着目し、水浸状態におけるアスファルト舗装、防水層、コンクリートのせん断疲労試験を実施した。

2. 床版防水層に関する現地調査

2.1 本調査の目的と概要

防水層の現状把握を目的として、特に厳しい環境条件を有すると考えられる積雪寒冷地の橋梁について、現地

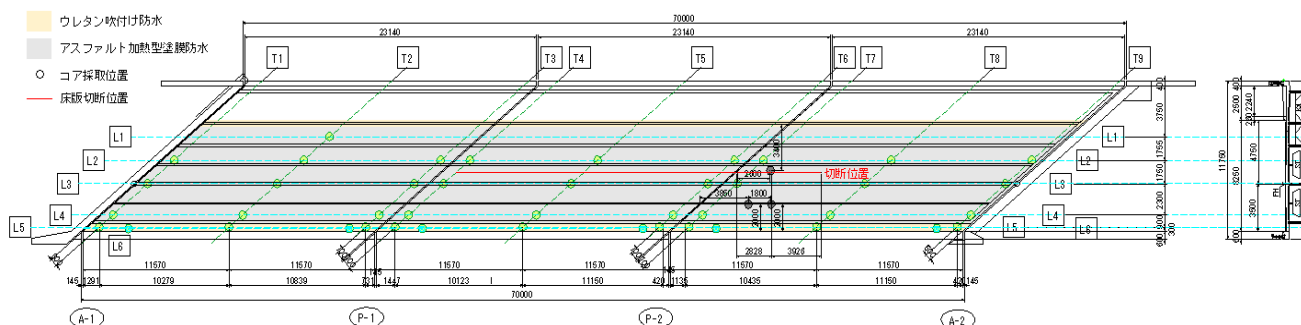


図-1 舗装、防水層、コンクリートコアの採取位置

調査および現地で採取した供試体に対する試験を実施した。本橋梁では、供用開始から 42 年目に車道部に防水層が設置されており、防水層が設置から現地調査の実施までに 5 年間供用されている。

2.2 調査橋梁

調査を実施した橋梁の設置環境および橋梁構造について表-1 に示す。対象橋梁は図-1 のような 3 径間単純非合成鋼桁の河川橋である。2010 年の交通センサスによる大型車交通量は上下線の合計で日あたり 778 台である。積雪寒冷地に位置しており、最寄りのアメダスの観測結果によると、観測結果のある 1976 年からの年最低気温の平均値は -22.5°C である。都市部の重交通路線と比較して大型車交通量は少ないものの、積雪寒冷地特有の凍結融解作用を受ける環境下にある橋梁といえる。

架橋年次は昭和 40 年であり供用開始から本調査の実施までに 46 年間供用されている。昭和 39 年の鋼道路橋設計示方書⁹⁾に基づいて設計されているが、当設計基準で設計された床版は配力鉄筋量が主鉄筋量の約 25% 程度しか配置されないために、疲労耐久性が低いとされている¹⁾。

図-1 は調査対象橋梁の平面図および断面図である。昭和 62 年には、床版の劣化損傷が進行していたことを受け、版の曲げモーメント低減を目的として G3 桁と G4 桁、および G4 桁と G5 桁の間に縦桁 (ST) が増設されている。合わせて、床版の配力筋不足を解消するために、床版下面に対して配力筋方向へ短冊状の鋼板接着補強が実施されている。平成元年には既設床版と一体構造として歩道橋が拡幅されている。また、平成 19 年には床版上面の劣化損傷部の部分的な補修と合わせて、車道部全体に床版防水層が施工されている。施工記録によると、地覆および車歩道境界部の幅 50cm が反応樹脂型 (ウレタン樹脂) の塗膜系防水層 (以下、「ウレタン吹付け防水」という。)、それ以外の車道部がアスファルト加熱型の塗

表-1 橋梁設置環境および橋梁構造

交 差 物 件	河川
大型車交通量	778 台/日 (上下線合計)
設 置 環 境	積雪寒冷地
最 低 温 度	-22.5°C (1976 年からの年最低気温の平均)
上 部 工 形 式	単純非合成鋼桁 ・橋長: 22.50m×3 連 ・幅員: 車道 8.25m+歩道 2.5m
架 橋 年 次	昭和 40 年 (46 年間供用)
適 用 基 準	昭和 39 年鋼道路橋設計示方書
設計床版厚さ	18cm
補 修 履 歴	昭和 62 年 ・橋軸方向に短冊状の鋼板接着 ・縦桁増設 平成元年 ・歩道橋拡幅 (既設床版と一体) 平成 19 年 ・床版上面コンクリートの部分補修 ・床版防水層 (5 年間供用)

膜系防水層 (以下、「アスファルト加熱型塗膜防水」という。)である。床版防水の構成はウレタン吹付け防水がプライマ、ウレタン樹脂防水材、舗装用接着剤、アスファルト加熱型塗膜防水がプライマ、アスファルト加熱型防水材、珪砂である。

2.3 調査の方法

(1) 防水層および排水設備の目視調査

舗装、防水層、床版コンクリートのコアを採取し、側面の状況等を目視により観察した。また、舗装を撤去した状態で防水層および排水設備の状況を観察した。

(2) 防水層の引張接着試験

防水層とコンクリートおよび舗装との接着性を確認す

表-2 舗装、防水層、コンクリートコアの採取位置

方向	測線	概要	輪荷重 の影響	水の 影響
橋軸 方向	L1	歩道近傍	小	大
	L2	輪荷重の車輪間	小	中位
	L3	センターライン C.L.	小	小
	L4	輪荷重重走行帯	大	中位
	L5	地覆近傍	小	大
	L6	排水マス近傍	小	大
橋軸 直角 方向	T1, T4, T7	伸縮装置近傍 (A1側)	大	大
	T2, T5, T8	支間中央	小	小
	T3, T6, T9	伸縮装置近傍 (A2側)	大	大

るために、舗装、防水層、床版コンクリートからなるコアを採取し引張接着試験を実施した。コアの直径は100mmとし、図-1に示す位置について46本のコアを採取した。コアの採取位置は表-2のような橋軸方向および橋軸直角方向の測線において系統的に決定した。具体的には、輪荷重の影響と水の影響の大小が異なると考えられる位置として、橋軸方向に6測線（L1～L6）、橋軸直角方向に9測線（T1～T9）を設定した。試験方法は道路橋床版防水便覧⁹⁾に準拠し、23℃に温度調整した室内において試験を実施した。本試験においては防水層の引張接着強度に着目することとし、試験においてアスファルト舗装の材料破壊の発生を避けるために、採取したコアはアスファルト舗装を10mm残して切断して試験に供した。

2.4 調査の結果

(1) 防水層の目視調査の結果

防水層の状況の一例を図-4に示す。図-4(a)は図-1に示したT1測線（伸縮装置近傍）とL2測線（輪荷重の車輪間）の交点で採取したコアの状況である。コアの削孔中にアスファルト舗装と床版コンクリートが分離した。コンクリート側の破断面には、固着した泥状の付着物が認められた。破断面は長期にわたって水環境に曝されていたものと考えられる。図-4(b)はT1測線（伸縮装置近傍）とL5測線（地覆近傍）の交点で採取したコアの側面の状況である。アスファルト舗装、防水層（ウレタン吹付け防水）、コンクリートが相互に剥がれて分離しており。コア採取位置周辺の箇所においても同様の状態であった。このため、床版コンクリート上面は降雨や融雪があった場合には時には滞水環境となっていたものと推測される。当該コアは地覆端部から300mmの位置で採取



(a) 削孔中に分離したコアの破断面（T1-L2）



(b) 削孔中に分離したコアの側面の状況（T1-L5）



(c) 車歩道境界近傍の防水層の状況（舗装撤去後）

図-4 防水層の状況

したものであり、輪荷重の影響は小さいものと考えられる。従って、アスファルト舗装、防水層、コンクリート相互の付着消失は、施工的な要因や供用中の滞水、凍結融解が考えられる。なお、コアの床版コンクリートのひび割れや砂利化は認められず、コア採取位置周辺の床版コンクリート上面がややスケリングしていた程度であった。

図-4(c)は車歩道境界近傍の舗装撤去後の状況である。排水マス周辺の防水層が付着消失してめくれあがっていた。また、防水層が歩道の縁石に立ち上げて設置されていたが、防水層と縁石に隙間が認められ、防水層下側へ

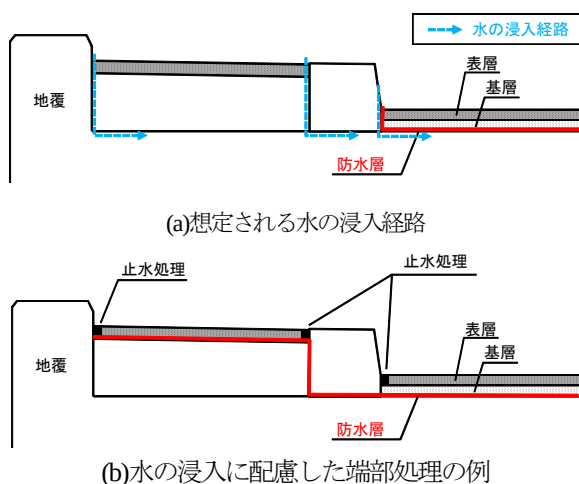


図-5 地覆部の防水層の端部処理

の水の浸入経路となっていたが、これは縁石同士の突合せ位置で顕著であった。図-5 (a) は車歩道境界付近での水の浸入経路を模式的に示したものである。防水層立ち上げ部と縁石の間の他にも、縁石および地覆の境界も水の浸入経路となった可能性がある。歩道部において水の浸入を抑制するためには、防水層を縁石で立ち上げるのではなく、図-5 (b)のような端部処理を講じる必要がある。

(2) 防水層の引張接着試験の結果

a) 供試体採取位置に着目した分析

ここでは、供試体の採取位置、すなわち橋軸直角方向の位置に着目して引張接着試験の結果を分析する。

図-6 は橋軸直角方向 (T1～T9) の引張接着強度の分布であり、道路橋床版防水便覧⁹⁾における規格値である 0.6N/mm^2 を破線で併記している。図より、引張接着強度の最大値は L4 (輪荷重走行帯) の 1.3N/mm^2 であるが、コア削孔中に破断したものも含めて引張接着強度 0N/mm^2 が複数認められた。

図-7 は規格値を基準として示した引張接着強度の頻度である。試験を実施した合計 46 箇所のうち 76% が規格値未滿、46% が引張接着強度ゼロであった。橋軸直角方向の位置 (橋軸方向測線 L1～L6) に着目すると、地覆近傍 (L5) および排水マス近傍 (L6) の 100% が引張接着強度ゼロであり防水層の機能が全く保持されていない状態である。地覆近傍は水が集まりやすいことから特に防水層の確実な機能が求められる部位であり、地覆近傍においては入念な管理のもとに防水層の施工を実施する必要がある。輪荷重走行帯 (L4) では 56%、センターライン (以下、「C.L.」という。) (L3) では 64%、車

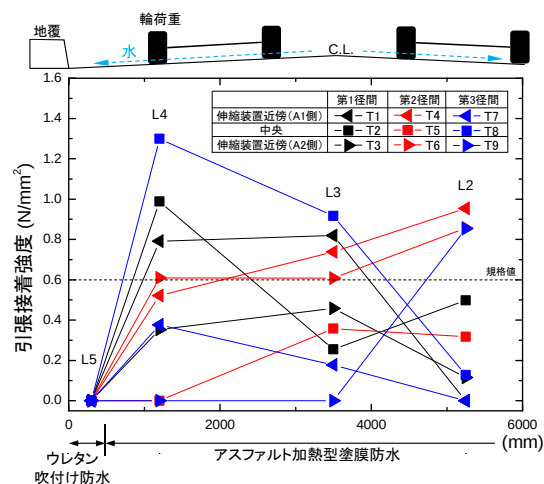


図-6 引張接着強度の橋軸直角方向の分布

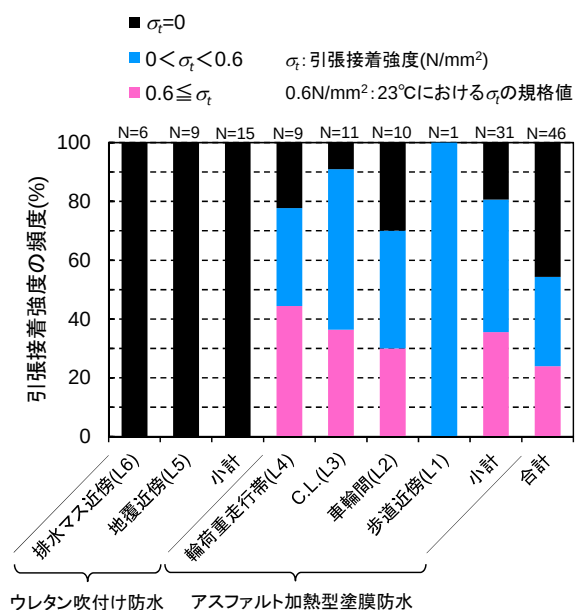


図-7 規格値を基準とした引張接着強度の頻度 (図中の N は試験実施数)

輪間 (L2) では 70% が規格値未滿である。

アスファルト加熱型塗膜防水層が施工されている L1～L4 の範囲内では、L4 (輪荷重走行帯) が最も多く輪荷重の繰り返し走行を受ける部分であるが、L1～L4 の総和 (小計) と比較すると $0.6 \leq \sigma_t$ の頻度はやや大きい。本橋梁における交通条件や防水層施工から本調査実施までの約 5 年間においては、輪荷重により防水層が顕著に損傷することはなく、逆に輪荷重の繰り返し走行により舗装が転圧されて引張接着強度が増加した可能性がある。

b) 防水層の材料に着目した分析

ここでは、防水層の材料に着目して引張接着試験における強度と破壊モードについてマクロ的に分析する。

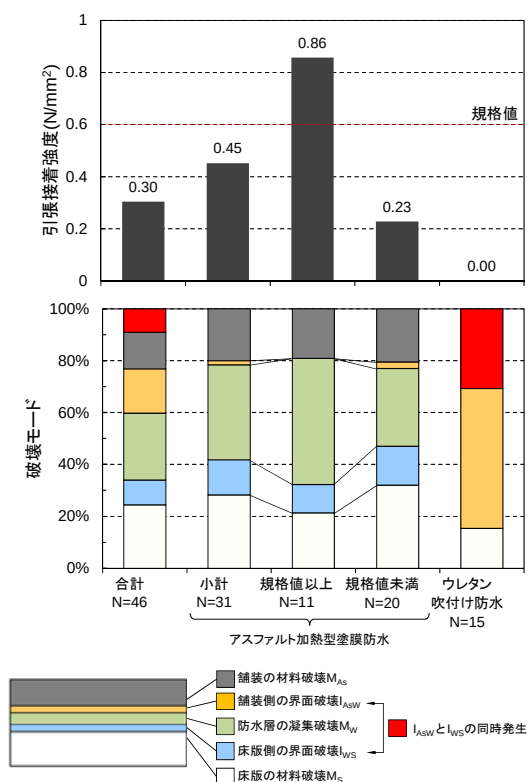


図-8 防水層材料ごとの引張接着強度と破壊モードの関係 (平均)

図-8 はアスファルト加熱型塗膜防水およびウレタン吹付け防水に対して引張接着強度、破壊モードの平均を示したものである。ここで、破壊モードとは破壊面における破壊形態を i) アスファルト舗装 (以下、「舗装」という。) の材料破壊 M_{As} 、ii) 舗装と防水層の界面破壊 I_{AsW} 、iii) 防水層の凝集破壊 M_W 、iv) 防水層とコンクリートの界面破壊 I_{WS} 、v) コンクリートの材料破壊 M_S の 5 種類に分類し、コア断面積に対する面積率としたものである。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。なお、ウレタン吹付け防水では、1 つの供試体においてコア削孔中から舗装、防水層、床版コンクリート相互の間で付着が完全に消失しているものが認められた。このような供試体については、舗装の界面破壊 I_{AsW} および防水層とコンクリートの界面破壊 I_{WS} 同時発生として図中に破壊モードを赤色で示している。

まず、全数 ($N=46$) に対する引張接着強度の平均は 0.30N/mm^2 であり規格値を大きく下回っていた。ウレタン防水は 0N/mm^2 ($N=15$) であり、全ての供試体で付着性が全く確保されていなかった。

アスファルト加熱型塗膜防水の全数 ($N=31$) に対す

る引張接着強度の平均は 0.45N/mm^2 である。アスファルト加熱型塗膜防水では、引張接着強度が規格値 (0.6N/mm^2) 以上および規格値未満のものについて分類して示した。規格値以上のもの ($N=11$) については、その平均は 0.86N/mm^2 であった。破壊モードは防水層の凝集破壊 M_W が最も卓越しており約 50% を占めている。これに対して規格値未満のものは引張接着強度の平均が 0.23N/mm^2 であった。破壊モードは凝集破壊の割合 M_W が約 30% であり、規格値以上と比較すると凝集破壊は減少する一方でその他の破壊モードの割合が増加し、特に床版コンクリートの材料破壊 M_S の増加が顕著である。これは、床版コンクリートの脆弱化部分を除去しきれずに防水層の施工した可能性や、供用中において床版コンクリート内部へ水が浸入して水環境下でのコンクリートの疲労の進行や、凍結融解の繰り返しによるコンクリートの脆弱化が生じていたことが要因として考えられる。

ウレタン防水は引張接着強度の平均が 0N/mm^2 ($N=15$) であり、全ての供試体で付着性が全く確保されていなかった。破壊モードは、舗装と防水層の界面破壊 I_{AsW} が大きく卓越している。また、舗装の界面破壊 I_{AsW} および防水層とコンクリートの界面破壊 I_{WS} 同時発生も約 30% 発生している。このように、ウレタン吹付け防水では各材料間の界面、特に舗装と防水層の界面において、付着性が確保されていない状況であった。ここで、ウレタン吹付け防水に対する試験実施位置は、地覆近傍 (L5 測線) および排水マス近傍 (L6 測線) の輪荷重が通過することが少ない箇所である。このため、ウレタン吹付け防水の機能低下要因としては、滞水や凍結融解等の環境要因や施工的な要因が挙げられる。

3. 輪荷重作用下における防水層の応力特性に関する有限要素解析

3.1 本解析の目的と概要

橋梁の供用期間中における防水層に対する作用として車両の走行、環境温度 (夏季、冬季)、凍結融解の繰り返し、降雨水や融雪水が挙げられる。これらの中で主な荷重条件は車両走行に伴う輪荷重の繰り返しであり、防水層は設計耐用期間において適切な疲労耐久性を有していることが求められる。

しかしながら、現状の技術では輪荷重載荷時に防水層に発生する応力を直接計測することが困難であるために、荷重走行時の応力特性や発生応力に影響する要因やその程度が不明確である。

そのため本節では、輪荷重作用時の防水層の応力性状

および応力性状への影響要因を把握するためのアプローチとして3次元FEM解析を実施した。

RC床版、防水層、舗装の3層からなる床版構造を対象とし3次元FEM解析を実施した。解析パラメータとして、舗装厚、舗装温度（弾性係数）および床版コンクリートの損傷（曲げ剛性）に着目し、輪荷重作用時の防水層の応力性状に及ぼす影響を確認する。

3.2 解析の方法

(1) 解析モデル

本解析は、FEM解析の汎用コードであるMSC.Marc (ver.2010)を使用した線形弾性解析である。図-9には、本検討で行った数値解析のモデルを示す。解析対象とする床版の形状や支持条件および配筋は、既往のRC床版の輪荷重走行試験²⁾を参考に表-3のように決定した。床版、防水層、舗装については6節点および8節点ソリッド要素でモデル化し、弾性支持部については支持部材(H鋼)と断面二次モーメントが等価となる梁要素で簡便にモデル化した。床版と防水層ならびに防水層と舗装との境界部には付着を考慮したジョイント要素を配置し、付着部分に生じるせん断応力を確認できるようにした。

荷重は輪荷重を想定し、床版中央へ100kNの鉛直荷重として考慮することとした。なお、輪荷重はダブルタイヤとし、一輪当たりの寸法は200×200mm、全体で80,000mm²の範囲に作用するものとし、接地範囲にはすべて等分布荷重として作用するものとした。

(2) 材料特性値

解析に使用した材料特性値を表-4に示す。床版については、その曲げ剛性が等価となるような一様体としてモデル化することとした。また、その剛性は橋軸方向および橋軸直角方向で異なることから、モデルは直交異方性材料として実物の剛性を忠実に再現している。弾性係数は通常のコンクリートを全断面有効とした場合と、疲労損傷により剛性が低下した状態として、引張側を無視した場合を想定することとし、それぞれの場合について弾性係数を設定した。

舗装はアスファルト舗装（以下、As舗装）とし、As混合物の材料特性の温度依存性を考慮して、-20℃、23℃、50℃における弾性係数を使用した。ここで、-20℃および50℃は、それぞれ冬期間および夏期間を想定した温度である。なお、弾性係数は次式⁷⁾により決定した。

$$E_{As} = \frac{1}{\frac{1}{8500} + 9.373 \times 10^{-19} \times 1.118^{T_k}} \quad (1)$$

ここで、 E_{As} はアスファルト混合物の弾性係数(N/mm²)、

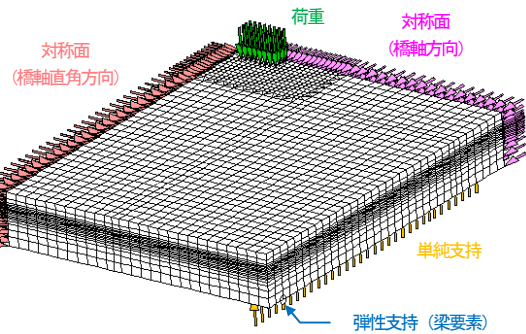


図-9 解析モデル

表-3 解析対象としたRC床版の概要

形状	橋軸方向		3,300mm
	橋軸直角方向		2,650mm
	RC 床版厚		160mm
	防水層厚		3mm
	As 舗装厚		40, 80, 120mm
支持条件	単純支持間隔 (橋軸直角方向支間)		2,350mm
	弾性支持間隔 (橋軸方向支間)		3,125mm
配筋	主鉄筋	上側	φ16@260mm
		下側	φ16@130mm
	配力鉄筋	上側	φ13@230mm
		下側	φ13@230mm

表-4 材料特性値

RC 床版*	全断面 有効	$E_1=22,400\text{N/mm}^2$ $E_2=24,200\text{N/mm}^2$ $E_3=22,000\text{N/mm}^2$
	引張側 無視	$E_1=2,700\text{N/mm}^2$ $E_2=7,090\text{N/mm}^2$ $E_3=22,000\text{N/mm}^2$
	防水層	$E=10\text{N/mm}^2$, $\nu=0.45$
As 舗装	-20℃	$E=8,380\text{N/mm}^2$, $\nu=0.35$
	23℃	$E=3,070\text{N/mm}^2$, $\nu=0.35$
	50℃	$E=230\text{N/mm}^2$, $\nu=0.35$

E: 弾性係数（添字は1: 橋軸方向、2: 橋軸直角方向、3: 鉛直方向を示す）、 ν : ポアソン比

T_k はアスファルト混合物の温度（K）である。

防水層には北海道での適用実績の多いアスファルト加熱型塗膜系を想定した。60℃までは防水層単体の弾性係数が温度の影響を受けない⁸⁾ことから、材料特性は一定とした。

防水層の境界部については、本検討においては付着切れの影響について検討するものではないためこれを考慮せず、鉛直ばね剛性および水平ばね剛性ともに $k_v = k_h =$

10^6N/mm^3 とした。また、付着特性の温度依存性は考慮していない。

3.3 解析の結果および考察

(1) 防水層界面の応力性状

図-10 に、防水層の付着せん断応力分布および鉛直応力分布を示す。着目断面は床版中央の走行直交方向断面である。なお、舗装厚や床版コンクリートの剛性による応力分布形状の著しい差異は確認されなかったことから、解析結果の例として、舗装厚 80mm、床版コンクリートを全断面有効としたときの応力分布を示している。

図より、鉛直応力についてみると、舗装の剛性が著しく低い 50°C では、荷重の面圧 1.25N/mm^2 と同程度の圧縮力が作用している。また、温度が低下し舗装の弾性係数が増加するにつれて圧縮力は小さくなり、荷重の拘束効果によるせん断抵抗は薄れていくものと推察される。

付着せん断応力についてみると、防水層の上下面ともに荷重端部（床版中央から 250mm）の近傍でせん断応力が最大となる傾向が見られる。特徴的な挙動として、 50°C の場合に荷重位置で舗装が局所的に変形することにより荷重端部でせん断応力が卓越し、両側で符号が反転している。輪荷重がランダムに走行した場合、舗装と防水層の界面および床版と防水層の界面にはそれぞれ最

大で 0.17N/mm^2 、 0.22N/mm^2 の応力振幅が交番で作用することになる。また、 23°C の場合においても若干ではあるが、付着せん断応力が反転していることが確認できる。温度が 23°C 、 -20°C の場合については、局所的なせん断応力の発生が緩和され、荷重端部から単純支持辺の間でほぼ一様に応力が分布する傾向が伺える。

次に、鉛直応力と付着せん断応力の関係については、 50°C の場合にはせん断応力が作用する範囲の大部分が圧縮状態であるのに対し、 23°C および -20°C では圧縮力が作用しない範囲にも最大せん断応力と同程度のせん断応力が生じている。

(2) 応力性状への影響要因

図-11 に各解析ケースにおける最大付着せん断応力とその発生箇所および同箇所における鉛直応力を示す。

図(a-1)(b-1) より、本検討の範囲における最大付着せん断応力は、おおよそ $0.04\sim 0.17\text{N/mm}^2$ の範囲となっており、舗装温度が高い場合ほど、また床版剛性が低い場合ほど大きくなっていることが分かる。これは、それぞれの材料の剛性が低いほど、その荷重に対応した変形は大きくなり、変形量に応じて境界面に生じる応力も大きくなったためと推察される。一方、舗装厚に関しては、床版との界面および舗装との界面で、舗装厚の減少とと

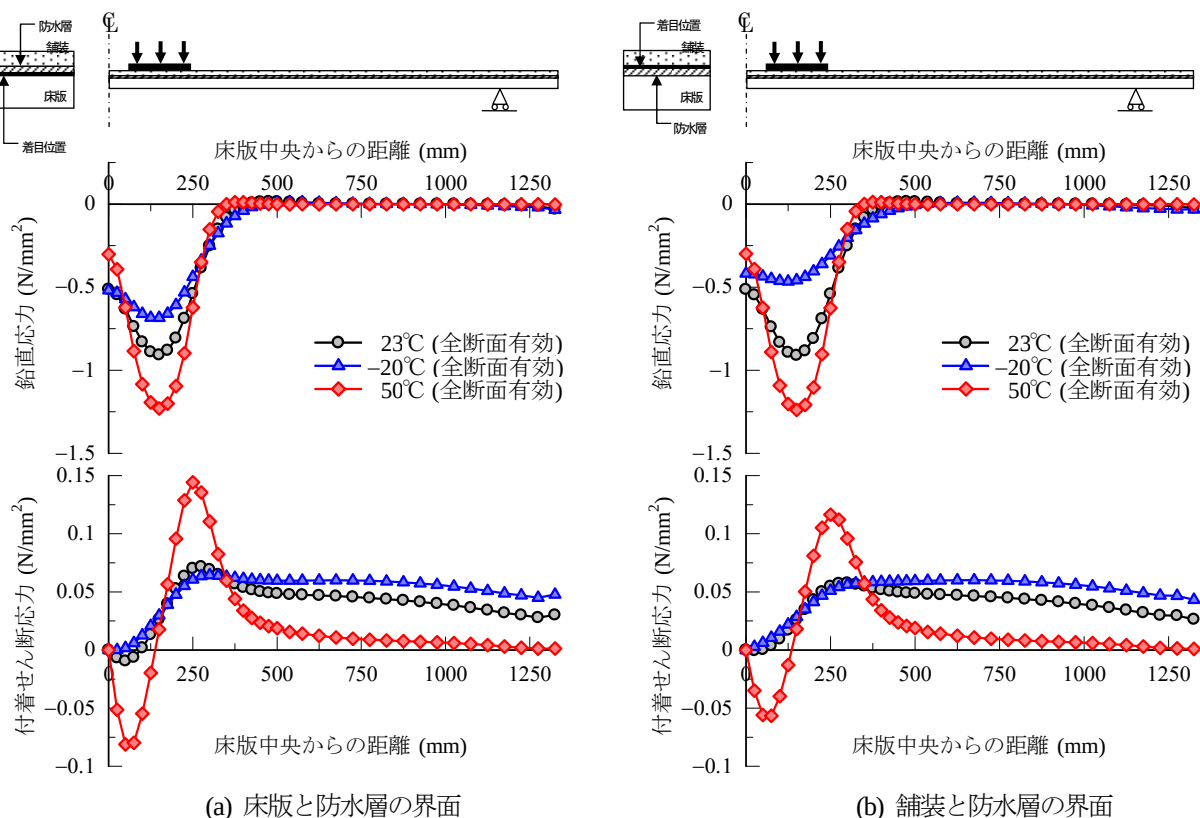
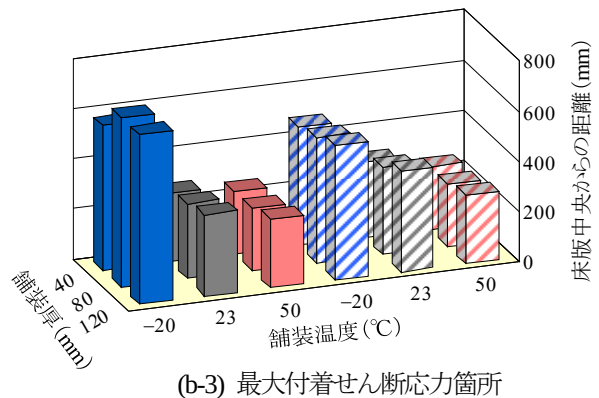
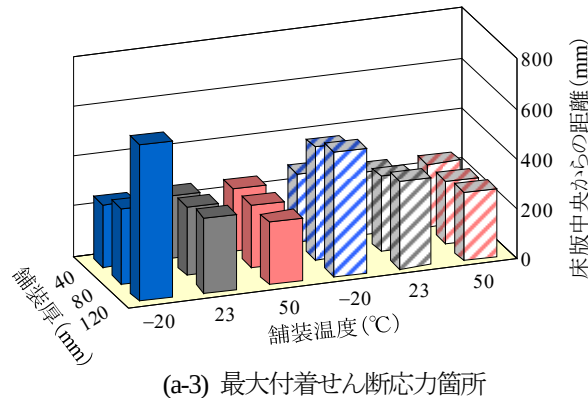
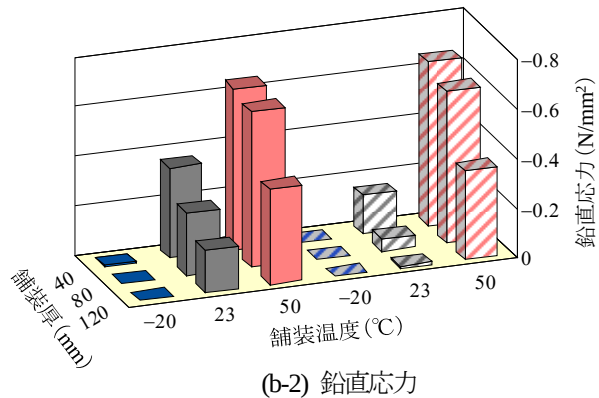
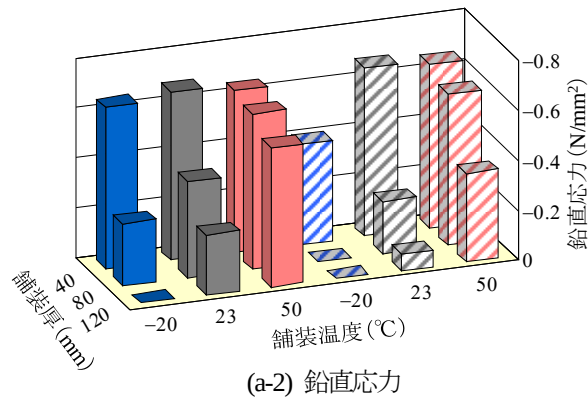
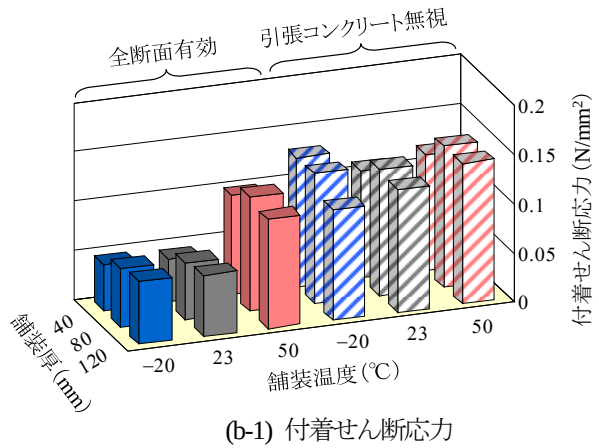
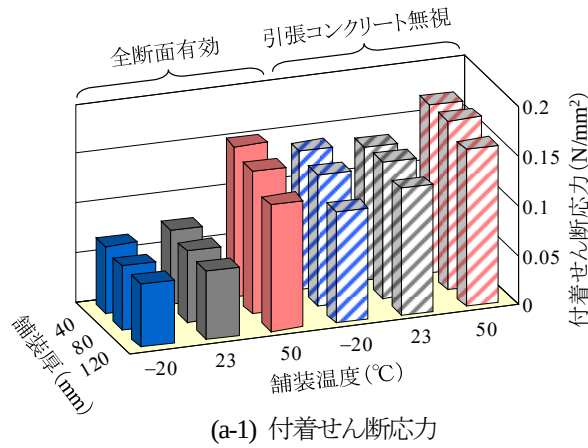


図-10 防水層の界面応力分布（舗装厚 80mm）



(a) 床版と防水層の界面

(b) 舗装と防水層の界面

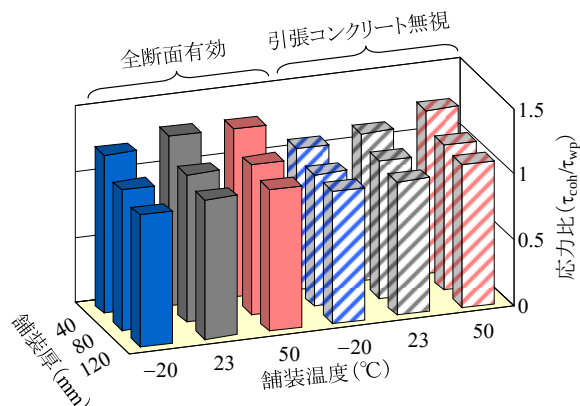
図-11 最大付着せん断応力の発生箇所と応力性状

もに付着せん断応力がそれぞれ増加および減少するが、他の要因と比較してその影響は小さいものであった。本検討では舗装の流動や割れ等を考慮していないが、これらが舗装厚の影響を受けることを踏まえると、別途詳細な検討を要するものと考えられる。

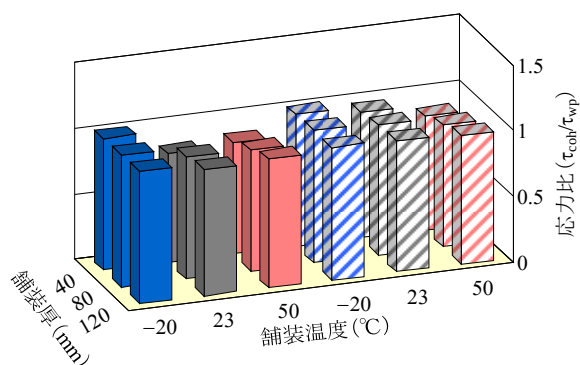
図(a-2)(b-2)より、鉛直応力への影響をみると、舗装の上下面ともに舗装厚の減少および温度の低下により鉛直応力は低下することがわかる。注目すべき点として、舗装との界面では、舗装温度が -20°C の場合に最大付着

せん断応力箇所に剥離方向の垂直応力が作用している。付着せん断応力は、舗装温度 23°C の場合と比較して同程度であるが、引張力が作用する過酷な応力状態となっており、積雪寒冷地では、冬期間に防水層が損傷しやすい可能性が考えられる。

図(a-3)(b-3)より、最大付着せん断応力の発生箇所についてみると、舗装厚の増加および舗装温度の低下とともに荷重位置から離れていく傾向が見られる。これは、舗装温度が低いことにより舗装の剛性が高くなり、荷重分



(a) 床版と防水層の界面



(b) 舗装と防水層の界面

図-12 せん断応力比

散効果がより強く生じたことによるものと推察される。また、最大応力の発生箇所が比較的近接している舗装温度 23°C および 50°C に対し、-20°C のみ大きく離れており、積雪寒冷地では、長期間の温度変化と輪荷重走行により広範囲に渡った損傷が生じやすいことが示唆される。

(3) 破壊モードの検討

床版防水層の破壊は、舗装や防水層、床版コンクリートの材料破壊と異種材料間の付着破壊に分けることができる。本節では、防水層界面のせん断応力と防水層自体のせん断応力を比較することにより、破壊モード（付着破壊と凝集破壊）に関する定性的な傾向を確認した。

図-12 には、最大付着せん断応力発生箇所におけるせん断応力比（付着せん断応力 τ_{coh} と防水層のせん断応力 τ_{wp} の比： τ_{coh}/τ_{wp} ）を示している。図より、防水層の上下面で異なる傾向が見られ、舗装厚が小さくなる場合や舗装温度が増加する場合、床版と防水層の界面では τ_{coh}/τ_{wp} が増加する傾向であるのに対し、舗装と防水層の界面では τ_{coh}/τ_{wp} が低下する。したがって、せん断応力の比率に基づく防水層の破壊モードに関する傾向として、舗装厚が小さく、温度が高くなる、すなわち舗装の剛性が低下



図-13 伸縮装置近傍での防水層の損傷例

するにつれて、床版と防水層に着目すると付着破壊が、舗装と防水層に着目すると凝集破壊の割合が高くなることが推察され、3層構造としては、最も大きなせん断応力が作用する床版と防水層の接着性を確保することが重要であると考えられる。反対に、舗装厚の増加や温度の低下により舗装の剛性が増加する場合、床版と防水層に着目すると防水層の凝集破壊が、舗装と防水層に着目すると付着破壊との割合が高くなることが推察され、3層構造としては、舗装と防水層の接着性が重要となると考えられる。ただし、本検討はあくまでせん断応力のみに着目した比較であることから、今後、防水層の材料強度と付着面の強度の差異を考慮した上で破壊モードへの影響要因を検討し、防水性能向上に向けた方策を講ずる必要がある。

4. 舗装、防水層、コンクリートからなる構造体のせん断疲労特性に関する実験検討

4.1 実験の概要と目的

特に伸縮装置近傍では図-13のような防水層の劣化損傷事例が多い傾向にある⁹⁾。伸縮装置近傍は、伸縮装置の段差に起因した輪荷重の衝撃力が作用することに加えて、橋面勾配の関係から滞水しやすい箇所である。このような、厳しい条件が伸縮装置近傍の防水層の損傷を招いている要因の一つとして考えられる。

ここで、床版防水層に関する技術基準¹⁰⁾では供用中の交通荷重に対する床版防水層の耐久性の照査手法として、せん断疲労試験が示されている。本試験は輪荷重の繰り返しによって舗装、防水層、床版コンクリート間に発生するせん断応力の繰り返し作用を再現して、防水層のせん断疲労特性を確認するものである。

本研究では防水層の損傷事例の多い伸縮装置近傍に着目し、水環境下における舗装、防水層、コンクリートの

構造体のせん断疲労耐久性について検討するために、水浸状態でのせん断疲労試験を実施した。

4.2 せん断疲労試験の方法

(1) 供試体

試験には舗装、防水層、コンクリートからなる供試体を用いた。表-5 には供試体の使用材料示している。舗装は13mm トップの碎石マスチックアスファルト (SMA) とし、バインダはストレートアスファルトとした。防水層には、北海道の国道橋において伸縮装置端部での適用実績が比較的多い吹付系のウレタン防水層を用いた。コンクリートは JIS 平板とした。縦横 300mm、厚さ 100mm (舗装 40mm、コンクリート 60mm) の舗装、防水層、コンクリートからなる平板を図-16 に示すように縦横 150mm となるように 4 等分に切断し、せん断疲労試験に供した。

(2) せん断疲労試験装置

実験に使用したせん断疲労試験装置の全景を図-15 に、概要図を図-17 にそれぞれ示す。本装置は大阪大学方式のせん断疲労試験機であり、偏心回転するカムによる強制変位付与部と床版および舗装からなる 2 層供試体の接合面に水平せん断応力をバネの力で与えるユニットから構成される。回転カムを中心に 3 つのユニットを放射状に配置することにより 3 つのユニットについて同時に試験を実施することが可能である。ユニットは、供試体の前後にバネを設けた構造となっている。回転カム側が载荷側、他方が反発側であり、供試体に安定した荷重を加えるために载荷側、反発側でそれぞれ 2 本のバネが並列

に設置されている。供試体の舗装部分が载荷側のバネ、コンクリート部分が反発側バネで接続される。ラケット状の载荷側のせん断箱で舗装部分を、反発側のせん断箱でコンクリートを固定する。油圧式のロータリーアクチュエータによるカムの回転運動は载荷側バネの並進往復運動に変換される。この並進往復運動が载荷側バネを介して供試体舗装部に水平力の繰り返しを与える。回転カムの中心はロータリーアクチュエータの回転中心に対して δ_L だけ偏心している。このとき防水層に作用する最大せん断応力は次式により与えられる。

$$\tau = \frac{k\delta_L}{A} \quad (2)$$

ここに、 τ は作用せん断応力、 k はバネ定数、 A は供試体の断面積である。

(3) せん断疲労試験の手順

供試体を上下のせん断箱に設置し、箱内での水平の動きをボルトで固定した。水浸状態で実験を実施する場合には、防水層が水浸するまで下側せん断箱に注水した。その後、回転カムを作動させ、供試体の破壊により舗装とコンクリートの間の相対水平変位が著しく大きくなり载荷不可能となった段階で载荷を終了した。

(4) 計測項目

試験中において、レーザー変位計により载荷側バネの変位量を、カンチレバー式変位計により上下のせん断箱を介して舗装とコンクリートの相対水平変位を測定した。

(5) 実験ケース

表-6 に実験ケースを示す。水の条件をパラメータとして乾燥状態すなわち水を張らない状態、および水浸状態の 2 種類についてそれぞれ 2 供試体ずつ実験を実施した。作用せん断応力 τ は、舗装、ウレタン防水層、床版に対する既往の有限要素解析結果¹⁰⁾を参考に 0.05N/mm^2 程度に設定した。なお、各供試体において作用せん断応力が異なっているのは、各载荷ユニットのバネ定数の特性

表-5 供試体の使用材料

構成	使用材料	厚さ(mm)
舗装	SMA (13mm トップ) ストアス 60/80	40
防水層	ウレタン防水層	2.5
コンクリート	JIS 平板	60

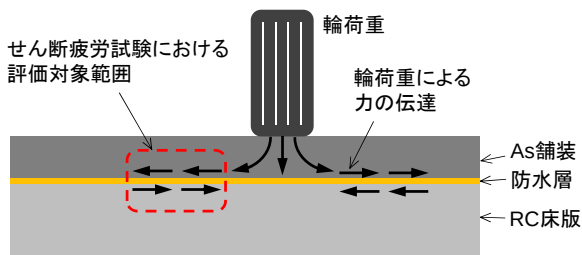


図-14 輪荷重による応力伝達の概念図



図-15 せん断疲労試験機の全景

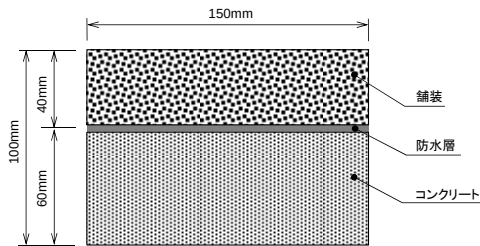


図-16 供試体断面図

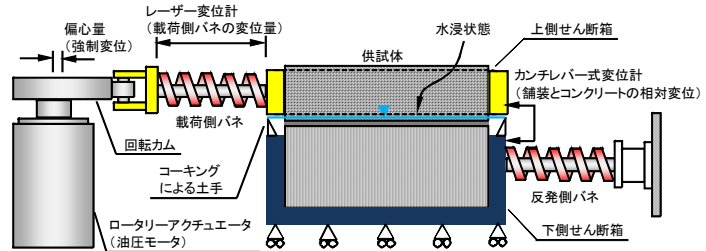


図-17 せん断疲労試験装置（回転カムと1つのユニット）

表-6 実験ケースおよび破壊回数

	水の条件	作用せん断応力 τ (N/mm^2)	破壊回数 N (回)	τ に対して文献12)の乾燥状態のS-N曲線から求めた破壊回数 N_u (回)	N/N_u
D-1	乾燥	0.054	1,096,193 (継続中)	656,032	1.67
D-2		0.057	526,201	489,307	1.08
W-1	水浸	0.047	123,778	1,184,413 (乾燥の場合)	0.11
W-2		0.057	35,169	375,164 (乾燥の場合)	0.09

値として、3つあるユニットのそれぞれのバネの載荷試験により求めたバネ定数を用いたためである。

(6) 実験結果の整理の方法

a) 破壊回数

実験終了時の載荷回数をもってせん断疲労による破壊回数とした。

b) 破壊モード

実験終了後の供試体破断面の破壊モードは2.4と同じくi)～v)の5種類に分類した。

4.3 せん断疲労試験の結果と考察

(1) 載荷回数

表-6に実験終了時の載荷回数を示す。図-18はせん断疲労試験結果から得られた実験終了時の載荷回数と作用せん断応力の関係である。図中には既往のせん断疲労試験結果から得られているウレタン防水層の乾燥状態におけるS-N曲線¹²⁾を併記した。なお、D-1は供試体が破壊に至っておらず、現在も試験を継続している。乾燥状態の載荷回数はD-1が52万回、D-2が110万回以上であり既往のS-N曲線と概ね対応している。一方で水浸状態の載荷回数はW-1が12万回、W-2が3.5万回であり、乾燥状態と比較して著しく少ない値である。

表-6には、既往の乾燥状態のS-N曲線¹²⁾から求めたD-1～W-2の作用せん断応力に対応する破壊回数 N_u および、 N_u に対する本実験の破壊回数 N の比である N/N_u を示している。これより、乾燥状態では N/N_u は1程度

またはそれより大きな値を示しているのに対し、水浸状態では N/N_u は0.1程度である。すなわち、乾燥状態に比べて水浸状態ではせん断疲労耐久性が1/10に低下している。

(2) 破壊モード

図-19は実験終了後の供試体破断面の状況である。左が舗装側の面、右がコンクリート側の面を示しており、コンクリート側の黄緑色が防水層である。なお、D-1については供試体が未破壊であるため示していない。図より、乾燥状態ではD-2の1供試体のみではあるが、コンクリート側の面に舗装が付着しており舗装の材料破壊が卓越している傾向にある。一方で水浸状態のW-1およびW-2では、コンクリート側の面に舗装の付着が少なく、特にW-2で舗装と防水層の界面破壊が卓越している。

(3) 考察

図-18および図-19を踏まえると、乾燥状態と比較して水浸状態では舗装と防水層の界面の破壊が卓越し、疲労耐久性が1/10程度まで著しく低下した。疲労耐久性低下のメカニズムとしては、水の影響により舗装と防水層の界面における摩擦係数が低下することや、界面付近の舗装骨材がせん断挙動する際に界面に浸入した水が水圧上昇することで破壊の進展が助長されること等が考えられる。しかしながら、明確なメカニズムを解明するためには、より詳細な検査を実施していく必要がある。

本実験結果を踏まえると防水層のせん断疲労耐久性を

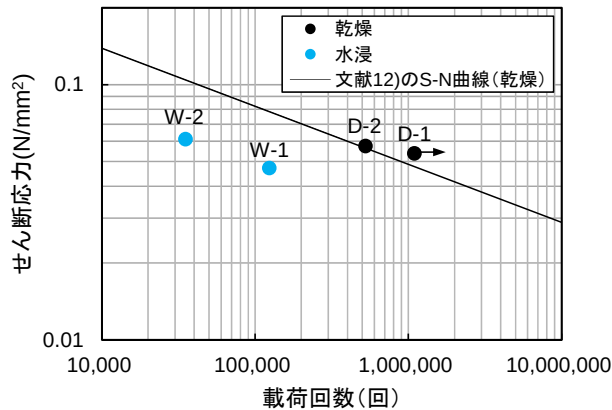


図-18 載荷回数とせん断応力の関係

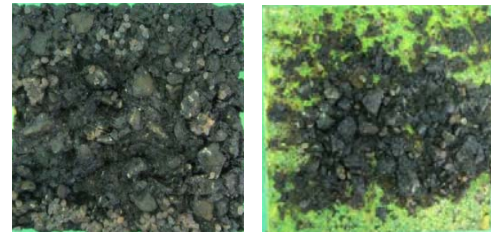
確保するためには、舗装との一体性が高い防水層を開発することが望まれる。これに加えて舗装内部、すなわち防水層の上に長期間滞水しない環境とすることも肝要である。そのためには、雨水や融雪水を速やかに排除するための排水計画や排水設備が極めて重要である。

5. まとめ

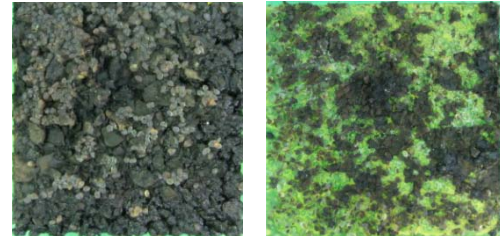
本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

床版防水層に関する現地調査に関して、

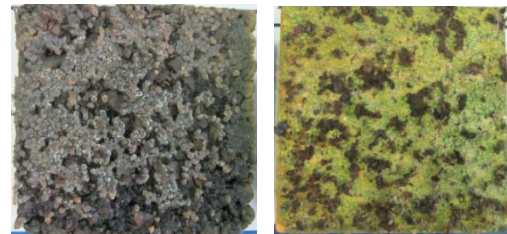
- (1) 伸縮装置や地覆近傍において、防水層下側に水の存在が確認される部分があった。また、歩道の縁石と防水層立ち上げ部の間に隙間が認められ、水の浸入経路となっていた。このことは、防水層の端部処理の重要性を示している。
 - (2) 引張接着試験を実施した46箇所のうち76%が規格値未満、46%が引張接着強度ゼロであった。
 - (3) アスファルト加熱型塗膜防水が施工されていた範囲では、引張接着強度が規格値未満のものはコンクリートの材料破壊が卓越していた。防水層施工前のコンクリート脆弱部の除去不足や、供用中に防水層下側への水の浸入を伴うコンクリートの疲労劣化や凍害が要因として考えられる。
 - (4) ウレタン吹付け防水が施工されていた地覆および排水マス近傍の全数 (N=15) が引張接着強度ゼロであった。輪荷重の通過が少ない位置であり、施工を含む輪荷重以外の要因によるものと考えられる。
- 輪荷重作用下における防水層の応力特性に関して、
- (5) 輪荷重を考慮した3次元FEM解析によると、舗装温度が50°Cのとき、付着せん断応力が著しく増加するとともに、交番応力の作用により応力振幅が増



(a) D-2 (N=526,201 回)



(b) W-1 (N=123,778 回)



(c) W-2 (N=35,169 回)

図-19 実験終了後の供試体破断面の状況 (左が舗装側面、右がコンクリート側面、黄緑色が床版防水層)

- 大することが示唆される。これより、夏期間には、わだち掘れだけでなく防水層の損傷が生じている可能性があり、点検等の実施に際し留意が必要となる。
- (6) 舗装厚が増加あるいは舗装温度が減少する場合、付着せん断応力が低下する一方で、鉛直方向の圧縮力が低下し、最大せん断応力発生箇所が荷重位置から離れる傾向がある。これは、積雪寒冷地においては、冬期間に荷重の拘束効果低下により付着性能が低下し、また損傷箇所が広範化することを示唆している。
- (7) 防水層の破壊モードに関する検討より、舗装の剛性が低下する場合には床版との付着破壊が、剛性が増加する場合には舗装との付着破壊が生じやすい応力性状となることを確認した。

舗装、防水層、コンクリートからなる構造体のせん断疲労特性に関して、

- (8) 水浸状態における舗装、防水層、コンクリートのせん断疲労試験によると、乾燥状態に比べて水浸状態では、舗装、防水層、コンクリート構造体のせん断疲労耐久性が1/10程度に低下した。

- (9) 乾燥状態では舗装の材料破壊が卓越するのに対し、水浸状態では舗装と防水層の界面破壊が卓越する傾向にあり、せん断疲労状態において舗装と防水層の界面が水の影響を大きく受ける。
- (10) 防水層のせん断疲労耐久性を確保するためには、舗装と防水層の一体性を向上させるのはもちろんのこと、舗装内部すなわち防水層の上が長期間滞水しない環境とすることが肝要であり、雨水や融雪水を速やかに排除するための排水計画や排水設備が極めて重要である。

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
- 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、2010.3
- 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) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書、1964.6
- 6) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007.3
- 7) 安倍隆二、丸山記美雄、熊谷政行：積雪寒冷地におけるアスファルト舗装の理論的設計方法に用いる材料特性および環境条件に関する検討、寒地土木研究所月報、No.708、pp.2-12、2012.
- 8) 野村謙二、魚本健人：道路橋における鉄筋コンクリート床版の防水工に関する研究（その 3）、生産研究、53 巻 5 号、pp.317-320、2001.
- 9) 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.
- 10) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007.3.
- 11) 小浦貴明、大西弘志、松井繁之：道路橋床版防水システムの付着耐久性評価、土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集、pp.311-312、2005.9.
- 12) 小浦貴明、大西弘志、松井繁之：道路橋床版における防水システムの付着耐久性評価手法の開発、土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集、pp.249-250、2004.9.

STUDY ON HIGHLY-DURABLE SLAB WATERPROOFING SYSTEM FOR KEEPING PERFORMANCE OF BRIDGE DECK SLABS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold-Region Construction

Engineering Research Group
(Structures)

Author : NISHI Hiroaki

KONNO Hisashi

OKADA Shinya

SATO Takashi

OMOTE Shinya

SAWAMATSU Toshikazu

Abstract : In this study, various factors were considered for the establishment of a slab waterproofing system capable of coping with the conditions of cold snowy environments and heavy traffic. Damages relating to waterproof membranes were analyzed, and factors affecting to deterioration were summarized. As part of the study, four waterproof membrane types were used in a mid-winter outdoor construction experiment to examine the effects of construction temperature, grinding and cleaning or not of slab-top surface and freeze-thaw action during the in-service period. The results showed that lower temperature construction led to lower tensile bond strength. In one case, the strength for a construction temperature of 3°C was 0.61 times that for a temperature of 7°C. In another case, the strength having a weak laitance layer with low tensile bond strength by a non-ground, and non-cleaned top surface was 0.12 times the corresponding value for a ground and cleaned slab surface.

Key words : Slab waterproofing, RC deck slab, Frost damage, Cold Snowy region