

論文

せん断疲労試験による床版防水層の耐久性評価に関する検討

樋口勇輝*, 黄木秀実*, 馬場弘毅*

*ニチレキ株式会社 技術研究所 (〒329-0412 栃木県下野市柴 272)

道路橋床版における床版-防水-舗装の三構造について、各層間の付着切れを構造破壊と定義し、せん断疲労試験による橋面舗装の耐久性評価を試みた。得られる载荷回数とズレ量の関係によって防水層の耐久性が評価できることを検証した。また、試験温度および応力周波数が耐久性に与える影響を散逸エネルギー理論に基づいて整理した。さらに、静的せん断試験の結果を用いて、試験結果を正規化できることを見出した。

キーワード：床版防水層，せん断疲労試験，使用限界寿命，散逸エネルギー

1. 研究背景

橋面舗装における床版防水層には、活荷重による曲げ作用や混合物の流動などにより、せん断力が作用すると考えられている¹⁾。せん断作用の繰返しにより橋面舗装の一体性が失われた場合、ポットホールなどの損傷に至ることが懸念される。すなわち、防水層には、床版に水を入れない防水性能に加えて、繰返しせん断に対する接着性能が必要となる。ここで、床版-防水-舗装の三構造を一体として考えたとき、各層間の付着が切れた状態を構造破壊と定義すると、せん断作用に対する疲労抵抗性によって寿命を表現できると考える。本研究は、せん断疲労試験により防水層の疲労抵抗性を求め、橋面舗装の接着に関する耐久性評価を試みるものである。

また、既往の研究では、せん断疲労試験において応力の大きさを変動因子と扱うことが多かった²⁾。しかし、実橋においては応力の大きさのみではなく、環境温度・応力周波数の影響も大きいと推測される。したがって、これらの因子を総合的に考慮して、橋面舗装の寿命は算出する必要があると考えられる。本検討では、試験温度および応力周波数を変えたせん断疲労抵抗性を測定し、それらの関係についても整理した。

2. 試験内容

2.1 せん断疲労試験機

装置の概略を写真-1、図-1に示す。せん断疲労試験機は、油圧サーボ機構による横型動的载荷試験装置を使用したものである。舗装体および床版のそれぞれを4面固定した供試体に対して、舗装体の方に応力制御による片振り正弦波振幅を与え、防水層に繰返し一面せん断力の負荷を与えた。

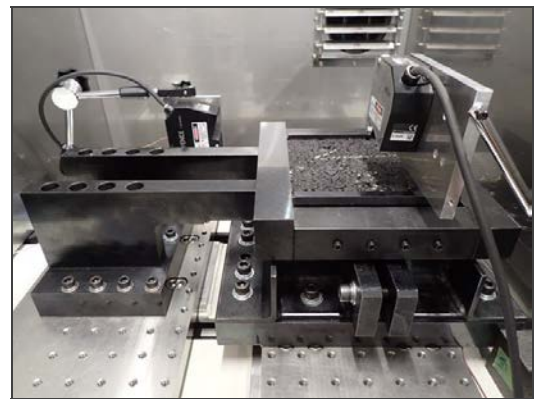


写真-1 せん断疲労試験機

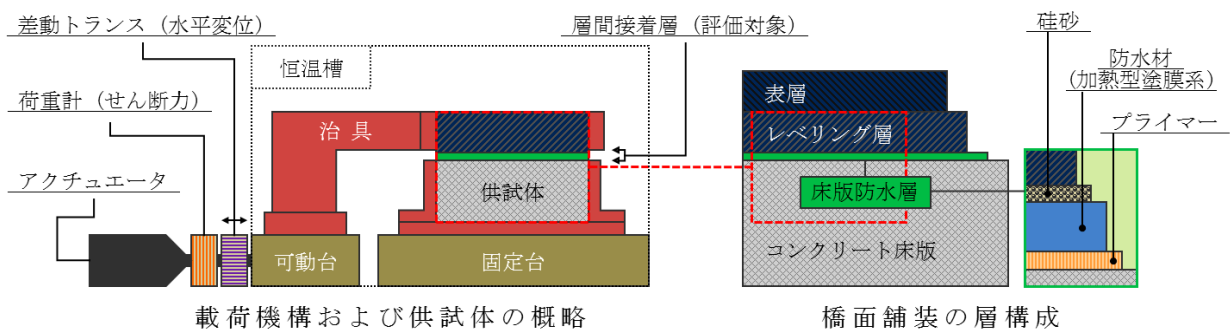


図-1 せん断疲労試験機の概略

2.2 試験供試体

供試体は、道路橋床版防水便覧³⁾(以下、防水便覧)に準拠して作製した。ただし、供試体の端部は舗装体の締固めが不十分で、試験結果に影響を及ぼすことが懸念されるため、図-2に示すように供試体の中心部をダイヤモンドカッターにて切り出し、150×150×100 mmの形状に整形したものを適用した。

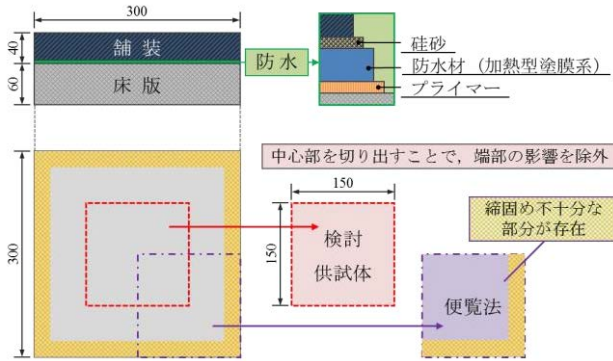


図-2 供試体の構成および加工方法

2.3 使用材料

供試体に使用した材料を表-1に示す。

表-1 仕様材料

層構成	水準		層厚 使用量	
舗装	混合物種類	密粒度アスファルト混合物(13)	40 mm	
	バインダ	<ul style="list-style-type: none"> ■ ストレートアスファルト 60/80 ■ 特殊改質アスファルト 		
防水層	硅砂	天然乾燥硅砂	0.7 kg/m ²	
	防水材	<ul style="list-style-type: none"> ■ 加熱型塗膜系防水材 A ■ 加熱型塗膜系防水材 B ■ 加熱型塗膜系防水材 C 	1.2 kg/m ²	
		プライマー	ゴム溶剤型プライマー	0.2 kg/m ²
		(防水層なし)	■ タックコート (PK-4)	0.4 kg/m ²
床版	コンクリート	普通コンクリート平版	60 mm	

(1) 舗装体

舗装体には密粒度アスファルト混合物(13)を用いた。バインダには、舗装体の塑性変形による試験結果への影響を極力排除するため、防水便覧に準拠したストレートアスファルト 60/80 (以下、ストアス) の他に、塑性変形抵抗性に優れた特殊改質アスファルト (以下、特殊改質) についても評価した。

これらを用いた混合物の塑性変形抵抗性を Flow Number 試験によって評価した結果を図-3に示す⁴⁾。なお、Flow Number とはアスファルト混合物の塑性変形抵抗性を評価する指標であり、AMPT (Asphalt Mixture Performance Tester) を用いて円筒供試体に繰返し圧縮载荷を与えたときに塑性ひずみ量が急激に増加する載荷

回数である。特殊改質はストアスと比較して 10~100 倍の塑性変形抵抗性を有しており、試験中の塑性変形の抑制が期待できる。

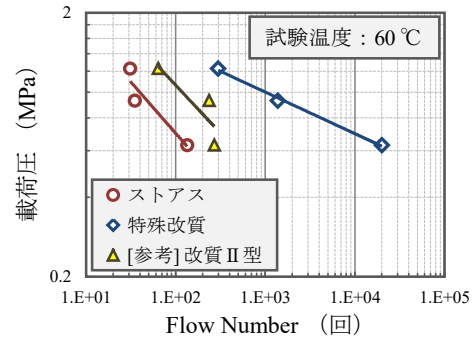


図-3 Flow Number 試験の結果

(2) 防水層

防水層には、3 種のアスファルト加熱型塗膜系防水材 (以下、防水材) を用いた。その他に比較として、防水層の代わりにタックコートのみを塗布したもの (以下、防水層なし) も加えた。

防水便覧に準拠して実施したせん断試験の結果を図-4に示す。それぞれの防水材が異なるせん断接着強度 (τ_0) を有している。

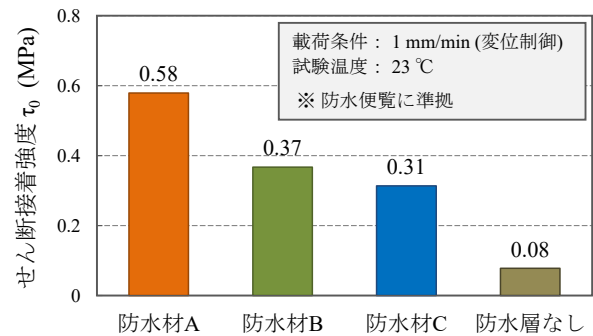


図-4 防水材種類とせん断接着強度

(3) 床版

JIS A 5371 の規定に基づいた普通コンクリート平版の表面をグラインダーで研掃し、脆弱層を除去したものを使用した。

2.4 試験条件

試験条件を表-2に示す。防水層の接着面積 (22,500 mm²: 150×150 mm) に対して 0.05~0.80 MPa のせん断応力振幅 ($\Delta\tau$) になるよう調整した水平荷重を繰返し載荷した。試験温度は、載荷機構全体を囲むよう設置した恒温槽を用いて一定に保った。なお、任意の試験温度および応力周波数の組み合わせに対して、複数の $\Delta\tau$ を設定して測定することで、応力と破壊回数との関係 (以下、 $\Delta\tau$ - N_f 曲線と呼ぶ) を取得した。

表-2 試験条件

項目	条件・範囲
制御モード	荷重制御
載荷波形	正弦波 (片振り)
試験温度	5~50 °C
応力周波数	0.02~20 Hz
応力振幅	0.05~0.80 MPa

2.5 試験結果の解析

載荷荷重 (P) および舗装-床版のズレ量 (δ) の波形を各載荷回数にて取得して、以下の特性値を解析した。

(1) 使用限界寿命

防水便覧に準拠して、図-5に示す載荷回数 (N) と舗装-床版のズレ量 (δ) の曲線の成す変曲点を使用限界寿命 (N_f) とした。

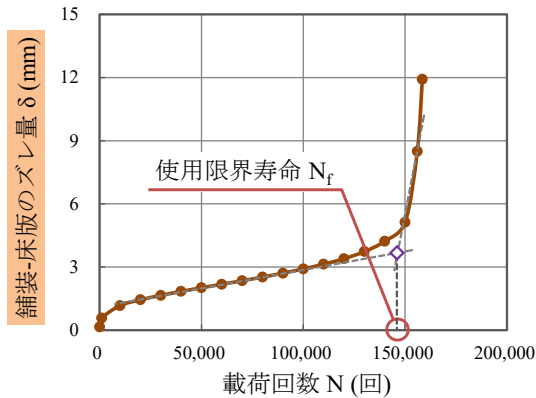


図-5 使用限界寿命

(2) 総散逸エネルギー

荷重-変位が描くリサージュ曲線の面積から、図-6に示すように1サイクル当たりの散逸エネルギー (E_{di}) を求めた。さらに、図-7に示すように N_f に至るまでの E_{di} の累積値を総散逸エネルギー (ΣE_d) とした。 ΣE_d の算出式を式(1)に示す。

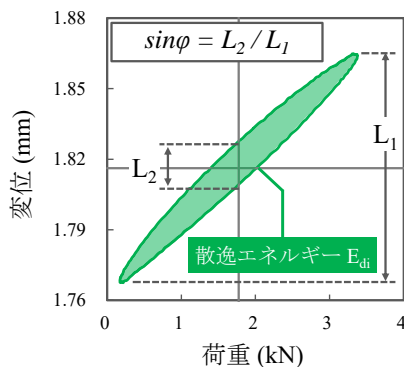


図-6 リサージュ曲線と散逸エネルギー

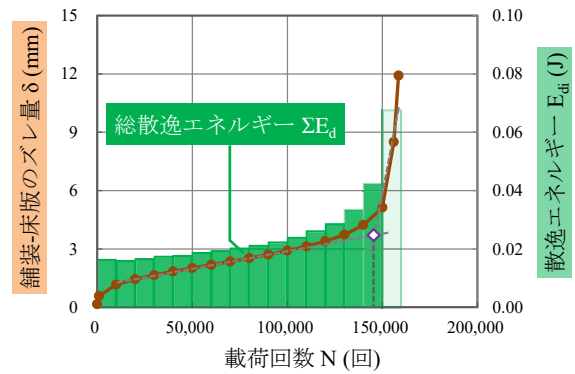


図-7 総散逸エネルギー

$$\Sigma E_d = \sum_{i=1}^{N_f} E_{di} = \sum_{i=1}^{N_f} \pi \cdot P_i \cdot \delta_i \cdot \sin \varphi_i \cdot A^{-1} \quad (1)$$

ここで、

- P_i : 荷重振幅 (kN)
- δ_i : 変位振幅 (mm)
- φ_i : 位相角 (rad)
- A : 防水層面積 (mm^2)

3. せん断疲労試験結果

3.1 舗装体のバインダが試験結果に及ぼす影響

舗装体のバインダにストアスおよび特殊改質を適用したときの $\Delta\tau$ - N_f 曲線の比較を図-8に示す。バインダがストアスの場合、特殊改質と比較して使用限界寿命は小さな値となった。試験後の破壊形態を写真-2に示す。ストアスの場合、舗装が大きく変形し内部の凝集破壊が生じているが、特殊改質の場合は変形および内部破壊は見られず、防水層およびその界面の破壊のみであった。これは、防水層のせん断耐力がストアスを適用した舗装の塑性変形抵抗性よりも高く、特殊改質よりも低いことの表れである。すなわち、塑性変形抵抗性の低いバインダを適用した場合、防水層およびその界面だけでなく舗装の塑性変形および内部破壊が生じ、その影響で防水層の疲労抵抗性を正しく測定できない可能性があることを示している。

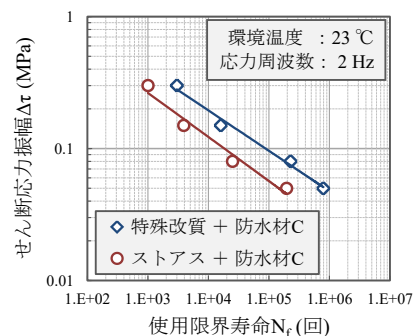


図-8 舗装のバインダ種類と使用限界寿命

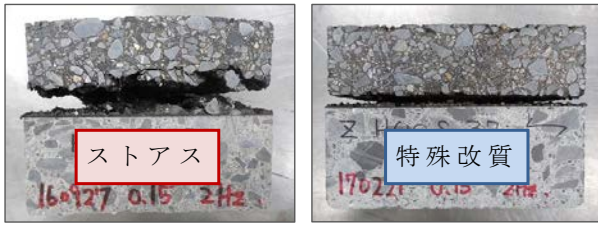


写真-2 破壊形態の比較

本研究では、防水層に着目した疲労抵抗性の評価が目的であるため、以降の検討ではすべて特殊改質アスファルトを適用した。

3.2 使用限界寿命

(1) 防水材料種類と使用限界寿命

試験温度 23 °C、応力周波数 2 Hz における防水材料種類と使用限界寿命 (N_f) の関係を図-9 に示す。各防水材料について両対数平面上で直線関係となり、かつ互いに異なる位置および勾配を有していた。この結果より、防水材料のせん断疲労抵抗性の違いを明確に判別できたことから、 N_f は防水材料の疲労抵抗性を示す特性値 (疲労特性値) と捉えることができる。

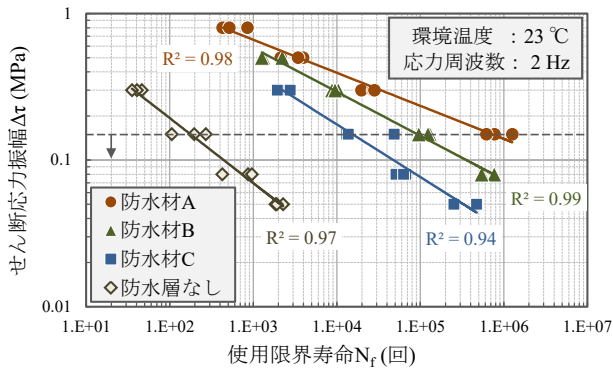


図-9 防水材料種類と使用限界寿命

(2) 試験条件と使用限界寿命

試験温度および応力周波数が使用限界寿命 (N_f) に与える影響を図-10 に示す。温度が高くなるほど、また周波数が低くなるほど、 N_f は短くなった。

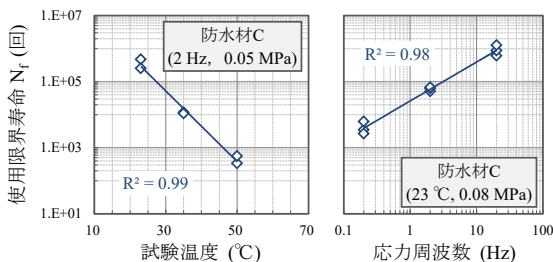


図-10 試験温度および応力周波数が N_f に与える影響

温度および周波数を変化させた場合の $\Delta\tau$ - N_f 曲線の関係は図-11 に示す通りであり、任意の温度・周波数の組み合わせで回帰曲線が得られ、その傾きはほぼ同一であった。また、これらの関係は防水材料 C のみでなく、防水材料 A, B についても同様の傾向が得られた。

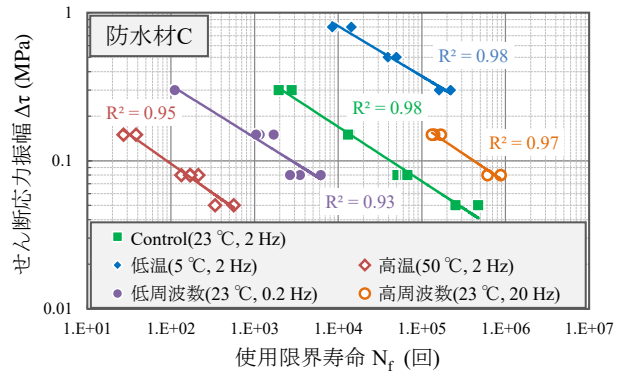


図-11 試験条件毎の $\Delta\tau$ - N_f 曲線

3.3 散逸エネルギー

(1) 防水材料種類と総散逸エネルギー

試験温度 23 °C、応力周波数 2 Hz における総散逸エネルギー (ΣE_d) と使用限界寿命 (N_f) の関係を図-12 に示す。すべての防水材料において ΣE_d と N_f との間に強い相関が見られた。このことから、 ΣE_d を疲労特性値として扱える可能性が示唆された。

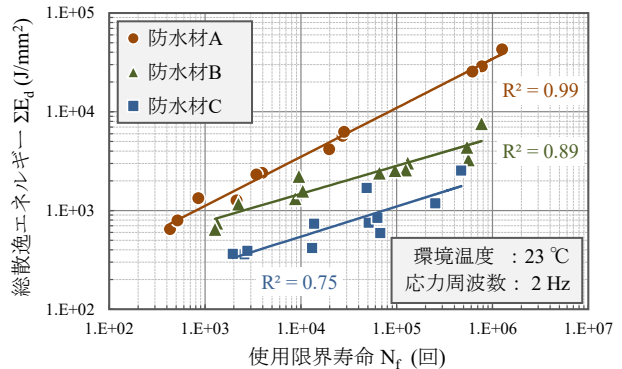


図-12 総散逸エネルギーと使用限界寿命の関係

(2) 試験条件と総散逸エネルギー

図-11 に示した試験温度および応力周波数を変えた防水材料 C についての測定値を、総散逸エネルギー (ΣE_d) と使用限界寿命 (N_f) の両対数軸平面に展開した結果を図-13 に示す。温度・周波数・応力振幅に関わらず、すべての試験結果が 1 本の曲線で回帰された。このことから、 ΣE_d と N_f との関係は試験条件に依らず一定であり、 N_f は試験条件に依存しないことが示された。

本検討で用いた防水材料の主原料であるアスファルトは、熱レオロジー的に単純な物質として知られており、

温度-時間換算則に従った応答を示す⁵⁾⁶⁾。この法則が成立するとき、温度（試験温度）または時間（応力周波数）の大小が力学特性に与える影響はお互いに等価換算が可能となり、かつその換算には規則性が存在する。

したがって、図-13に示した関係は、この規則的な等価換算に基づいた応答が現れていると見なすことができる。すなわち、粘弾性を有する防水材のせん断疲労抵抗性には、温度-時間換算則の考え方を適用できると考えられる。このことから、試験条件に依らない回帰曲線を用いた寿命設計式が防水材毎に存在する可能性が示唆される。

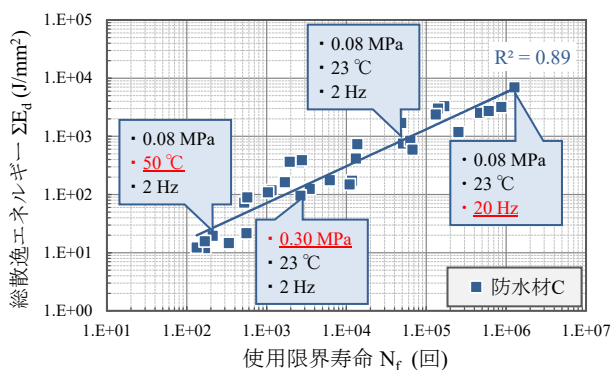


図-13 試験条件に依らない回帰曲線

(3) 防水材種類および試験条件と総散逸エネルギー

さらに、防水材 A, B についても図-13と同様の関係が成立するか検証した結果を図-14に示す。防水材 A, B についても C と同様、試験条件に依らない回帰曲線を得た。さらに、それぞれが固有の相関関係を有することを見出した。

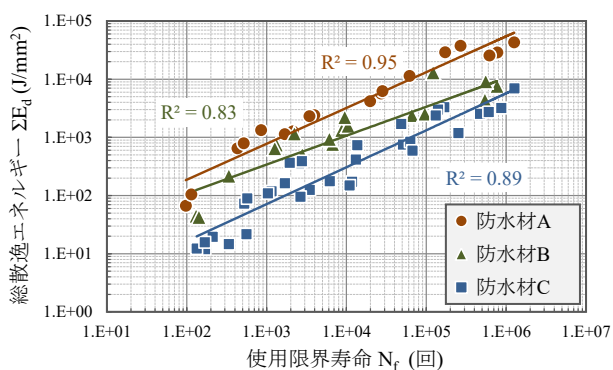


図-14 各防水材における ΣE_d と N_f の関係

4. 静的試験（せん断試験）の結果を用いた無次元化

一般的に、材料の疲労特性には応力比が大きく関係していることが知られている。例えば、移動荷重を受ける RC 床版の疲労特性は、その諸元に関わらず無次元量を

用いた 1 つの S-N 曲線で表される。この関係が今回得た $\Delta\tau$ - N_f 曲線で成立するかを、静的試験（せん断試験）の結果を用いて検討し、測定値の正規化を試みた。

図-9の $\Delta\tau$ - N_f 曲線の縦軸 $\Delta\tau$ を、図-4のせん断接着強度 (τ_0) で除し、無次元の応力比 $\Delta\tau/\tau_0$ としてものを図-15に示す。その結果、測定値は防水材の種類に依らず 1 本の曲線で回帰した。よって、せん断疲労抵抗性は τ_0 で正規化されることが検証できた。

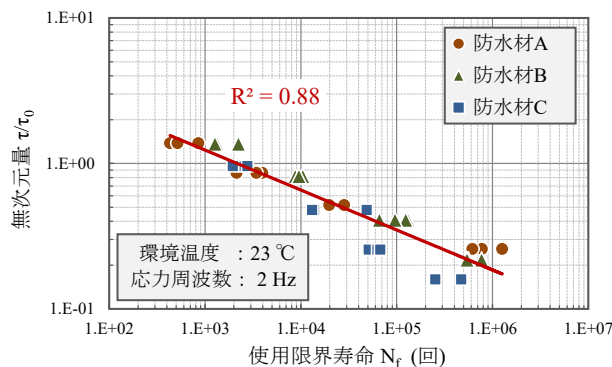


図-15 応力比 $\Delta\tau/\tau_0$ による無次元化

5. まとめ

せん断疲労試験による防水層の疲労抵抗性評価から、以下の知見を得た。

- ① アスファルト加熱型塗膜系防水材を用いた防水層のせん断疲労抵抗性は、使用限界寿命、総散逸エネルギーで評価できる
- ② 試験温度および応力周波数を変えると、せん断応力振幅が同一であっても使用限界寿命は大きく異なる
- ③ 総散逸エネルギーと使用限界寿命の関係は、試験温度および応力周波数、せん断応力振幅に依存しないが、防水材種類に固有の相関を有する
- ④ 静的試験（せん断試験）の結果でせん断疲労抵抗性は正規化され、防水材種類に依らない唯一の寿命設計式の存在が示唆される

6. 今後の展開

今回得た知見を基に、床版防水層の接着に関する耐久性評価の手法を確立させることで、橋面舗装の設計寿命を考慮した最適な防水層の選定を可能とし、道路橋床版の長寿命化に貢献したい。更に、研究を発展させることで以下の項目が実現すると考えている。

- ・ 床版-防水-舗装の三構造を一体として考えた橋面舗装の設計寿命算出システムの構築
- ・ 静的試験による橋面舗装の余寿命推定手法の確立

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版，2016.
- 2) 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，第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.129-134，2004.
- 3) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧，2007.
- 4) 齊藤夏実，丸山陽，宮城裕一：Flow Number 試験による塑性変形抵抗性の評価方法に関する一検討，第 72 回土木学会年次学術講演会概要集，V-009，2017.
- 5) 笠原篤，菅原照雄：アスファルト混合物の動的応答に関する研究，土木学会論文報告集，第 215 号，pp.75-83，1973.
- 6) 姫野賢治，渡辺隆，丸山暉彦：低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労特性に関する研究，土木学会論文集，第 366 号/V-4，pp.143-151，1986.
- 7) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集 9-2，pp.627-632，1987.

(2018 年 7 月 20 日受付)