

## 舗装の流動特性に着目した床版防水層の接着特性評価

Evaluation of adhesion properties of waterproofing layer on RC slabs based on flow characteristics of asphalt pavement

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 ○正 会 員 角間 恒 (Ko Kakuma)  
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 佐藤孝司 (Koji Sato)  
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

### 1. はじめに

道路橋 RC 床版（以下、床版）の健全性を長期にわたり確保するためには、床版内部への水の浸入を遮断する防水層の設置が重要である。近年では、舗装-防水層-床版の三位一体構造をもって水の浸入を抑制する「床版防水システム」<sup>1)</sup>の考え方が浸透し、多数の調査研究が実施されている<sup>2)</sup>。

床版防水システムにおいて、防水層には多様な機能が求められる。舗装の耐久性確保はその一つであり、舗装の流動やひび割れを助長しないために、供用中に防水層が床版および防水層と十分な接着性能を保持しなければならない。しかしながら、舗装の耐久性の観点から防水層の接着特性を評価した研究は数例<sup>3), 4)</sup>しかなく、舗装の耐久性を確保するために防水層が保有すべき接着性能は明確ではない。

以上より、本研究では、舗装の耐久性に着目した防水層の性能評価手法について検討した。具体的には、せん断接着特性が異なる舗装-防水層-床版構造体に対してランダムホイールトラッキング試験（以下、RWT 試験）を実施し、舗装の流動特性に及ぼす防水層の接着特性の影響を評価した。また、その結果を踏まえ、舗装の耐久性確保の観点から防水層が保有すべき接着性能について考察した。なお、本研究では、北海道開発局が管理する国道橋において標準的に使用されているアスファルト加熱型塗膜防水層に着目して一連の検討を行っている。

### 2. 試験方法

#### 2.1 試験装置

舗装の流動特性の評価は図-1 に示す RWT 試験機により実施した。本装置は、輪荷重の繰返し作用を与える

小型輪荷重走行試験機と供試体を走行直角方向に移動させる精密位置決めテーブルから構成され、輪荷重が路面を押さえながらその走行位置が概ね正規分布に基づいて変化する実交通荷重の載荷条件を再現することができる。

#### 2.1.1 小型輪荷重走行試験機

小型輪荷重走行試験機は、道路橋床版の疲労耐久性評価に用いられるクランク式の輪荷重走行試験機であり、油圧により最大 40kN の鉛直荷重を載荷した状態で車輪を繰返し走行させること可能である。走行範囲は 1m で、1 分間に 48 回（24 往復）の輪荷重走行を作用させることができる。車輪は外径が 480mm、幅が 102mm、外周部分がウレタン製である。

#### 2.1.2 精密位置決めテーブル

精密位置決めテーブルは、AC サーボモータによりそのテーブル部を水平方向へ運動させる機構を備え、テーブル部の上に固定した供試体を輪荷重走行方向に対して直交方向に移動させることにより相対的に異なる走行位置で輪荷重の繰返し走行を与える。精密位置決めテーブルの運動は、車輪が供試体上を通過した後、再度供試体に到達するまでの間に供試体の移動が 1 回行われる。移動のストロークは最大で 340mm、移動の最高速度および位置決め精度はそれぞれ 500mm/sec および 0.02mm である。

#### 2.2 供試体

試験には、図-2 に示す縦 300mm×横 300mm×厚さ 100mm（舗装 40mm、コンクリート 60mm）の平板供試体を使用した。舗装には密粒度アスファルト混合物 13F（改質 II 型）を、コンクリートには JIS A 5371 に基づくコンクリート平板を、防水層にはアスファルト加熱型塗膜防水を使用した。

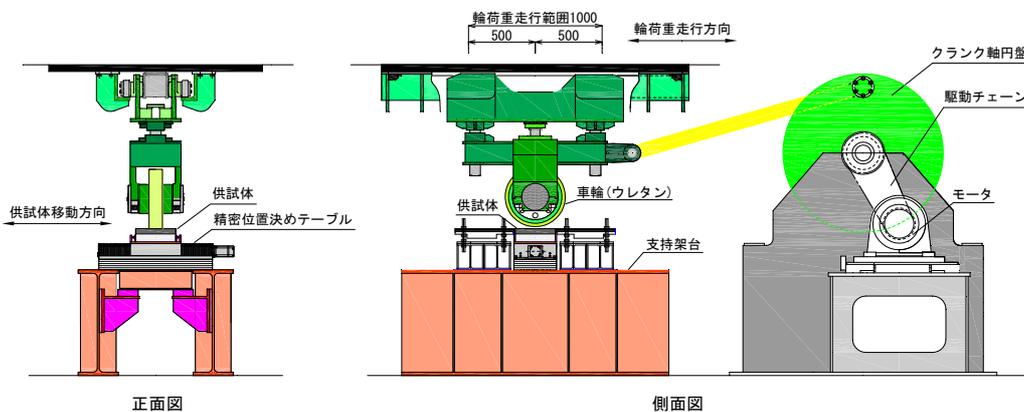


図-1 試験装置

表-1 試験ケース一覧

ケース名	接着試験結果 (23°C)			
	引張	せん断		
	$\sigma$	$\tau$	$\delta$	破壊モード
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
0.15	1.03	0.15	3.23	B
0.2a	0.93	0.18	2.75	B
0.2b	1.04	0.21	2.57	B
0.25	1.20	0.23	5.43	B
0.3	1.25	0.31	5.53	B
0.4a	1.53	0.43	3.95	B
0.4b	0.96	0.44	6.86	B
0.6	1.04	0.54	3.77	A
0.8	1.78	0.76	2.07	B

接着試験結果  $\sigma$ : 引張接着強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\tau$ : せん断接着強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\delta$ : せん断接着強度時の変位 (mm)

破壊モードの凡例 A: 舗装の凝集破壊  
 B: 防水層の凝集破壊

### 2.3 試験ケース

試験は、表-1 に示す防水層の接着特性を変化させた9 ケースについて実施した。本研究では、アスファルト加熱型防水材におけるアスファルト混合物の配合等を調整することで舗装-防水層-床版構造体のせん断接着特性を種々に変化させ、舗装の流動特性とせん断接着特性の相関関係を整理できるようにした。表-1 には、各供試体の基本的な接着特性をまとめており、全ての供試体で 23°C における試験規格値<sup>9)</sup>である引張接着強度 0.6N/mm<sup>2</sup> 以上、せん断接着強度 0.15N/mm<sup>2</sup> 以上、せん断接着強度時変位 1.0mm 以上を満たすことを確認している。

### 2.4 試験手順

図-3 に試験手順を示し、以下にその詳細を説明する。

#### 2.4.1 試験温度

本試験では、舗装の流動変形を促進するために、赤外線ヒータの放射熱により供試体を高温に保った状態で輪荷重走行を実施した。試験温度は、放射温度計を用いて計測した舗装表面9点での平均温度により管理しており、平均温度が所定の温度に達したことを確認した上で輪荷重走行を開始した。このときの平均温度は、夏期の走行を想定して 50±1°C とした。

#### 2.4.2 供試体移動プログラム

実橋梁における車輪走行は、ある確率分布の下で走行位置を変え、その分布は正規分布に従う<sup>9)</sup>。本試験では、実交通荷重の荷重条件を踏まえ、輪荷重の走行位置が正規分布に基づいてランダムに決定されるように供試体を移動させた。供試体移動プログラムは、乱数正規分布に基づいており、その平均を 0mm (供試体中央)、標準偏差を 70mm とした。これは、車線幅 B に対し、車輪走行位置がセンターラインからの平均距離 $\mu=0.7B$ 、標準偏差 $\sigma=0.1B$  の正規分布に従うとする旧建設省土木研究所による報告<sup>9)</sup>を再現するものである。

輪荷重走行は、原則 500 回を 1 ステップとして実施し、

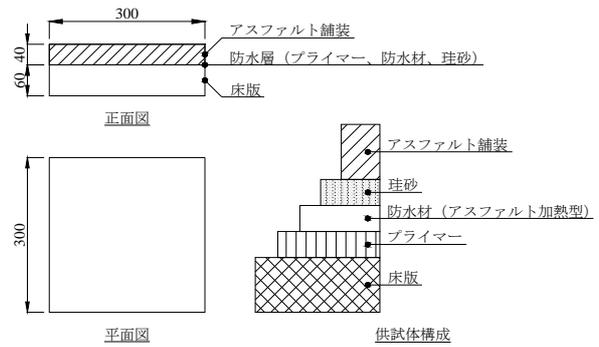


図-2 供試体

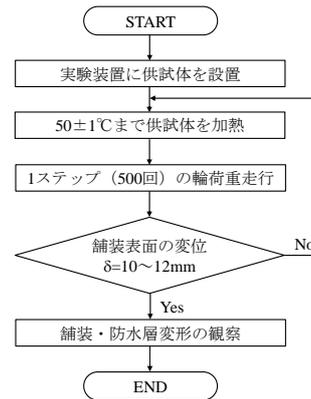


図-3 試験手順

供試体の移動がランダムとなるよう 1 ステップ毎に新しい移動プログラムを作成した。試験温度の管理は 1 ステップが終了する毎に行っている。

試験は、舗装表面中央の鉛直変位が 10~12mm に達した時点、あるいは、1 ステップ当たりの鉛直変位増分が極端に小さくなり舗装の流動が収束したと判断できる時点で終了した。

#### 2.4.3 支持条件および荷重荷重

供試体の支持条件は、床版コンクリート部は 4 辺側方固定支持および下面全面の鉛直方向固定支持とする。防水層部と舗装部は固定しない。

輪荷重の大きさは 10kN とした。このときの接地圧は 2.0N/mm<sup>2</sup> 程度であり、床版の設計荷重 (T 荷重) である接地圧 1.0N/mm<sup>2</sup> と比較すると、過大な荷重が作用する荷重条件である。

#### 2.4.4 測定項目

本試験では、1 ステップの輪荷重走行が終了する毎にデジタルノギス (測定精度 0.01mm) により舗装表面の鉛直変位および水平変位を測定した。ただし、1 ステップでの変位増分が小さい場合には測定を省略している。

## 3. 結果および考察

### 3.1 試験結果

#### 3.1.1 舗装表面の変形状

図-4 に、舗装表面の鉛直変位分布の例として、ケース 0.15 における走行回数 500 回時および 900 回時の計測値を示す。図より、舗装表面では中央付近を頂点とし

た凹形の変形性状を示し、走行回数の増加とともにその形状を保持したまま変位が増加する。同様の変形性状は、防水層のせん断接着特性によらず全ての供試体で共通するものであった。

### 3.1.2 舗装表面の鉛直変位と走行回数の関係

図-5(a)に、舗装表面の鉛直変位と走行回数の関係を示す。ここでは、上述した舗装表面における凹形の変形性状を考慮して供試体中央での計測値を鉛直変位の代表値とした。

図より、鉛直変位の増加にはせん断接着強度の影響が明確に表れており、せん断接着強度が大きくなるほど鉛直変位の増加が抑制される。また、鉛直変位増加の過程により全供試体を二つのグループに大別できる。一つはせん断接着強度が  $0.4\text{N}/\text{mm}^2$  未満の供試体群であり、これらの供試体では、走行回数に概ね比例して鉛直変位が線形的に増加し、試験終了条件である変位  $10\sim 12\text{mm}$  に達する。もう一つは、せん断接着強度が  $0.4\text{N}/\text{mm}^2$  以上の供試体群であり、これらの供試体では、最初の1ステップ目で生じる鉛直変位に対して2ステップ目以降での鉛直変位増加が小さく、走行回数の増加に対して概ね一定の勾配を保持して変位が増加するようになる。さらに、せん断接着強度が特に大きいケース 0.6 および 0.8 では、走行回数の増加に伴う舗装の変位増加が極端に小さくなり、本試験の走行回数の範囲内において鉛直変位が一定値に収束する傾向が見られる。

### 3.1.3 舗装表面の水平変位と走行回数の関係

図-5(b)に、舗装表面の水平変位と走行回数の関係を示す。本試験では、走行直角方向端部の防水層および舗装が自由であり実橋とは拘束条件が大きくことなること、また一部の供試体では走行直角方向端部で舗装の脱落が生じたことから、供試体中央から  $\pm 105\text{mm}$  の位置での水平移動量の平均値に着目する。

図より、舗装の水平変位は鉛直変位に類似した増加傾向を示す。すなわち、せん断接着強度  $0.4\text{N}/\text{mm}^2$  を境に、せん断接着強度が低い場合には走行初期から走行回数に比例して水平変位が増加するのに対し、せん断接着強度が高い場合には初走行時の変位増加が大きく、2ステップ目以降では緩やかに変位が増加する。このような舗装の鉛直変位と水平変位との相関関係は、既往の RWT 試験<sup>3)</sup>においても明らかになっているものであり、舗装の耐久性確保のために防水層が保有しなければならない接着性能とわだち掘れ抵抗性は、相互に依存する性能であることを表す。

### 3.2 舗装耐久性への影響要因の分析

上記の RWT 試験結果に基づき、舗装の耐久性とせん断接着特性との関係について考察する。ここでは、舗装の耐久性を表す指標として、図-5(a)における走行回数 500 回以降での鉛直変位-走行回数関係を直線近似したときの傾き（以下、流動速度）に、せん断接着特性として、せん断接着強度およびせん断剛性（せん断接着強度とせん断接着強度時変位の比）に着目する。なお、せん断接着試験は試験温度  $23^\circ\text{C}$ 、RWT 試験は試験温度  $50^\circ\text{C}$  で実施したものであるが、本研究では、供試体によらず防水層の構成が同一であることから、試験温度が変化し

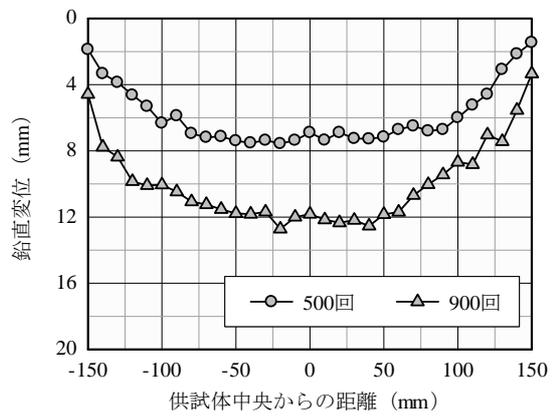
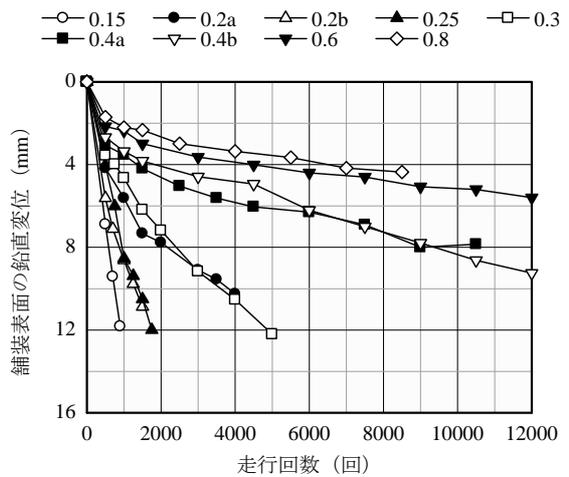
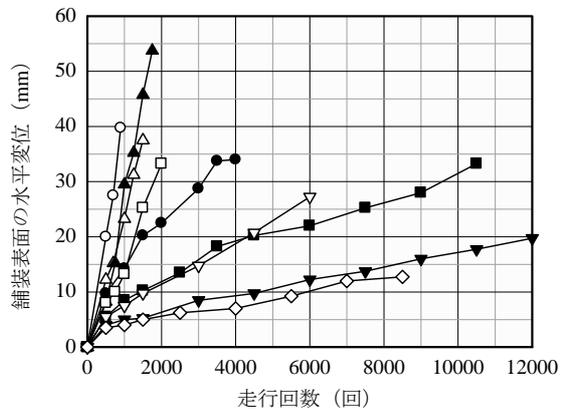


図-4 舗装表面の鉛直変位分布（ケース 0.15）



(a) 中央の鉛直変位



(b) 中央から  $\pm 105\text{mm}$  の位置での水平変位

図-5 舗装の変位と走行回数の関係

ても供試体間のせん断接着特性の相対関係は変化しないと仮定して結果を整理する。

図-6 に流動速度とせん断接着強度の関係を示す。図より、せん断接着強度が増加するにつれて流動速度が低下することがわかる。また、両者の間にはべき乗関係が成り立つと示唆され、せん断接着強度が小さい領域では舗装の耐流動性がせん断接着強度に大きく依存するが、せん断接着強度が  $0.4\text{N}/\text{mm}^2$  を超える範囲では強度の増加に対する流動速度の低下が鈍くなり、流動速度が一定

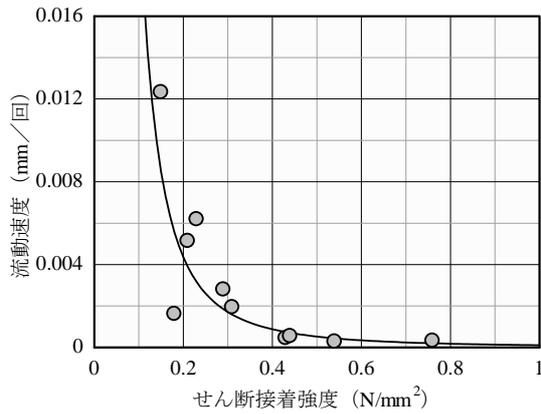


図-6 流動速度とせん断接着強度の関係

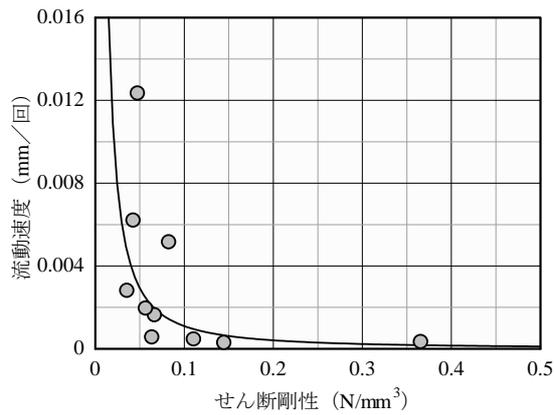


図-7 流動速度とせん断剛性の関係

値に収束する傾向がある。

図-7 に流動速度とせん断剛性の関係を示す。流動速度とせん断剛性との関係では、全体的な傾向は流動速度とせん断接着強度の関係と同様であり、せん断剛性が小さい場合にはせん断剛性のわずかな増加により流動速度が大きく低下し、せん断剛性  $0.1\text{N/mm}^3$  程度を境に流動速度は概ね一定となる。

本研究で使用した供試体では、せん断接着強度とせん断剛性との間に概ね線形関係が成り立つことから、せん断接着強度とせん断剛性のどちらが舗装の流動特性を決める支配的要因であったかは明確ではない。ただし、アスファルト加熱型塗膜防水に関する既往の RWT 試験<sup>3)</sup>においては、防水層に大きなせん断変形が生じた場合であっても舗装-防水層-床版が一体性を喪失するような破壊には至らず、RWT 試験後にも道路橋床版防水便覧<sup>5)</sup>に規定されるせん断接着強度や防水性を満足することが確認されている。このことより、舗装の耐久性を確保するためのせん断接着特性としては、舗装-防水層-床版構造体のせん断剛性がより重要になると推察される。

### 3.3 考察

以上の結果より、舗装の流動速度と舗装-防水層-床版構造体のせん断接着特性の間には明確な相関関係が成立し、本研究の範囲では、せん断接着強度  $0.4\text{N/mm}^2$  以上およびせん断剛性  $0.1\text{N/mm}^3$  以上になると、流動速度が概ね収束することが明らかとなった。このことは、既存の性能評価試験であるせん断接着試験により実交通荷重作用下での防水層の接着性能を評価できることを示しており、交通量に応じた防水層の選定を可能にするものであると考えられる。また、道路機能としての重要性が高い主要幹線道路や維持管理上のリスクが大きい重交通路線に架かる道路橋では、舗装の耐久性確保の観点から、上記のせん断接着特性を満たすことが望ましいと言える。

### 4. おわりに

本研究では、舗装-防水層-床版構造体のランダムホイールトラッキング試験に基づき、舗装の流動特性の観点から床版防水層の接着特性を評価した。

その結果、舗装の流動速度と防水層のせん断接着特性（せん断接着強度およびせん断剛性）との間には相関関係があり、ある水準以上のせん断接着性能を確保することで舗装の流動速度は概ね一定値となることを示した。

今後は、舗装種類や防水層種類、試験温度等をパラメータとした RWT 試験により本評価技術の標準化を図るとともに、交通量に応じた防水層の選定方法について検討していく。

### 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、2007。
- 2) 例えば、高速道路総合技術研究所、日本建設機械化協会施工技術総合研究所、災害科学研究所：欧州床版防水システム調査報告書、2009。
- 3) 青木康素、大西弘志、松井繁之、田口仁：床版防水システムのせん断付着疲労耐久性評価に関する研究、第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp.143-148、2006。
- 4) 澤松俊寿、岡田慎哉、角間恒、西弘明、松井繁之：舗装、床版防水層およびコンクリートからなる構造体の疲労耐久性評価に関する実験的検討、第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.149-154、2014。
- 5) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007。
- 6) 建設省土木研究所：設計活荷重に関する研究（交通荷重の実態と橋梁設計への適用）、土木研究所資料第 701 号、1971。