

## 論文

## 舗装の塑性変形に着目した床版防水層の接着性能評価

角間恒\*, 佐藤孝司\*\*, 西弘明\*, 松井繁之\*\*\*

\*博(工), (国研)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

\*\*(国研)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

\*\*\*工博, 大阪大学名誉教授 (〒565-082 吹田市山田西4-2-40-1006)

道路橋 RC 床版において舗装の耐久性を確保するためには、耐流動性に優れる舗装材料の使用とともに舗装の塑性変形を抑制できる防水層の選定が重要であるが、舗装の耐久性の観点から防水層が保有すべき性能を評価した例は数少ない。本論文では、床版・防水層・舗装からなる構造体について、せん断接着特性を試験パラメータとしたランダムホイールトラッキング試験を実施し、舗装の変形特性に与える防水層の接着特性の影響を検討した。その結果、防水層のせん断剛性と舗装の変形特性には相関関係があり、せん断剛性に注目することで、舗装の変形特性も考慮した防水層の性能評価を行えることを示した。

キーワード：床版防水層，ランダムホイールトラッキング試験

## 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必須となっている。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、舗装の塑性変形（以下、変形）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舗装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)</sup><sup>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。

本研究では、舗装の変形に着目して防水層の性能評価を行う方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、舗装の変形特性に及ぼす防水層の接着特性の影響を評価した。

## 2. ランダムホイールトラッキング試験

## 2.1 試験装置

舗装の変形特性の評価は、図-1 に示す RWT 試験機に

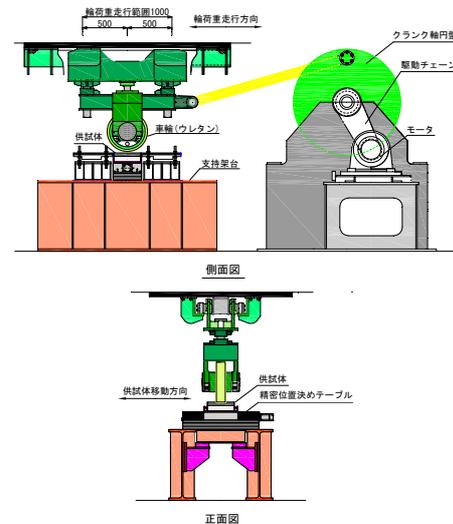


図-1 ランダムホイールトラッキング試験機

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試験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走行状態を再現できる。

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が可能である。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、

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

外周部分がウレタン製である。

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高速移動させる機構を備え、テーブル部の上に固定した試験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で異なる走行位置での輪荷重を与える。精密位置決めテーブルの運動は、車輪が試験体上を通過した後、再度試験体に到達するまでの間に試験体の移動が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 試験体

試験には、図-2 に示す縦300mm×横300mm×高さ100mm (舗装40mm, コンクリート60mm) の平板試験体を使用した。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を使用した。なお、使用したアスファルト混合物の動的安定度は3500回/mmである。

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。なお、ケース名の数字は、試験体のせん断接着強度を表す。本研究では、アスファルト加熱型防水材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変化させ、舗装の変形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 のとおり、全ての試験体で道路橋床版防水便覧<sup>9)</sup>における23°Cでの照査基準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。

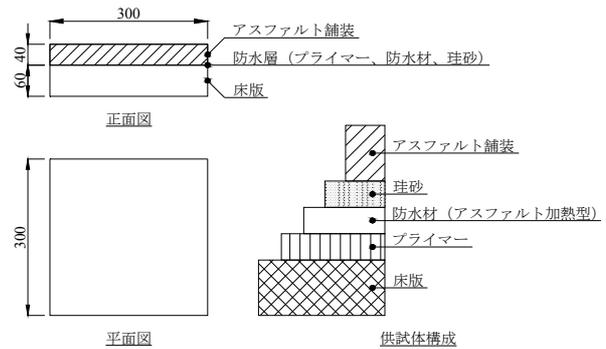


図-2 試験体

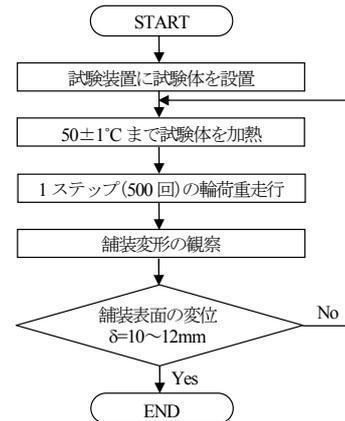


図-3 試験手順

## 2.3 試験手順

試験手順を図-3に示し、以下にその詳細を説明する。

### (1) 試験温度

本試験では、舗装の変形を促進するために、夏期の走行を想定して試験体を50±1°C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、平均温度が50±1°Cに達したことを確認した上で輪荷重走行を開始した。加温には赤外線ヒータ (定格消費電力750W) を2台使用し、供給電圧は180V、照射距離は490mm、試験前の加温時間は8時間以上とした。これらは、事前に実施した加温試験の結果を考慮したものであり、上記の条件下で舗装表面が50°C程度で定常状態になる。また、加温試験によると、定常状態における表面と防水層直上での舗装の温度差は2°C程度であった。

### (2) 試験体移動および走行プログラム

本試験では、ある正規分布に従う確率分布の下で走行位置を変える実交通荷重の載荷条件<sup>9)</sup>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試験体を移動させた。試験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 (試験体中央)、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、試験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。なお、試験温度の管理は 1 ステップが終了する毎に行う。

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変形が収束したと判断できる時点で終了した。

### (3) 支持条件および載荷荷重

試験体の支持条件は、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載荷条件である。

### (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. 試験結果および考察

### 3.1 舗装の変形

#### (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。同様の変形状は、防水層のせん断接着特性によらず全ての試験体で共通するものであった。

#### (2) 舗装表面の鉛直変位と走行回数

図-5 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状を考慮して試験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試験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 0.4N/mm<sup>2</sup> 未満の試験体群であり、これらの試験体では、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 10~12mm に達する。もう一つは、せん断接着強度が 0.4N/mm<sup>2</sup> 以上の試験体群であり、これらの試験体では、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

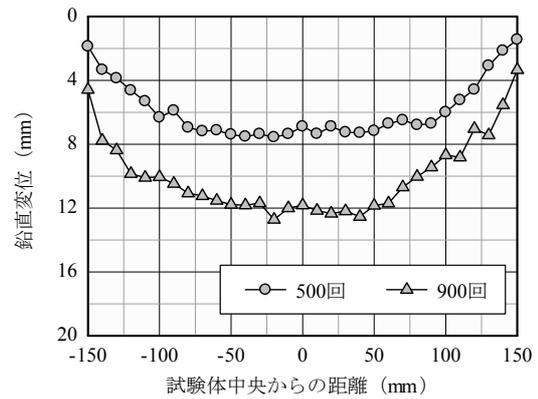


図-4 舗装表面の鉛直変位分布 (ケース 0.15)

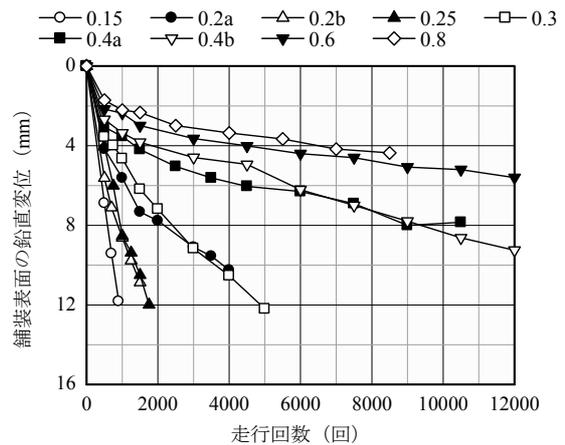


図-5 舗装表面の鉛直変位と走行回数

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。

### 3.2 舗装変形に与える防水層の接着性能の影響

上記の試験結果に基づき、舗装の耐久性と防水層せん断接着特性との関係を整理する。ここでは、舗装の耐久性を表す指標として、図-5 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、舗装変形速度) に、せん断接着特性として、せん断試験から得られるせん断接着強度のせん断接着強度時変位に対する比で定義したせん断剛性に着目する。せん断剛性に着目したのは、既往の試験<sup>4)</sup>において、アスファルト加熱型塗膜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と防水層と床版が一体性を喪失するような破壊には至らず、輪荷重走行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が満足されることが示されており、せん断剛性が舗装の変形特性を決める支配的要因になると考えられるからである。なお、せん断接着試験は試験温度 23°C、RWT 試験は試験温度 50°C で実施されたものであるが、本検討では防水層の構成が同一であることから、試験温度が変化しても試験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した。

図-6 に舗装変形速度とせん断剛性の関係を示す。図中の「浸透系複合」「反応樹脂型 (MMA)」「反応樹脂型 (ウレタンA)」「反応樹脂型 (ウレタンB)」は、文献4において実施されたアスファルト加熱型塗膜防水層以外の防水層に関する試験結果であり、防水層の構成や試験結果の詳細は文献4を参照されたい。また、図中の実線は、アスファルト加熱型塗膜防水層に関する試験結果をべき乗関数により近似したものである。

まず、アスファルト加熱型防水層(図中の「As 加熱型」)に着目すると、せん断剛性が増加するにつれて舗装の変形速度が低下することがわかる。特に、せん断剛性が比較的小さい範囲ではせん断剛性のわずかな増加により舗装変形速度が大きく低下し、防水層のせん断接着性能の改善により舗装の耐変形性が大きく改善されることを示唆する。さらにせん断剛性が増加し、 $0.1\text{N/mm}^3$ 程度を境に舗装変形速度が一定値に収束する傾向がある。

また、各種防水層に関する試験結果に着目すると、「反応樹脂型 (ウレタンB)」を除き、各結果はアスファルト加熱型防水層の試験結果に概ね一致し、舗装変形速度とせん断剛性の関係は防水層の種類に依存しないことがわかる。なお、「反応樹脂型 (ウレタンB)」において他の結果からの乖離が見られたのは、RWT 試験において早期に舗装と防水層の界面はく離が生じたためである。

### 3.3 試験結果のまとめ

上記の結果より、RWT 試験と既存の性能評価手法であるせん断試験の結果には相関関係があり、実交通荷重の作用を想定した防水層の接着性能の評価に従来の評価手法を適用できると示唆される。そのとき、せん断接着強度およびせん断接着強度時の変位だけでなく、両者の比で表すせん断剛性を追加の照査項目とするのが、舗装の耐変形性の観点では望ましいといえる。

現段階では、本試験での走行回数と実橋梁での舗装の耐用年数の関係は明らかではなく、図-6 において舗装変形速度が大きい値となった防水層においても舗装の不具合が生じるわけではない。ただし、せん断剛性の舗装の変形特性への影響は明らかであり、特に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など、防水層により高い性能が要求される場合には、より高いせん断剛性の防水層を選定することが重要になる。また、あるせん断剛性を境に舗装の変形速度が一定となった結果は、舗装の耐久性確保のために防水層が持つべきせん断剛性を設定できることを示唆できたものと考えられる。

一方、本研究で対象にした防水層の中には、他の試験結果とは様相が異なるものがあり、例えば、RWT 試験において早期の界面はく離が生じた「反応樹脂型 (ウレタンB)」の場合、せん断剛性では輪荷重走行下での防水層の接着性能を適切に評価することができない。これは、せん断試験と RWT 試験で試験温度が異なることに起因

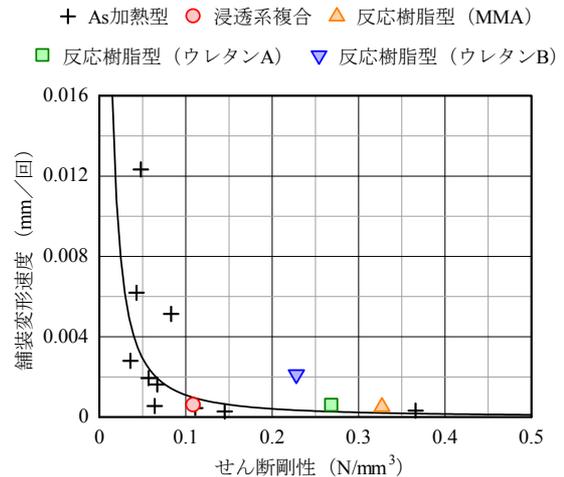


図-6 舗装変形速度とせん断剛性の関係

するものであり、供用中に想定される環境下において防水層の接着特性に極端な変化がないことを照査することも重要になる。

## 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、舗装の塑性変形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、舗装の変形速度と防水層のせん断接着特性(せん断剛性)との間には相関関係があり、せん断剛性を照査項目とすることで、舗装の変形特性も考慮した防水層の性能評価が行えることを示した。

今後は、舗装種類や試験温度等をパラメータとして試験を実施し、せん断剛性に着目した防水層の設計方法等について検討する。

## 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.

(2016年7月18日受付)