

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、西城能利雄、角間 恒

【要旨】

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。積雪寒冷地においては、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。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の構築が重要と考えられる。

平成 26 年度は、せん断接着特性を種々に変化させた舗装、防水層および床版コンクリートからなる構造体のランダムホイールトラッキング試験を実施し、舗装の流動特性に着目した接着特性の評価方法や新たな規格値の策定について検討を行った。その結果、(1) 防水層のせん断接着強度とせん断剛性は舗装の流動特性と相関関係にあり、舗装の耐流動性を直接的に評価できる指標になること、(2) ある水準以上のせん断接着強度およびせん断剛性を確保したとき舗装－防水層間のずれが生じることなく耐流動性が大きく向上することを明らかにした。これらのことより、基本的な性能評価試験であるせん断試験による実交通荷重の載荷条件に即した防水層の性能評価、ならびに、交通量に応じた防水層の選定が可能になることが示唆された。

キーワード：床版防水層、RC 床版、せん断接着特性、舗装の流動特性

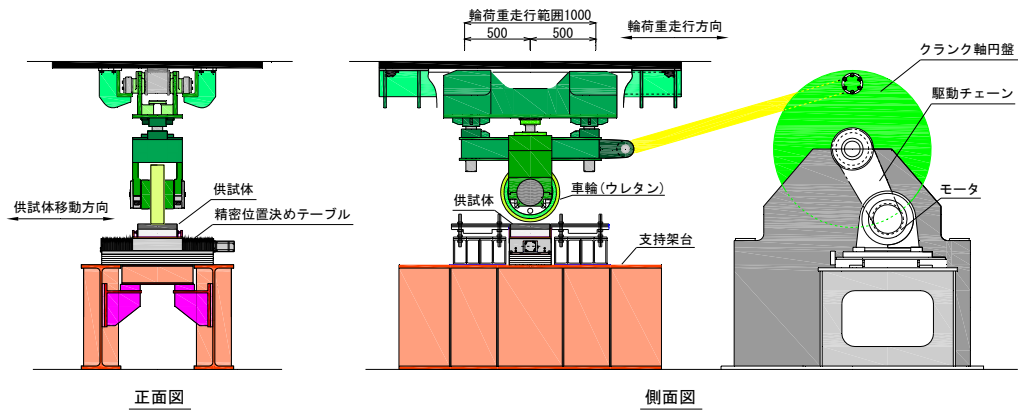
1. はじめに

道路橋における鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）の劣化要因は、主に大型車輪荷重の繰返し走行による疲労であり、ひび割れを介した床版内部への水の浸入が床版の劣化を 50～300 倍にまで加速する場合があることが報告されている¹⁾。また、積雪寒冷地において冬期に散布する凍結防止剤や海岸から近い橋梁にもたらされる飛来塩分は床版内部へ塩化物イオンを供給し、塩害による鉄筋の腐食を通して床版上面側コンクリートの剥離に起因する舗装路面のポットホールを引き起こす場合がある。さらに、冬期に気温が氷点下となる地域では、床版コンクリートに浸入した水の凍結融解によって床版上面側のコンクリートの損傷を発生させ、砂利化や床版の抜け落ちに至った例も報告されている²⁾。その他、近年では、反応性骨材を含んだ RC 床版において、水の供給によりアルカリシリカ反応が生じて床版の劣化損傷が顕在化した事例もある³⁾。

以上のように、RC 床版の様々な劣化損傷に床版内部への水の浸入が大きく関わっており、床版の長寿命化を図る上で床版内部へ水を浸入させないことが重要になる。

しかしながら、橋面全面への床版防水層（以下、防水層）の設置が基準化されたのは平成 14 年改訂の道路橋示方書⁴⁾からであり、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。また、建設年次が比較的新しい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。このため、道路橋床版の劣化損傷を防ぎ、安全で円滑かつ快適な交通を確保するためには、供用中の作用に対してアスファルト舗装（以下、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の構築が重要になる。

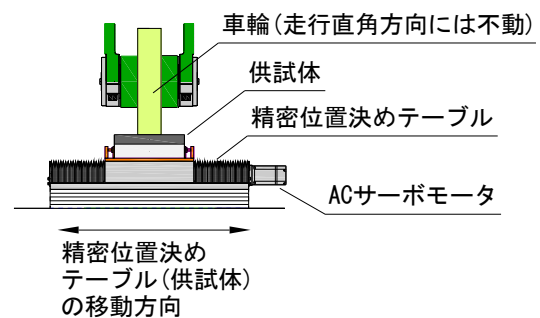
本研究は、積雪寒冷環境下や重交通路線における防水工に求められる機能の提案や性能評価手法の開発を行い、高耐久防水システムを確立することを目的としている。平成 26 年度は、実交通荷重に即した荷重作用に対する防水工の性能評価として、せん断接着特性を種々に変化させた舗装－防水層－床版構造体のランダムホイールトラッキング試験を実施し、舗装の流動抑制に着目した防



(a) 小型輪荷重走行試験機



(b) 実験のセットアップ



(c) 供試体周辺部の概要 (正面図)

図-1 実験装置

水層の接着特性の性能評価方法や新たな規格値の策定について検討した。

2. ランダムホイールトラッキング試験

本研究では、実橋における輪荷重走行に即した鉛直力と界面せん断力の繰返しを同時に供試体に作用させることのできるランダムホイールトラッキング試験により、舗装の流動特性に着目した床版防水システムの性能評価を実施した。

2.1 試験装置

実験に使用したランダムホイールトラッキング試験機は、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¹⁾を再現することができる。図-1に実験装置の概要図を示す。

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¹⁾を縮小したものであり、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1,000mm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。

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ており、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角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ものである。精密位置決めテーブルの運動は、小型輪荷重試験機のクランク軸円盤の回転変位をトリガとして所定のプログラムに基づく量を移動するよう設定されており、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

実験には図-2に示す縦300mm、横300mm、厚さ100mm(舗装40mm、コンクリート60mm)の平板供試体を用いた。舗装には密粒度アスファルト混合物13F

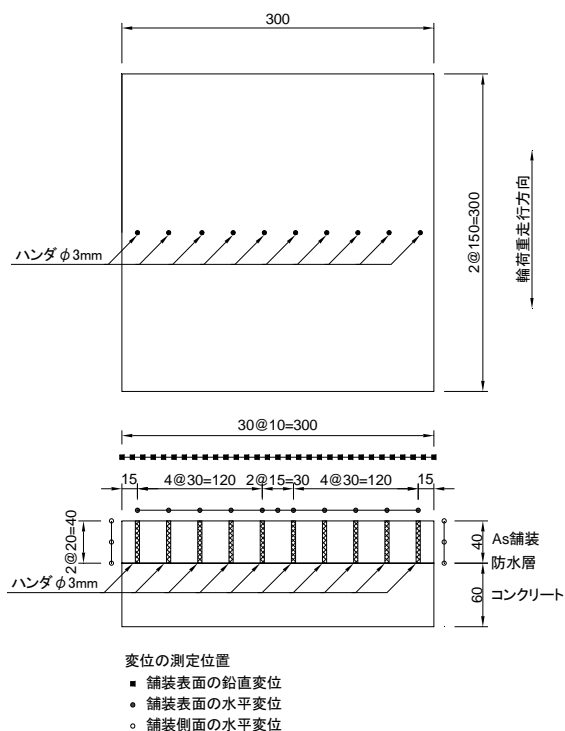


図-2 実験供試体および変位計測位置

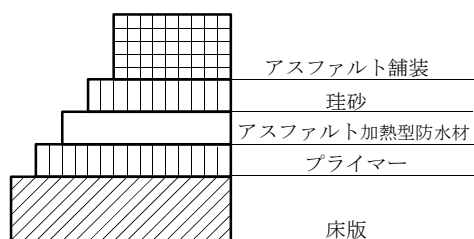


図-3 供試体の構成

(改質II型)を、コンクリートにはJISA 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-3には供試体の構成を示す。

本実験においては、舗装-防水層-床版構造体の接着性能に関する新たな規格値の策定について検討するため、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、せん断接着特性の違いによる舗装の流動特性の変化を検証できるようにした。せん断接着特性は表-1に示す全6ケースに分類しており、全てのケースで23°Cにおける試験規格値⁵⁾である引張接着強度0.6N/mm²以上、せん断接着強度0.15N/mm²以上、せん断接着強度時変位1.0mm以上を満足するものであった。

実験ケース名は、せん断接着強度の小さい順にCase1、Case2、Case3、Case4、Case5とし、せん断接着強度

表-1 実験ケース一覧

ケース名	引張	せん断	
	σ (N/mm ²)	τ (N/mm ²)	δ (mm)
Case1	0.93	0.18	2.75
Case2	1.14	0.29	6.58
Case3a	1.53	0.43	3.95
Case3b	0.96	0.44	3.77
Case4	1.04	0.54	2.07
Case5	1.78	0.75	6.86

σ ：引張接着強度、 τ ：せん断接着強度、 δ ：せん断接着強度時の変位

※試験温度23°C、3体の平均値

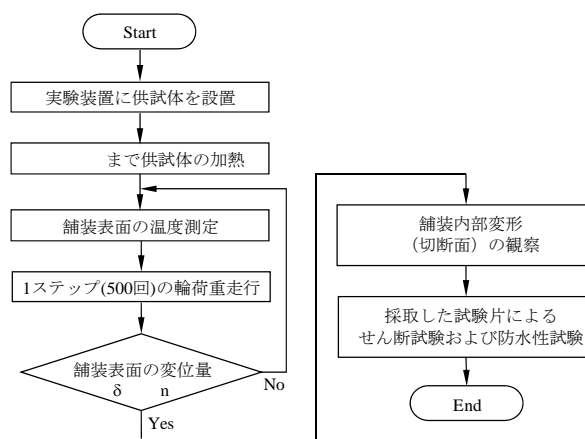


図-4 実験手順

が0.43N/mm²および0.44N/mm²と同程度であるCase3については、せん断接着強度時の変位が大きいほうをCase3a、小さいほうをCase3bとした。

2.3 実験方法

実験は図-4に示すフローに従って実施した。以下には、実験方法の詳細を記す。

2.3.1 供試体の温度

本実験では、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。供試体の温度は、放射温度計を用いて計測した舗装上面9点での平均温度により管理し、既往の実験⁶⁾を参考に、輪荷重走行開始時の平均温度が50±1°Cになるようにした。

2.3.2 供試体移動プログラム

実交通荷重の載荷条件を踏まえ、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

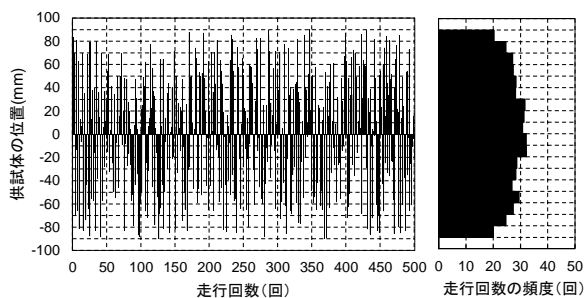


図-5 供試体移動プログラムの例

表-2 供試体移動プログラムの概要

概要	正規分布に基づくランダム移動
正規分布	平均 0mm、標準偏差 100mm
移動範囲	±90mm
実験終了の目安	舗装表面中央の鉛直変位 10mm、または、1 ステップ当たりの変位増分量が 0.1mm 以下。

を移動させた。図-5 および表-2 に供試体移動プログラムの例とその概要を示す。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、標準偏差を 100mm とした。供試体の移動範囲は供試体の中心に対して ±90mm であり、本実験では幅が約 100mm の車輪を用いていることから、供試体の中心に対して ±140mm の範囲に輪荷重が作用することになる。輪荷重の大きさは 10kN としており、このときの接地圧は 2.0 N/mm² である。

輪荷重走行は 500 回を 1 ステップとして実施し、供試体の移動がランダムとなるよう 1 ステップごとに新たに乱数正規分布に基づいてプログラムを作成した。なお、舗装表面温度の管理は 1 ステップが終了する毎に行い、温度が 50±1°C の範囲にあることを確認した上で次のステップに進んでいる。

実験は、舗装表面中央の鉛直変位量が 10mm 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 0.1mm 以下となり舗装の流動が収束したと判断できる時点でした。

2.4 測定項目

本実験では、1 ステップの輪荷重走行が終了するごとにノギス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 ステップでの舗装の変位増分が小さい場合には計測を省略している。

また、供試体舗装部には、図-2 に示すとおり舗装厚さの全長にわたって 3.0mm のハンダを挿入しており、実

験終了後の供試体切断面におけるハンダの変形状態から舗装内部の変形状態を確認できるようにした。

3. 実験結果および考察

3.1 舗装変位と走行回数の関係

3.1.1 鉛直変位

図-6(a)に供試体中央の舗装表面鉛直変位と走行回数の関係を示す。ここでは、舗装表面の変位が供試体中央付近をピークとした凹型を示したことから、供試体中央での計測値を代表値としている。

図より、いずれの供試体も鉛直変位の増加傾向は類似しており、最初の 1 ステップで鉛直変位の増加が大きいが、その後は走行回数の増加に対して鉛直変位の増加が概ね一定の勾配を保持して変位が増加する。ただし、変位増加の速度は供試体によって異なり、せん断接着強度が大きい供試体ほど最初の 1 ステップでの変位量が小さく、2 ステップ目以降での変位の増加勾配も緩やかになる。Case1、Case2、Case3a、Case3b では、変位が 10mm に達した走行回数 4,000 回、3,000 回、15,000 回、12,000 回で実験を終了した。また、Case4 および Case5 では、1 ステップ当たりの変位の増加が 0.1mm 以下となったため、舗装の流動が収束状態に達したと判断してそれぞれ走行回数 12,000 回および 8,500 回で実験を終了した。

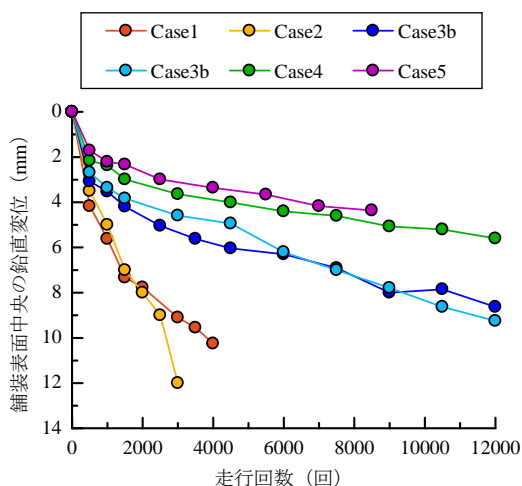
3.1.2 水平変位

図-6(b)には舗装表面水平変位と走行回数の関係を示す。舗装の水平変位は、供試体中央から走行直角方向 ±105mm の位置での変位の平均値とした。舗装の水平変位は鉛直変位と同様の増加傾向を示しており、当然ながら、せん断接着強度が小さいほど舗装下端でせん断変形しやすいことから、舗装全体の水平移動も生じやすくなる。

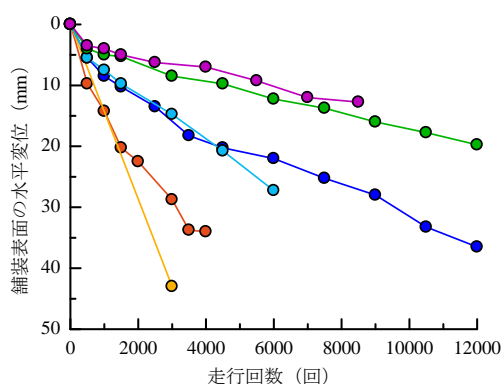
3.2 舗装および防水層の変形状況

図-7 には実験終了後の供試体切断面の変形図を示す。変形図は図-2 に示すハンダを設置した断面において供試体を切断し、供試体表面およびハンダの変形状況を図化したものである。図中で、黒色の破線は変形前のハンダ位置を、赤色の実線は変形後のハンダ位置を表す。なお、走行直角方向端部では、Case2 を除く全てのケースで側方流動に伴う舗装の割れおよび脱落が生じたが、供試体舗装部の左右両側面の境界条件が自由であり、現実の条件と異なることから、流動特性の評価対象としていない。

切断面の変形状況を見ると、せん断接着強度の小さい Case1 および Case2 では舗装下端でハンダが大きく水



(a) 舗装表面中央の鉛直変位



(b) 舗装表面の水平変位

図-6 舗装の変位と走行回数との関係

平移動していることがわかる。特に、せん断接着強度が最も小さい Case1 では、ハンダが概ね鉛直方向の直線形状を保持したまま水平に移動していることから、輪荷重走行の早い段階で舗装の変形に先行して防水層あるいは防水層界面のせん断変位が生じ、輪荷重作用による鉛直変位に伴うポアソン効果によって舗装全体が水平に変位する変形モードとなっていたと推察できる。一方、Case3a、Case3b、Case4 および Case5 では、舗装下端でハンダが水平移動しておらず、中でもせん断接着強度が最も大きい Case5 では、舗装表面の水平移動量もわずかであり、舗装-防水層-床版構造体全体で舗装の流動に抵抗している。

以上の舗装変形状況の観察より、舗装の変形モードが Case2 と Case3a の間で異なっており、ずれ発生の閾値がせん断接着強度 $0.3 \sim 0.4 \text{ N/mm}^2$ 程度にあったものと推察される。

3.3 舗装の流動特性に対する影響要因の分析

舗装-防水層-床版構造体として床版防水の性能を考

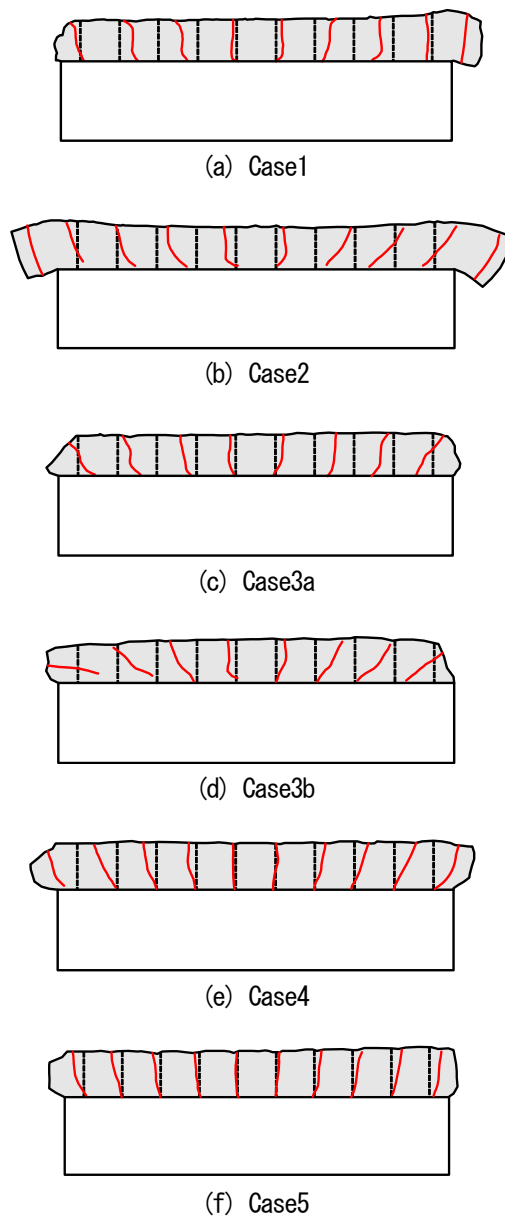


図-7 舗装、防水層の変形状況

える場合、床版の劣化要因の侵入を防ぐだけでなく舗装の早期損傷を誘発しないことも重要になる。本検討では、上述のランダムホイールトラッキング試験結果に基づき、舗装の流動を抑制するために舗装-防水層-床版構造体が保有すべき接着特性について検討する。

3.3.1 相関関係の整理

各供試体の基本的な接着性能とランダムホイールトラッキング試験結果との関係を整理し、舗装の流動特性に影響を及ぼす支配的要因を抽出する。ここで、舗装の流動特性を表す指標として、走行回数 500 回以降の舗装鉛直変位-走行回数関係を最小自乗法により直線近似した

ときの傾き（以下、流動速度）に着目する。また、舗装流動性との関係を整理する接着特性は、引張接着強度、せん断接着強度、せん断接着強度時変位、および、せん断剛性とした。なお、引張接着試験およびせん断試験は試験温度 23°C、ランダムホイールトラッキング試験は試験温度 50°C で実施したものであるが、本検討においては実験ケースによらず防水材の種類や防水層の構成が同一であることから、実験結果の温度依存性は無視した。

(1) 引張接着強度

図-8(a)は流動速度と引張接着強度の関係であり、両者の間に相関関係は見られない。引張接着試験は防水層の接着特性を簡便に評価できる試験の一つであり、施工確認等を目的として現場で実施することが可能であるが、輪荷重の踏みつけにより防水層に発生する応力とは応力の発生機構が異なる。また、ある一定以上の接着強度を有する場合には防水層の接着特性に依存せず舗装の強度により接着強度が決まり、実際に、本検討においても舗装で破断する供試体が数多く見られていた。以上より、

引張接着強度は舗装の耐流動性の観点で防水層の接着特性を評価できる指標ではないと考えられる。

(2) せん断接着強度

図-8(b)に流動速度とせん断接着強度の関係を示す。図より、Case2で流動が早く進行する結果となったものの、全体的な傾向としてはせん断接着強度の増加により流動速度が低下する。両者の関係は流動速度が相対的に大きいグループ (Case1, Case2) と小さいグループ (Case3a, Case3b, Case4, Case5) に大別でき、その境界がせん断接着強度 0.3~0.4N/mm²程度にある。これは、供試体切断面から観察された舗装下端でのずれ発生の閾値とも概ね一致するものである。また、注目すべき点として、せん断接着強度がこの閾値を超える範囲ではせん断接着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 3.0×10⁻⁴mm/回程度に収束していく傾向が見られる。

(3) せん断接着強度時変位

図-8(c)に流動速度とせん断接着強度時変位の関係を示す。図より、せん断接着強度時変位が増加するにつれ

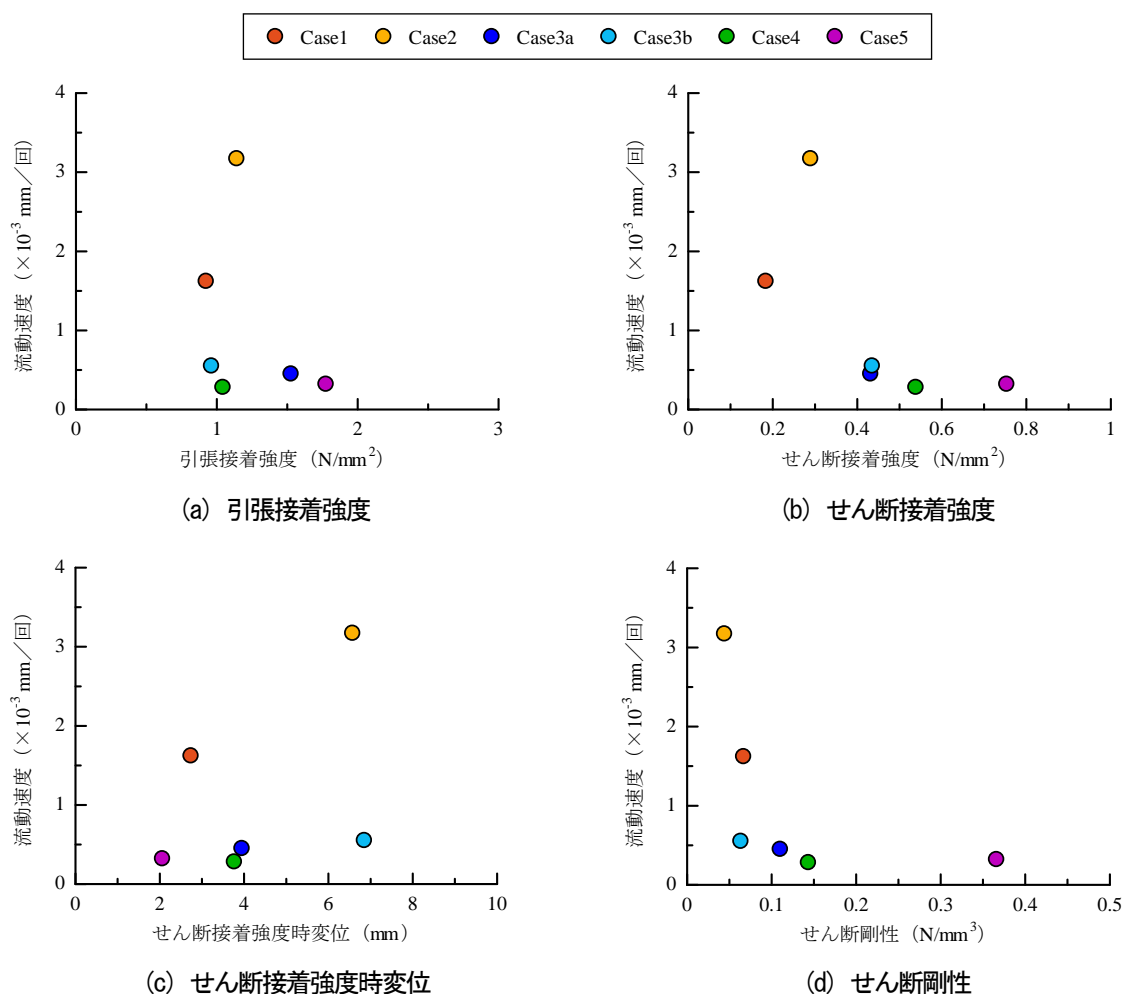


図-8 舗装の流動速度と接着特性との関係

て流動速度が大きくなる傾向こそあるが、明確な相関関係は見られず、舗装の流動特性評価に適するパラメータではないと推察できる。せん断変位に関する規格は、防水層が舗装および床版の変形に追従するための変形性能を確保するものであり、変位量が大きいほど優れた性能と評価される。しかしながら、せん断接着強度に対して変形量が相対的に大きくせん断剛性が小さくなる場合には舗装の変形を助長する可能性があることから、舗装の耐流動性の観点では、変形性能が大きくなりすぎないための変位量の上限值の設定、あるいはせん断剛性に関する規格値の設定も必要になると考えられる。

(4) せん断剛性

図-8(d)に流動速度とせん断剛性の関係を示す。ここでせん断剛性は、せん断接着強度とせん断接着強度時変位の比（割線せん断剛性）として定義しており、せん断接着強度とせん断接着強度時変位との相対的な大小関係を考慮できる形式になっている。図より、流動速度とせん断剛性との間には明らかな相関関係が成り立ち、せん断剛性の増加に対して概ね累乗関数に則り流動速度が低下する。また、せん断剛性 0.1N/mm^3 程度に相関関係の変曲点があり、それ以降では流動速度が一定になる傾向がある。

3.3.2 考察

以上の結果より、舗装-防水層-床版構造体の接着特性のうち、せん断接着強度とせん断剛性については舗装の流動速度との間に相関関係が成立し、舗装の流動特性を直接的に評価する指標になり得る。また、せん断接着強度およびせん断剛性がある一定値以上になったとき舗装下端でのすべりが生じることなく流動速度が概ね収束することが明らかとなった。これらのことは、既存の性能評価試験により実交通荷重の載荷条件に即した防水層の性能評価が可能になること、さらに、交通量に応じた防水層の選定が可能になることを示唆するものである。一方で、本実験で採用した輪荷重の接地圧 2.0N/mm^2 は実交通荷重と比較すると過大であり、舗装の流動に対して極めて過酷な条件である。すなわち、本実験は防水層の接着特性が舗装の流動に及ぼす定性的な影響を評価し

たに過ぎず、舗装の流動が収束したせん断接着強度 $0.3 \sim 0.4\text{N/mm}^2$ 以上およびせん断剛性 0.1N/mm^3 以上は防水層が保有すべき接着特性を定量的に表すものではない。したがって、ランダムホイールトラッキング試験による舗装の流動特性に着目した接着特性の評価技術を標準化するためには、荷重条件の適切な設定および実験結果と実橋梁における輪荷重走行回数との関連付けが不可欠になる。

4. まとめ

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、防水層の接着特性が舗装の流動特性や舗装-防水層間のすべりの発生に与える影響を検証した。その結果を以下に示す。

- (1) 舗装-防水層-床版構造体のせん断接着強度とせん断剛性により舗装の耐流動性の評価が可能である。
- (2) ある水準以上のせん断接着特性を確保することで舗装の耐流動性が大きく向上する。

今後は、舗装の耐流動性に着目したせん断接着特性の規格値策定や交通量に応じた防水層の選定方法について検討する。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版株式会社、2007。
- 2) 澤松俊寿、岡田慎哉、山崎達也：一般国道 275 号志寸川橋の床版陥没について、第 56 回北海道開発技術研究発表会、2012。
- 3) 五島孝行、大田孝二、梶尾聡、鈴木康範、井戸康清、島田守：アルカリ骨材反応で損傷した道路橋床版の調査、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、pp.835-836、2013。
- 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：道路橋床版防水便覧、2007。
- 6) 松井繁之：ランダムトラバースホイールトラッキング試験機による床版+防水工+舗装の耐久性評価、平成 17 年度～平成 18 年度科学研究費補助金基盤研究 C 研究成果報告書、2007。

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

SAIJOH Norio

KAKUMA Ko

Abstract : This study conducted the random wheel trucking test on specimens consisting of asphalt pavement, waterproofing and slab concrete with various shear adhesive properties, in order to obtain fundamental data for establishing a new evaluation method of waterproofing's adhesive performance from the view point of the pavement's flow resistance. The result revealed that (1) the shear adhesive strength and stiffness, presenting a correlation with flow resistance, can become indices to evaluate flow behavior directly, and (2) shear adhesive property over a definite degree drastically improved and converged flow resistance. These indicated the selection of waterproofing corresponding to traffic volume would be implemented in the future as well as actual wheel running condition based performance evaluation by using a current performance test: shear test.

Key words : Waterproofing, RC deck slab, Shear adhesive property, Flow behavior of pavement