

論文

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

澤松俊寿*，岡田慎哉**，角間恒**，西弘明**，松井繁之***

*国土交通省北海道開発局網走開発建設部（〒093-8544 北海道網走市新町2丁目6-1）

**博(工)，(独)土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム（〒062-0912 札幌市豊平区平岸1条3-1-34）

***工博，大阪大学名誉教授，(一財)災害科学研究所（〒541-0043 大阪市中央区高麗橋4-5-13）

輪荷重の繰返し走行に対するアスファルト舗装、床版防水層および床版からなる構造体の抵抗特性の評価を目的として、アスファルト舗装、床版防水層およびコンクリートからなる供試体に対するランダムトラバースホイールトラッキング試験を実施した。実験では実現象に即した輪荷重負荷による圧縮力と界面せん断力の繰返しを同時に作用させることのできる試験機を用い、床版防水層が用いられた供試体に対して疲労耐久性を評価した。その結果、アスファルト舗装の下面が水平方向に変位するメカニズムには2とおりあり、床版防水層の層内でせん断変形が卓越するものと、舗装と床版防水層の界面が剥離してずれるものに大別された。

キーワード：床版防水層，輪荷重走行試験，わだち掘れ，疲労耐久性

1. はじめに

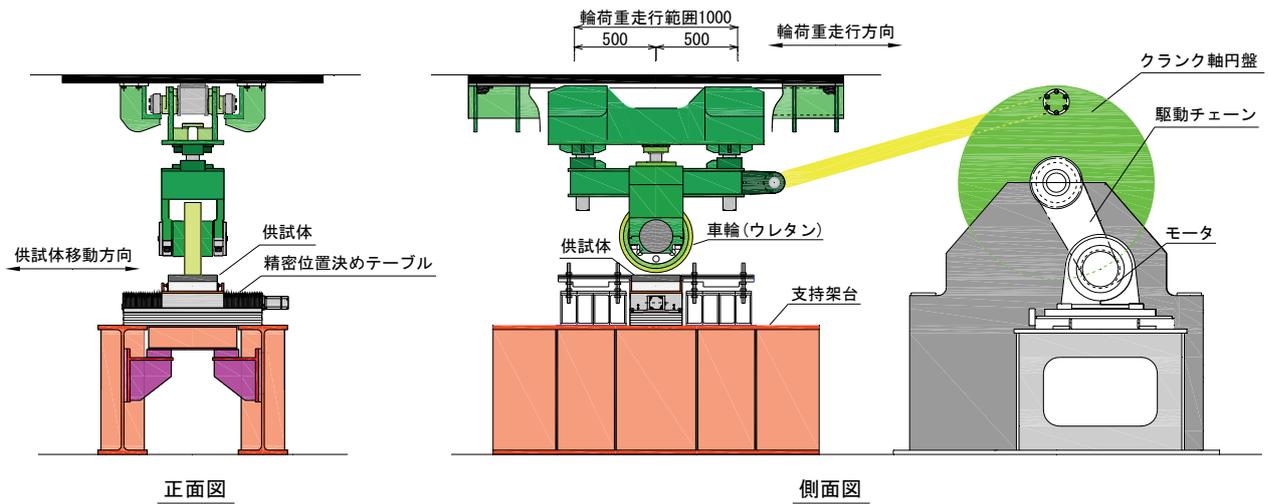
道路橋における鉄筋コンクリート床版の劣化要因は、主に大型車輪荷重の繰返し走行による疲労であり、ひび割れを介した床版内部への水の浸入が床版の劣化を50～300倍にまで加速する可能性があることが報告されている¹⁾。また、積雪寒冷地において冬期に散布する凍結防止剤や海岸から近い橋梁にもたらされる飛来塩分は床版内部へ塩化物イオンを供給し、塩害による鉄筋の腐食をとおして床版上面側のコンクリートの剥離に起因する舗装路面のポットホールを引き起こす場合がある。さらに、冬期に気温が氷点下となる地域では、床版コンクリートに浸入した水の凍結融解によって床版上面側のコンクリートの損傷を発生させ、砂利化や床版の抜け落ち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

道路橋床版の劣化損傷には種々の要因が考えられるが、これらのいずれの要因に対しても床版内部への水の浸入が床版の劣化損傷の進行を著しく促進することが示されており、床版内部への水の浸入防止が床版の長寿命化に大きく貢献することは明らかである。

このような背景から、床版内部へ水を侵入させないことに対する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²⁾、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。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（以後、「舗装」という。）、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と考えられる。

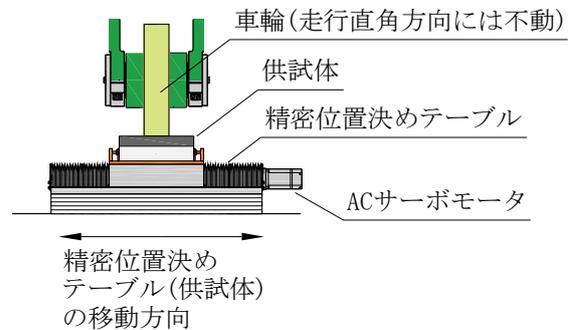
輪荷重の繰返し走行は、舗装、防水層、床版からなる構造体に対する供用中の主たる作用の1つであるといえる。当然ながら輪荷重が繰返し走行するような条件下においても舗装、防水層、床版からなる構造体は安全で円滑かつ快適な交通を確保できる状態にある必要がある。本報では、舗装、防水層、床版からなる構造体に対する輪荷重走行の繰返しに対する損傷メカニズムに着目した疲労耐久性評価を目的として、舗装、防水層およびコンクリートからなる供試体を用いたランダムトラバースホイールトラッキング（以後、「RTWT」という。）試験を実施した。



(a)概要図



(b)実験のセットアップ



(c)供試体周辺部の概要図 (正面図)

図-1 ランダムトラバースホイールトラッキング試験機

2. RTWT 試験の方法

2.1 試験の概要

本実験では、輪荷重の走行位置の実現象に即した輪荷重負荷による圧縮力と界面せん断力の繰り返しを同時に供試体に作用させることのできる RTWT 試験機を用いて、舗装、防水層およびコンクリートからなる構造の損傷メカニズムに着目した疲労耐久性の評価を実施した。

2.2 試験の方法

(1)RTWT 試験機

本実験では、輪荷重が路面を押しえながらその走行位置が概ね正規分布に基づいて決定される実交通荷重の載荷条件³⁾を再現することのできる RTWT 試験機⁴⁾を用いた。本試験装置は、輪荷重の繰り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交方向に移動させる精密位置決めテーブルから構成されている。

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試験に用いられる輪荷重走行試験機¹⁾を縮小したもので、その機構も同様である。本試験機はクランク式の輪荷重走行試験機であり、油圧により 40kN までの鉛直荷重を載荷した状態で車輪を繰り返し走行させることが可能である。走行範囲は 1000 mm で、1 分あたり 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。10kN の鉛直荷重を載荷した場合の接地圧は $2.0\text{N}/\text{mm}^2$ である。ここで、接地圧は感圧紙を用いて所定の鉛直荷重を載荷した際の接地面の車輪痕から求めた接地面積で鉛直荷重を除することにより求めた。

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いる。移動のストロークは最大で 340mm、移動の最高速度は 500mm/sec および位置決め精度は 0.02mm である。精密位置決めテーブルの運動によりテーブル部の上に固定

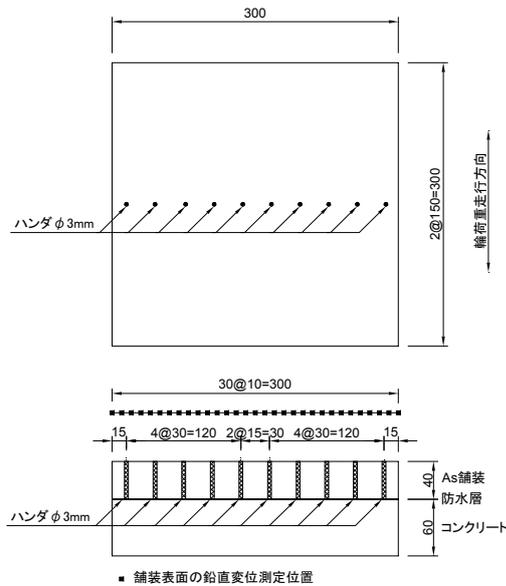


図-2 供試体および変位の測定位置

した供試体を輪荷重の走行方向に対して直交する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り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1回の供試体の移動が行われる。

(2) 供試体

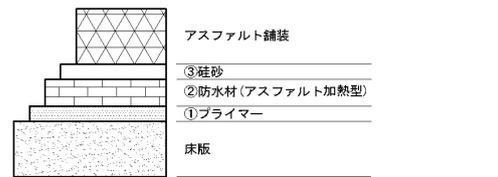
供試体には図-2 に示す縦 300mm、横 300mm、厚さ 100mm（舗装 40mm、コンクリート 60mm）の平板供試体を用いた。

舗装は密粒度アスファルト混合物 13F（改質Ⅱ型）とした。コンクリートには JIS A 5371 に基づくコンクリート平板を用いた。防水層には図-3 に示す材料や構成が異なる5種類を用いた。反応樹脂型塗膜防水（ウレタン樹脂）A および B では、防水材と舗装の間の接着剤に異なる材料が用いられている。本実験で用いたいずれの防水層も道路橋床版防水便覧⁵⁾の基本照査試験を満足するものである。

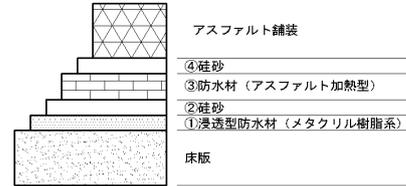
実験終了後に供試体を切断して舗装内部の変形の状態を確認することを目的に、試験に先立って舗装内部にハンダを設置した。図-2 に示すとおり供試体舗装部を舗装厚さの全長に渡ってφ3.5mm で鉛直に削孔し、φ3.0mm のハンダを挿入した。

(3) 走行プログラム

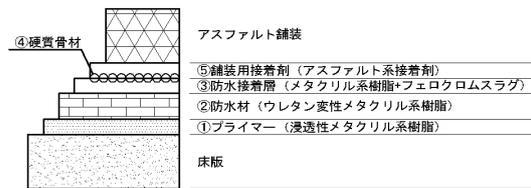
実交通荷重の載荷条件を踏まえて正規分布に基づいてランダムに輪荷重の走行位置が決定されるように供試体を移動させた。図-4 に供試体移動プログラムの例とその概要を示す。プログラムは、乱数正規分布に基づくものとし、その平均を 0mm、標準偏差を 100mm とし



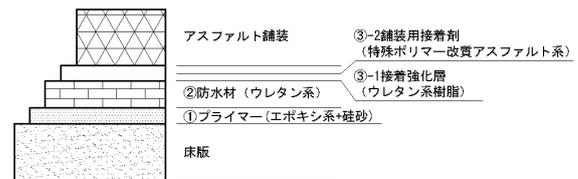
(a) Case1 アスファルト加熱型塗膜防水



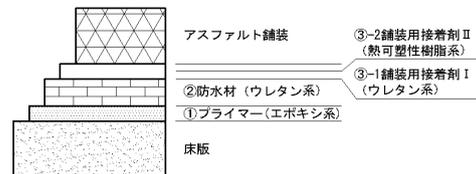
(b) Case2 浸透系複合防水



(c) Case3 反応樹脂型塗膜防水（メタクリル樹脂）



(d) Case4 反応樹脂型塗膜防水（ウレタン樹脂）A



(e) Case5 反応樹脂型塗膜防水（ウレタン樹脂）B

図-3 防水層の構成

た。供試体の移動範囲は供試体の中心に対して±90mmである。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 が車輪に踏まれる範囲である。輪荷重走行は 500 回を 1 ステップとして実施した。供試体の移動がランダムとなるよう配慮して 1 ステップごとに新たな乱数に基づいて供試体のプログラムを作成した。なお、この走行プログラムは舗装に実際のわだち掘れと同様の変形が生じるように定めている。

輪荷重の大きさは 10kN とした。このときの接地圧は前述のとおり 2.0N/mm²である。

(4) 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図-

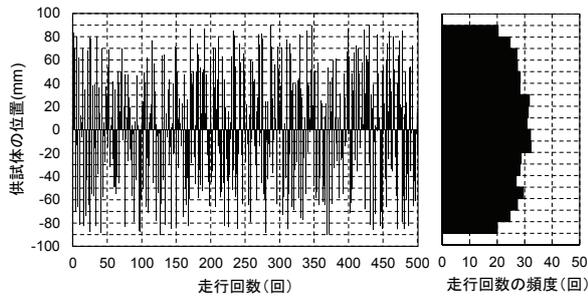


図-4 1ステップあたりの供試体の移動プログラム

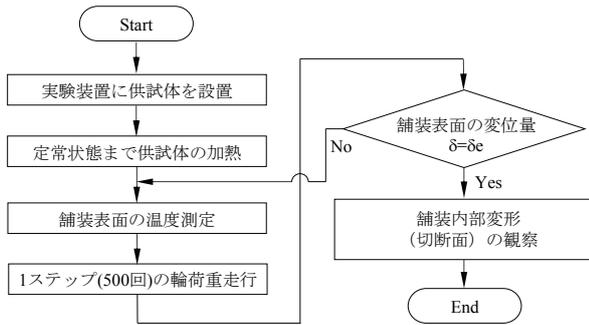


図-5 実験のフロー

1(b)のように赤外線ランプ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。輪荷重走行開始時の温度は、既往の研究⁴⁾に準拠して舗装上面の温度を $50\pm 1^\circ\text{C}$ とした。輪荷重走行試験に先立って加熱方法に関する予備試験を実施し、加熱方法(熱量、放射距離、加熱時間)を設定した。また予備試験により、加熱開始から10時間程度で供試体温度が定常状態となることが確認されたことから、輪荷重走行前の供試体の加熱時間の目安を12時間とした。

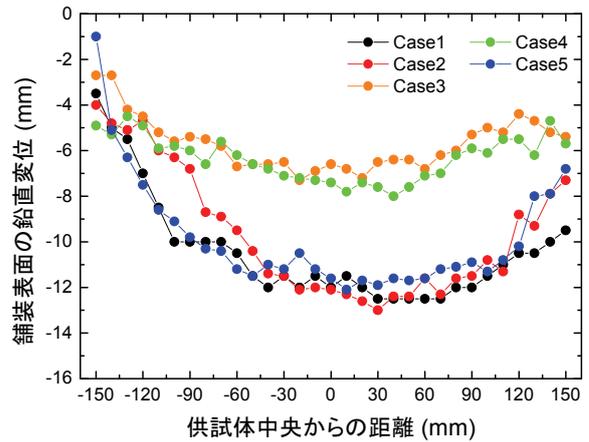
(5) 測定項目

1ステップ(500回)の輪荷重走行を実施する前に、舗装表面の温度を放射温度計の測定結果により管理した。また、1ステップ(500回)ないし2ステップ(1000回=500回×2)の輪荷重走行を実施するごとにノギスにより舗装上面の鉛直変位を測定した。測定した位置は図-2に示したとおりである。

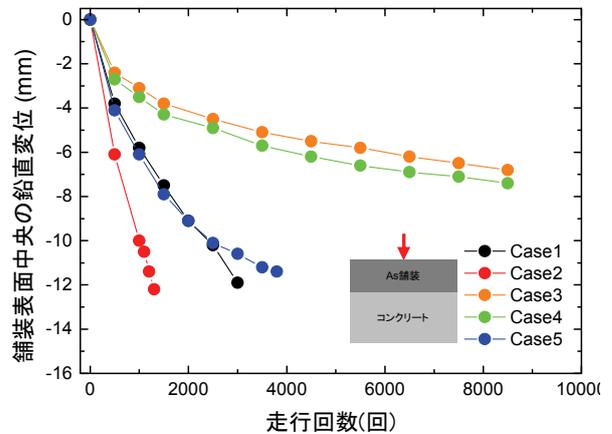
(6) 実験の手順

実験は図-5のフローに示す手順で実施した。まず、供試体を実験装置に設置し、赤外線ランプにより12時間の加熱を行った。次に、舗装表面の温度を放射温度計により測定し、測定結果が $50\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲にあることを確認した。そして、所定の供試体移動プログラムのもとで1ステップ(500回)の輪荷重走行を実施し舗装表面の変位を測定した。舗装表面の鉛直変位量が12mmとなるまで1ステップごとの輪荷重走行を繰り返した。舗装表面の鉛直変位量が12mmとなった時点で輪荷重走行を終了し、舗装内部および防水層の変形状況を目視観察するために、ハンダを設置した断面で供試体を切断した。

(7) 実験ケース



(a)実験終了時における舗装表面の鉛直変位の分布



(b)舗装表面中央の鉛直変位と走行回数
図-6 舗装の変形

パラメータは防水層の種類とし、全5ケースについて試験を実施した。

3. RTWT 試験の結果

3.1 舗装変位と走行回数の関係

図-6(a)は舗装表面の鉛直変位の分布である。輪荷重走行回数によらず同様の分布形状を示したことから、ここでは実験終了時の結果を示した。

Case3およびCase4では、8500回の輪荷重走行終了時に輪荷重走行1ステップ(500回)あたりの鉛直変位量の増分が0.1mmとなったため、変形の進展が十分に小さいと判断し走行を終了した。その他のケースでは中央の鉛直変位が12mmとなった時点で輪荷重走行を終了した。全てのケースにおいてCase1、Case2およびCase5では供試体中央部付近を頂点に凹型のモードで変形している傾向が認められた。

図-6(b)は舗装表面中央の鉛直変位と走行回数の関係である。舗装表面の鉛直変位分布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、ここでは舗装表面中央を代表値としている。同図より防水層の種類によって鉛直変位の発生量、すなわちわだち掘れに対する抵抗性が大きく異なることが分かる。ただし、Case2-1 は供試体加熱用の赤外線ランプの不調により舗装上面の温度が54℃程度となっていたために、他のケースと比べて舗装剛性が低下して同一の走行回数に対する鉛直変位が大きくなったものと考えられる。このため、その疲労耐久性を単純に比較することはできないが、後述のとおり、供試体切断面の舗装の変形モードはCase2と同様のアスファルト加熱型塗膜の層を有するCase1と類似している。Case3およびCase4は他のケースと比較して発生する鉛直変位の量が小さい。例えば鉛直変位6mmが発生した時点の走行回数はCase2が500回程度、Case1およびCase5が1000回程度、Case4が4100回程度、Case3が6000回程度である。

3.2 実験終了後の舗装および防水層の変形の状況

図-7は実験終了後の供試体切断面の変形図である。変形図は図-2に示すハンダを設置した断面に対してコンクリートカッターで供試体を切断し、供試体表面およびハンダの変形の状況を図化したものであり、実験前の設計上の位置を黒い破線で、実験後の実測位置を赤線で示している。なお、全てのケースにおいて供試体切断面にはその両端部付近を除いて舗装のひび割れは認められなかった。

防水層の種類によらず供試体の中心に対してほぼ対象に外側に向かって舗装が変形していることがわかる。舗装の下端部分に着目すると、Case1、Case2およびCase5は水平方向に比較的大きく変位しており、Case3およびCase4は供試体の両端部を除いて変位が発生していないかごくわずかである。なお、供試体の左右両側面の境界条件が自由であり現実の条件とは異なっていることから、端部から50mm程度の範囲は実現象と乖離している可能性がある。

図-6(b)の舗装表面中央の鉛直変位と走行回数の関係において、試験結果を同一走行回数に対する鉛直変位が大きいグループ(Case1、Case2およびCase5)と鉛直変位が小さいグループ(Case3およびCase4)に分類すると、前者は舗装下端が水平方向に比較的大きく変位しており、後者は舗装下端の水平変位が発生していないかわずかである。したがって、舗装表面の鉛直変位(わだち掘れ)の大きさと舗装下端の水平変位には強い相関があるといえる。

舗装下端が水平方向に変位したケースのうちCase5の供試体切断面を目視したところ、図-3(e)に示した接着剤II(熱可塑性樹脂シート)と舗装の界面がずれて剥離(開口)した形跡が認められた。一方でCase1およびCase2では界面が剥離したような形跡は認められず、舗装下端の水平変位はアスファルト塗膜層自体のせん断

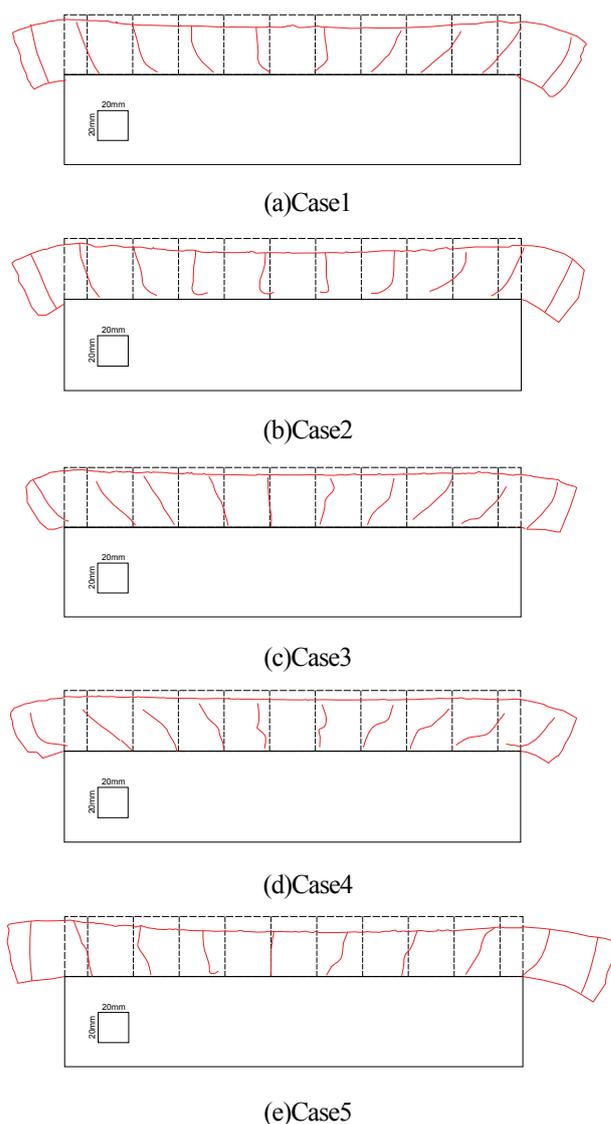


図-7 実験終了後の切断面の変形図

変形によってもたらされている。これは、アスファルト塗膜材料の温度依存性による高温時のせん断剛性の低下が影響したものと考えられる。このことから本実験に用いた防水層においては舗装下端が水平方向に変位するメカニズムは2通りあり、防水層の層内でせん断変形が発生するモード(Case1、Case2)と舗装と防水層の界面がずれるモード(Case5)に大別されると考えられる。

4. 考察

図-6および図-7より舗装表面の鉛直変位(わだち掘れ)の大きさと舗装下端の水平変位には強い相関があることが認められた。これは、舗装、防水層およびコンクリートからなる構造体の変形特性の観点からは、舗装にとって防水層は下端での境界条件としての役割を果たしていることに他ならない。したがって、構造体としてわだち掘れに対する高い抵抗性を確保するためには

舗装に耐流動性の優れた材料を用いるだけでなく、防水層および防水層と舗装との界面においてせん断接着強度と一定程度のせん断剛性が要求されるといえる。

一方で、舗装、防水層およびコンクリートからなる構造体としてのせん断接着強度やせん断剛性が低くわだち掘れに対する抵抗性が低いかまたは低下したとしても、実験で確認された2とおりのメカニズム、すなわち防水層と舗装の界面がずれる場合と防水層自体がせん断変形する場合とでは、損傷の進展特性や修復性の観点においては両者が持つ意味合いは大きく異なるものと考えられる。Case5 で用いた防水層は輪荷重の繰返し走行の結果としてもたらされた防水層と舗装の界面のずれを伴う剥離が、後の供用中にその一体性を回復するようなことはない。さらなる輪荷重の繰返し走行が作用すると、この防水層と舗装の界面のずれを起点として面的にずれが進展することが容易に想像される。さらに剥離した部分に雨水等が浸入すると輪荷重による圧縮応力下で静水圧を超える大きな水圧が発生し、剥離の進展の速度が著しく増加するものと考えられる。そして界面においてある程度の剥離が発生した結果として、舗装のよれや基層からのポットホールとして外観に顕在化し、車両走行の安全性の低下を招くものと考えられる。一方で、Case1 や Case2 のようなアスファルト加熱型塗膜の層を有する防水層では、輪荷重の繰返し走行の結果としてアスファルト加熱型塗膜の層に大きなせん断変形がもたらされたとしても、構造体の界面に剥離は発生していない。例えば、橋面に発生した舗装のわだち掘れを切削オーバーレイによって補修する場合、前者は舗装の表層および基層さらには防水層を補修する必要があるが、後者は付着が保たれているため、表層のみの補修で良いと考えることもできる。また、アスファルト加熱型塗膜の層を有する防水層は Case3 や Case4 と比較するとわだち掘れに対する抵抗性は低いものの、その材料費が相対的に廉価であることを踏まえると、舗装の管理水準がそれほど高くない場合や、大型車交通量が少ない場合には床版防水層として十分に適用性があるものと考えられる。ただし、これらは舗装、防水層およびコンクリートからなる構造体の変形特性のみに基づく議論であり、防水性が確保されていることが前提である。

5. まとめ

本研究では、輪荷重の繰返し走行に対する舗装、防水層および床版からなる構造体の疲労耐久性評価を目的として、舗装、防水層およびコンクリートからなる供試体を用いた小型輪荷重走行試験を実施した。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 舗装表面の鉛直変位（わだち掘れ）の大きさと舗装下端の水平変位、すなわち防水層の変形特性には強い相関があり、防水層の種類によってわだち掘れに対する抵抗性が大きく異なる。
- (2) 舗装下端が水平方向に変位するメカニズムは2通りあり、防水層の層内でせん断変形が発生するモードと舗装と防水層の界面がずれるモードに大別された。修復性の観点においては両者が持つ意味合いは異なるものと考えられる。
- (3) 橋面においてわだち掘れに対して高い抵抗性を確保するためには舗装に耐流動性の優れた材料を用いるだけでなく、防水層および防水層と舗装との界面において一定程度のせん断接着強度とせん断剛性が要求される。

謝辞

本研究は、(独)土木研究所寒地土木研究所が一般財団法人災害科学研究所と共同で実施した「積雪寒冷地における橋梁床版等の補修・補強技術に関する研究」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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，pp.102-103，2002。
- 3) 谷垣博司：近畿管内の道路橋における交通荷重の実態から見た路線別交通特性と橋梁部材の確率論的安全性評価に関する基礎的研究，大阪大学大学院修士論文，1996
- 4) 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，2007.3
- 5) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧，2007.3