

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

Study on Evaluation of Fatigue Durability of Asphalt Pavement on Various Waterproofing Systems for RC Slabs

青木康素*, 大西弘志**, 松井繁之***, 田口仁****
Yasumoto AOKI, Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI, Hitoshi TAGUCHI

*工修 阪神高速道路(株) (〒541-0056 大阪府中央区久太郎町 4-1-3)

**工博 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

***工博 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

****工博 福田道路(株) 技術研究所 (〒959-0415 新潟県新潟市大潟村古新田 2031)

A waterproof is placed between RC slab and pavement. The asphalt pavement on the waterproof is largely affected by the conditions of bending strength between pavement and waterproof. Therefore, in order to evaluate the fatigue durability of the shearing bonding strength and effects on asphalt pavement deformation, the authors developed a new wheel tracking machine, Random Wheel Tracking Machine.

The fatigue durability of asphalt pavement including waterproof was evaluated with the triple-layered waterproofing system that consists of a concrete slab, a waterproof and asphalt pavement. From the tests, the new testing method can be said to be a more reasonable evaluation method for the flow deformation and stability of the asphalt pavement as well as the adhesiveness of waterproofs.

Key Words: waterproof, fatigue durability, Random Wheel Tracking Machine, triple-layered waterproofing system

1. はじめに

床版自身が保有するであろう耐久性を発揮させるには、床版内への水や塩分の供給を遮断する高い性能の防水層の設置が重要だと認識されている。一方防水層は、供用下では床版及び舗装と連成して挙動し、輪荷重載荷によって舗装の流動が発生し、その繰り返し作用によって舗装と防水層間、あるいは防水層と床版間の付着が切れて、舗装の流動化や割れが加速する。このようなせん断付着疲労破壊に対する防水層の接着性能は「床版+防水層+舗装」の三位一体構造で評価する必要がある¹⁾。

輪荷重作用下での防水層のせん断接着力に対する疲労耐久性（以下、疲労耐久性という）を「床版+防水層+舗装」の三位一体で評価する試験として、ホイールトラッキング（WT）試験、ホイールトラッキングトラバース（WTTV）試験がある。WT試験及びWTTV試験は、アスファルト舗装のわだち掘れ評価及びアスファルト混合物の耐流動性を評価する試験である。しかし現行の方法では、輪荷重が路面を押さえながらランダムに動く実交通荷重の載荷特性を再現できておらず、より実現象に即した防水層評価試験の開発が必要となっている。この現状を受けて、大阪大学では、荷重移動位置を確率分布させる新形式のWT試験機を開発している。

本研究では、防水層の疲労耐久性を評価するため、「床版+防水層+舗装」の3層構造の供試体に対し、大阪大

学で開発された新形式のWT試験機であるランダムホイールトラッキング（RWT）試験機を用いた疲労試験を実施した。試験結果から、防水層の疲労耐久性を「床版+防水層+舗装」の3層の床版防水システムで評価した。

2. ランダムホイールトラッキング（RWT）試験機

本試験機は、実路において輪荷重の走行位置が、確率分布に従ってランダムに変化するという現象を、試験機の輪荷重走行方法に組み込んだ新形式のホイールトラッキング試験機である。すなわち、1mにわたって一定位置を往復運動する軌道内中心に、長さ300mmの舗装付き床版供試体を設置し、それを車輪通過ごとにランダム

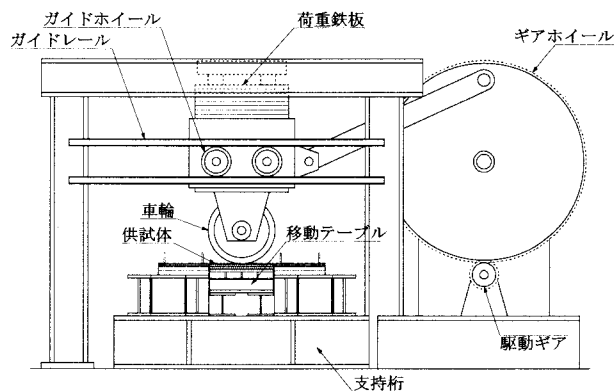


図-1 RWT試験機の概略図

に走行方向に直角方向に瞬時移動させるものである。結果として走行位置がランダムに変化することを再現しており、わだち掘れ変形した舗装の上を車輪が踏んで通過するようにさせ、既往のホイールトラッキングトラベース試験における舗装への強制横力をかけないものとなっている。試験機の概略図を図-1に示す。確率分布として標準偏差70mmの正規分布を適用した。また、供試体上面内で輪荷重の走行位置を変化させる必要があるため、供試体の移動範囲は300mm以下に設定しておく必要がある。そこで、試験輪幅と安全性を考慮し、試験的に±80mmとした。走行位置分布を図-2に示す。また、供試体範囲を図-2に点線で示す。またもちろん、輪荷重が供試体の中央部のみを走行するWT試験も実施可能である。

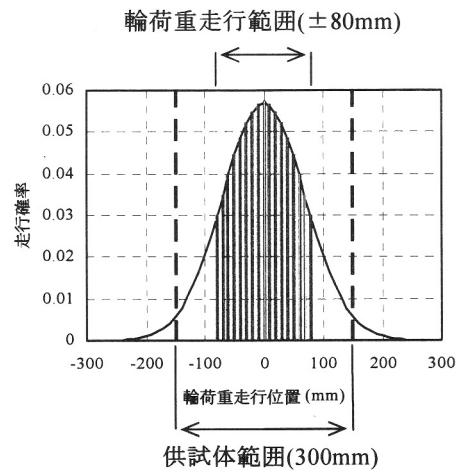


図-2 RWT試験機での走行位置分布

3. RWT試験, WT試験

3.1 供試体

供試体は図-3に示すようなコンクリートと防水層と舗装の3層構造で寸法は300×300×100mm(厚さ:コンクリート60mm, 防水層1~3mm, 舗装40mm)である。供試体に施工した防水層の種類を表-1に示す¹⁾。試験で使用する供試体の仕様概要を表-2に示す。これらの表に示すように、本試験で使用した防水層は防水層無しを含めて7種類である。これら7種類の防水層供試体を、設定温度の異なる2条件で、RWT試験及びWT試験を実施した。ただし、防水層MM2についてはRWT試験(50℃)のみ実施した。以上より、使用した供試体は合計19体である。なお、アスファルト混合物はSMA(13mm top)、バインダーはストレートアスファルト60/80である。また、防水層なしNでは、コンクリート部に舗装用接着材としてアスファルト乳剤(PK-4, 0.3l/m²)が塗布されている。

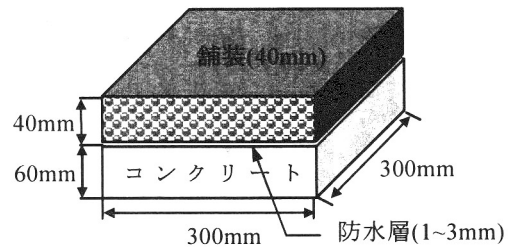


図-3 供試体の概略図

表-1 使用した防水層種

防水層	概要	備考
US1	ウレタン塗膜	高機能防水層
US3	ウレタン塗膜	高機能防水層
AS2	アスファルトシートII	高機能防水層
AS0	アスファルトシート	従来シート防水層
AT0	アスファルト塗膜	従来塗膜防水層
MM2	MMA樹脂系	浸透系防水層
N	防水層なし	-

表-2 供試体の仕様概要

防水層種	RWT試験(5℃)	RWT試験(50℃)	WT試験(50℃)
US1	US1-1	US1-2	US1-3
US3	US3-1	US3-2	US3-3
AS2	AS2-1	AS2-2	AS2-3
AS0	AS0-1	AS0-2	AS0-3
AT0	AT0-1	AT0-2	AT0-3
MM2	-	MM2	-
N	N-1	N-2	N-3

3.2 試験方法

(1) 試験での温度管理

温度変化によって舗装は様々な影響を受ける。舗装の力学的特性は温度とともに変化する。舗装を構成している材料の物性値、すなわち変形特性、強度特性等の重要なパラメーターが変化する。アスファルト舗装において、合材間を繋いでいる舗装用バインダーのアスファルトの温度依存性が極めて大きく、この影響により、舗装剛性が変化することになる。つまり、高温下では舗装は軟化し、弾性係数が低下する。逆に、低温下では舗装は硬化し、弾性係数が増加する。また、防水材層の上下面に設置される、舗装用接着材層及び床版用接着材層も、温度条件によっては、材料的变化が生じ、その影響で付着強度が変化する可能性がある。よって、温度による舗装変形及び防水層の付着強度への影響が考えられるため、本試験では温度条件を設定した。

温度条件として夏場条件及び冬場条件の温度を設定

し、それぞれの舗装温度条件で試験が可能となるように、温度管理装置を試験機に導入した。温度管理装置の概要を以下に示す。

①高温状態の設定方法

供試体の舗装部表面を高温状態に保つため、図-4のように赤外線ランプによる赤外線熱放射を4方向から与え、温度を上昇させる。また試験中、温度条件で設定した温度を一定に保持する必要がある。供試体の表面温度を非接触温度センサーで常時計測し、これと連動したデジタル調節計によって、赤外線ランプの照射時間を管理することで、温度を調節できる装置を試験機に設置した。

②低温状態の設定方法

供試体の舗装部表面を低温状態に保つため、図-5のように冷凍機の冷気噴射口にダクトを接続し、このダクトを供試体表面近傍に設置することで、ダクトからの冷気を供試体に当て、温度を低下させる。また試験中、温度条件で設定した温度を一定に保持する必要がある。供試体の表面温度を非接触温度センサーで常時計測し、これと連動したデジタル調節計によって、冷凍機の起動電源出力を管理することで、温度を調節できる装置を試験機に設置した。

(2) 支持条件

本試験における供試体支持条件は、コンクリート部は4辺側方固定支持、及び下面全面で鉛直方向固定支持とし、防水層部と舗装部は拘束なしである。一方、従来のWT試験では、供試体コンクリート部、防水層部、舗装部まで全て側方固定支持である。

本研究の試験では、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を供試体に作用させ、舗装の耐流動性及び防水層の疲労耐久性を舗装の変形量及び変形形状より評価しようとしている。具体的には、輪荷重負荷が舗装の鉛直及び水平の舗装流動変形に与える影響を評価する。そして、防水層の接着疲労破壊の有無を比較検証することが本試験の最重要項目となる。防水層とコンクリート間及び防水層と舗装間の接着性能に着目して、この接着性能を鉛直及び水平の舗装流動変形から評価する。そこで、図-6のように舗装部及び防水層部を側方拘束しないことで、従来のWT試験より、界面せん断力の影響が顕著となる支持条件となっている。

(3) 輪荷重走行負荷

RWT試験機で供試体に与える荷重負荷は、輪荷重走行負荷である。試験機での輪荷重走行負荷の諸元を表-3に示す。本研究では、RWT試験での走行載荷荷重は4.66kN、接地圧1.17N/mm²で試験を行った。これは床版の設計荷重であるT荷重の接地圧1.0N/mm²(衝撃考慮1.4N/mm²)相当の本試験機の最小載荷荷重である。橋梁における舗装設計では、基本的に荷重は床版でもたせ、舗装の疲労ひび割れ性、耐流動性、走行安定性等を考慮して舗装厚が決定されている。そこで、橋面防水層の疲労耐久性を、実際の設計に沿ったT荷重程度の荷重で評価した。本試験機では、大阪大学所有の小型輪荷重走行試験機で使用されていた輪荷重を転用している。輪荷重走行試験機は、道路橋床版上を走行する輪荷重を実験上で再現し、供試体としての床版の疲労強度を確認するものである。小型輪荷重走行試験機の装置では、ウレタンゴムを鋼製車輪に積層接着しており、その弾性変形で接地長が40mm程度確保できるため、この車輪での供試体への載荷において、部分分布荷重を作用させることができる。

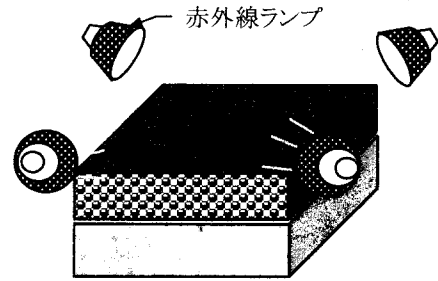


図-4 赤外線ランプによる加熱

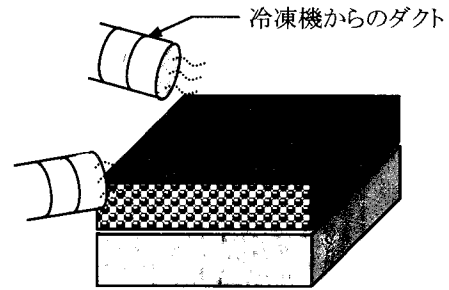


図-5 冷凍機による冷却

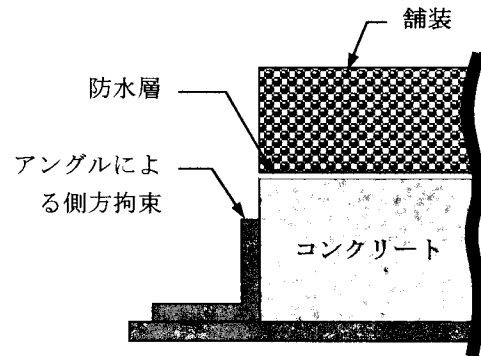


図-6 RWT試験の側方支持条件

表-3 荷重負荷条件

載荷能力(kN)	速度(回/min)	橋軸方向 走行範囲(mm)	接地面積(mm)
4~20	46	300	40×100*

* 接地長×車輪幅

3.3 測定項目

本試験では舗装の変形状態を把握するために、以下のような測定項目を設けた。

(1) 舗装の変形量

橋軸方向で供試体中央の橋軸直角方向の舗装変形量を測定した。

測定では、図-7に示す変形量測定装置を用いて測定した。橋軸直角方向にレーザー変位計を移動させながら、動ひずみ測定器によって変位量を測定する。測定位置は橋軸方向で供試体中央の橋軸直角方向0.1mmピッチの3000箇所であり、動的に測定することで、変形形状を精度よく捉えた。変形量の測定は、所定の輪荷重の走行回数ごとに走行載荷を中止し、測定装置を設置した後に行った。

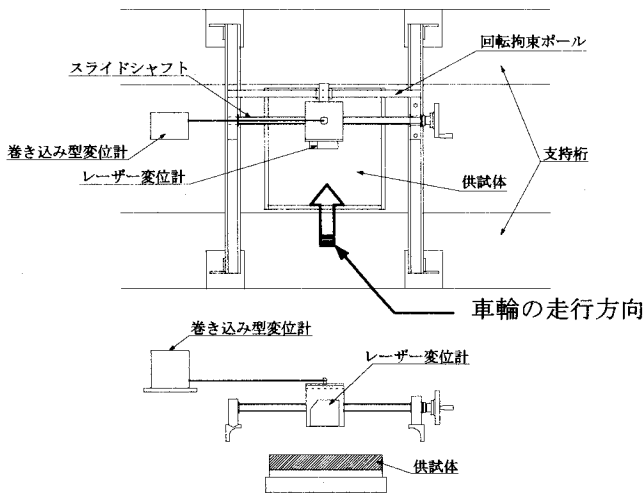


図-7 変形量測定装置

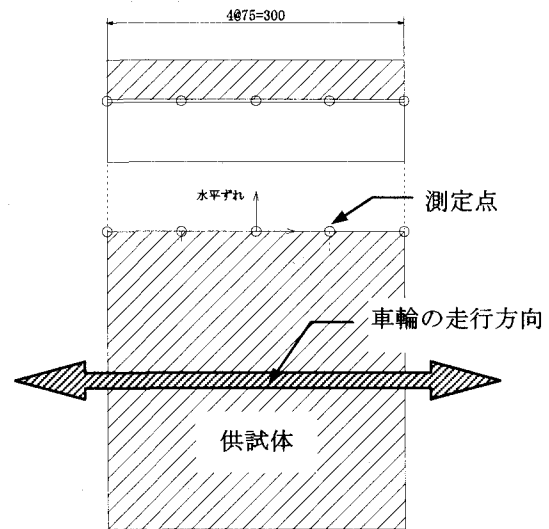


図-8 水平ずれ量測定点

(2) 舗装とコンクリート間の水平ずれ

舗装とコンクリート間のずれを定規により 0.1mm 単位で測定した。このずれ量の測定結果を、防水層の接着性能の評価に活用した。測定点を図-8 に示す。

試験では、輪荷重負荷による圧縮力と界面せん断力の作用で、舗装の塑性流動変形が生じる。この影響により、舗装と防水層間、または防水層とコンクリート間で付着切れが生じた場合、舗装部では更なる流動変形が生じ、橋軸直角方向及び橋軸方向に移動することになる。試験での支持条件では、舗装部の側方移動は拘束していない。このため、流動変形し側方移動した舗装部と、コンクリート部との間でずれが生じることになる。

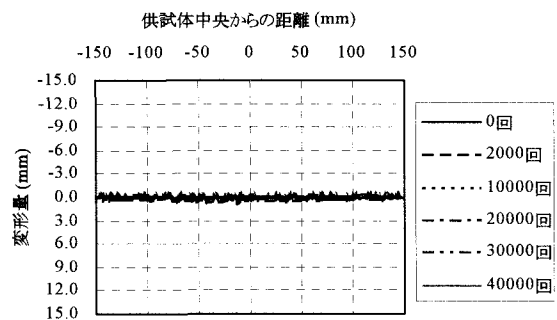


図-9 舗装変形の経時変化
(低温 5°C, 防水層 US1)

4. 試験結果と考察

4.1 舗装の変形形状

(1) 低温試験 (RWT5°C)

低温試験での、舗装の変形形状については、全ての防水層供試体でほぼ同じ結果であった。一例として以下に防水層 US1 の結果を示す。

図-9 に示すように、試験終了時まで、舗装の変形はほとんど生じていない。これは、低温下でアスファルトが硬化し、舗装単体で荷重に十分抵抗できる舗装剛性となったためだと考えられる。

低温下では、本試験の輪荷重接地圧 1.17N/mm²、つまり橋梁の床版設計荷重レベルの荷重走行に対して、防水層 US1 と接着している舗装の構造状態は安定していると推定される。

(2) 高温試験 (RWT50°C, WT50°C)

高温条件 (50°C) での RWT 試験及び WT 試験の結果、舗装の変形形状として、大別して 2 パターンの変形モードが確認された。以下に確認された高温時の変形モードの概要を説明する。橋軸直角方向断面の変形モードのイメージ図を図-10 に示す。また、供試体の初期形状を図-10 に点線で示す。

a) 変形モード A

図-10 のように、舗装の圧縮変形と流動変形により、供試体中央部では鉛直下向きの変形が生じている。また、輪荷重の走行範囲端の直近で鉛直上向きの変形が生じている。注目すべき特徴として、舗装端の表面付近では初期形状と異なり舗装が非拘束側に変形しているが、舗装と防水層間または防水層とコンクリート間では、ほとんど水平ずれが生じていない (生じていても 5mm 程度)。これは、輪荷重による界面せん断力によって、舗装が水平方向に流動変形するのに対し、防水層の接着力が抵抗している。そのため、界面ではほとんど水平にずれず、厚さ方向で表面に向かって、非拘束側に膨らんだ変形になったと推察される。

b) 変形モード B

変形モード A と同様に、舗装の圧縮変形と流動変形により、供試体中央部では鉛直下向きの変形が生じている。また、輪荷重の走行範囲端の付近で鉛直上向きの変形が生じている。しかし注目すべき特徴として、図-10 に示すように、舗装と防水層間または防水層とコンクリート間では、顕著な水平ずれが生じている。また、変形モード A に比して、鉛直下向きの変形は大きく、対して鉛直上向きの変形は小さく生じている。防水層界面で付着切れによる水平ずれが生じ、防水層の接着力が

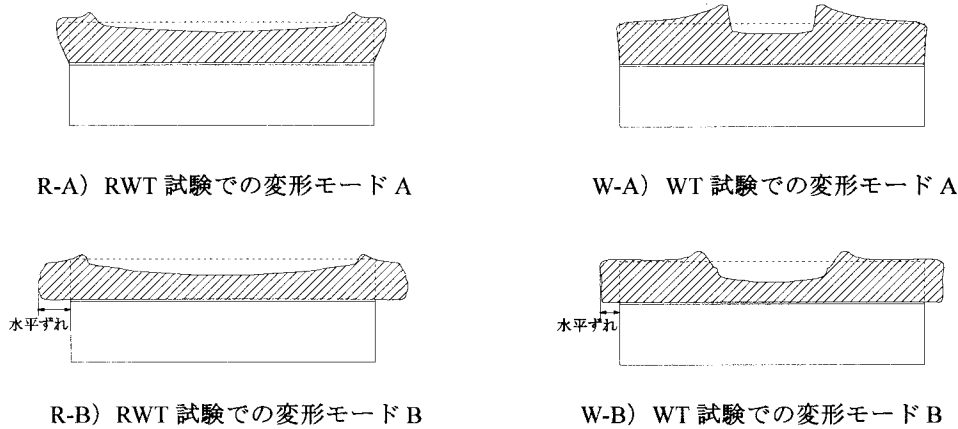


図-10 橋軸直角方向断面の舗装変形モード (50°C)

ほとんど消失する。そのため、更なる水平方向の舗装の流動変形が生じ、大きな水平ずれが生じた。

4.2 RWT 試験と WT 試験の比較

舗装変形について、高温条件 (50°C) での RWT 試験と WT 試験を比較する。変形モード A の例として防水層 US1、変形モード B の例として防水層なし N の試験結果を図-11、図-12 に示す。

両走行方法において、舗装の変形は鉛直下向きと鉛直上向きの変形が生じている。RWT 試験と WT 試験を比較すると、変形範囲は RWT 試験の方が広い。これは、WT 試験が供試体中央のみの走行であるのに対して、RWT 試験では広い走行範囲で、走行位置が正規分布に従ったランダムな走行をしていたためである。また、正規分布に従っていたことから、走行頻度の影響により、鉛直下向きの変形が、供試体中央部で大きく端部で小さいという緩勾配曲線になっていることが分かる。

防水層 US1 は RWT 試験及び WT 試験の試験終了時まで、防水層のせん断接着力に起因する拘束力が舗装の流動変形を抑制していた。一方、防水層なしでは両試験ともに、試験中に接着層で付着切れが生じ、舗装が流動変形によって水平に滑る結果であった。

これらをもとに次のような傾向が得られる。せん断接着力が高い防水層は、付着切れをする防水層に比して、鉛直下向きの変形量が小さく、鉛直上向きの変形量が多い。これは両試験において共通で、舗装の流動変形が防水層界面での接着力により拘束されることで、舗装が側方に滑り出さないために、このような変形が生じると推察される。

また、せん断接着力が高い防水層については、RWT 試験では、鉛直上向き及び下向きの最大変形量が WT 試験に比して小さい。これは各走行位置の頻度の違いによると考えられる。一方、せん断接着力が低い防水層は、RWT 試験及び WT 試験中に防水層界面で付着切れが生じ、舗装の水平ずれが加速され、滑ると同時に、舗装の流動変形に対する拘束力も減少し、鉛直下向きの変形が大き

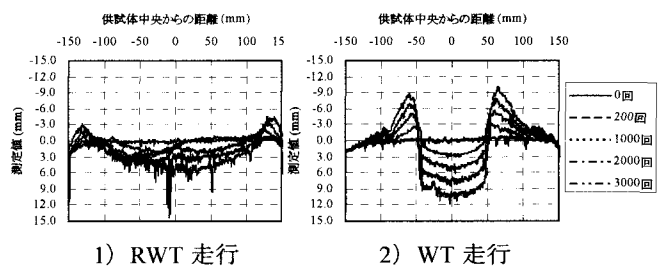


図-11 防水層 US1 の舗装変形 (50°C)

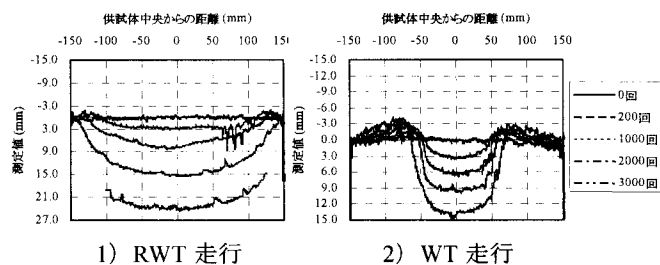


図-12 防水層なし N の舗装変形 (50°C)

く生じる。また、水平ずれについては、RWT 試験の方が WT 試験よりも大きく生じる傾向にあった。

輪荷重走行負荷による変形量、変形形状から、防水層の接着性能を評価するのであれば、変形形状、最大変形量及び水平ずれ量が、RWT 試験の方が WT 試験に比して、大きく生じるので、RWT 試験の方が望ましいと言える。

5. 床版防水システムの疲労耐久性評価

RWT 試験 (50°C) を用いた、床版防水システムの疲労耐久性のより定性的評価と各防水層の比較を行うために、舗装変形と、防水層の接着性能を以下に示す 2 つの代表値によって評価することとした。

- a) v : 橋軸方向中央の、橋軸直角方向中央部 $\pm 5\text{mm}$ 範囲の舗装変形量の平均値
- b) δ : 橋軸方向中央の水平ずれ量

5.1 舗装変形量 v

舗装変形量 v の経時変化を図-13 に示す。また、各測点間の走行回数に対する変形速度 (dv/dN) を図-14 に示す。

図-13 より防水層なし N が最も大きく変形しており、防水層 US3, 防水層 MM2 でも最初の段階が大きく発生し、最終的にも、他の防水層供試体と比して舗装変形が大きいことが分かる。これは、防水層なし N, 防水層 US3, 防水層 MM2 で試験中に接着性能の低下が生じたことで、舗装変形が他の防水層と比して大きくなったと推定される。

図-14 より、各防水層で走行回数 200 回の初期段階が、最も変形量が増加していることが分かる。これは、舗装表面の骨材間の空隙及び固化しているアスファルトの表面突起部分が、荷重の荷重により圧縮され、舗装密度の増加分に等価な圧縮変形が生じたためと考えられる。しかし、防水層種によって初期変形増分が異なっている。これは、防水層の接着性能の違いが舗装の流動変形の違いとして現れているためである。

5.2 水平ずれ量 δ

図-15 の水平ずれ量 δ の経時変化より、防水層なし N で水平ずれが顕著に生じていることが分かる。また、防水層 US3, 防水層 MM2 でも大きな水平ずれが生じた。対して他の 4 種の防水層では、舗装が水平に流動しようとするせん断変形が発生しようとしても、防水層のせん断接着力が抵抗していたため、水平ずれがほとんど生じなかった。

5.3 床版防水システムの疲労耐久性評価

以上の経時的な舗装変形量、舗装変形増分、水平ずれ量を総合し、防水システムの疲労耐久性を評価する。RWT 試験で得られた、防水システムの有する舗装の耐流動性能及び防水層の接着性能の関係は以下のとおりである。全ての防水層供試体において、防水層なしのものよりも疲労耐久性が高いという結果となった。高温時の舗装流動変形と舗装接着界面の接着性能を考慮すると、防水層を施工することで、舗装の流動変形を拘束することができる可能性がある。最後に、本研究で対象とした防水材の優劣を比較すると下記のように判断できる。

$$US1 \approx AS2 > AT0 > AS0 > MM2 > US3 > N$$

6. まとめ

本研究では、大阪大学で開発された実交通荷重のランダム性を考慮したランダムホイールトラッキング試験機を用いて、活荷重、特に輪荷重作用下における道路橋床版防水層を用いた場合の舗装と防水層間のせん断付着に関する疲労耐久性を、「床版+防水層+舗装」3層の床版防水システムで評価した。また、RWT 試験と WT 試験の

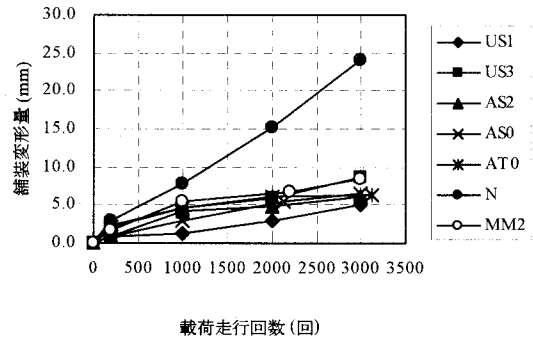


図-13 舗装変形量 v の経時変化

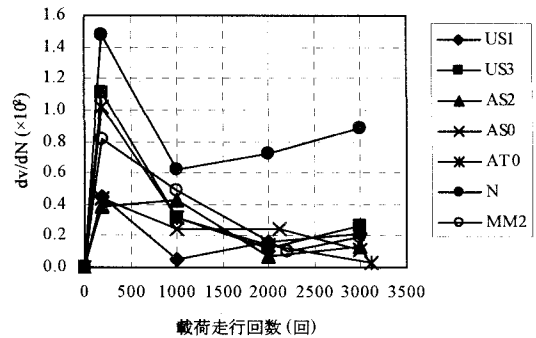


図-14 舗装変形速度の関係

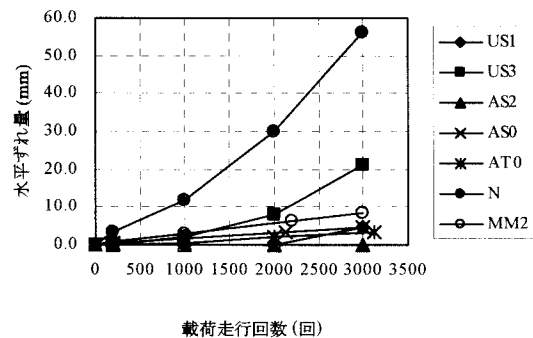


図-15 水平ずれ量 δ の経時変化

比較を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 低温試験では、特に低温状態での高剛性の舗装が、輪荷重負荷に対して抵抗しているため、舗装は塑性流動変形せず、防水層への輪荷重負荷の影響は小さい。
- (2) 高温試験の結果、舗装の変形形状として、2 パターンの変形モードが確認された。
- (3) 輪荷重走行負荷による変形量、変形形状から、防水層の接着性能を評価するのであれば、変形形状、最大変形量及び水平ずれ量が、RWT 試験の方が WT 試験に比して、大きく生じるので、RWT 試験の方が望ましい。
- (4) RWT 試験での舗装変形量及び水平ずれ量の代表値の経時変化を用いて、防水システムの有する舗装の耐流動性能及び防水層の接着性能を代表値ごとに評価し、総合的に防水層種ごとの防水システムの疲労耐久性を比較評価できた。

参考文献

- 1) 財団法人災害科学研究所, 道路橋床版高機能防水システム研究委員会: 道路橋床版高機能防水システムの耐久性評価に関する研究報告書, 平成 16 年 3 月。