

道路橋床版における防水システムの付着耐久性評価手法の開発

Development of A New Evaluation Method for Bonding Durability of Waterproofing System on RC Slabs

小浦貴明*, 大西弘志**, 松井繁之***, 星島時太郎****

Takaaki KOURA, Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI and Tokitaro HOSHIJIMA

*大阪大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**工修 大阪大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***工博 大阪大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

****三菱化学産資(株) 機能資材事業部 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-8-2)

The life of RC slab subjected to moving wheel loads will be shortened by penetration of rainwater into cracks on the top surface. Therefore, it is necessary to prevent the water penetration from asphalt pavement and to put waterproofs between the pavement and slab. Until now various waterproofs have been developed. But the most of them are available for building roofs and those seem to be not durable under moving large concentrated loads of wheels. As the results there is no appropriate verification system for the waterproofs. The authors developed a fatigue testing machine to give horizontal shear force between pavement and slab because liquid deformation, pop-out phenomena of pavement and brake of waterproof itself occur by repetition of shear stress working on the both upper and bottom interfaces of waterproof. Then essential fatigue tests were carried out by changing parameters of waterproof kinds. The clear differences were observed on S-N relations and bonding shear deformations.

Keyword: waterproof, bonding durability, shear stress

1. はじめに

近年、橋梁床版、ひいては橋梁はその使用環境において、様々な劣化要因の影響を受けている。RC 床版や合成床版では、コンクリートの乾燥収縮や活荷重の作用により生じた床版上面のクラックに、雨水が浸入することにより、床版の劣化が非常に短期間に進行することがわかっている^{1) 2)}。また、寒冷地で使用される凍結防止剤に含まれる塩分の床版内への浸入により、床版内部の鋼材に腐食が発生する。これらのことから、床版自身が保有するであろう耐久性を發揮させるには、床版内への水や塩分の供給を遮断する高い機能を有する防水層の設置が重要である³⁾。これまでも種々の防水層が開発され、実用化されている。しかし、その多くは建築用の屋根防水工に使用することを前提として開発されたものである。これらの防水層を使用した床版に大きな集中荷重である輪荷重が載る時、輪荷重の繰返し载荷による舗装の轍掘れや、防水層と舗装間の付着切れによる舗装のポップアウトが発生することが懸念される。この付着切れは防水層の上下界面に生じるせん断力の繰返し作用により起こると考えられる。このせん断力はその生じる機構により以下の3つに分類される。

- 1) 活荷重の作用による曲げに起因するせん断応力 (図-1)
- 2) 輪荷重作用による舗装の3次元的な塑性変形である轍掘れの発生過程において、アスファルトが流動する

ことにより生じるせん断応力 (図-2)

- 3) 舗装とコンクリートの線膨張係数の差により生じるせん断ひずみ

以上のことから、高い防水性能を保持しつつも舗装の耐久性に悪影響を与えないという、床版+防水層+舗装の三位一体の耐久性向上を計った防水システムの構築が必要と言える。

しかし、このようなシステムの耐久性を合理的に評価する方法が確立されていないため、筆者らは床版+防水層+舗装からなる3層供試体で防水層に繰返しのせん断応力を作用させる試験機を開発した。本研究ではこれまでにを行ったこの試験機の性能の検証と、舗装と防水層の間のせん断付着疲労特性について、その概要を報告する。なお、本研究は高機能床版防水システム研究委員会の調査研究活動の一環として行っているものである。

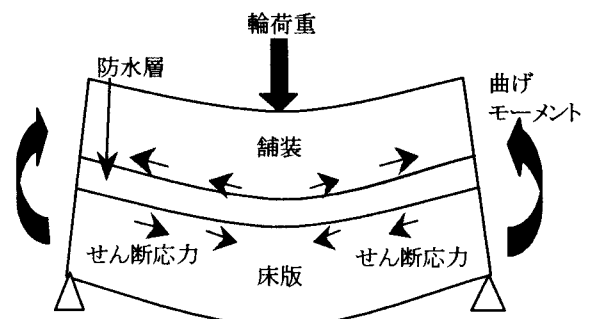


図-1 活荷重の曲げに起因するせん断応力の発生機構

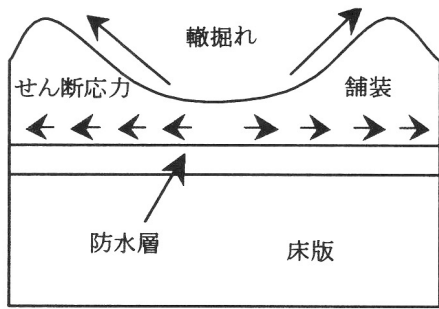


図-2 舗装の轍掘れ発生過程において生じるせん断応力の発生機構

2. せん断付着疲労試験機

2.1 せん断付着疲労試験機の概要

舗装と防水層の間のせん断付着疲労特性を評価するために、大阪大学方式と名付けた独自のせん断付着疲労試験機を開発した。

本研究で開発したせん断付着疲労試験機は回転カムによる変位付与部と床版+舗装からなる2層供試体の接合面に水平せん断応力をバネ力で与えるユニットからなるものである。回転カムを試験機を中心に置き、一つの荷重ユニットを放射状に設置するというレイアウトにすることで、一度に3体の供試体の試験を行うことができる効率の高いものになっている。(写真-1, 2)

荷重ユニットの構造の概略を図-3に示す。回転カム側にあたる荷側、さらにその反対側にあたる反撥側にもバネを装着し、偏心回転カムによって与えられた水平変位を水平力に変換し、供試体接合面に水平せん断力を生起させている。大きな荷重荷重にも安定した荷重を加えるため、バネを2本並列に設置している。

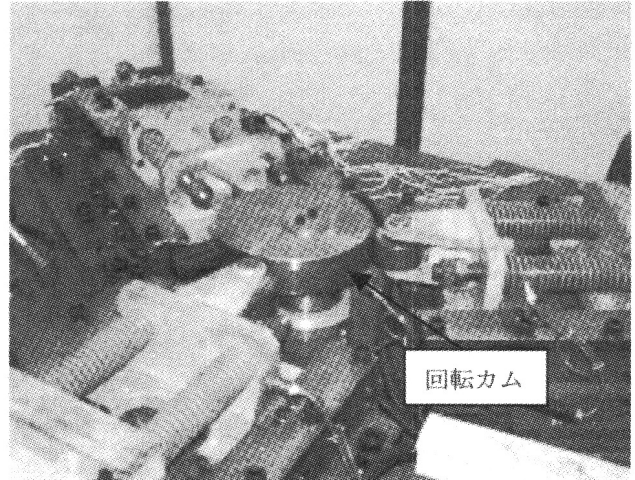


写真-1 せん断付着疲労試験機の概要図

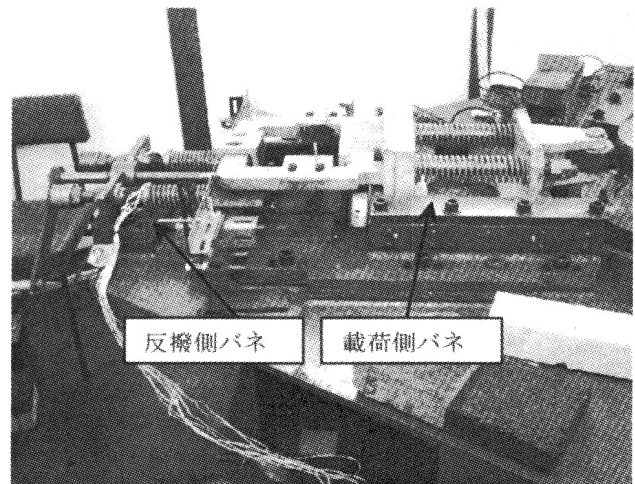


写真-2 荷重ユニットの概要図

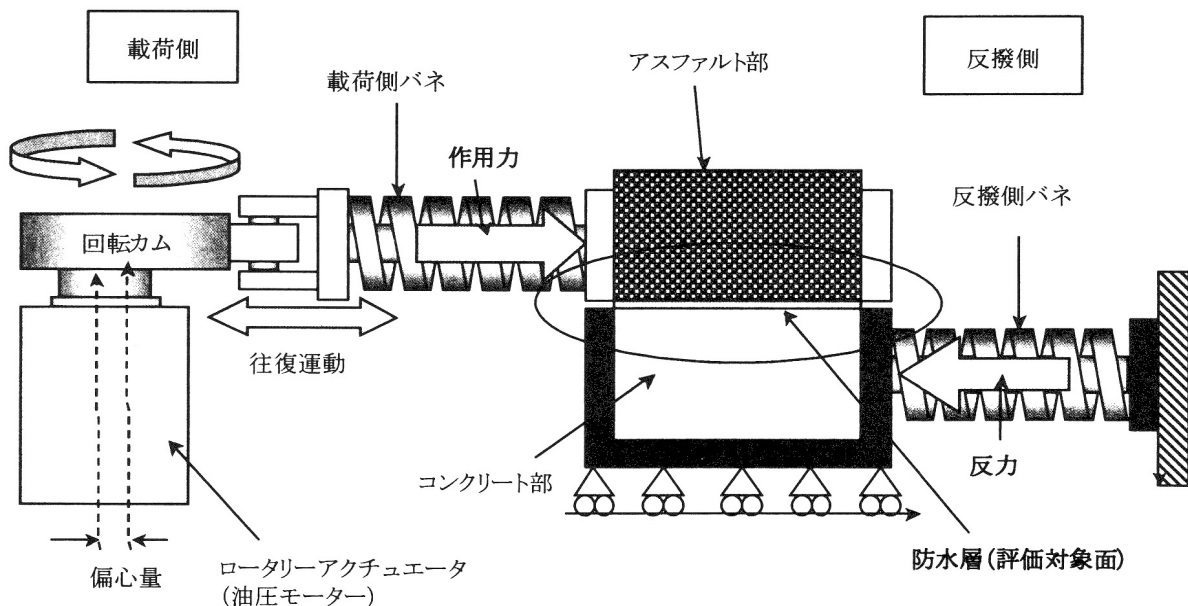


図-3 せん断付着疲労試験機の荷重機構の概略図

2.2 試験機の荷重制御

せん断付着疲労試験機の载荷機構を以下に述べる。この試験機の载荷システムは動力源であるロータリーアクチュエーターに偏心して直結された回転カムに回転運動を与えることにより、バネを通じて繰返しせん断力を生じさせる機構である。コンクリート部とアスファルト部を剛な函体で囲って、これらにせん断力を与えることによって、評価対象層の防水層に繰返し一面水平力を与える。

载荷荷重の変更は、バネの種類（バネ定数）、および偏心量の大きさの違う回転カムの交換によって行うことができる。バネは4種類のバネ定数の異なるものを用意した。それらの仕様を表-1に示す。回転カムはφ250mmとφ230mmの2種類を用意した。それぞれ载荷側の先端部に50mm, 30mmの変位を与えることができるものである。

試験機の荷重の大きさは、舗装+防水層+床版の三層構造に輪荷重を作用させたモデルを、簡易なプログラムで数値計算した時に得られた値を参考にして決定した。この計算結果より、輪の端部付近で防水層の上下界面に最大のせん断応力が生じるという結果が得られたため、図-4に示す通り、本試験ではこの部分を試験の対象箇所とすることとした。

表-1 使用したバネの仕様

バネの種類	バネ定数
Class A	19.6N/mm (=2.00kgf/mm)
Class B	41.4N/mm (=4.22kgf/mm)
Class C	76.5N/mm (=7.81kgf/mm)
Class D	153.1N/m (=15.62kgf/mm)

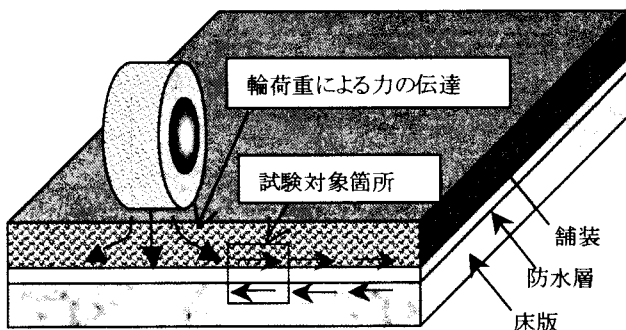


図-4 試験対象箇所の概略図

2.3 温度管理システム

アスファルト舗装において、温度による轍掘れや防水層とのせん断付着強度への影響は顕著で、骨材を結合しているアスファルトの温度依存性が極めて大きい。従来のアスファルト舗装体の実験では-20℃～60℃の間で実験されている。本試験では、まず基本性質を調べることを目的とし

ているため、常温、つまり20℃付近で試験を実施することとした。そのため、外部との温度変化を遮断できる部屋内に試験機を設置し、冷凍機と暖房機による温度管理を行っている。

3. 供試体の概要、および試験手順

3.1 供試体の概要

供試体はコンクリート・防水層・アスファルトの3層で構成された三位一体構造のものを使用する。供試体の大きさは150mm（縦）×150mm（横）×約100mm（厚さ）である（アスファルトの厚さ：40mm、コンクリートの厚さ：60mm）。したがって、評価対象面の面積は150mm（縦）×150mm（横）である。供試体の概要図を図-5に示す。

3.2 防水層の仕様

今回の試験は、9種類の防水層と防水層を施さなかったものの計10種類の供試体を準備して試験を実施した。表-2に防水層の概略を示す。現行品の防水層として⑦と⑧の2種類、長期耐久性を確保できると期待される高機能防水工として①と④～⑥の4種類、その他の防水層として⑨と⑩の2種類を採用して試験を行った。

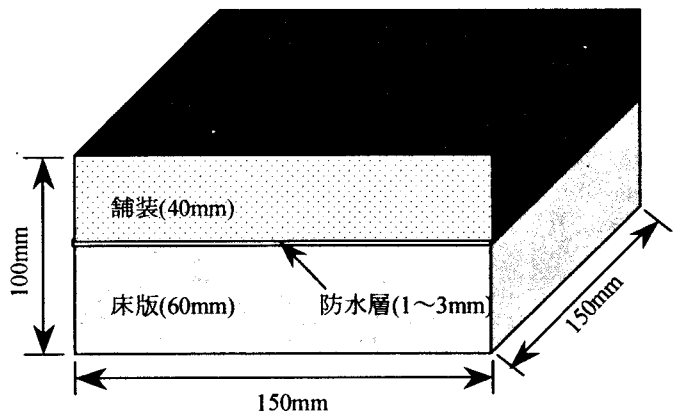


図-5 供試体の概要図

表-2 防水層の概略説明

防水層の種類	概要	厚さ	
①	速硬化ウレタン系	高機能防水工	3.2mm
④	Asシート系Ⅰ	高機能防水工	3.2mm
⑤	Asシート系Ⅱ	高機能防水工	3.3mm
⑥	Asシート系Ⅲ	高機能防水工	3.1mm
⑦	As塗膜系	従来品	2.3mm
⑧	Asシート系	従来品	3.6mm
⑨	弾性モルタル系	簡易施工用	1.8mm
⑩	MMA樹脂系	浸透系材料	0.27mm
無	防水層なし	—	0.2～0.4mm

3.3 試験手順

防水層の上下界面に作用させるせん断応力は、項目2.2でも説明した通り、回転カムの偏心量と使用するバネのバネ定数とにより一義的に決定される。この組み合わせとせ

ん断応力との関係を表-3 に示す。この表に示す通り、この試験では、Level 1 (約 0.026N/mm²) から Level 8 (約 0.34N/mm²) までの 8 つの応力レベルでの試験が可能である。

また、今回の試験では、各防水材料に対して供試体を 16~24 体準備して試験を行った。供試体の個数と試験を行った応力レベルとの関係を表-4 に示す。

4. 測定項目およびその測定方法

測定項目は以下に示す a)~c) の 3 項目である。また、その概要図を図-6 に示す。

- 試験機に装備した近接スイッチに連動したカウンターにより随時、繰返し載荷回数を把握した。特にアスファルト部と防水層、もしくは防水層とコンクリート部の付着が完全に途切れた時点を破壊と判断し、その時の載荷回数、つまり「破壊回数」を確認した。
- 「載荷側バネの変形」を測定し、その変形量とバネ定数を用いて載荷荷重を算出した。レーザー式変位計を用いてバネの変形量を測定した。
- 「アスファルトとコンクリート間の水平ずれ」を測定し、試験終了までの供試体の評価対象面でのずれ変形を把握した。カンチレバ式変位計を用いてアスファルトとコンクリート間の水平ずれを測定した。

表-3 せん断応力レベルの一覧

	回転カムのサイズ(偏心量)	
	φ230mm(15mm)	φ250mm(25mm)
Class A	Level 1 (=0.026N/mm ²)	Level 2 (=0.044N/mm ²)
	Level 3 (=0.055N/mm ²)	Level 4 (=0.092N/mm ²)
Class B	Level 5 (=0.102N/mm ²)	Level 6 (=0.170N/mm ²)
	Level 7 (=0.204N/mm ²)	Level 8 (=0.340N/mm ²)

b) と c) の 2 項目は、動的測定により常時把握しており、サンプリング周波数を 50Hz~100Hz の間で設定して試験を実施した。

5. せん断付着疲労試験の結果

5.1 破壊形状

本試験では、試験終了時にせん断力の作用により付着が切れた面における破壊形状の観察し、その結果以下の 3 つの破壊形式が確認できた。

- アスファルト部と防水層の間でのせん断破壊
- コンクリート部と防水層の間でのすべり破壊
- アスファルト内部のせん断破壊

表-5 に各防水層で確認された破壊形式を示す。防水層なしの供試体では接着層でずれ破壊が見られた。防水層⑧はコンクリートと防水層の間でずれ破壊を呈するのがほとんどであった。防水層①、④、⑤、⑦、⑨、⑩はアスファルトと防水層の間でせん断破壊し、その中でも防水層①、④、⑤に関してはアスファルトの一部が防水材料側に残り、アスファルトがせん断破壊した。防水層⑥は防水層の上下界面の両面での付着切れが確認できた。つまり、コンクリートと防水層の間のずれ破壊とアスファルトと防水層の間でのせん断破壊が同時に生じたという結果が得られた。

表-4 各応力レベルでの試験実施供試体の個数

		防水層の種類								
		①	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	無
せん断応力レベル	Level 1	-	-	-	2	3	4	4	2	2
	Level 2	-	-	2	4	4	4	4	3	4
	Level 3	2	2	4	4	4	4	4	4	4
	Level 4	8	4	4	4	4	4	4	4	2
	Level 5	1	9	6	4	4	4	4	4	2
	Level 6	8	6	6	4	4	4	4	4	2
	Level 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Level 8	4	2	2	2	-	-	-	-	-
計		23	23	24	24	23	24	24	21	16

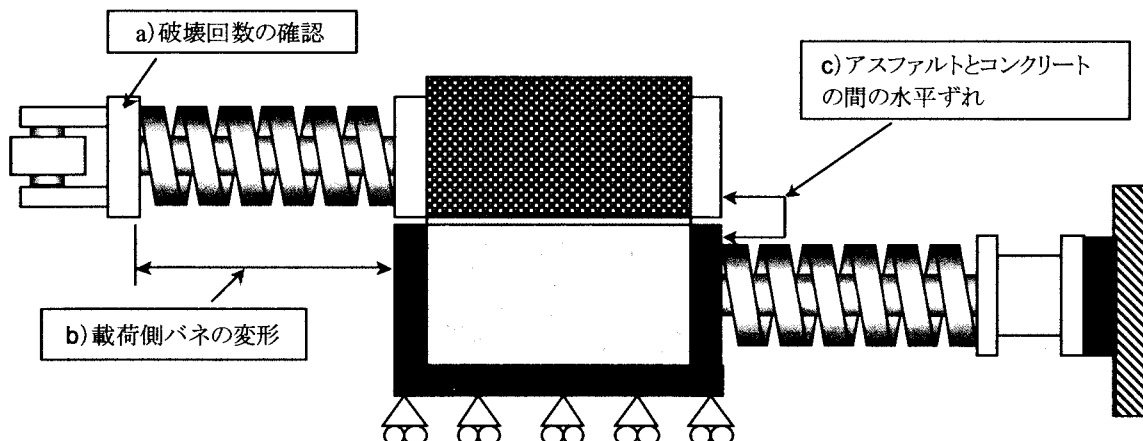


図-6 測定項目の概要図

表-5 破壊形状の観察結果

防水層の種類	破壊形式	破壊面
①	c	As-防水層間, As内部
④	c	As-防水層間, As内部
⑤	c	As-防水層間, As内部
⑥	a, b	As-防水層間, Co-防水層間
⑦	a	As-防水層間
⑧	b	Co-防水層間
⑨	a	As-防水層間
⑩	a	As-防水層間
無	-	乳剤面(接着層)

5.2 使用限界

図-7 に測定項目 c. の試験結果である水平ずれの経時変動結果の一例を示す。この試験結果は防水層①であるウレタン系防水層の試験から得られた結果である。この結果でも見られるように、アスファルト部とコンクリート部の間にある程度の水平ずれが発生した後に急速に破壊に至ることがわかった。筆者らはこの載荷回数 - ずれ曲線の変曲点にあたる点を使用限界と考えた。この時の載荷回数を使用限界寿命、水平ずれを限界ずれと定義した。その算出方法について以下に示す。

使用限界は曲線の傾きの変化によって定義されていることから、図-7 の曲線の増分変化を見ることで、より顕著に使用限界を把握できると考えた。図-8 にその曲線の傾き(増分)の経時変動を示す。この図にも明らかなように図-8 の点(ア)に相当する傾きは図-7 において使用限界として示した2点間の傾きである。図-8 に示す通り、急変点として着目した傾きの前後のデータから求めた直線の交点(図-7 の黒丸の点)を使用限界と定義し、この交点からそれぞれ使用限界寿命、限界ずれを読み取った。

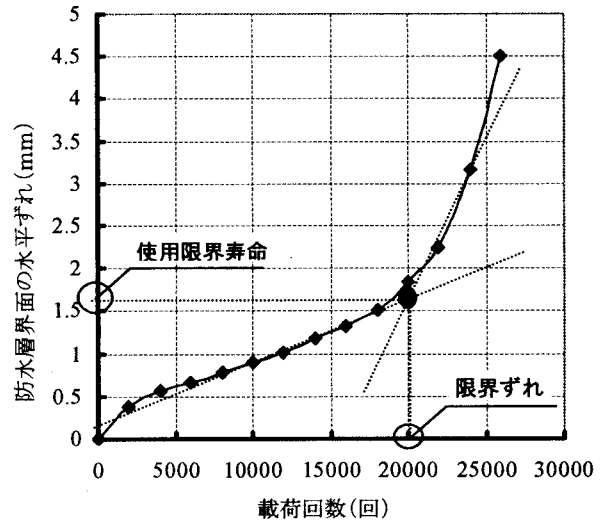


図-7 防水層界面の水平ずれ経時変動結果

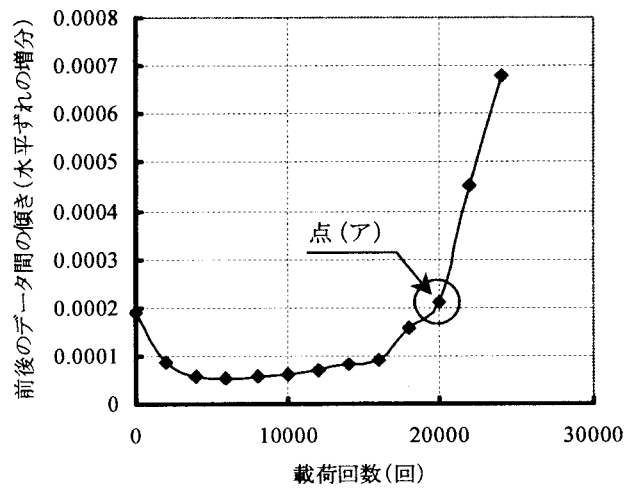


図-8 水平ずれの増分の経時変動結果
(防水層①：ウレタン系の一例)

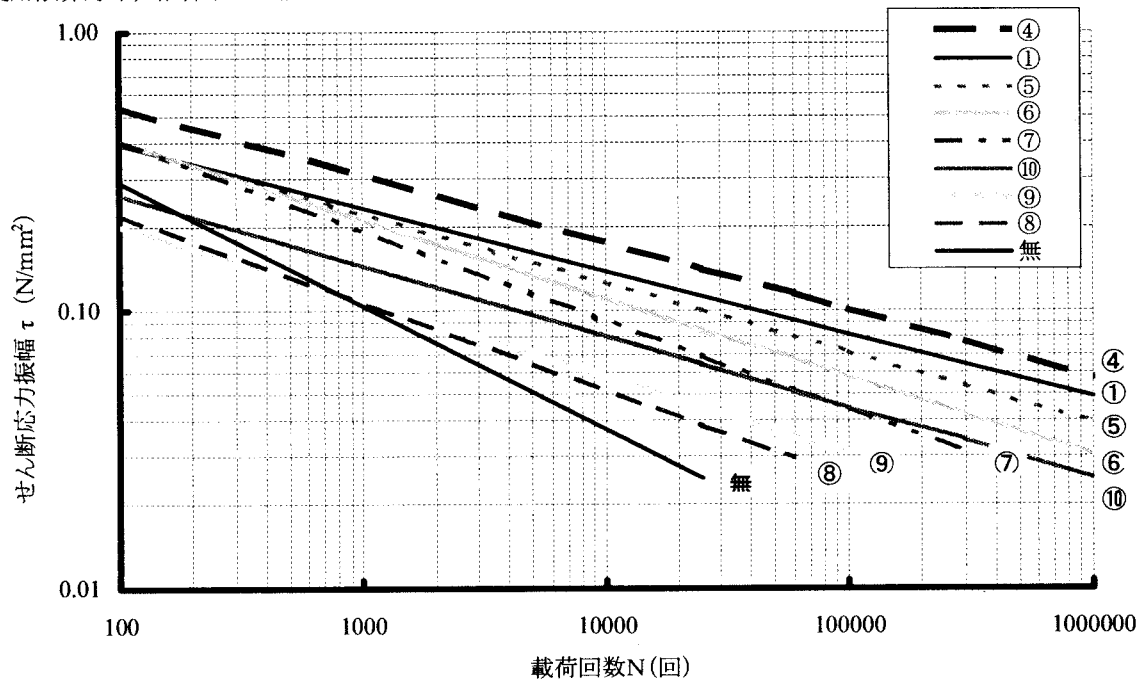


図-9 S-N 関係の比較結果

5.3 S-N関係

今回の一連の試験で図-9に示すようなS-N関係が得られた。この図に示した曲線は、縦軸に防水層の上下界面に生じるせん断応力、横軸に使用限界時の载荷回数である使用限界寿命としてプロットしたデータを指数関数により近似することで得られた近似曲線である。各防水層に対してそれぞれ精度の良いS-N曲線が得られた。

図-9の結果より、各S-N曲線の比較を行うことで得られるせん断付着疲労寿命の大小関係は以下の通りである。

$$\textcircled{4} > \textcircled{1} > \textcircled{5} > \textcircled{6} > \textcircled{7} > \textcircled{10} > \textcircled{9} \approx \textcircled{8} > \text{無}$$

上位4種類の防水層④、①、⑤、⑥は長期耐久性を保持するために開発された高機能防水工であり、せん断応力 $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ に着目して防水層無しのものと比較すると少なくとも10倍以上、付着強度が最も強いもので約100倍の寿命の伸びが確認できた。

従来品の材料である防水層⑦は約8倍の寿命の伸びが確認でき、防水層⑧は防水層無しのものとはほぼ同程度であることが確認できた。その他の材料として、浸透系材料である防水層⑩は約3倍の寿命の伸びが確認でき、簡易防水層⑨は防水層⑧と同様でほぼ同程度であることが確認できた。一例としてせん断応力 $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ に着目した疲労寿命の伸びを上記に示したが、どの応力レベルに対しても高機能防水層が比較的高いせん断付着疲労耐久性を保持していることがわかった。

せん断付着疲労試験で得られたS-N関係は舗装と防水層間、および防水層と床版間のせん断付着耐久性を評価できるため、筆者らは、この試験が床版防水システムを照査する手法として必要かつ妥当であると考えた。

5.4 防水層界面における水平ずれの経時変動の比較

本試験では測定項目c)であるアスファルトとコンクリート間(防水層界面)の水平ずれをある一定間隔で把握している。各防水層のアスファルト-コンクリート間の経時変動を調べたところ、比較的短い期間で大きな変形を生じるものや比較的長い期間安定状態が続いた後破壊に至るものがあることがわかった。

そこで、このような現象の違いを評価するため、水平ずれが 1.0mm 、 2.0mm 、 3.0mm 、 4.0mm 生じる時の载荷回数を求めて、この载荷回数を比較することによりずれに対する耐久性の評価を行った。この比較結果を図-10に示す。これらの値は、せん断応力 $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ 時の試験結果により求めたものである。

図-10の結果より、各曲線の比較を行うことで得られるずれに対する耐久性の大小関係は以下の通りである。

$$\textcircled{1} > \textcircled{4} > \textcircled{6} > \textcircled{5} > \textcircled{7} \approx \textcircled{10} \approx \textcircled{9} \approx \textcircled{8} \approx \text{無}$$

項目5.3のS-N関係の比較結果と同様、上位4種類の防水層は高機能防水工である。しかしながら、S-N関係の結果とは若干異なり、防水層①が最も長い期間安定状態を保持し続けるという結果が得られた。

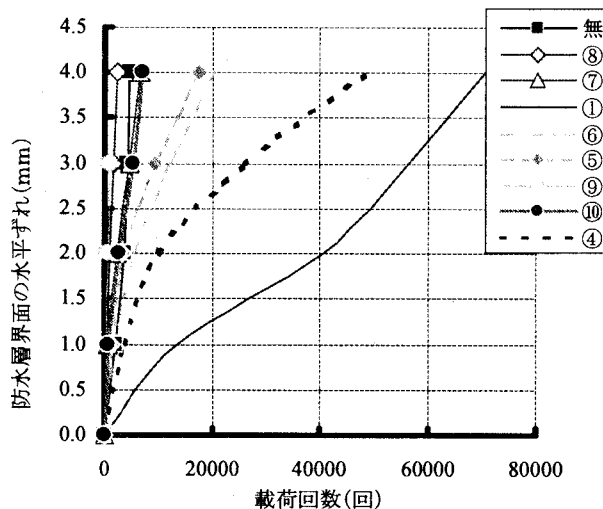


図-10 防水層界面の水平ずれの経時変動比較結果

6. 結論

床版防水システムの新しい照査手法の確立として、独自に開発した試験機を用いてせん断付着疲労試験を実施し、この試験の有用性を明らかとした。主な結論は次の通りである。

- (1) 供試体の状態の変化を示す指標として限界ずれ、ならびに使用限界寿命を定義した。
- (2) 各防水層において疲労寿命を予測することができるS-N曲線が得られた。これらのS-N曲線を比較することにより、舗装と防水層間、もしくは防水層と床版間のせん断付着耐久性の評価を行うことができる。
- (3) 本試験では、アスファルトとコンクリート間(防水層界面)の水平ずれの挙動を把握することで、比較的短い期間で大きな変形を生じるものか比較的長い期間安定状態を保持するものか判別することが可能である。

謝辞

本研究は、高機能床版防水システム研究委員会の調査研究活動の一環として行われた研究成果であります。有益なコメントをいただいた委員各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之：水環境下にある道路橋RC床版の耐久性向上のための防水層の研究，平成元年度科学研究費補助金(試験研究(1))研究成果報告書，平成2年3月。
- 2) 松井繁之，大西弘志，大江博文：防水層を施した水環境下における疲労耐久性，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 199～202，平成12年10月。
- 3) 日本道路公団試験研究所：防水システム 設計・施工マニュアル(案)，平成13年6月。