

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工の研究

Study on Water Proofing to Increase Durability of RC Slabs of Highway Bridges

松井 繁之* 栗山 研一** 園田 恵一郎*** 上林 厚志****
 by Shigeyuki MATSUI Kenichi KURIYAMA Keiichirou SONODA Atsushi KAMBAYASHI

In Japan, deterioration of RC slabs has been a serious problem since about 1970. The deterioration is said a kind of fatigue failure due to heavy vehicle loads. Furthermore, rain water penetrated into cracks is accelerating the rate of deterioration. Therefore, it seems to be very effective to put water proofing between pavement of asphalt and concrete slabs. In the study, a series of fatigue tests under a running wheel load were carried out to find out suitable water proofing for the slabs of highway bridges. Six materials such as Epoxy resin, Fabricated asphalt sheel, Acrylic resins, Acrylic resin concrete, Acrylic-gum resins and Epoxy-mixed asphalt were examined. From the fatigue tests, various characteristics of those materials were clarified.

1. まえがき

RC床版の損傷は荷重の移動による広義の疲労であることが、これまでの調査・実験的研究などによりほぼ定説化している。そして、過去の陥没した事例において、舗装中を浸透した雨水が疲労劣化をさらに加速していると推定され、水を張った疲労実験でその傾向が認められた。この結果、床版の上面に防水工を施すことが疲労耐久性を確保する上に非常に重要であると強調できる¹⁻⁴⁾。

ところで、現在各種の防水工が開発されているが、これらは主に建築物の屋根防水を目標に置かれていたため、その効果は、材料の静的機械特性と、化学的特性からのみ評価されているだけであり、道路橋床版への適用に際しての十分な検討資料は少ない⁵⁾。荷重度が大きく、かつ、小さな載荷面積で作用する輪荷重を担う道路橋床版に適用する場合には、疲労耐久性が重要な評価項目になるであろう。

そこで、本研究では、床版に直接輪荷重を作用させる小型の輪荷重走行試験機を用いて、材料学的に望ましいと考えられる防水工を施した床版の疲労実験を行い、防水工の疲労耐久性と舗装との接着性について基礎的資料を得ることとした。道路橋に適用できる防水工を模索することと、今後開発される防水工の効果評価手法の確立をめざすものである。

* 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

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

*** 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

**** 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

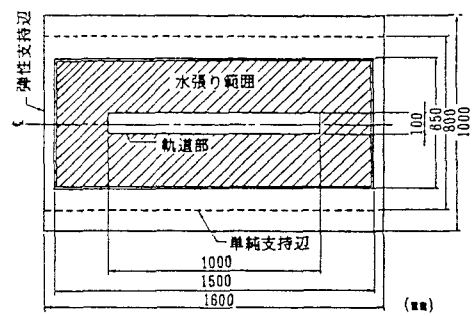
2. 実験の概要

2. 1 実験目的と供試体の種類

- 本研究における実験は全て小型供試体によるもので、実験種類は以下のように分類できる。
- a) RC床版の静的試験-----基本となるRC床版の静的強度とその時の破壊性状を確認する。
 - b) RC床版の基本疲労実験（乾燥状態）-----RC床版の乾燥状態下の基本疲労強度を確認する。防水工が十分な耐久性をもつ場合にはこの疲労強度を保有する筈であり、上限の強度となる。
 - c) RC床版の水張り状態下での疲労実験-----水環境下にあるRC床版の基本疲労強度を調べる目的で行うもので、疲労強度の下限を求めることになる。
 - d) 床版+舗装（乾燥状態）の実験-----敷設した舗装の基本疲労特性、すなわち、舗装のわだち掘れと流動性について基本情報を得る。ただし、舗装は温度感受性が高いので30℃、10℃、5℃の3種の温度で行う。
 - e) 床版+舗装（水張り状態）の実験-----水を含んだ舗装下での疲労特性を調べる。条件はd)と同様である。
 - f) 床版+防水工（水張り状態）の実験-----防水工の基本特性、すなわち、コンクリートのひびわれに対する追従性、接着性について調べる。当然、全供試体を水張り状態で実験する。6種の防水工を対象とした。ただし、この内1種は舗装材にエポキシ樹脂を混入し、防水効果を与えるようにした舗装を施工したものである。
 - g) 床版+防水工+舗装（水張り状態）の実験-----床版全構成要素を組み合わせたもので、防水工の耐久性と、防水工の舗装に与える影響度について基本的に調べる。全供試体とも水張り状態で実験する。

2. 2 供試体

基本となる床版供試体の外形寸法は幅 1m、長さ1.6mで、床版厚を6cmとした。主鉄筋に D6を4.5cm（下側）、9cm（上側）間隔で配置した。主鉄筋のかぶりを 1cm（鉄筋中心からコンクリート表面まで）とした。配力鉄筋断面は配力鉄筋量を主鉄筋量の 70%とした複鉄筋断面として、引張側に D6 を6.4cm間隔で、圧縮側に12.8cm間隔で配置した。供試体を単純版とし、図1のように長辺方向の二辺で単純支持し（支間80cm）、他の二辺は横桁による弾性支持とした。床版上面に高さ2cmのプラスチック製の枠木をシリコンで接着して堰堤をつくり、図-1にハッチングで示す範囲で深さ5mm 程度の水を張った。なお、全供試体に使用したコンクリートは3種で、それぞれの機械的性質を表-1に示し、各供試体で使用するコンクリートの種類を実験結果の一覧表（表-3,4）中に記号 A, B, C で付記した。



図－1 供試体寸法

表－1 コンクリートの機械的性質

コンクリート 材齢（日）	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ /cm ²)	種別
111	390	2.43	A
115	471	2.24	B
45	398	2.60	C

2. 3 防水工の性質

現在、道路橋床版に試用されている防水工は、塗布系ではエポキシ樹脂、シート系ではゴム化アスファルトが代表的である。今回の実験で試験した防水工は、この2種を基本としたが、アクリル樹脂塗布型、アクリルコンクリート、アクリルゴム系、および、舗装にエポキシ樹脂を混練したエポアスの4種を加えて防水効果の耐久性を比較検討することにした。

エポキシ樹脂塗膜型防水工は、エポキシ樹脂の主剤、硬化剤及び炭酸カルシウム調合骨材を調合した後、

約2mm程度の厚さにハケ塗りし、舗装の熱によって硬化させるものである。特徴として、接着性、防水性に優れており、引張強度も大きいと言われている。しかし、延性に若干問題があり、コンクリートのひびわれに対する追従性が懸念される。このため、中間に不織布を挿入した。また、表面には舗装への浸透を抑止することと、アスファルト運搬車の硬化前の走行による樹脂の剝離を防ぐために粒径3mm程度の砂をまいた。

ゴム化アスファルトのシート系工法は、不織布に特殊ゴム化アスファルトを浸透させたシートを、やはりアスファルト系の接着剤（ガムファルト）で貼付けるものである。ただし、上面には微細な砂をまき、舗装との接着性向上のためのジベルにしている。これが逆に舗装との接着性を低下させる懸念がある。

アクリル樹脂系工法は、メタクルメチルアクリレートと呼ばれる弾性のある特殊アクリル樹脂40%に、炭酸カルシウム調合骨材60%を加え、攪拌、混合した液状体を床版に塗布するもので、常温では3時間程度で硬化する。ただし、ひびわれ耐久性を増加させるため、中間に不織布を入れている。この工法の防水性、ならびに、耐久性についての情報はこれまでは無い。

また、上記の骨材を粒径の大きなものに変え、骨材80%にアクリル樹脂20%を混合したものはコンクリートと同様の性質、強度を与える。これは一種のレジンコンクリートで防水工に利用できると考え効果評価実験することにした。ただし、骨材の大きさから厚膜型となり増厚効果をあたえるため、この防水工をアクリルコンクリート増厚型とよぶ。

アクリルゴム系は弾力性に富むアクリルポリマーと無機質硬化材のセメントとの複合材料である。これまでの静的試験からその弾性係数は非常に小さく、ひびわれ追従性は非常に良好であることが認められている。これについても疲労荷重下での情報は無いため試験項目に加えた。

また、通常の舗装付きの実験での舗装は阪神高速道路公団の仕様に従った密粒度アスコンで、仕上がり厚を3cmとしたが、このアスファルト合材の製作時にエポキシ樹脂を混練し、鋼床版との接着性の向上を計るため最近開発され、エポアスと呼ばれる。アスファルトの空隙をエポキシ樹脂で充填することから、この舗装だけで防水性が確保できる可能性があり供試体の一種に加えた。

2. 4 実験装置

図-2に小型輪荷重走行試験機の概要を示す。基本的な機構は大型の輪荷重走行試験機¹⁾と同様で、供試体に荷重を作用させながら走行する車体部と、回転歯車にアームを付け、これによって車体を往復させる起動装置で構成した。供試体床版のスパンを80cmと仮定し、全長を160cmとした場合、十分な断面力振幅が得られるかどうかをF.E.M解析によって調べ、走行範囲を床版中央から±50cmと決定した。

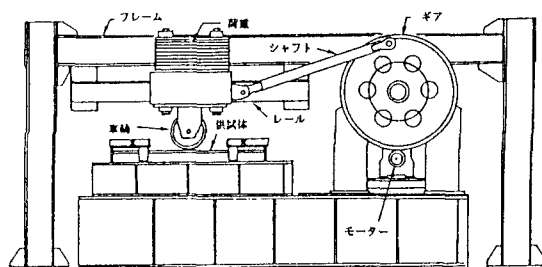


図-2 小型輪荷重走行試験機

載荷能力は 0.4～2t、走行速度は23往復/毎分、荷重は鉄板の重量で与えるようにした。

3. 供試体RC床版の基本静的強度と疲労強度

3. 1 静的載荷実験結果

静的載荷試験をS1,S2,S3,S4の4体について行った。なお、S3, S4については床版橋軸方向でL/4点、3L/4点付近、すなわち、中央より左側(L)と右側(R)の2箇所で載荷した。実験で得られた破壊荷重(静的耐荷力)は表-2のとおりであった。実験結果に対して、昭和62年度制定のコンクリート標準示方書で示されている評価式による計算値 $V_{p,0.6}$ ⁶⁾、および、松井が提案している評価式による計算値 P_s ⁷⁾を対応させた。示方書

式においては鉄筋比が一つの影響因子となるが、これについては上下の鉄筋を合計し、かつ、主鉄筋と配力鉄筋の平均値で与えた。また、安全係数は実験値との比較のためであるので1.0とした。

全供試体について、両計算結果とも実験値とほぼ一致していることがわかる。S3の計算値は実験値より小さくなった。これは載荷位置が床版端部に近かったために端横桁の影響があったためと思われる。S4では若干床版中央寄りで載荷したため計算値との一致度が高くなった。

疲労実験における破壊位置は断面力振幅の大きい中央付近で発生するものと予想される。表に示した数値から、総じて松井の提案式による計算値の方が実験値に近い値になっていることから、以下の疲労実験結果の評価に必要な静的強度の計算には松井式によるものとする。

表-2 静的載荷実験結果と計算耐荷力

供試体	実験値 (t)	計 算 値 (t)		載荷面 (A×B)
		Ps	Vpcd	
S 1	7.54	7.37	7.89	(4×10)
S 2	8.02	8.18	7.75	(7×9)
S 3 (L)	9.18	8.18	7.75	(7×9)
S 3 (R)	8.50	8.18	7.75	(7×9)
S 4 (L)	7.82	7.94	6.59	(4×10)
S 4 (R)	8.00	7.62	6.59	(7×9)

3. 2 基本的疲労強度 (FD,FW)

乾燥状態下で行った FD-1,FD-2, および、水張り状態下で行った FW-2, FW-3 の疲労実験結果を表-3と図-3に示した。同図には実物大供試体による乾燥状態下の結果を細い実線で、水張り状態下の結果を細い破線で併記した。

さて、今回行った 6cm厚の結果は実物大の結果と比較すると、寿命は約1/10～1/8 程度に低下することが認められる。この原因は床版厚が小さく、かつ、鉄筋間隔が小さいため図-4に示すように、床版下面に間隔密にひびわれが発生し、コンクリートが全断面有効の状態から引張側コンクリート無視の状態に到達するまでの寿命が短くなったためと考えられる。実物大床版では鉄筋間隔が大きい、ひびわれ間隔が大きく、引張側コンクリート無視の断面に達するまでの寿命と、その後の破壊までの寿命がほぼ同じであった。

水張り試験の結果は乾燥状態のものから大幅に疲労寿命あるいは疲労強度が低下していることが理解できる。この低下こそが水の影響分である。ひびわれへの水の浸入によってモルタル分が軟化し、骨材が振動作用を受けてその周辺の付着が取れて骨材化するためである。水張り試験でも今回の模型床版では漏水発生から破壊までの寿命は平均2000往復程度であり、実物大試験における数万回から数十万回の余寿命と大きな違いがあった。これは圧縮側の有効コンクリート厚そのものが小さいためである。

以上から、図-3に示した2点の結果を捕捉し、既往のS-N曲線に平行に引いた太い実線と破線を、6cm厚床版の基本疲労曲線とする。これらのS-N曲線と防水工を施した供試体の結果を比較することによって防水工の効果が評価できる。

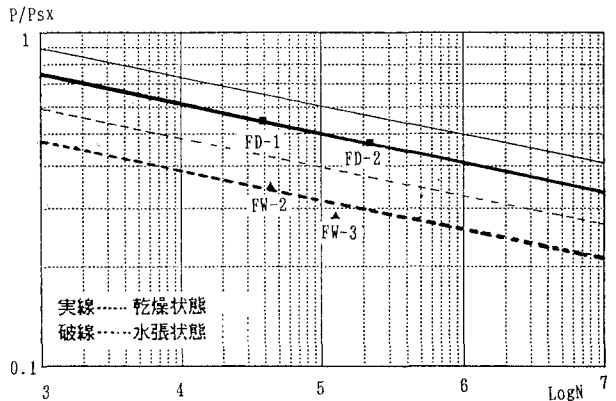


図-3 乾燥・水張りの基本S-N結果

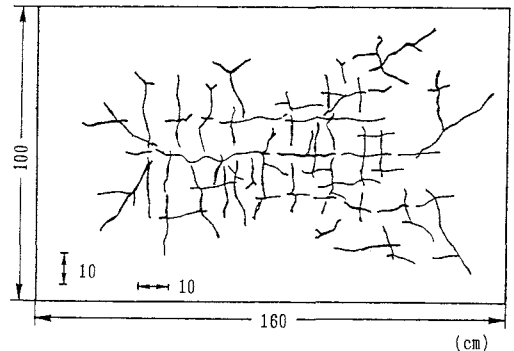


図-4 床版下面のひびわれ状況

4. 防水工を施した供試体の実験結果とその考察

床版+防水工の供試体の実験結果を表-3に、また、舗装つき床版の実験結果を表-4に示す。

4. 1 床版+防水工の結果

表-3 床版+防水工の供試体の実験結果一覧

実験 供試体	供試体 グループ	上面の 状態	舗装 の有無	防水工 の種類	載荷 荷重(t)	載荷 回数(回)	最終状況
FD-1	C	乾燥	無	無	1.918	39800	陥没破壊
FD-2	C	乾燥	無	無	1.646	221400	陥没破壊
FW-1	B	水張り	無	無	1.328	4550	陥没破壊
FW-2	B	水張り	無	無	1.328	44660	陥没破壊
FW-3	A	水張り	無	無	1.15	127348	破壊
FDP-1	B	乾燥	有	無	2.008	58000	舗装破壊
FDP-2	B	乾燥	有	無	0.832	291200	舗装変形
FWP-1	B	水張り	有	無	1.15	478174	舗装変形
FWP-2	B	水張り	有	無	1.705	77640	舗装変形
FWP-3	A	水張り	有	無	1.705	178200	舗装漏水大
FWER-1	B	水張り	無	エポキシ樹脂	1.328	23038	陥没破壊
FWER-2	A	水張り	無	エポキシ樹脂	1.15	156942	破壊
FWAS-1	A	水張り	無	シート系	1.15	614988	破壊せず
FWAS-2	B	水張り	無	シート系	1.328	600000	破壊せず
FWAS-3	A	水張り	無	シート系	1.705	270958	漏水
FWAS-4	B	水張り	無	シート系	1.918	447000	陥没破壊
FWAR-1	B	水張り	無	アクリル-3mm	1.326	600000	破壊せず
FWAR-2	B	水張り	無	アクリル-3mm	1.918	650000	陥没破壊
FWAR-3	A	水張り	無	アクリル-1mm	1.599	171100	漏水
FWAR-4	A	水張り	無	アクリル-2mm	1.599	23700	漏水
FWAR-5	C	水張り	無	アクリル-3mm	1.646	110800	漏水
FWAR-6	C	水張り	無	アクリル-3mm-T	1.646	323900	陥没破壊
FWAG-1	C	水張り	無	アクリルゴム	1.646	41200	漏水
FWAG-2	C	水張り	無	アクリルゴム	1.646	13000	漏水
FWAC-1	B	水張り	無	アクリルコンクリート	1.918	1200000	破壊せず
FWAC-2	B	水張り	無	アクリルコンクリート	2.098	600000	破壊せず

T：不職布入り

(1) エポキシ樹脂防水工の結果 (FWER)

エポキシ樹脂塗膜型の供試体は、他の防水工のものに比べ、早い時期に漏水を来とし、放置して実験を続行すると漏水部の上側で走行路の圧縮側コンクリートが骨材化した。このような破壊現象は主に車輪荷重によって発生しているせん断力によってその両縁端にやぶれが生じ、水が浸入したためである。実物大床版の実験ではねじりモーメントによる主鉄筋方向のひびわれが漏水の原因となっていた。エポキシ樹脂は床版との接着性は良いが、ある程度剛性があるためせん断破壊しやすく、ひびわれ開閉に対する追従性が良くないようである。よって、硬化後のエポキシ樹脂の靱性確保のための改良が必要と思われる。

(2) ゴム化アスファルトシート

防水工の結果 (FWAS)

シート系防水工のゴム化アスファルトシートはエポキシ樹脂系より大きな荷重を載荷しても床版ならびに防水工に顕著な劣化がなく、たわみも停留していた。このシートは粘弾塑性体で約 3mm程度の厚みがあるため車輪荷重でもせん断塑性変形し、発生応力が小さく破れの現象が出なかった。最終破壊はRC床版自身の疲労破壊であり、この破壊に伴って破れが生じた。

(3) アクリル樹脂防水工の結果 (FWAR)

アクリル樹脂系では、厚さを1mm、2mm、3mmと変化させて実験を行ったが、厚さが1mm、2mmの場合、防水工が局部的に破れ、漏水が起こり写真-1のような骨材化が起こっていた。1mm 厚の場合の破れは床版表面の骨材による凹凸部での局部支圧破壊であった。2mm厚の場合には、エポキシ樹脂と同様な車輪両側面でのせん断破壊を呈していた。厚さを3mmにすると床版自身の破壊まで局部せん断変形で追従し全く破壊は無く、シート系と同等以上の耐久性を示した。この材料も防水効果が高いと言える。

(4) アクリルコンクリート防水工の結果 (FWAC)

アクリルコンクリートの厚さを10mmとしたが、試験機的设计最大荷重で60万回载荷しても漏水は発生せず防水効果は大きいと認められた。。また、たわみは上記3種のものよりも大幅に小さくなり、床版と合成された曲げ剛性を発揮していることが認められた。

(5) アクリルゴム防水工の結果 (FWAG)

アクリルゴム系は非常に弾性に富むが、骨材として用いたものがセメントであるため、この防水工自身の中に水が浸入し、荷重の走行繰返しによってセメント分が分解湧出した。このため、床版上面では泡だらけになった。実験後防水工を観察すると、バインダーである樹脂部だけの海绵状になっていた。このような材料分離のため防水効果はほとんどなく、床版だけの基本供試体とほぼ同じ回数で床版下面に漏水が発生した。組成の改善が望まれる。

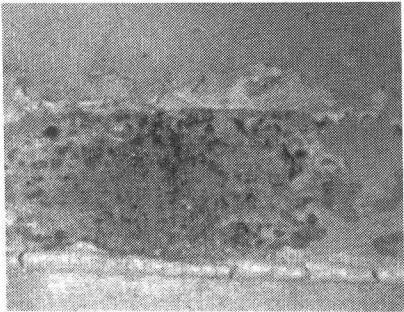


写真-1 軌道下のコンクリートの骨材化

4. 2 舗装付き床版の結果

防水工なしの供試体、エポキシ樹脂、ゴム化アスファルトシートの防水工を施した後に 3cm厚の舗装を施工した供試体を疲労実験した。また、エポアス3cm のものも防水工と舗装とを兼ね備えたものとして実験に加えた。これら舗装付き供試体では、舗装の温度感受性が大きいことを考慮して実験室内の温度を30℃、10℃、および、5℃ 程度に変化させて実験し、温度の違いによる破壊性状の違いを見ることにした。ただし、本研究で使用した疲労試験機では輪荷重の走行位置は一定であり、舗装に対して非常に苛酷なものであり、疲労試験結果は実橋梁に直接適用するには若干の無理がある。しかし、相対的な比較評価と傾向は得られたと思われる。

表-4 舗装付き床版の供試体の実験結果一覧

実験 供試体	供試体 グループ	上面の 状態	温度 (℃)	防水工 の種類	載荷 荷重(t)	載荷 回数(回)	最終状況
FWERP-1	A	水張り	30	エポキシ樹脂	1.705	204000	漏水破壊
FWERP-2	A	水張り	10	エポキシ樹脂	1.705	820600	破壊せず
FWERP-3	A	水張り	5	エポキシ樹脂	1.918	630000	舗装変形小
FWERP-4	B	水張り	30	エポキシ樹脂	1.918	68000	漏水破壊
FWASP-1	A	水張り	25	シート系	1.705	307000	漏水破壊
FWASP-2	A	水張り	15	シート系	1.705	759000	破壊せず
FWASP-3	A	水張り	5	シート系	1.918	484000	漏水破壊
FWASP-4	B	水張り	30	シート系	1.918	50000	舗装変形
FWEAP-1	A	水張り	5	エポアス	1.918	629000	舗装変形小
FWEAP-2	B	水張り	30	エポアス	1.918	44000	舗装変形
FWP-4	A	水張り	5	無	1.918	158600	漏水破壊
FWP-5	B	水張り	30	無	1.918	43000	漏水破壊

(1) 床版+舗装の結果 (FWP)

常温 (30℃) での実験では、早期に漏水が起こり、舗装には防水効果をほとんど期待できないことが再確認した。輪荷重の走行位置が一定のため、舗装のわだち掘れが非常に早く進行し、漏水後は床版とのずれ (舗装の流動) が大きく発生した。5℃の低温下での実験では、わだち掘れ・流動は少なくなり、漏水寿命も大幅に伸びた。しかし、以降の防水工を施した供試体と比較するとやはり短く、舗装には防水効果が少ないと言える。

(2) 床版+エポキシ樹脂防水工+舗装の結果 (FWERP)

エポキシ樹脂系は常温での実験でも舗装と床版のずれ (舗装の流動) も少ないことから、防水工なしのものに比べ舗装と床版の付着が良いと考えられる。ただし、ずれが少ない分、走行路付近のわだち掘れが大きくなった。漏水寿命は防水工なしのものに比較して若干延びた。ただし、1 体の実験だけであり、効果については明確でない。10℃以下の低温下では、常温での実験で見られたわだち掘れは少なく、約60万回まで載荷を行ったが、たわみも顕著には増加せず、漏水も発生しなかった。防水工なしの場合の約3倍以上の寿命の伸びを示し、低温下では防水効果の高いことが認められる。

(3) 床版+ゴム化アスファルトシートの防水工+舗装の結果 (FWASP)

シート系は常温下ではエポキシと同様にわだち掘れが大きく、かつ、エポキシよりも舗装の流動が大きくなり、防水工と舗装との接着性に若干の問題のあることを示唆した。また、5℃の低温下ではエポキシと同様にわだち掘れが小さくなったが、約48万回で漏水が起こり床版の疲労破壊に至った。低温になるとアスファルトは堅くなり、脆化する傾向があると考えられる。以上から、シート系では舗装との接着性と低温下での脆化について今後の検討が必要と言える。

(4) 床版+エポアスの結果 (FWEAP)

エポアス舗装は常温では通常の舗装よりも早い回数でわだち掘れが大きく発生した。一方、低温下では、通常の舗装と同じように舗装変形も小さく、漏水も起こらなかった。これよりエポアスは常温での舗装流動性を解決すれば防水工兼用の可能性が見いだされるであろう。

5. S-N図における実験結果の比較

以上の試験結果を比較考察するため、荷重を無次元化してS-N図にプロットすると、図-5~8のようになった。舗装付きの供試体については、床版が破壊していなくても舗装の流動変形が大きくなり、荷重の載荷が不可能になった実験終了回数でS-N結果とした。縦軸の荷重比は載荷荷重/静的耐荷力であるが、静的耐荷力には各供試体でコンクリートの種類、材令にしたがった圧縮強度を用いた計算押抜きせん断耐荷力をあてた。

なお、これらの図中の実線、破線で示したS-N曲線は3.2節で求めた基本疲労強度曲線である。

(1) 床版+防水工の結果

図-5にエポキシ樹脂とゴム化アスファルトシートの結果を、図-6にはアクリル樹脂系の結果をまとめた。

エポキシ樹脂防水工 (FWER) は、防水工なしのFWシリーズと同じような結果となり、この防水工ではほとんど寿命の向上は認められない。破壊性状で述べたようにエポキシ樹脂はひびわれ追従性がなく、床版コンクリートのひびわれによって割れを生じるためである。

シート防水工 (FWAS) は、4 体の結果をプロットした。この防水工では総じて床版自身の破壊まで、防水効果が期待できると考えられる。FWAS-1は若干寿命が短いようであるが、輪荷重のエッジで局部的なせん断破壊が生じたためである。本実験では直接荷重が防水工に作用するため過酷な実験となっていると言える。以上から、ゴム化アスファルトシートは防水効果が非常に高いと判断してよいであろう。

アクリル樹脂 (FWAR) は、3mm厚のFWAR-2, FWAR-5, FWAR-6の結果は乾燥状態下の床版と同等以上の寿命を保持していることが図-6より理解できる。FWAR-2の結果が非常に高いのは実験時の気温が若干低く、このため樹脂の剛性が上がり、合成効果が発生したためと考えられる。2mm厚のFWAR-4の結果は極端に寿命が低下した。これは先に述べたように床版表面に露出していた骨材のくさび効果で局部破壊したためである。1mm厚のFWAR-3はたまたま寿命が延びたと考えられる。このS-N結果からアクリル樹脂は3mm程度以上の厚さを塗布すると防水効果は十分であり、輪荷重に対する耐久性は大きく向上すると言えるであろう。

アクリルゴム (FWAG) は、水張りの床版だけの結果よりも若干寿命が延びただけであり、破壊現象からも防水効果はほとんど期待できないと判断せざるえない。

アクリルコンクリート (FWAC) は、S-N結果からも、水に対する防水効果と増厚の効果を合わせもつことが明らかである。

(2) 床版+防水工+舗装の結果

舗装付き床版では、温度によって舗装の流動性に大きな違いがあるので、5℃の低温下のものと、10℃以上での結果とに分類して、図-7,8に示した。

舗装には防水効果は無いと述べたが、低温下での防水工の無いFWP-4の結果が実線のS-N曲線上にプロットされことは、舗装に剛性が発現し、床版との合成により床版コンクリートの発生応力が減少し、床版のひびわれ発生が遅延効果が出たためであると思われる。本供試体ではこの効果は防水工を施工したことと同等となった。次に、防水工付きの供試体のS-N結果は乾燥状態下の床版だけのS-N曲線の上側にプロットさ、寿命は最低3倍以上延びたことが理解できる。エポキシ樹脂系塗布型防水工はひびわれ追従性が疑問視されたが、舗装付きで、低温下では大きな防水効果が期待できるようである。

図-8で明らかなように、10℃以上の温度でも舗装付き床版の結果は乾燥状態下での床版だけのS-N曲線付近にプロットされた。これは舗装には防水効果はないものの、舗装の剛性によって床版との合成効果、あるいは、輪荷重の荷重分配効果によってコンクリートのひびわれ発生を遅らせたため

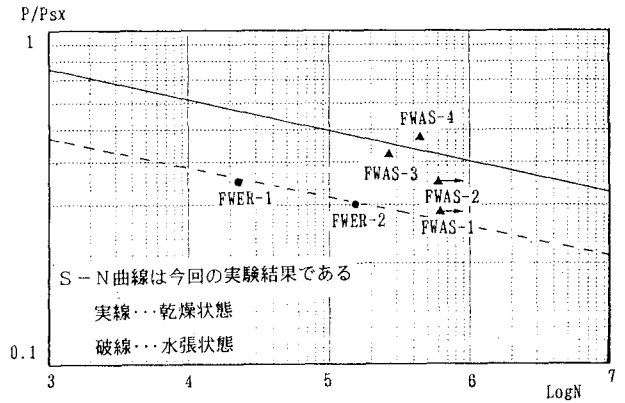


図-5 エポキシとシート系のS-N結果

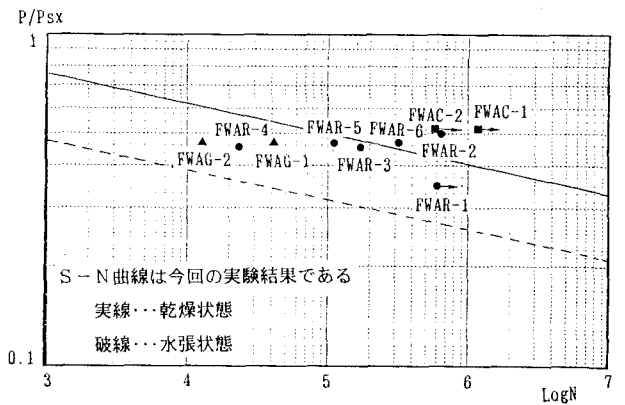


図-6 アクリル系のS-N結果

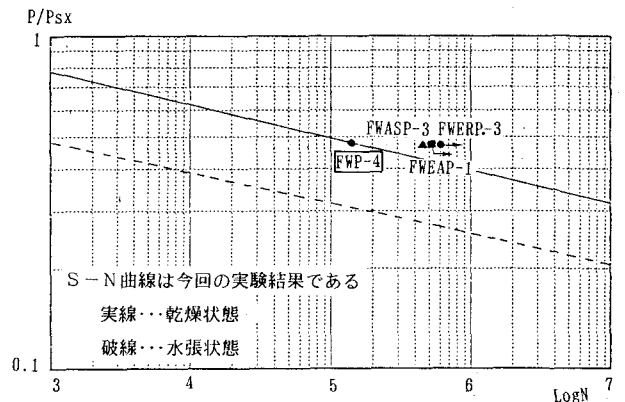


図-7 舗装付き床版 (低温) のS-N結果

であろう。この図-8において、10℃で行ったエポキシ樹脂の結果 (FWERP-2)、および、15℃で行ったシートの結果 (FWASP-2) 以外は、防水工の無い FWP-5 を通って実線に平行に引いた S-N 曲線付近にプロットされ広い意味で防水効果が少なくなったと言える。エポキシ樹脂防水工ではその割れによる漏水、シート防水では舗装との接着性の低下による舗装の流動、エポアスでは舗装のわだち掘れが発現したためである。これらが、各防水工の弱点と考えられる。しかし、本研究での実験方法は舗装にとつては非常に過酷なものであり、ここに報告した結果から実際の適用性について論じるのは早計である。エポキシ樹脂およびアスファルトシートとも実橋では 10 年経過後も防水効果があるとの報告もある。今後、より適切な実験方法を開発する必要がある。

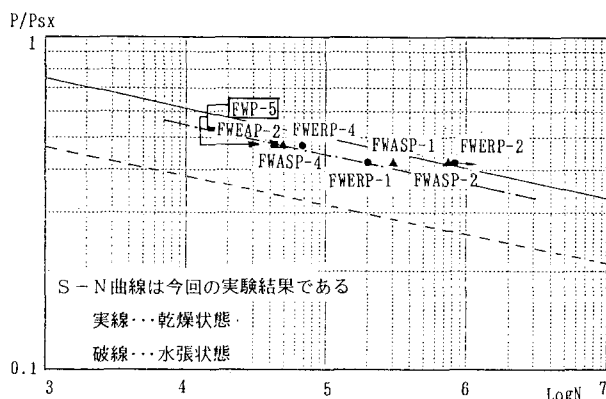


図-8 舗装つき床版 (常温) の S-N 結果

6. 結 論

本研究より以下のことが明らかになった。

- 1) 今回の床版のみの水張り実験からも、床版下面から漏水が発生してから破壊に至るまでの時間は非常に短く、上面のコンクリートが骨材化することが確認され、床版には防水工が必要であると強調できる。
- 2) エポキシ樹脂塗膜による防水工は、床版および舗装との接着性は良好であるが、ひびわれ追従性に欠けるようである。ただし、舗装付きの場合、低温下ではシート系防水工よりも耐久性があった。塗布系の場合、施工時に不均厚になる恐れがあり、注意を要する。
- 3) ゴム化アスファルトシートによる防水工は、伸び・せん断変形性能が高いためひびわれ追従性があり、長期の防水工効果が期待できる。しかし、舗装付きの場合、低温下ではエポキシ樹脂よりも漏水寿命が短く、低温脆性が出易いことに注意が必要であろう。また、常温下でもエポキシ樹脂の場合と比較すると防水工と舗装との接着強度は弱いようである。
- 4) アクリル系防水工も、弾性に富み、ひびわれ追従性がよく防水工自身の耐久性も高い。ただし、塗布厚は 3mm 以上が望ましい。また、不織布を挿入するとさらに耐久性が向上する。
- 5) アクリルゴム系樹脂は硬化促進材としてセメントを使用しているが、このセメントが吸水し分離湧出して防水工の役目を喪失する。分離しない改良が必要である。
- 6) アクリルコンクリートは 1cm 厚ながら、防水効果があり、かつ、増厚の効果が非常に大きい。
- 7) エポアス舗装は常温では、通常の舗装より流動変形が大きくなり、剛性保持の改良が必要である。低温下では通常の舗装と同じような剛性を発現し、防水効果も期待できる。
- 8) アスファルト舗装には防水効果は期待できないが、その剛性 (特に、15℃以下) による床版との合成効果と、輪荷重の荷重分配効果によって、床版コンクリート上面の応力を低減させ、ひびわれ発生を遅延させる。このため見かけ上、床版の耐久性向上の効果がある。ただし、実橋床版の厚さではこの効果は大幅に減少するであろう。
- 9) ここで示した舗装付き供試体の結果は、相互を比較対照するには価値があるが、各結果そのものを実橋に直接適用するべきではないだろう。

謝 辞 本研究は昭和63年度・平成元年度の文部省科学研究費補助金（試験研究(1)）を受けて行われたものであることを附記する。また、本研究では阪神高速道路公団には種々支援をいただいた。さらに、防水工の施工には様々のメーカーの御協力を得た。舗装の施工精度が本実験では重要な要因となるため、経験豊富な北川道路㈱に施工の御協力を得た。ここに、上記関係各位に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集 9-2、1987。
- 2) 松井繁之ら：RC床版の耐荷力と耐久性、昭和60年度土木学会関西支部講習会テキスト、昭和60年7月。
- 3) 松井繁之、水本雅夫、福本晴士、宇藤滋：床版防水工に関する基礎的研究、第43回土木学会年次学術講演会講演概要集 I-185、昭和63年10月。
- 4) 阪神高速道路公団、災害科学研究所：道路橋RC床版の防水工の耐久性に関する調査研究業務、昭和63年3月。
- 5) 阪神高速道路公団、日本材料学会：橋梁用樹脂に関する調査研究業務報告書（その11）、昭和63年3月。
- 6) 土木学会：昭和61年制定 コンクリート標準示方書、昭和61年10月。
- 7) 前田幸雄、松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文集第348号 V-1、1984年8月。

(1990年10月12日受付)