

高性能床版防水システム

Kajima Water-proof System for Reinforced Concrete Slab in Road Bridges

渡邊 賢三 坂田 昇 牧野秀也¹⁾

要 約

コンクリート構造物の高耐久化の一環として、高速道路をはじめとする鉄筋コンクリート床版用の高性能床版防水システムの開発を検討した。床版防水システムの各種規格を満足するため、接着剤、防水層などの材料種類、施工要因が各種性能に及ぼす影響を検討し、システム開発を行った。その結果、優れた接着性、ひび割れ追従性、耐久性を有し、日本道路公団マニュアル、日本道路協会規格を満足する床版防水システムを開発した。また、床版防水システムの施工時期が構造物の耐久性に及ぼす影響を評価した結果、コンクリート床版の長寿命化には床版竣工後、早期に防水工を実施することが好ましいことを定量的に示した。本稿では、それらの結果について報告するとともに、今後の方針について述べた。

目 次

- はじめに
- 床版防水の各種基準
- 鹿島式床版防水システムの開発及び性能
- 解析的検討
- 次世代床版防水工
- おわりに

はじめに

昨今、増加する交通荷重とスパイクタイヤの使用規制に伴う凍結防止剤の散布によって、高速道路をはじめとする道路橋床版の早期劣化が顕著になってきている。早期劣化のメカニズムは、Fig.1 に示すように、アスファルト舗装と鉄筋コンクリート床版（以下 RC 床版）に生じたひび割れを通じ、雨水、凍結防止剤などが構造物に浸入し鉄筋を腐食させ、構造物の耐久性を低下させると考えられている。そこで、RC 床版の長寿命化を目的に、国土交通省では、RC 床版には必ず防水層を設けることを道路橋示方書¹⁾において提言している。一方、日本道路公団ではコンクリート床版用の防水システムに関するマニュアル（以下 J H 規格）²⁾を 2001 年 6 月に作成し、この規格を満足したシステムのみを実橋に適用できることとしている。このような中、例えば日本道路公団では、橋梁が多く計画されている第二東名や、さらに既設の高速道路のアスファルト改修の際に床版防水システムの適用が検討されている。なお、その数は概算で約 7,000 橋とも言われており、今後、高性能床版防水システムが強く求められる。

床版防水の各種基準

RC 床版における防水システムの基準としては、1987 年に制定された日本道路協会規格（以下協会規格）³⁾と先述した J H 規格の大き

く二つがある。協会規格及び J H 規格は、Fig.2 に示すように、コンクリートとアスファルトの間に敷設される防水層を含めた防水システムの性能を規定したものである。協会規格は、J H 規格に先んじて制定されており、防水層を敷設した場合の防水性、接着引張強度、接着せん断強度及び防水層単味の低温可とう性を評価する規格である。しかしながら本規格を満足する防水システムを実橋に適用しても、数年後には床版下面からの漏水やつらの発生及び舗装表面の変状が確認され、規格の見直しが望まれていた⁴⁾。

新しく制定された J H 規格の特徴は、規格を満足する防水システムには 30 年の耐久性を有すると見なされる“見なし規定”の点であり、ひび割れ追従性、耐温冷繰返し性能、耐舗設性能、遮塩性能及び耐薬品性能など初期性能から長期耐久性能までを厳しく評価する試験規格である。J H 規格の中でも、特に大きな課題は、Fig.2 に示すの防水層のひび割れ追従性能、及び ~ の材料間の接着強

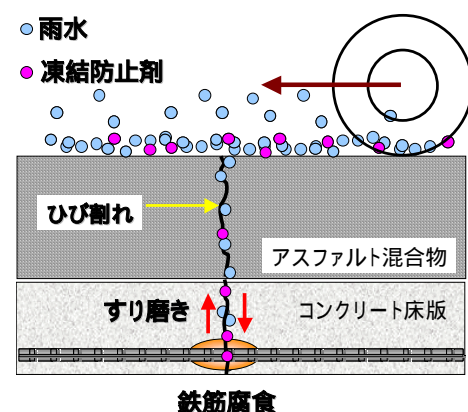


Fig.1 コンクリート床版の劣化機構
(Deterioration Mechanism of Slab Structure)

1) 牧野総合研究所

キーワード：防水工，道路橋床版，耐久性，
ポリウレタ，引張強度，せん断強度，樹脂，
コンクリート床版

度である。480 万回にも及ぶ疲労試験に耐え得る防水層には、優れた伸び性能が要求されるため、ポリウレタやポリウレタンなど伸び性能に優れた樹脂系材料が適用される。しかし、ポリウレタやポリウレタンはアスファルトとの接着強度が 0 に等しく、これらの課題を同時に解決する技術的手法が必要となる。

・ 鹿島式床版防水システムの開発及び性能

1．ひび割れ追従性に関する検討

(1) 要求性能

防水層の大きな役割は、RC 床版に入ったひび割れからの漏水を遮断することである。しかも、このひび割れは Fig.1 に示すように交通荷重によって開閉するため、樹脂自体に優れたひび割れ追従性が要求される。そこで、防水層の樹脂としての機能を有する材料を選定するため、実験的検討を実施した。

(2) 実験内容

ひび割れ追従性能は、J H 規格²⁾(JHERI410-8)を参考に、Fig.3 に示す、厚さ 2mm 幅 50mm の樹脂単味を用いて、JHERI410-8 と同等の繰り返し変位（初期変位 0.25mm、ひび割れ間隔 0.1 から 0.4mm）を 10Hz で 480 万回与え、その時の応力を測定し評価した。

Table 1 に使用材料の物性一覧を示す。防水層として伸び率の異なるポリウレタ樹脂 2 種類とポリウレタン樹脂 1 種類を検討対象とした。

(3) 実験結果

Fig.4 にひび割れ追従性に関する実験結果を示す。Fig.4 はひび割れ振幅回数と引張応力の関係を示したものであり、応力の減少は、樹脂の劣化、破断を示すものである。なお、実験開始から振幅回数が 500 回未満における応力のばらつきは、実験的に振幅が安定しないためである。Fig.4 によれば、ポリウレタ は振幅開始から徐々に応力が低下しており、150 万回の振幅で大きな応力低下が生じ、この時、破断が生じたものと推測された。事実、試験後のポリウレタ はひび割れと一部破断が生じていた。一方で、ポリウレタ、ポリウレタンは 480 万回でも初期値とほぼ同等の引張応力を示しており、優れたひび割れ追従性を有していることが分かる。本実験においては、同一な変位を与えているため、樹脂の伸び率が大きく、引張強度が小さいほど樹脂にかかる応力が小さくなり、良好な結果を示すことが分かった。なお、Table 1 に示すように、ポリウレタ、ポリウレタンは伸び率が大きいため、振幅繰り返しに対して優れた耐久性を有する結果となったことが分かる。以上からポリウレタ及びポリウレタンを防水層の材料として選定した。

2．新しい接着剤の開発

(1) 要求性能

章で述べたように、アスファルトとポリウレタやポリウレタンなどの防水層は接着力が極めて小さい。これはポリウレタやポリウレタンなどの表面張力が極めて小さいためであり、これまでにない新しい接着剤の開発が求められた。この課題を解決するために、数種類の接着剤について、その接着性能について検討を行った。ここでは、選定した 2 種類の接着剤について適用性を検討することを目的に、塗布量、アスファルト混合物の種類、防水層の材質を要因として検討した結果を示す。

(2) 実験内容

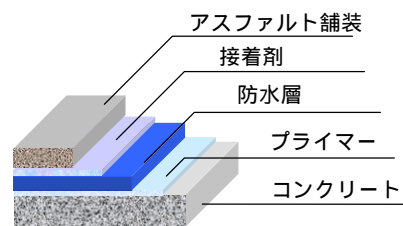


Fig.2 防水システムの構成
(Proportion of Water-proof System)

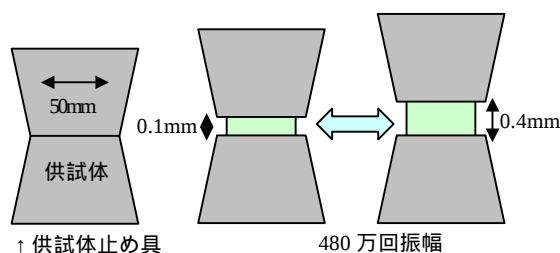


Fig.3 樹脂単味を用いたひび割れ負荷試験
(Method for Damage by Crack Cycle)

Table 1 防水層の材料特性

(Propertise of Materials for Water-proof)

樹脂種類	ポリウレタ	ポリウレタ	ポリウレタン
引張強度 (N/mm ²)	22	15	10
伸び率 (%)	170	510	980

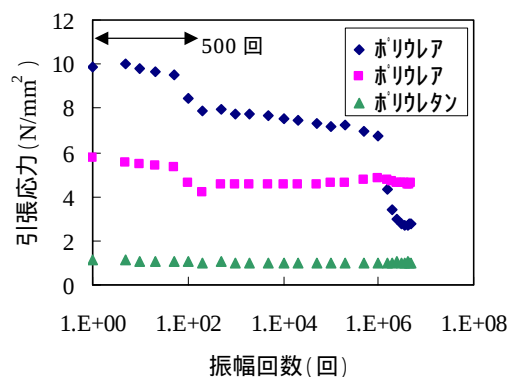


Fig.4 防水材料のひび割れ負荷に対する耐久性能
(Results of the Test for Damage by Crack Cycle)

本実験においては、Table 2 に示す三つのシリーズの実験について各シリーズとも 2 種類の接着剤を用いて検討を行った。シリーズ 1 では、防水層の材質を要因として実験を行い、接着剤から防水層の材質の選定を試みた。シリーズ 2 では、床版防水が施工される条件（時間、自然環境など）に制約が多いことから、接着剤の塗布量がばらつくことが予想されるため、塗布量を要因とした。シリーズ 3 では、各種道路設計への応用を想定し、アスファルト混合物の種類を要因とした。

本実験には、JIS A 5401 に準拠するコンクリート平板をショットブラストにて目荒らしたものをを用い、コンクリート用プライマーは反応系プライマー、防水層は Table 1 に示すポリウレア 及びポリウレタンを厚さ 2mm に吹付けて形成した。接着剤は粘性を調整した 2 種類の反応硬化型樹脂 (A: 低粘度, B: 高粘度) を用いた。アスファルトは、骨材最大寸法 13mm, 改質 型アスファルトを用いた碎石マスチックアスファルト混合物 (以下, SMA-改質 型) と骨材最大寸法 20mm, ストレートアスファルトを用いた粗粒度アスファルト混合物 (以下, 粗粒-ストアス) を用いた。なお供試体は、J H 規格²⁾ (JHERI410-1) に準じて作製した。

接着性の評価は J H 規格 (JHERI410-11, 12) に準じて、引張及びせん断接着強度を測定した。なお試験温度はすべて 23 とした。

(3) 実験結果

Fig. 5 に防水層の材質の違いが接着強度に及ぼす影響を示す。引張接着強度及びせん断接着強度ともにポリウレア の方がポリウレタンより優れた接着強度が得られることが分かる。これは、ポリウレア とポリウレタンは表面張力が大きく異なることに起因すると推測された。また、接着剤 B の方が A より防水材の材質による影響が小さく、防水層の種類によらず規格値を満足する結果となった。これは、接着剤 B の粘性に起因するものと推測された。

Fig. 6 に接着剤塗布量が引張接着強度及びせん断接着強度に及ぼす影響を示す。接着剤 A, B 共に接着剤塗布量の増加に伴い引張強度及びせん断強度とも増加する結果となった。なお施工性、コストを勘案すると 0.5kg/m² 以上塗布することは適切ではなく、J H 規格、協会規格と比べても十分な接着強度を有していることから接着剤は 0.3kg/m² 以上塗布することとした。なお引張強度試験によって破壊する場所は、接着剤の凝集破壊、若しくは接着剤との界面 (Fig. 2) における 間若しくは 間) であったが、Fig. 6 で示す黒印はプライマーでの破壊が生じたため、この供試体の接着剤の接着強度は標記値以上であると推測される。

Fig. 7 にアスファルト混合物の種類が接着強度に及ぼす影響を示す。接着剤の種類によらず、SMA-改質 型の方が大きな接着強度となる結果となった。これは、SMA-改質 型はモルタルが多く、密実なアスファルト混合物であるため接着剤層と面で接着するためである。一方で、粗粒アスファルト混合物は骨材が多く、空隙が多いアスファルト混合物であるため、接着剤層と点で接着することになり、十分な強度が得られなかったと推測される。なお、本実験では接着剤の塗布量を 0.3kg/m² としていたため、粗粒アスファルトの場合はより多くの接着剤を塗布することで、十分な接着強度が得られる可能性がある。

以上より、ポリウレア , 接着剤 B, 接着剤塗布量 0.3kg/m² 以上, SMA-改質 型を用いることで接着強度規格値を満足するものと推測された。

3. J H 規格に対する性能

2 節にて選定した材料及び施工方法を鹿島式床版防水システム (KW システム) と名付け、このシステムについて、J H 規格、協会規格を実施した。試験結果を Table 3 に示す。また引張接及びせん断接着強度の J H 規格値に対する比率を Fig. 8 に示す。鹿島式床版防水システムは J H 規格 (性能水準 -3 と 4), 協会規格を全て満足した。また接着強度は規格値の約 2 倍を発現する結果となった。

Table 2 接着剤の選定に関する実験要因

(Factor of Experiments)

シリーズ	要因	パラメータ	
1	防水層種類	ポリウレア	ポリウレタン
2	接着剤塗布量	0.3kg/m ²	0.5kg/m ²
3	アスファルト混合物種類	SMA-改質 型	粗粒-ストアス

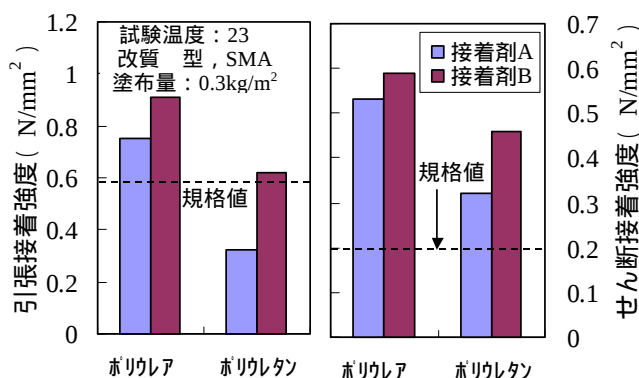


Fig.5 防水層の材質の違いが接着強度に及ぼす影響

(Relation between Kind of Materials for Water-proof System and Tensile Adhesion)

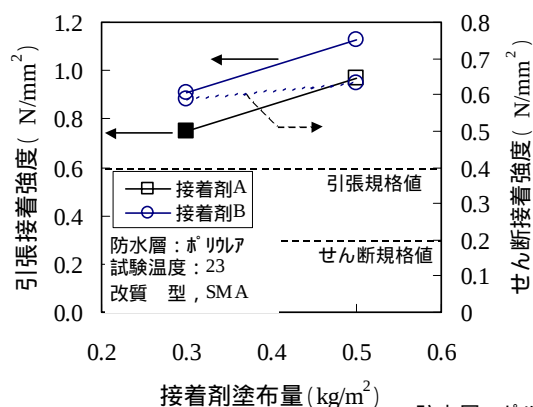


Fig.6 接着剤塗布量と強度の
防水層: ポリウレア
試験温度: 23
塗布量: 0.3kg/m²

(Relation between Amount of Bond and T

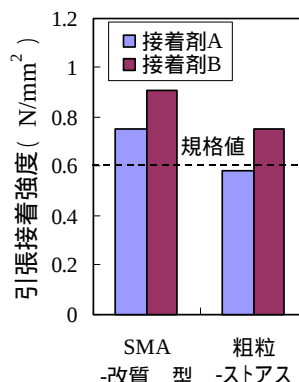


Fig.7 アスファルト混合物の種類と接着強度の関係

(Relation between Kinds of Asphalt and Tensile Adhesion)

Table 3 JH規格，協会規格に対する試験値

(Proportions of Kajima Water-proof System)

項 目	性能	規格
膨れ負荷，はがれ負荷，舗設負荷	異常なし	公団規格 ²⁾
温度変化及び薬品負荷	異常なし	
ひび割れ負荷後	異常なし	
ホイールトラッキング負荷後	異常なし	
防水性試験（ひび割れ負荷後，ホイールトラッキング後）	漏水なし	
引張接着強度，せん断接着強度（-10，23，60）	合格	
遮塩性能	合格	協会規格 ³⁾
引張接着強度，せん断接着強度（-10，20，水中7日）	合格	
低温可撓性試験	異常なし	
防水性試験	漏水なし	

4. 実験的検討のまとめ

防水層のひび割れ追従性，接着剤の性能検討を行い，材料の最適化を検討した。本システムがJH規格，協会規格ともを満足する性能を有することを確認した。

・ 解析的検討

1. 現状の施工方法

現在，RC床版の防水工は舗装工事と同時に施工されている。アスファルト舗装は，上部工がある程度まとまった長さで完成した後，数km単位で施工されている場合が多い。そのため，通常で数年程度，最大で10年以上，RC床版が日射，雨水，乾燥，凍結，飛来塩分の影響を受ける場合がある。その後，防水工にて，劣化要因を遮断しても，既にコンクリート中に浸透した劣化因子によって鉄筋コンクリートの劣化が進行すると考えられる。

2. 解析の目的

打放しのRC床版が竣工から数年間程度，舗装しないまま，自然環境にさらされている場合，特に沿岸地域における飛来塩分は，RC床版を著しく劣化することが既往の知見から明らかになっている。また，竣工後の数年間にRC床版内部に一度浸透した塩分を除去することは極めて困難であるとともに，長期耐久性に大きな影響を及ぼすことが懸念されている。ここでは，既往の施工方法に従って，アスファルト舗装の直前に床版防水を実施することを基本として，床版防水が実施されるまでの期間を5年間と仮定して，RC床版が受ける影響を評価した。また，床版防水の施工時期を要因として，その影響を解析的に評価することを試みた。

3. 解析の内容

解析はフィックの拡散則を基本とした物質移動評価解析⁵⁾にて実施した。コンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数⁶⁾は水セメント比（以下W/C）=50%相当（ $1.334\text{cm}^2/\text{year}$ ）とした。解析の対象構造物を沿岸部に建設されるRC床版とし，境界条件は，海岸からの距離から決定されるTable 4に示す飛来塩分量⁶⁾を用いた。なお，かぶり厚は安全側の評価を目的として，最小かぶり 3cm^1 を用い，鉄筋腐食が開始する塩化物イオン量を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ，鉄筋腐食が開始するまでの時間を寿命とし，解析対象期間を30年間として解析，評価を行った。また，Fig.9に解析対象としたRC床版のモデルを示す。ここで，防水工施工前は，ABC面のみから塩分が供給され，防水工施工後はABC面を含めすべての面から塩分が浸入しないと仮定した。ちなみに，深さ方向への塩分浸透量はABの中心であるD点に

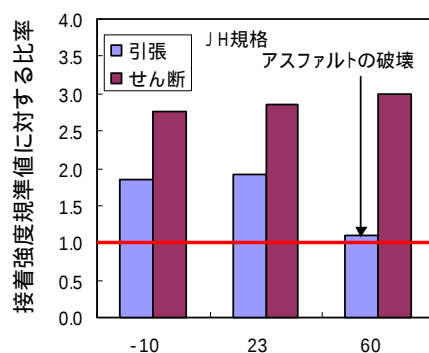


Fig.8 接着強度試験結果

(Results of JH Examination)

Table 4 解析入力値一覧

(Input data)

海岸からの距離 (m)	表面塩化物イオン量 (kg/m^3)	床版竣工から防水 工実施までの期間
0	9.0	5年，3年，1年， 防水工なし
100	4.5	
250	3.0	
500	2.0	

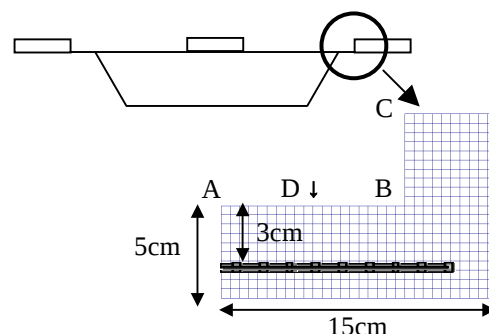


Fig.9 RC床版のモデル化

(Model of Reinforced Concrete Slab in Road Bridges)

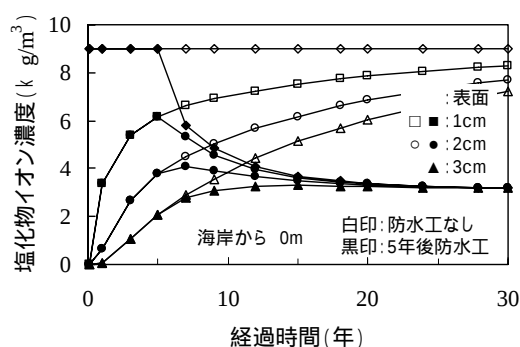


Fig.10 解析結果1（防水工の有無）

(Results of analysis 1)

て評価することとした。

4. 解析結果

Fig.10に海岸から0mに位置するRC床版についてコンクリート表

面から 1, 2, 3 cm の位置における塩分浸透解析の結果を示す。Fig. 10 に示すように、防水工を施工しない場合は時間経過に伴い塩分濃度が増加するのに対し、橋梁竣工 5 年後に防水工を実施した場合、防水工の効果によって塩分浸透が遮断され、防水工を施工する前までに浸透していた塩分が内部に拡散して濃度の均一化が生じることが分かる。この時、鉄筋位置 (3 cm) での塩分量は 1.2kg/m^3 を大きく越えており、Fig. 10 に示した解析条件では鉄筋腐食が数年から開始している可能性が高い結果となった。

Fig. 11 に鉄筋位置 (3 cm) での塩分量について、海岸からの距離をパラメータとして解析した結果を示す (橋梁竣工 5 年後に防水工を実施したケース)。海岸から 0 m の場合 (表面塩化物イオン量 9.0kg/m^3 相当) では 4 年で、海岸から 100 m の場合 (4.5kg/m^3 相当) では 6 年で、鉄筋位置での塩分量が 1.2kg/m^3 以上となり鉄筋腐食が開始する恐れがある一方で、海岸から 250 m 以上離れた場合 (3.0kg/m^3 相当以下) では鉄筋位置での塩分量が 1.2kg/m^3 以上にならず、30 年間鉄筋が腐食しない結果となった。つまり、RC 床版竣工後 5 年後に防水工を実施する場合、海岸から 250 m 以内の場合では、床版防水前に浸透した塩分によって 30 年以内に鉄筋が腐食する可能性があることが考えられた。

そこで、橋梁竣工から防水工を施工するまでの期間をパラメータとして塩分浸透量について解析した。その結果を Fig. 12 に示す。海岸から 0 m に構築された RC 床版において長期間鉄筋腐食を抑制するためには、橋梁の竣工から (塩分の供給開始から) 1 年以内に防水工などの処理をしなければならないことが分かる。

なお、図には示さないが、海岸から 100 m 離れた RC 床版の場合は 3 年以内、250 m 離れた場合は 5 年以内に防水工を施工すればその後長期間の鉄筋腐食を抑制することが可能であることが分かった。

5. 解析的手法のまとめ

RC 床版の長期耐久性を勘案した場合、RC 床版竣工後、できるだけ早く防水工を実施し塩分を遮断することが有効であることが分かった。さらに海岸沿いに建設された RC 床版については、竣工から 1 年を超える年月を経てから防水工を施工した場合、防水工の施工前に既に浸透した塩分によって鉄筋腐食が生じる可能性があることが明らかにした。

・次世代床版防水工

1. 耐候性能に関する検討

(1) 要求性能

章において、RC 床版の耐久性を勘案した場合、RC 床版竣工後、可能な限り早く、防水工を行うことが有効であることを示した。これは、アスファルト舗装が舗設されるまで、防水工は表面被覆材としてコンクリートに対する劣化要因の浸透を防止し、アスファルト舗装後は防水層として機能させる方法であり、ここでは、「次世代床版防水工」と称する。しかしながら、防水層に用いているポリウレタなど有機系材料は、一般に紫外線に対する耐久性に乏しく劣化が数年で起こる可能性がある。そこで、ここでは、樹脂単味の耐候性能について評価し、次世代床版防水工への可能性を検討した。

(2) 実験内容

耐候性能は JIS B 7753 に規定されるサンシャインカーボンアーク灯式耐候性試験機を用い、200 及び 400 時間紫外線を照射し、その

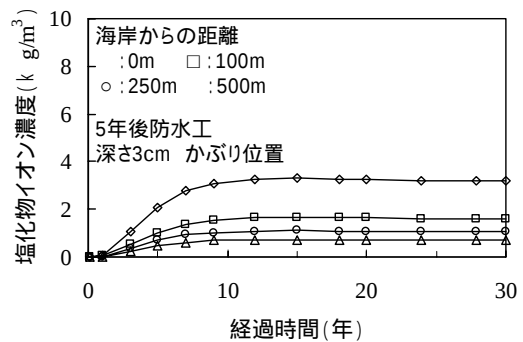


Fig.11 解析結果 2 (海岸からの距離)
(Results of analysis 2)

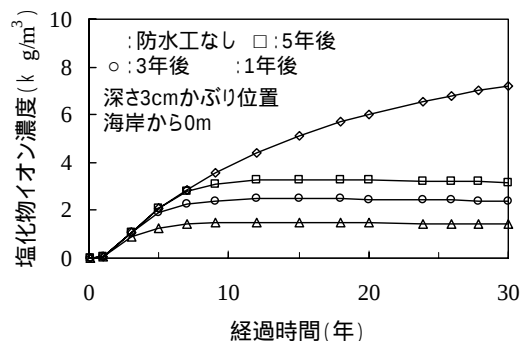


Fig.12 解析結果 3 (防水工実施までの期間)
(Results of analysis 3)

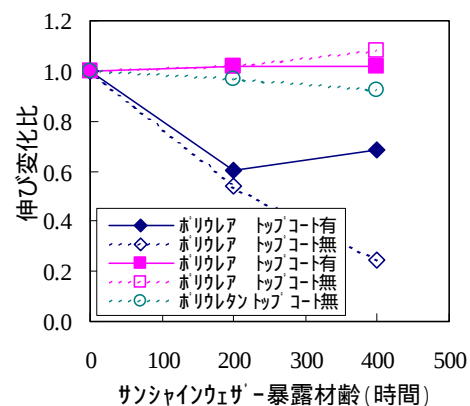


Fig.13 紫外線による伸び率の変化
(Alteration of Flexibility due to Ultraviolet)

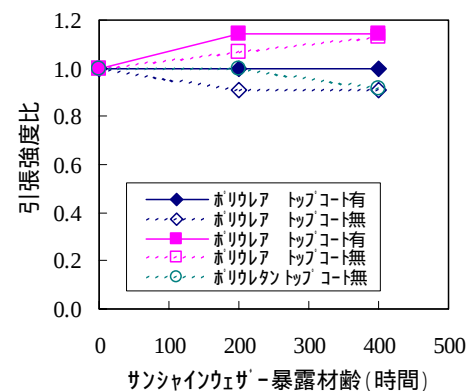


Fig.14 紫外線による引張強度の変化
(Alteration of Tensile Strength due to Ultraviolet)

時の引張強度及び伸び率を測定し、初期物性に対する比を用いて評価した。防水層は Table 1 に示すポリウレタ と 及びポリウレタンを厚さ 2 mm に吹付けて形成し試験に供した。なおトップコートの有無も要因として加え、トップコートには市販のアクリル系材料を用いた。

(3) 実験結果

耐候性能に関する試験結果として、Fig.13 に伸び率について初期値に対する劣化後の比を示す。また Fig.14 に引張強度について初期値に対する劣化後の比を示す。

Fig.13 に示すように、ポリウレタ は伸び率の低下が著しく、照射時間 400 時間で、暴露前の伸び率に対して、トップコート有りの場合約 6 割、トップコートなしの場合約 2 割となった。また、ポリウレタ、ポリウレタンはトップコートの有無にかかわらず、伸び率が初期とほぼ変わらない結果となった。

Fig.14 に示すように、トップコートの有無にかかわらずポリウレタ、ポリウレタンの引張強度は低下するものの、初期と比べ 9 割以上を保持した。これに対して、ポリウレタ は、初期と比べ微小ながら増加する結果となった。これは、紫外線に対する樹脂特性の違いであり、このような変化が小さいほど良好な耐候性能を有するものと推測される。

以上の結果から、紫外線に対しては、ポリウレタ = ポリウレタン > ポリウレタ の順で安定であると推察された。なお、照射後の供試体はすべて黄色に変化しており、変色程度はポリウレタ < ポリウレタ < ポリウレタンの順で大きくなった。この結果より、樹脂の変色程度が、伸び率、引張強度の低下を直接示すものではないと考えられるため、紫外線による劣化について性能評価をする際には機械的な評価によって判断する必要がある。

(4) 耐候性能に関するまとめ

耐候性能に優れたポリウレタ、ポリウレタンは次世代床版防水工に適した防水層として適用できる可能性を見いだした。また、トップコートによって耐候性能は向上できるため、トップコートが各種性能に及ぼす影響を把握することが重要である。

2. 次世代床版防水工のまとめ及び今後の課題

樹脂単味の耐候性試験を行い、耐候性能の観点から次世代床版防水工の可能性について検討した結果、鹿島式床版防水システム (KW システム) は、次世代床版防水工として適用可能であることが分かった。

しかしながら、次世代床版防水工には、防水層自体の耐候性能のほかに、屋外曝露を経た後、接着剤及びアスファルト舗装を行い、各種性能を満足する必要がある。特に、紫外線劣化を受けた後の樹脂系材料は伸び性能が低下し、脆性的な挙動をとるため、ひび割れ

追従性や接着性能などを検討する必要がある。また、耐候性能向上を目的にトップコート類を塗布した場合は、トップコートとアスファルト間の接着剤の開発、トップコートを付いた場合のひび割れ追従性や接着性を確認する必要がある。今後、このような課題を解決していく必要がある。

・おわりに

RC 床版の長寿命化を目的として日本道路公団、日本道路協会が定めた床版防水システムに関する各種検討を行った。防水層の材料には伸び性能、耐ひび割れ追従性に優れたポリウレタ樹脂を用いた。防水層とアスファルトの接着剤は各材料間の表面張力を考慮した新しい接着剤を開発した。さらに、施工法が防水システムに及ぼす影響を実験的に確認し、これらの結果を集約して、鹿島式床版防水システム (KW システム) を開発した。本システムは JH 規格、協会規格を満足することを確認した。一方で、解析的な手法を用いて、防水層の施工時期が RC 床版全体に及ぼす影響を検討し、RC 床版の長寿命化には、防水層の施工を可能な限り早期に行うことが好ましいことを定量的に示した。また、次世代床版防水工の可能性について樹脂単味の耐候性能を評価し、その可能性を示した。

今後、鹿島式床版防水システム (KW システム) の施工性実験を数回実施し、施工性能の確認及び課題の抽出を行う予定である。

また、コンクリート床版防水システムの開発において取得した各種情報、技術を基に、表面被覆材料としての応用や各種防水工としての幅広い適用を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説，2002．
- 2) 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，2001．
- 3) 日本道路協会；道路橋鉄筋コンクリート床版 防水層設計・施工資料，1987．
- 4) 大橋 岳；床版防水システムの新基準策定に向けて一性能規定型に改訂一，技術情報誌「EXTEC」60 号 VOL.15, No 4, (2002)，pp.43-46．
- 5) 横関康祐，安田和弘；コンクリート劣化の解析・予測システムを開発，メンテナンス，No.236，(2003) pp.98-100．
- 6) 土木学会；コンクリート標準示方書 施工編，2002．