論文

塗膜系（アスファルト加熱型）床版防水の性能評価に関する検討

谷口　惺*，篠田隆作**，小坂　崇***

*工修，阪神高速道路（株）技術部技術推進室（〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町 4-1-3）
** 工修，阪神高速道路（株）大阪管理局保全部保全審査課（〒552-0006 大阪府大阪市港区石田 3-1-25）
*** 工修，阪神高速道路（株）建設・更新事業本部堺建設部設計課（〒590-0075 堺市堺区南花田口町 2-3-20）

塗膜系（アスファルト加熱型）床版防水を対象に，阪神高速道路における舗装の維持管理間隔をふまえた要求性能を仮定し，新設工事及び舗装補修工事を想定した試験体を用いて性能評価を行った．防水性は新設を想定したケースでは目標性能を満足したが，下地面（既設 RC 床版上面）に凹凸のある舗装補修工事を想定したケースでは一部の試験体で漏水が確認された．せん断接着性は新設ケース・舗装補修ケースとも目標性能を満足し，下地面の状態に関わらず十分な耐久性を有していることを確認した．防水層のひび割れ追従性は両ケースとも目標性能を下回る結果となり，ひび割れのある床版の耐久性に対する影響が懸念された．

キーワード：塗膜系防水層，防水性試験Ⅱ，ひび割れ開閉負荷試験，せん断接着試験

1. はじめに

RC 床版は路面からの水の供給が原因で疲労等の劣化が促進される[1),2)]．道路橋示方書では，RC 床版への水の浸入を防ぐため，RC 床版上に防水層を設置することを規定している[3)]．防水層の要求性能は道路橋床版防水便覧[4)]（以下，防水便覧）に規定されているが，性能評価試験は表面に凹凸のない新設床版を想定したものである．よって，舗装補修工事で大型切削機による舗装等の撤去に伴って上面に凹凸が生じた既設 RC 床版上に施工した場合と防水性能に差が生じる可能性がある．

本検討では，阪神高速道路で最も多く使用されている塗膜系防水層（アスファルト加熱型）を対象に性能試験を行い，阪神高速道路の交通特性や工事の施工条件をふまえた要求性能に基づき防水層の性能を照査した．

2. 阪神高速道路で実績のある床版防水

2.1 床版防水の施工実績

道路橋示方書では，橋梁区間においてアスファルト舗装とする場合は，路面より侵入した雨水等が床版内部に浸透しないように防水層を設けるものとすることを規定している[3)]．阪神高速道路では，道路橋示方書に準じて，床版への浸透水に対する防護を目的として，床版上面には必ず防水層を設けることとしている[5)]．床版防水の種類は塗膜系防水とシート系防水があるが，近年しゅん工した新設工事では，シート系防水はブリスタリングが懸念されること等から，端部防水を除き塗膜系防水層（アスファルト加熱型）としている．また，直近 5 年の舗装補修工事では，端部防水でわずかにシート系防水層を採用した箇所はあるが，床版の一般部（端部以外の箇所）はすべて塗膜系防水層（アスファルト加熱型）を使用している．

一方，東・中・西日本高速道路株式会社では，平成 25 年にひび割れ追従性等の性能を高めた規格グレードⅡを設定した[6)]．これは，ウレタン材料等を用いたもので，高い床版防水性能を期待できるが，交通規制等が伴う舗装補修工事では，施工時間等の制約が厳しく採用は難しい状況である．

2.2 塗膜系防水層（アスファルト加熱型）の施工手順

阪神高速道路の床版新設工事では，上面仕上げを一般に金ごて仕上げとし，防水層を施工する前に RC 床版平面の清掃を行い，①プライマーの塗布，②塗膜系防水層の施工，③硅砂散布，④舗装材料の舗設の順で施工を行っている．なお，従来は床版表面の仕上げを「ほうき目仕上げ」としていたが，防水層にブリスタリングが懸念されることから，近年では実施していない．舗装補修工事では，既設舗装を大型切削機で撤去し，床版上面を清掃した後，新設床版と同様の手順で防水層を施工している．スチールショットブラスト等の床版上面処理の有効性は別検討によって確認している[6)]ものの，施工時間等

の面で適用が難しい状況であるため，実施していない．

3. 防水層の照査項目

防水便覧では，表－1 に示す照査項目が示されており，性能評価のために必要不可欠な基本照査試験と耐久性や施工性に関してより高い性能を要求することが必要な場合に行う追加照査試験を規定している．本検討では，新設床版および施工面に凹凸のある既設床版を対象に，基本照査試験より，防水層の機能性を確認するため防水性試験Ⅱ，耐久性を確認するためにせん断接着試験を行った．また，舗装補修工事等が原因で床版上面にひび割れが発生することが懸念されるので，追加照査試験よりひび割れ開閉負荷試験を実施した．なお，土木工事共通仕様書[8]では床版防水の性能試験として，防水性試験，局部変形性試験，せん断接着試験，引張接着試験，水浸引張接着試験，ひび割れ追従性試験を定めている．

4. 防水層の性能評価試験

4.1 試験体

試験体の断面のイメージを図－1に示す．試験体は市販のJIS平板に下地処理を行い，塗膜系防水層を塗布したのち，舗装材料を舗設する．平板表面が平滑な新設床版を想定したケースと凹凸を設けた舗装補修を想定したケースを対象とし，舗装材料の種類および下地処理の方法により，表－2に示す5ケースに分類した．

新設を想定したケースでは，表面の脆弱層を除去するため，平板表面をディスクサンダーで研掃した．舗装補修を想定したケースでは，写真－1のように平板表面を切削機で切削した．切削機は幅500mmのドラムに15mmピッチでビットを設けたもので，これを回転させることで平板表面に幅15mm，高さ5mm程度の凹凸を設けた．さらに，ケース4では切削後にスチールショットブラストによる表面処理を行った．表面粗さはサンドパッチング方法[9]で測定した．舗装は阪神高速道路で使用実績のある基層の舗装材料2種類（密粒およびSMA）の配合とし，冬季施工を想定して6℃の恒温室で保管したコンクリート平板上に現場を再現した敷均し温度で舗設した．試験体作製手順は表－3のとおりである．

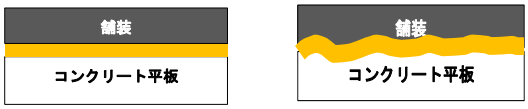
4.2 防水性試験Ⅱ

(1) 試験方法

表－1　照査項目

要求性能	基本照査項目(必須)	追加照査項目
①防水性	***防水性試験Ⅰ or Ⅱ***	－
②遮塩性	***防水性試験Ⅰ or Ⅱ***	－
③接着性	***引張接着試験、せん断接着試験、水浸引張接着試験***	－
④耐変形性	***せん断接着試験、ひび割れ追従性試験Ⅰ or Ⅱ***	ひび割れ開閉負荷試験、せん断疲労試験
⑤耐熱性	***引張接着試験、せん断接着試験***	－
⑥耐薬品性	耐薬品性試験	－
⑦耐荷性	***引張接着試験、せん断接着試験***	はがれ負荷試験、***局部変形性試験***、WT負荷試験
⑧耐久性	－	WT負荷試験、ひび割れ開閉負荷試験、せん断疲労試験
⑨排水性	－	－
⑩環境安全性	－	－
⑪維持管理性	－	－
⑫施工性	－	ブリスタリング抵抗性試験、はがれ負荷試験、局部変形性試験

※斜字：土木工事共通仕様書に規定のある試験項目



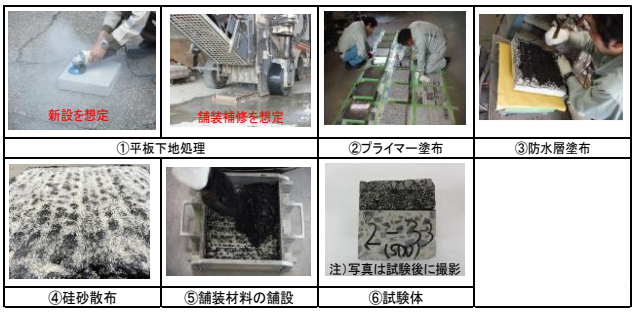
(a)新設を想定したケース　　(b)舗装補修を想定したケース

図－1　試験体断面

表－2　試験ケース

試験ケース	想定	下地の状態			防水層	舗装材料		舗設条件	
		施工面の平坦性	下地処理	表面粗さ(mm)		種類	バインダー	試験体温度	敷均し温度
ケース1	新設	平滑	ディスクサンダー	0.21	塗膜系防水層（アスファルト加熱型）	密粒(13)	改質Ⅱ型	6℃	156℃
ケース2	新設	平滑		0.21		SMA(13)	改質Ⅱ型		
ケース3	舗装補修	凹凸大	大型切削機	2.11		密粒(13)	改質Ⅱ型		
ケース4	舗装補修	凹凸小	大型切削機＋スチールショットブラスト（投射密度100kg/m^2）	1.61		密粒(13)	改質Ⅱ型		
ケース5	舗装補修	凹凸大	大型切削機	2.11		SMA(13)	改質Ⅱ型		

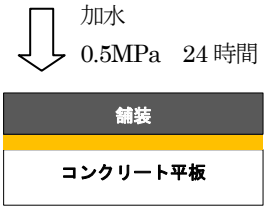
表－3　試験体作製手順



(a)切削状況　(b)切削機ビット　(c)切削後の状況　(d)スチールショットブラスト

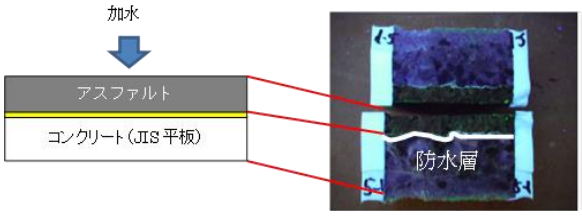
写真－1　平板切削状況

(a)試験機

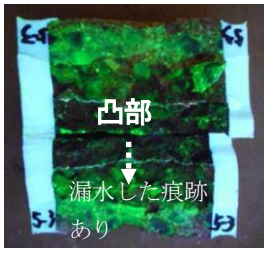


(b)試験概要

図－2　防水性試験Ⅱ　試験方法



図－3　試験体断面図



(a)試験結果

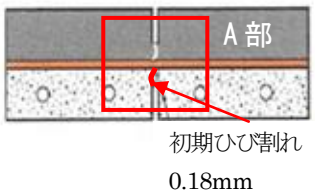
(b)漏水個所の考察

図－4　漏水箇所の推察

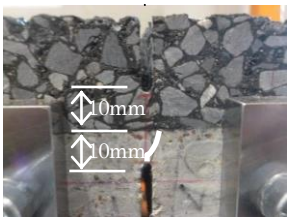
表－4　防水性試験Ⅱ　試験結果

試験ケース	想定	下地の状態	舗装	漏水照査結果		
ケース1	新設	平滑（ディスクサンダー）	密粒	1-1　漏水なし	1-2　漏水なし	1-3　漏水なし
ケース2	新設	平滑（ディスクサンダー）	SMA	2-1　漏水なし	2-2　漏水なし	2-3　漏水なし
ケース3	舗装補修	凹凸大（大型切削機）	密粒	3-1　漏水なし	3-2　漏水なし	3-3　漏水なし
ケース4	舗装補修	凹凸小（大型切削機+ブラスト）	密粒	4-1　漏水なし	4-2　漏水なし	4-3　漏水あり
ケース5	舗装補修	凹凸大（大型切削機）	SMA	5-1　漏水なし	5-2　漏水なし	5-3　漏水あり

(a)初期ひび割れの導入



(b)試験体断面図



(c)A 部拡大図

図－5　ひび割れ開閉負荷試験　試験体

舗設後の防水性が保持されていることを確認するため，防水性試験Ⅱ[4]を実施した．これは，図－2 のように試験体に舗装側から水圧 0.5MPa を負荷し，24 時間後に防水層からの漏水の有無で照査するものであり，防水性試験Ⅰ[4]と比較して条件が厳しいものである．

(2) 要求性能の設定

各ケース 3 体ずつ試験を行い，全試験体で漏水がないことを照査する．

(3) 試験結果

防水性試験Ⅱの試験結果を表－4 に示す．図－3 は試験体を 2 等分した状態を表している．ブラックライトを照射し，黄色く色がついた部分が漏水した箇所を表す．防水性試験の結果，以下のことが明らかとなった．

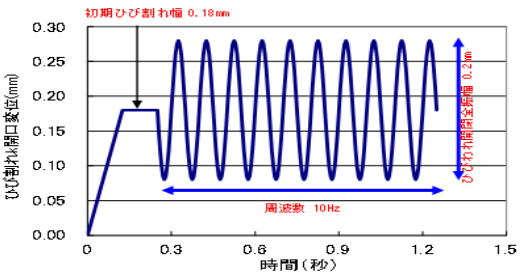
- 新設床版を想定したケース 1～2 では，全試験体で漏水は認められず，十分な防水性を有することを確認した．
- 舗装補修を想定したケース 3～5 では，9 試験体中 2 体が漏水した．表面に凹凸があるケースでは，漏水する場合があることを確認した．
- 表面に凹凸のある舗装補修を想定したケースでは，一般に水密性が高いとされている基層が SMA のケースおよび防水性の改善が確認されているスチールショットブラストを行うケース[7]においても，漏水する場合があることを確認した．
- ケース 5-3 では，図－4 のように凸部から水が拡散した痕跡がみられる．凸部が弱点となり，この部分から漏水したことが推察される．

4.3 ひび割れ開閉負荷試験

(1) 試験方法

ひび割れ開閉負荷試験は床版上面に生じたひび割れに対する防水層の耐久性を評価する試験で，欧州では防水層の性能評価項目の一つとして導入されており[9), 10)]，国内では東・中・西日本高速道路株式会社がグレードⅡの性能評価項目として試験方法を規定している[6)]．

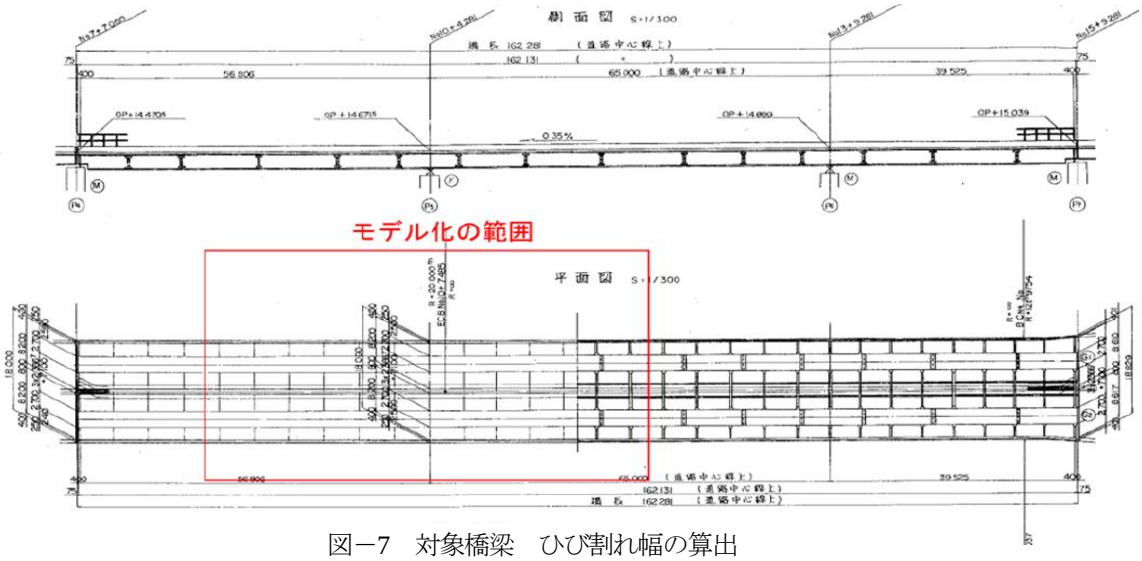
写真－2　ひび割れ開閉負荷試験機



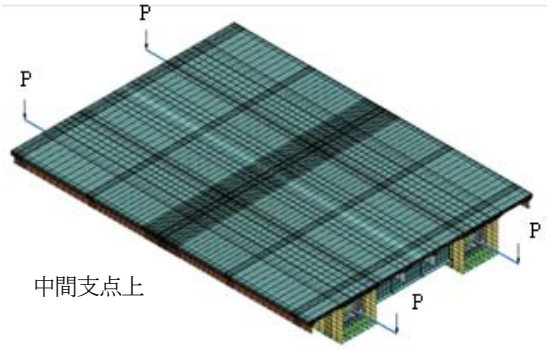
図－6　載荷パターン

表－5　材料特性　ひび割れ振幅の算出

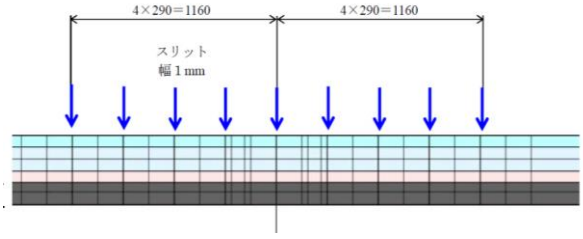
部　材	要素種類	弾性係数 (N/mm²)	ポアソン比
床版	ソリッド	26,500*	0.2
ハンチ	ソリッド	26,500*	0.2
配力筋	バー	200,000	0.3
主桁・横桁など	板・梁	200,000	0.3
舗装・防水層	モデル化しない		
節点数：392,367、要素数：110,148			



図－7　対象橋梁　ひび割れ幅の算出



図－8　ひび割れ量の算出　解析モデル

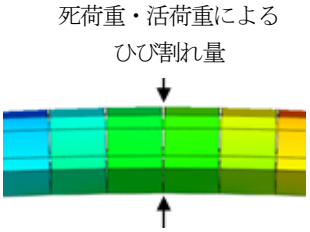


図－9　ひび割れのモデル化

試験体の初期ひび割れは，図－5 のようにまず試験体中央に防水層から 10mm 程度の深さまで切り込みを設け，曲げ載荷によりひび割れを誘発させ，その後コンクリート側のひび割れ幅が 0.18mm となるよう微調整する．次に，写真－2 の試験機を用いて，図－6 のように周波数 10Hz，振幅±0.1mm でひび割れ開閉負荷を加える．その後，防水性試験Ⅱを実施し，防水性を照査する．試験体は各ケース 2 体ずつとし，ひび割れ負荷後の試験体からそれぞれ 2 体ずつコア採取して防水性試験Ⅱを実施する．

(2) 要求性能の設定

初期ひび割れ幅及び開閉振幅は舗装自重及び大型車による活荷重を想定した FEM 解析によって算定した．既設橋として，図－7 に示す 3 径間連続非合成箱桁を想定し，床版上面が引張となる中間支点の前後 15m の範囲を解析した．対象橋梁は，道路橋示方書[12]（昭和 55 年）および阪神高速道路公団の設計基準[13]（昭和 55 年）に準拠しており，床版厚は 250mm，床版コンクリートの設計基準強度は 27N/mm² である．解析モデルを図－8 に，材料特性を表－5 に示す．非合成桁全体ををモデル化の対象とした．床版のひび割れ開閉が舗装と防水層による拘束を受けない状態を想定し，舗装と防水層の無い解析モデルとした．床版面には，図－9 のように，ひび割れを模擬したスリットを 290mm 間隔で設けた．スリット間隔（L）はコンクリート標準示方書[14]に示された曲げひび割れの算出式から鉄筋ひずみと収縮ひずみを除き式(1)により算出した．ここに，K_1：鉄筋の種類による係数，K_2：コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす係数，K_3：引張鋼材の段数の係数，C：配力筋のかぶ

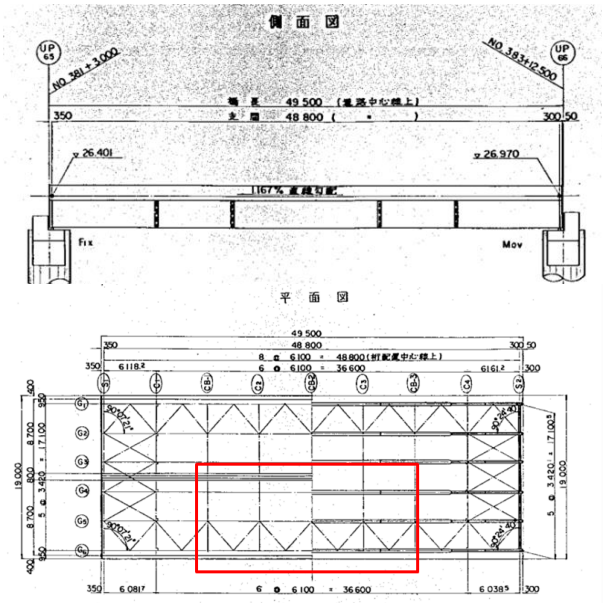


図－10　ひび割れの開閉量

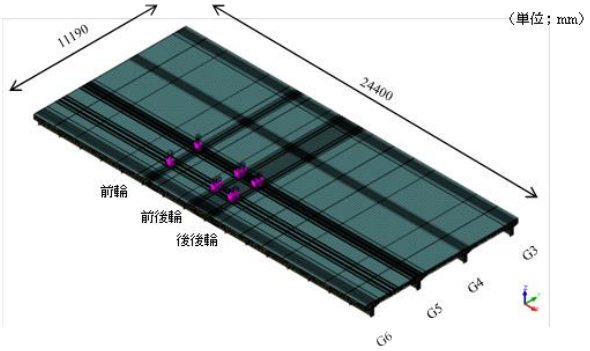
写真－3　せん断接着試験試験機

表－6　ひび割れ開閉負荷試験　結果

試験ケース	想定	下地の状態	舗装	試験体1			試験体2		
				1-1	1-2	破断時の繰り返し回数	2-1	2-2	破断時の繰り返し回数
ケース1	新設	平滑（ディスクサンダー）	密粒	漏水あり	漏水あり	12600回	試験体破断	試験体破断	12600回
ケース2	新設	平滑（ディスクサンダー）	SMA	漏水あり	漏水あり	25200回	漏水あり	漏水あり	25200回
ケース3	舗装補修	凹凸大（大型切削機）	密粒	漏水あり	漏水あり	初期ひび割れ時破断	漏水あり	漏水あり	初期ひび割れ時破断
ケース4	舗装補修	凹凸小（大型切削機+ブラスト）	密粒	漏水あり	漏水あり	初期ひび割れ時破断	漏水あり	漏水あり	初期ひび割れ時破断
ケース5	舗装補修	凹凸大（大型切削機）	SMA	漏水あり	漏水あり	初期ひび割れ時破断	漏水あり	漏水あり	初期ひび割れ時破断



図－11　対象橋梁　せん断応力の算出



図－12　構造モデル　せん断応力の算出

表－7　材料特性　せん断応力の算出

車輌速度	載荷時間	部材			
		舗装	防水層	床版	鋼桁
		ソリッド要素	面分布ばね	ソリッド要素	ソリッド要素
		弾性係数	ばね定数	弾性係数	弾性係数
km/h	秒	N/mm2	N/mm3	N/mm2	N/mm2
14.4	0.05	2,300	50	28,600	200,000
7.2	0.1	1,700	50		
3.6	0.2	1,400	100		

※温度：23℃

り，C_s ：配力筋の中心間隔，ϕ ：配力筋径とする．

$$L = 1.1K_1K_2K_3(4C + 0.7(C_s - \phi)) \qquad (1)$$

荷重はモデル両端に鉛直荷重 P（舗装自重：399.9kN，活荷重：938.0kN）を載荷する．床版にスリットを設け，舗装自重と活荷重を載荷し，図－10 に示すスリットの開き量からひび割れ開閉量を求めた．

ひび割れ開閉負荷試験におけるひび割れ振幅（W）は，解析で求めた活荷重による振幅（W_L）の 1/2 に安全率を乗じて±0.10mm と設定した．初期ひび割れ幅（W_0）は，解析で求めた舗装自重によるひび割れ（W_d），コンクリート標準示方書 [13]に基づき算出したコンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ（W_{se}）およびひび割れ振幅を足し合わせて 0.18mm と設定した．

載荷回数は阪神高速道路における 30 年分の大型車交通量に等価回数として 200 万回と設定した．

ひび割れ開閉負荷後に防水性試験Ⅱを実施し，全試験体で漏水がないことを照査する．

(3) 試験結果

ひび割れ開閉負荷試験の結果，表－6 のとおり全ケースで等価回数に達するまでに漏水が確認された．新設を想定した 2 ケース（ケース 1，2）はひび割れ開閉負荷中の 12,600～25,200 回，既設を想定した 3 ケース（ケース 3～5）は初期ひび割れ設定時点で漏水し，塗膜系防水層（アスファルト加熱型）はひび割れ発生下での耐久性に課題が残ることを確認した．

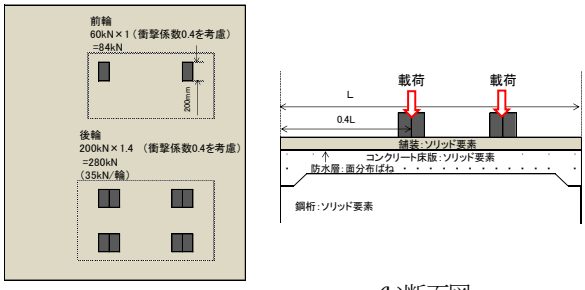
4.4 せん断接着試験

(1) 試験方法

本検討ではピーリング作用による試験体の破壊を防ぐため，試験体を写真－3のように15度傾けて試験を行う．荷重は変位制御で載荷し，載荷速度は1mm/分，100mm/分および500mm/分とし，外挿により走行車両の速度が80km/hの場合のせん断接着強度を算出する．

(2) 要求性能の設定

80km/h で走行する車両によるせん断応力は FEM 解析により算出した．床版厚が 220mm と薄いこと，縦桁の不等沈下による付加曲げモーメントの影響がないシンプルな構造であることから，図－11 に示す鋼単純合成鈑桁のスパン中央部分を図－12 のとおりモデル化した．材料特性は車両速度に応じて表－7 のとおり設定した．荷重は衝撃係数 0.4 を考慮し，前輪は合計 84kN/輪，後輪は合計 280kN とし，車両速度に応じた載荷時間で図－13 のとおり載荷した．せん断応力は各層がずれることで発生し，橋軸方向，橋軸直角方向に発生する応力のうち大きい値とし，車両速度 14.4km/h，7.2km/h，3.6km/h での値を算出した．なお，載荷時間はタイヤの接地長さ 200mm をそれぞれの車両速度で通過するのに要する時間としている．それぞれの車両速度でのせん断応力を式(5)に代入し，外挿により 80km/h でのせん断応力（τ）



(a)平面図　　(b)断面図

図－13　荷重条件　せん断応力の算出

表－8　せん断接着試験結果

試験ケース	想定	下地の状態	舗装	車両速度（km/h）	性能試験によるせん断接着強度（N/mm²）τu 供試体1	供試体2	供試体3	平均	80km/h外挿値	解析によるせん断応力τ（N/mm²）
ケース1	新設	平滑（ディスクサンダー）	密粒	14.4	0.24	0.24	0.23	0.24	3.451	0.165
				7.2	1.04	1.16	0.87	1.02		
				3.6	1.72	1.60	2.03	1.79		
ケース2	新設	平滑（ディスクサンダー）	SMA	14.4	0.23	0.22	0.23	0.23	3.094	0.165
				7.2	1.01	1.08	1.17	1.09		
				3.6	1.52	1.53	1.53	1.53		
ケース3	舗装補修	凹凸大（大型切削機）	密粒	14.4	0.35	0.36	0.36	0.36	3.44	0.165
				7.2	1.31	1.25	1.11	1.22		
				3.6	1.68	1.67	2.02	1.79		
ケース4	舗装補修	凹凸小（大型切削機+ブラ	密粒	14.4	0.38	0.38	0.33	0.36	3.453	0.165
				7.2	1.07	1.04	0.96	1.02		
				3.6	1.48	2.23	1.98	1.90		
ケース5	舗装補修	凹凸大（大型切削機）	SMA	14.4	0.30	0.29	0.24	0.28	3.349	0.165
				7.2	1.17	1.33	1.02	1.17		
				3.6	1.91	0.54	1.63	1.69		

を算出した．ここに，車両速度 14.4km/h でのせん断応力（$\tau_{14.4}$），7.2km/h でのせん断応力（$\tau_{7.2}$），3.6km/h でのせん断応力（$\tau_{3.6}$）とする．算出した 80km/h 外挿値を表－8 に示す．

$$\tau = 2.1(\tau_{3.6} - \tau_{14.4}) + 0.4(\tau_{3.6} + \tau_{7.2} + \tau_{14.4}) \qquad (5)$$

せん断接着試験により車両速度 14.4km/h，7.2km/h，3.6km/h でのせん断接着強度を算出し，外挿により車両速度 80km/h でのせん断接着強度（τ_u）を算出した．これを式(6)のとおり解析により求めたせん断応力（τ）と比較し，せん断接着性を照査する．

$$\tau \leq \tau_u \qquad (6)$$

なお，曲線・勾配区間や制動時のせん断応力がさらに大きくなる可能性はあるが，本検討では直線区間を 80km/h で走行する場合を想定してせん断応力を算出した．この値は，道路橋床版防水便覧 [4]に規定された基準値(0.15N/mm²)と比較して，わずかに厳しい値となっている．

(3) 試験結果

試験結果を表－8 に示す．すべてのケースで解析で算出したせん断応力よりせん断接着強度が大きくなっていることを確認した．

5. まとめ

本検討では，新設及び舗装補修（既設床版）を想定した RC 床版上に施工する塗膜系防水層（アスファルト加熱型）を対象に性能試験を行った．舗設後の防水性を確認する防水性試験Ⅱについては，新設を想定した 2 ケースでは漏水がなかったが，舗装補修を想定した 3 ケースでは漏水するものがあり，床版上面に凹凸のある場合に防水性が確保されていない可能性がある．ひび割れ開閉負荷試験では，ひび割れ発生下での床版防水の耐久性は，新設，既設を想定したケースを問わず，十分ではないことが確認された．せん断接着試験では，新設，を想定したケースとも十分なせん断着強度を有することが確認された．

今後は，凹凸やひび割れを有する RC 床版上での防水性・耐久性向上に向けた検討及び阪神高速道路の交通特性や工事の施工条件をふまえた床版防水の要求性能を基準化するため，既設 RC 床版への適用を想定し，各種防水材料を対象に性能評価を実施する予定である．

謝辞

本検討を行うにあたり，首都高速道路株式会社，名古屋高速道路公社および福岡北九州高速道路公社に防水に関する情報をご提供頂きました．また，一般社団法人日本建設機械施工協会には，本検討業務にご協力頂きました．ここに深く感謝の意を表します．

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，1987.
2) 複合構造を対象とした防水・排水技術研究小委員会：複合構造物を対象とした防水・排水技術の現状，土木学会論文集，2014.
3) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書，2012.3.
4) 社団法人日本道路協会: 道路橋床版防水便覧，2007.3.
5) 阪神高速道路株式会社：設計基準第 3 部（構造物設計基準），2016.1.
6) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第二集，2013.7.
7) 青野守，鬼丸三敏，篠田隆作，児玉健：RC 床版の素地調整技術の高度化検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，2014.9.
8) 阪神高速道路株式会社：土木工事共通仕様書，2015.10.
9) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法，2015.7.
10)谷倉泉，三浦康治：欧州における橋梁床版の防水システム，建設の施工企画，第 704 号，2008.10.
11)株式会社高速道路総合技術研究所，一般社団法人日本建設機械施工協会，一般財団法人災害科学研究所：欧州床版防水システム調査報告書，2009.3.
12)社団法人日本道路協会: 道路橋示方書，1980.2.
13)阪神高速道路公団：設計基準 第 2 部 構造物設計基準（橋梁編），1980.4.
14)土木学会：コンクリート標準仕様書，2013.

（2016 年 7 月 18 日受付）