

招待論文 輪荷重走行試験機を主体とした床版研究の動向

Review of Researches and Technologies on Highway Bridge Decks by Using Wheel Running Machines

松井 繁之
Shigeyuki Matsui

工博 大阪大学名誉教授・大阪工業大学教授 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷4)

Deterioration of the reinforced concrete slabs on highway bridges has been a severe problem in the bridge engineering. Through fatigue tests with wheel running machines developed in Japan, the failure mechanism and the fatigue strengths of RC slabs were clarified. In recent two decades, new types of bridge decks such as prestressed concrete slabs and steel plate-concrete composite decks have been developed as high durable decks for highway bridges and a remarkable innovation was introduced into the bridge engineering. The wheel trucking machines have contributed on the innovation in bridge engineering. The paper reviews those developments in the bridge deck engineering and overviews some problems to grade up the technologies.

Key word: highway bridge deck, deterioration, high durability, wheel running machine, fatigue test, new material, innovative bridge deck system

キーワード: 道路橋床版, 劣化損傷, 高耐久性, 輪荷重走行試験機, 疲労試験, 新材料, 新形式床版構造

1. はじめに

昭和39年道路橋示方書で設計された床版が、建設後4、5年で一部コンクリートが抜け落ちるといった劣化問題が報告されて以来、道路橋の路面を形成している鉄筋コンクリート床版の耐久性向上、および既存橋梁床版の維持管理が道路技術者にとって重要課題となり、約25年もかかったが非常に耐久性のある床版に改良された。さらに、経済成長の鈍化による橋梁構造の合理化、コスト縮減の要望により多数の新しい合成床版の開発、蘆科川橋を代表する長支間場所打ちPC床版の出現をもたらした。さらに、既存橋梁床版の補修・補強に関しても、種々の新材料・新工法が生み出されてきた。ごく最近では、鋼床版の疲労問題が関心事として技術者を席卷している。この疲労問題に関しても輪荷重走行試験機による疲労実験により解明が進んでいる。ここ35年間に、床版の劣化問題の解明・構造挙動に基づく設計法の確立等、技術革新に長足の進歩を遂げたと言える¹⁾。

これらの技術の進歩・革新において床版専用の疲労試験機として開発された輪荷重走行試験機による疲労実験が大きな貢献をしたことは周知のことである。輪荷重が移動することによる板構造特有の断面力の相乗効果が、

応力振幅を大きくし、早期の疲労をもたらすと認識させたことが最も基本的な技術革新と言える。この理論に基づき、細部構造を改良した種々の床版が出現したことは日本固有の科学技術と確信している。この技術をさらに発展させるとともに、諸外国にこの技術を広めたいものである。

以下では、文献1)でレビューした床版研究の変遷についての概要を述べ、続いて、輪荷重走行試験機を主体としたその後の床版研究の動向、新しい床版問題、課題を論説する。

2. 床版研究の変遷

2.1 床版に関する現状認識

ここ10年の間で、道路を代表する社会基盤投資が大幅に減少しており、建設のゴーサインがでていないもののプロジェクト費の縮減が余儀なくされ、橋梁建設における合理化が強く要求されている。このような状況で、少数主桁橋が出現したが、その上の床版に橋軸方向のプレストレスを導入する代わりに、橋軸直角方向にプレストレスしたプレキャスト版を桁上に配置し、プレキャスト版毎の連結はループ筋構造で行い、橋軸方向プレストレス

を省く工法が考案され、輪荷重走行試験での耐久性確認を経て東海大府高架橋に実施された。そのような工法の変革から、筆者はそれまでの床版分類法であった構造毎のものを、建設場所を考えて、「現場打ち床版」「フルプレキャスト床版」さらに「ハーフプレキャスト床版」の3種に分類することを提案した。現場工期の短縮が要求されるが、大きな重機を投入できない所では現場打ちコンクリート床版とせざるを得ない場合があるためである。同じ形式の床版であっても運送する時の重量によって、床版の製造方法を変えるべきであるためである。後述する鋼板を用いた合成床版はハーフプレキャスト床版（ハーフプレファブ床版というべきであるが）に中に入る。

2.2 RC床版の劣化損傷問題とその機構解明

RC床版の疲労破壊メカニズムの説明が輪荷重走行試験機の実験方法の採用によって可能となった。すなわち、走行する車輪荷重の繰り返しによって橋軸直角方向に貫通ひび割れが発生し、板構造が主鉄筋方向のはり並べたはり状に変化し、それらのはり状化した部分の主鉄筋断面がせん断破壊するメカニズムを明らかにし、それまでの定点に上下に脈動する繰り返し載荷する疲労試験結果に対して、10,000倍程度早く疲労破壊することを明確にし、実橋の疲労寿命推定が可能となった。さらに、アスファルト舗装に浸入した雨水がRC床版上面に発生している橋軸直角方向ひび割れに入り、そのひび割れの磨耗劣化を促進し、圧縮側コンクリートが骨材化すること、また、それによって疲労寿命がさらに300分の1~80分の1程度に低下することを示した。このような結果から、乾燥状態下での疲労試験結果からは床版の最大寿命が評価でき、水張り状態下での結果は最小寿命を推定するものであると言える。よって、実橋ではアスファルト舗装と床版の間に防水層を設置することによって最大寿命が期待できるので、有効な防水層を設置することが必須であると提言できた。

2.3 輪荷重走行試験機の普及状況

上記のような筆者の研究から輪荷重走行試験機の有用性が認められ、わが国で15基の試験機が設置されるにいたっている。現在の保有状況は、大阪大学方式のクランク式と呼ばれるものが8基、大阪工業大学方式の自走式のもの3基、その他として3基がある。クランク式の車輪は鉄輪が一般的であるが、一部はゴムタイヤも装着可能になっている。自走式の載荷輪は全てゴムタイヤであるが、実トラックの後輪のダブルタイヤで載荷できるが、大きな荷重を載荷したい場合にはジャンボジェット機のゴムタイヤを装着して実験できるようにしている。この場合には250kNの荷重が載荷できる。3番目のその他の一つは、自走式であるが走行距離が3m程度の山口大保有機、2つ目は日大が保有しているもので、載荷輪は固定されているが、支持桁を含めた床版が油圧装置で前後

に押し引きする独特のものである。3つ目は住友金属工業が保有する道路耐久性試験装置であるが、半径10m程度の円軌道上を実トラックを電動で回転走行させる装置である。トラックと回転装置の間を大きなシャフトで連結させている。この装置で、鋼板接着工法および増桁工法で補強した床版の補強効果の比較実験を行った経験がある。その他の4つ目として新しく施工総合技術研究所が保有しているものがある。荷重台車をチェーンで引っ張る方式で、左右のチェーンを交互に引っ張ることによって輪荷重が往復し、疲労試験ができる。

阪大での試験機は25年目に入るが、上記のほとんどの試験機は今もフル稼働している。床版研究がまだ活発であり、有効な研究成果は着実に蓄積されつつある。

2.4 床版の新技术と輪荷重走行試験機の役割

(1) コンクリート系床版での新技术

床版にプレストレス導入することが有効であることを輪荷重走行試験で証明できた。ただし、実物大床版では疲労破壊に至らしめるのは全く不可能と言える程大きなものである。床版厚6cmの縮小モデルで、かつ、小型の輪荷重走行試験機で実験を行った。結果として、導入したプレストレスが1.5N/mm²程度で、約50倍も疲労寿命が延びることが認められた。この程度のもので十分と考えられるが、長期のコンクリート特性（クリープ現象や乾燥収縮によるプレストレスの損失）を考慮して、2N/mm²程度を推奨したい。

現場でコンクリートを打設し、その硬化後に橋軸直角方向にプレストレスを入れることによっても疲労寿命が延びるが、このことは上記の橋軸方向プレストレス床版と同様に、橋軸直角方向の版剛性の向上によってせん断耐力も上がるためである。ただし、実験床版で大きなプレストレスを入れる場合には、ケーブル端部付近で大きな支圧力が働き、コンクリートに割裂ひび割れが入り、効果の検証ができない可能性があるため注意が必要である。

(2) 合成床版その他の方法

コンクリート系床版は床版厚が大きくなり、死荷重増による主桁の負担増、大型プレキャスト版の架設に大型重機が必要など、問題点が指摘される。その問題解決の方法として、鋼材を多用した鋼板・コンクリート合成床版の活用が考えられる。合成床版では鋼材に剛性増を期待でき、鋼材部分を工場でセミプレハブ化ができる。軽量の故に、現場では小さな架設機材で設置できる。後打ちコンクリートの型枠になる。かつ、剛性があるので支保工も不要、さらに、架設時の安全性が高い等の利点が見出される。コンクリートの硬化後はコンクリートと合成され、小さな床版厚でも大きな曲げ剛性を生み出す。これまで多種多様な合成床版が開発されている。筆者も合成床版の研究を多く行ってきた。グレーチング床版、ロビンソン型の鋼板・コンクリート合成床版、さらには、

サンドイッチ床版等の耐荷力や疲労破壊現象についての実験的研究、ならびに、疲労設計法の提案などの成果を蓄積している。成果は実橋に活用されている。

合成床版に関して輪荷重走行試験機による疲労実験から一つ特徴ある破壊形式を発見した。これはロビンソン型のスタッドの疲労破壊現象である。FEMによる解析の結果、スタッドには輪荷重の移動に伴ってせん断力が回転して作用することと、スタッドの溶接性が原因していることを明らかにした。より正確で多量の疲労データを収集するために、1本のスタッドに回転せん断力が与えられる特殊な実験装置を開発した。これらの疲労試験結果は従来のスタッドの押し抜き試験結果の1/4程度に落ちるものとなり、スタッドを使った合成床版ではこの現象を対象にした疲労設計を行う必要のあることを提案し、土木学会合成構造設計指針(案)に採用された。

鋼の代わりにFRP型材とコンクリートを合成したFRP合成床版も、腐食しない合成床版として共同開発し、輪荷重走行試験等の成果を積み上げて、実用化に成功している。現在は違った形式のFRP合成床版についての研究を継続している。

もう一つのプレキャストコンクリート版については、厚さを半分にしたPCプレキャスト版を型枠として桁上に並べ、その上に現場コンクリートを打ち足して一体化する工法のもので、道路橋への活用へ向けて輪荷重走行試験機を使用した研究も行い、実用化にこぎつけた。半厚で下側半分をプレキャスト化し、小さい重機で現場で架設し、残り半分を現場打ちコンクリートで完成する。両者のコンクリートが完全に一体させる必要があるが、その役目が自動溶接で製作されたトラス鉄筋であり、これをずれ止めとして水平せん断力を分担させることを特徴としている。このトラスの斜材はコンクリートのせん断補強筋として働くため、疲労耐久性が向上するのが大きな効果である。

これらの合成床版の活用が飛躍的に進んだのは大阪大学での輪荷重走行試験はもちろんであるが、建設省土木研究所で開発された階段載荷による輪荷重走行試験方法による開発企業との共同研究プログラムが造られたためである。16トンの荷重から4万回毎に2トンずつ増加させ40トン、52万回まで載荷するプログラムである。

(3) 研究の国際化

1994年にカナダ・ノバスティア州ハリファックスで開催された第3回中小スパン橋梁に関する国際会議において、主催者のマフティ教授らが進めていた床版開発が公開された。その床版は、内部には全く鉄筋を配置せずに、面外荷重に抵抗し得るとするもので、輪荷重に対して、コンクリートの内部で形成されるアーチ効果によって抵抗させようとするもので、常識を越えるものであった。ただし、下面に初期曲げモーメントによってコンクリートがひび割れることを防ぐために、コンクリートにチョップ状のポリプロピレン繊維を混入する、そして、支持

する桁の横方向変位を拘束し、アーチ効果を確保するために、約1m置きに鋼棒を主桁間に渡してフランジに固定している。カナダの研究グループは静的実験ならびに既往のジャッキを使用した定点載荷による疲労実験を行い、安全性を確認しているが、やはり輪荷重走行試験を行う必要を感じ、ポリプロピレン繊維の提供とコンクリートの配合をもらい、国際交流として大阪大学で実物大床版の疲労実験を行った。ある程度までは理論どおりのアーチ効果とポリプロピレンの補強効果による耐久性を示したが、ひび割れが床版支間中央で橋軸方向に1本しか発生しないため、ひび割れ幅が2~3mm程度の大きなものとなり、衝撃等が加わるとこの断面で破壊する危険性が強く懸念されたので、端部付近の床版にだけは最小量の鉄筋を配置することを勧告したのである。

韓国では日本と同様の床版問題をもっているが、日本と同じ設計法を採用するとともに、多数の過積載トラックが走行しているためである。そのため輪荷重走行試験機を持ちたいとの強い要望があり、その設計等の相談を受けた。留学生と共に試験機メーカーの技術者の指導を行い、韓国建設技術研究所に実現した。今後の研究成果を期待している。

2.5 既存橋梁床版の補修・補強の研究

既設の損傷を受けた床版の補修・補強方法に関して非常に多数のものが開発されているが、その主なものは①鋼板接着工法、②縦桁増設工法、③上面増厚工法である。これらの工法の効果・良否については、補修時期の選定、あるいは、対象とする床版の劣化度を正しく評価する必要がある。そして、当然、輪荷重走行試験機による疲労実験によって効果評価が各所で行われてきた。ただし、実橋では損傷の進行度の評価が適切に行われていない場合もあるので、実験どおりの延命度が期待できないと考えるのは安全側であろう。

最近の補強工事では新材料・新工法の活用が進んでおり、特に、鋼板接着工法に変わるものとして、炭素繊維シートやアラミド繊維シートを貼り付け工法がある。炭素繊維は鋼の10倍の強さと、鋼と同等から3倍程度のヤング係数を有するが、反面、非常に軽いという特徴があるため、ここ8年位の間で、鋼板接着工法にとって変わったと言える。炭素繊維シート補強の疲労試験データは数多く蓄積できている。それらの主な成果をまとめると、次のようなこととなる。

- (1) 床版下面全面に薄いシートを2方向に一層ずつ貼り付けるだけでも高い耐久性向上度が得られる。
- (2) 4層以上の場合には効果が減少する。
- (3) 10cm四方の隙間を設けて貼り付けても全面貼りと同じ効果が期待できる。
- (4) 床版厚15cmから21cm程度の厚さに共通するS-N曲線が整理できており、疲労設計が可能である。
- (5) アラミド繊維シートも同様な効果が期待できる。

2.6 独特な研究, 応用研究, 特殊研究

「独特な研究, 応用研究, 特殊研究」として輪荷重走行試験機を用いたコンクリート系床版に関する試験方法, 鋼床版に対する試験方法, ならびに, 輪荷重走行試験機の床版以外への活用例を以下に紹介する。

(1) 建設省土木研究所での疲労実験プログラム

非常に床版厚が大きい床版とか, PC 床版では通常採用されている輪荷重, すなわち, 計測された最大軸重 150kN やそれに衝撃を考えた 180kN 程度の荷重で実験すると疲労破壊に至らないことが多い。合成床版では最終破壊性状が不明のものが多いのはそのためである。土木研究所の元橋梁室長であった西川和廣氏(現, 国土交通省国土技術政策総合研究所研究総務官)は, 出来るだけ破壊の形式を知りたいと考えて, 初期荷重 16 トンで開始し, 4 万回走行毎に 2 トンずつ上昇させ, 最終の 40 トンでトータル 52 万回まで走行載荷する階段載荷法を考案した。最終荷重は試験機のほぼ最大荷重であったと記憶している。理由は, この試験法採用の前に, 床版 39 年示方書, 49 年示方書, 平成 8 年の示方書, ならびに 25%のパーシャルプレストレスした PC 床版について実験され, 結果として, 前者の 3 つは 16~18 トンで, 20~24 トン程度, ならびに, 28~32 トン程度で破壊し, 25%PC 床版は最後まで破壊しなかった結果に基づいている。先に述べたように多くの合成床版も最終荷重段階をクリアしている。

(2) 最近の鋼床版の疲労問題解明に輪荷重走行試験機を活用

道路橋の鋼床版にも多数疲労亀裂が発生しており, 現在その補修対策に関係者が頭を悩まされている。この疲労亀裂は世界的なものである。

わが国での鋼床版の歴史は約 30 年ということであるが, RC 床版の損傷が過積載車の載荷の影響であることと同様に, 鋼床版にも影響している。ドイツでの疲労亀裂発生位置はトラックが主に走る走行レーン下に限るとのことであったが, わが国では, 走行レーンはもちろんであるが, 追い越しレーンでも発生している。トラックがレーンを守らず, 走行レーンも多数走行しているためである。筆者もこの鋼床版に関する研究を 2005 年頃から継続的に行ってきた。一つは, 寒冷地で冬季に鋼床版上の舗装の凍結を防止するために舗装内に凍結防止剤を封入した角パイプを入れる構造の是非について検討するもので, 舗装の代わりに SFRC を使用することによって問題なく耐久性が確保できることをあきらかにした。二つ目は, 京都にある御幸橋が廃橋になるのに伴い, 使用していた鋼床版を供試体としていただき, 疲労亀裂発生の機構, ならびに, 上面にコンクリートを打設して合成床版化することによって高耐久性が得られることを実証する研究であった。バルブプレートを縦リブに用いたものであった。3 つめは都市高速道路のトラフリブを有する鋼床版の疲労亀裂補修工法検証のためのものである。

これらの研究を通じて, 鋼床版の疲労は 1.3m~1.5m 毎

に配置されている横リブを跨いで輪荷重が走行することによって横リブ各部の応力が交番すること, また, 縦リブ間あるいはトラフリブが曲げ変形と共にねじり変形し, 各部の溶接部に大きな曲げ応力が発生することが検証できた。従来の定点載荷法ではこのような現象が発生せず, これまで積極的な対策が採られて来なかった原因と推定している。SFRC 打設による合成鋼床版において, 亀裂発生点の応力は, 例えば, 縦リブと横リブの交点では応力は 40%程度に減少, デッキプレートと縦リブの溶接部では実に 5%程度に減少し, 疲労耐久性が大幅に向上する。これが合成効果である。

(3) 輪荷重走行試験機の床版以外の研究に活用した事例

平成 17 年の夏頃, 新聞で道路のガードレールの継目に得体の知れない三角形の鉄片が刺さっているとの記事が載った。その後, 2 ヶ月経った頃, ある企業の人が尋ねてきて, あの三角形の鉄片は自動車衝突して取れたものです。その防御方法として, 金太郎の前掛け状のものをその継手部に当てればよいと試作品を持参し, 中古車の自動車を購入して衝突実験を行いたいので, 意見を頂きたいとのことであった。方法論について検討した末に私の愛機であるゴンゴロにドアを抱かせ, 床版上に設置したガードレールに衝突させればよいとひらめいた。その技術者は即座に理解し, 2 週間で実験準備した。チャッカリと報道関係者も集めてきた。心配したが, ゴンゴロを一回転させて後は慣性力だけでガードレールに衝突させた。瞬時に実験が終了したが, 見事に再現に成功した。再現性が抜群の実験であった。この結果, 酔っ払い運転か, 未熟運転のため, 反対車線に突っ込みガードレールにあたり, 前ドアの前縁がガードレール(約 3mm 厚)の重ね合わさった部分に当たり, その衝撃で鉄板が破れて継目に刺さり, 剥ぎ取られたと断定できた。続いて, 金太郎の前掛けを当てた場合について実験したが, ドアは若干へこむが, 破れ現象は全く発生しなかった。非常に楽しい, ゴンゴロの実験であり, ゴンゴロの使用を拡張できる喜びを持った次第である。

3. コンクリート系床版の疲労破壊性状

3.1 単純版における疲労現象と設計の配慮

RC 床版, PC 床版, および合成床版ともこれまでのほとんどの実験は支持桁で供試体床版の左右辺を橋軸方向に単純支持し, 床版支間の 1.5~1.8 倍の長さの矩形版とし, その前後の短辺を弾性支持した単純版について行われてきた。そして, 床版厚 16cm~25cm 程度の床版に対して, 輪荷重を 100~250kN 程度の荷重を載荷している。結果として, 鉄筋の引張応力は降伏応力より充分小さいものとなり, 輪荷重走行試験では鉄筋は疲労破壊せずに, 押し抜きせん断破壊状のせん断破壊を呈する。鉄筋を疲労破壊させるにはより小さな荷重で 10^7 回以上の繰り返し数が必要であろう。鋼板・コンクリートの合成床版で

も同様の傾向があるようである。もし、合成床版の鋼板や補剛材の溶接部を疲労破壊させようとする、荷重を60~70kN程度に低下させる必要がある。ただし、鋼床版ではこのような輪荷重でも疲労破壊するのは、デッキプレート等の各要素の剛性が小さく、変形が大きくなるので、荷重の移動に伴い、交番応力が発生し、応力振幅が大きくなるためである。コンクリート系床版では部材厚が大きくなるため、鋼材に局所変形が発生しない。

合成床版に関する筆者らの研究や土木研究所での共同研究では全て載荷荷重は大きいのでほとんどの床版は最終的には押し抜きせん断破壊するので、鋼材の疲労の照査はもっぱら FEM 解析を行って溶接部の応力振幅を求め、3乗則か5乗則で荷重倍した応力と設計寿命中の載荷回数を予測して疲労被害度を算出して 1.0 より以下か否かで判定している。合成床版中のスタッドについては作用せん断力が自動車の走行によって作用方向が回転する特徴があるので、この回転を考慮した実験結果を参照して疲労耐久性を照査しなければならない。土木学会の合成構造物設計指針(案)では過去の実験からスタッドに作用するせん断応力が 50N/mm²以下になるようにスタッド配置間隔を決める場合には疲労照査は省力できる。

3.2 輪荷重走行試験機の違い、実験方法の違いによる統一化

第2次道路橋床版委員会(委員長 堀川都志雄大工大教授)の時に、たくさんある輪荷重走行試験機によって、例えば、軌道装置等に相違があり、実験結果を単純に比較することは出来ないと容易に想定できるので、実験結果の統一評価が出来るようにしたいということで、同じ条件で試験体を製作し、それぞれの輪荷重走行試験機で実験をしていただくことになった。その実験が予想どおりに進行できず、少々時間が取られた。かつ、試験体の精度にも問題があり、簡単にはパラメーターを選んで比較してもよい成果は得られていないようである。ただし、阪大方式と土研方式によるクランク式の結果と、東京都土木研究所のジャンボタイヤを使用した自走式の結果の整合性を図るパラメーターは見付かったようである²⁾。

図-1(a)は単純に各所の試験機による車輪の接地面を利用し、松井式で評価した S-N 曲線であるが、全2者と後者のもので大きな隔たりがあるが、ジャンボタイヤの車輪の接地長を阪大と土研の平均値であると仮定すると一応は3者のデータは図-1(b)に示すように一つの S-N 曲線で表現してもよいようにまとまりを見せた。ただし、ショーボンド建設の結果が鉄輪の結果と同じであるのは、使用しているジャンボタイヤにウレタンを注入しているためと思われる。以上のような検討は無理矢理、松井が求めた S-N 曲線まわりに分布させ、説明を簡単にしようとしているとの批判もあるようであるが、私は一つの説明を可能にする方法論であると確信している。

同様のことが、一つの合成床版の S-N 結果がやはり下

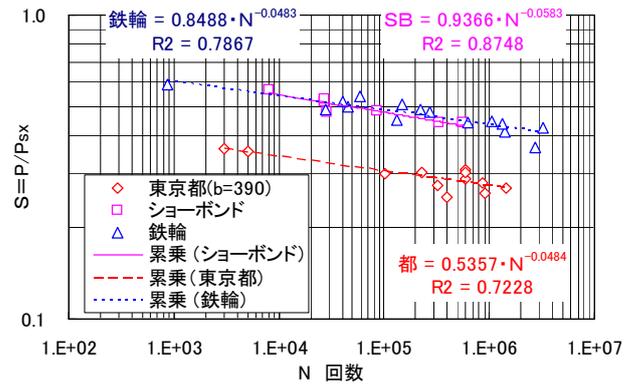


図-1(a) 試験機別 S-N 曲線

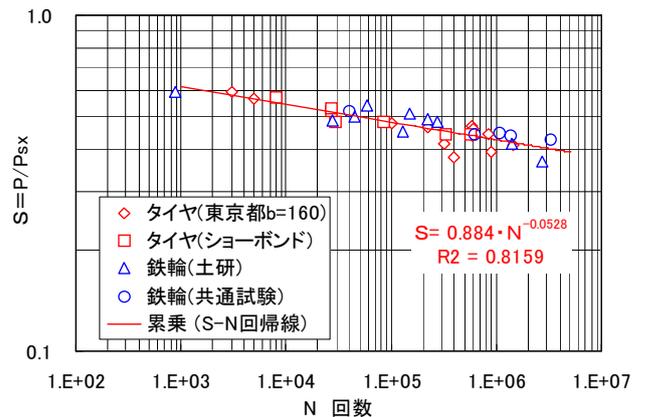


図-1(b) 統一化された S-N 曲線

記のような取り扱いをすれば RC 床版で得られた S-N 曲線上に疲労試験結果がプロットできると報告している³⁾。

破壊機構も押し抜き型の破壊であることと、引張側鋼板がコンクリートの外側にあることから押し抜きせん断破壊時の下側鉄筋によるかぶり破壊が起らないと考えて、 P_{sx} を下記のように設定した。

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{smax} \cdot x_m \cdot B \quad (1)$$

$$B = b + 2d_d$$

ここに、 τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度
 x_m : 合成床版主鉄筋断面の中立軸位置
 B : 疲労に対する床版のはり状化幅
 b : 橋軸方向の載荷板の辺長
 d_d : コンクリート床版厚

その結果として、合成床版の疲労データは少ないものの、疲労データは図-2のように RC 床版の S-N 曲線上にプロットできた。このような一致から、合成床版でのはり状化後の押し抜きせん断破壊モデルが無理の無いものと評価できる。ただし、合成床版の疲労耐久性は非常に大きいので、破壊まで実験した事例が非常に少なく定量化できていないと批判されるところである。

このような問題から、国土技術政策総合研究所と大阪

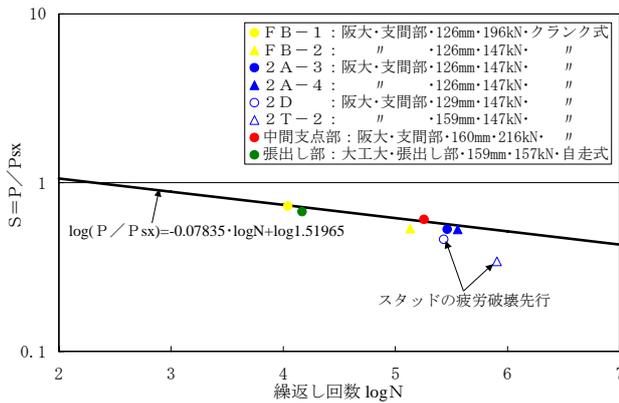


図-2 合成床版のS-Nデータ

大学、九州工業大学、ならびに日本橋梁建設協会の共同研究で、道路橋床版の疲労破壊を解析的に追跡できないか否かを検討する研究を進め、平成20年8月に一応の成果がまとめられた⁴⁾。筆者は輪荷重走行試験方法を開発し、ほぼ説明できる成果が得られるようになったと自負しており、疲労現象を安易に解析的に求められないよと言ってきたが、解析を進めるために、経験した挙動を解析担当者に説明してきた。数値解析を合成床版にも適用できることをアピールすればよいと考えている。

3.3 片持ち部床版の疲労損傷

片持ち部床版部は道路橋では必ず存在する。この床版の設計も示方書によって曲げ応力で断面決定する許容応力度法に拠っている。ということは、荷重が繰り返し作用すると引張側鉄筋が疲労破壊するものと予想できるが、輪荷重走行試験による研究が2, 3あり、それによると単純版と同様にせん断破壊する。ただし、破壊は図-3に示したように輪荷重の主桁に近い側のエッジを起点とするせん断破壊を呈する。破壊面は輪荷重縁端から主桁に向かって斜め下方向である。この疲労破壊に対するS-Nデータは単純版と同様のはり状化幅で、全荷重が上記の破断面の1面で作用し破壊すると考えると、既往の単純版のS-N曲線上にプロットできる。

ただし、通常、片持ち部には路肩が存在し、常時設計で考えるような位置で自動車が走行することは無いと考えられるので、疲労破壊に至る走行回数までには至らず、疲労照査の必要は無いように思われる。現行の曲げ応力に着目した許容応力度法で設計しておけば十分な疲労耐久性は確保されていると考えてよい。

鋼板・コンクリート合成床版の片持ち部でも一つ疲労実験し、その疲労耐久性を検討した研究報告があるが、はり状化幅が補強リブ間隔、あるいはその間隔が大きい場合にはスタッドと補強リブの間隔に支配されるので、その間隔をはり幅と考え、かつ、合成床版特有の下側鋼板位置での剥離破壊の抵抗力が無いものとした下記のような式を静的せん断強度 P_{sx} とすれば、実験データ(張出し部)は図-2のRC床版のS-N曲線上にプロットできる³⁾。

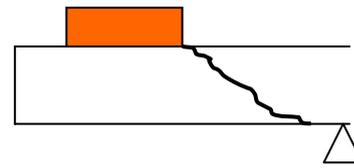


図-3 片持ち部床版の輪荷重による破壊性状

$$P_{sx} = \tau_{smax} \cdot x_m \cdot B \quad (2)$$

3.4 軽量コンクリート等を用いたRC床版の押し抜きせん断強度の研究の動向

普通コンクリートに対して軽量コンクリートの強度はほぼ同じであるが、ヤング係数が小さいことや骨材強度が低い等の特徴から、松井らが提案している押し抜きせん断耐荷力式で強度推定することができない。このため、特にせん断強度については純せん断試験等を行って調べ、それを適用する必要がある。この研究に郭ら⁵⁾、東山ら⁶⁾の研究がある。

3.5 特殊環境にある床版の問題

北海道では冬季の低温が長く続くことによるコンクリートの凍害が大きな問題であり、新設時における凍害対策は材料配合、施工によって対応が図られるが、それだけでは十分ではなく、床版内に舗装からの水を浸入させないよう防水層が設置されなければならない。既設床版では上記のような対策が十分行われていないものについては、床版上面において凍害によるコンクリートの骨材化が橋面全域において発生しているようである。このため、北海道では維持管理においては冬季の凍結融解作用に対する点検、診断、修繕に特別に配慮しなければならない。損傷があると圧縮側コンクリート厚が減少すると同じであるので、大きく疲労寿命が低下する。水および塩分を通さない高機能の防水工を採用することによって長寿命化を図る必要がある。

3.6 市町村における生活道路の床版の維持管理

市町村道は一般に道路幅、車線幅が小さく、中型車以下の自動車が通行する地域密着型であり、その中に架かる橋梁は古いものは設計荷重が小さいが、最小床版厚は15cmであるので、輪荷重による疲労損傷は少ないと経験している。しかし、ほとんどが全くと言ってよいほど維持管理がなされていない。床版下面への漏水、遊離石灰の沈着、かぶりコンクリートの剥落等の水がらみの環境劣化が主体である。損傷が激しく、疲労範囲に発生している場合には耐荷力の問題もあるので維持修繕が必要であろう。損傷が激しくない場合には表面からの水の浸入を止める防水層の設置は必ず行うべきである。これらの市町村が管理する橋梁の維持管理に関して、国土交通省が道路橋長寿命化修繕計画策定事業補助制度⁷⁾を設立し、若干であるが、各市町村が点検マニュアルを作成し、そ

れに従って維持管理している場合には、将来に橋梁が損傷して大きな補修や取替えの費用が生じる場合には補助できるとしている。当面は上記の点検マニュアル作成の段階で若干の補助金を出すとしている。これまで、我々が対象にしていた床版は重交通路線の国道や高速道路に架かる橋梁床版であった。しかし、市町村管理橋梁にも目を向け、技術支援をする必要がある。幸い、私立大学や工業高等専門学校がその地域の橋梁の点検や診断のために社会貢献プログラムを立ち上げ始めている。これらの活動の更なる拡大を期待したい。

4. コンクリート系床版の損傷対策の最近の傾向

補修補強した床版の補強効果などについても輪荷重走行試験を行い、適度に大きな荷重を載荷しても破壊に至らないことによって検証している。

しかし、実橋においては実験で予測するよりもはるかに早く再損傷を呈することがある。原因の一つは設計どおりの補修・補強工事が行われていなかったことと推定される。コンクリートに関しては材料の選定が悪い、配合が不適切、施工時に雨が降った、バイブレーターが一樣にかかっていなかった、脱型が早すぎた、等の原因が伺える。鋼構造では溶接の良否、高分子材料では気温に対応した材料でなかった、塗布面に水分が残存していた、内部に気泡が入った、等の施工不良がある。さらに、設計での配慮不足、経験不足、計算ミス、等も原因していることがある。例えば、経験不足の一例は、床版の損傷は輪荷重によるせん断疲労であるので、せん断力を減少させるような配慮が必要であるのに、曲げの観点からモーメントを小さくなる縦桁補強を行った場合、再損傷が早期に起こったことがある。

床版補強では最近縦桁補強や鋼板接着工法が減少し、炭素繊維シートやアラミドシートを床版下面に貼る工法に取って代わられている。施工の容易さに原因している。時々、損傷ランクが進んだ所でも炭素繊維シートを貼り付ける設計がされ、判定を求められる場合があるが、その場合には鋼板接着工法を推奨している。炭素繊維シート接着はひび割れの開口を止めて、ひび割れ面の磨耗劣化を防ぐことにより延命するものであるが、母床版のひび割れには樹脂が入らない。鋼板接着の場合には低圧によりエポキシ樹脂を充填するので、ひび割れにも樹脂が浸潤し、ひび割れの修復もできるので、飛躍的な回復があり、延命期間も大幅に伸びることが実験的にも証明できる。

一方で、鋼板接着工法で補強済の床版に対する維持管理方法を心配している機関もある。鋼板を下面からたたき点検して、鋼板が剥離していると判定した場合には、樹脂の再注入を行うことになっているが、その程度は？ということである。筆者は過去の補強床版の実験ならびに合成床版の実験を通じて経験したのは、鋼板の剥離は

本当に載荷初期から起こるが、それによる剛性低下はほとんど無いことである。このような剥離を無くすことは神業に近いことで、非常にコストが大きくなる。鋼板接着床版の場合、剥離領域が全面積の60%程度になると若干の剛性低下があるが、アンカーボルトは全く健全に残っている。アンカーボルトがゆるむようになると合成効果が低下するので要注意となる。以上から、筆者は鋼板接着した床版では鋼板の端部から漏水が無い場合にはほとんど心配は不要であろうと考えている。

旧JHのNEXCOが開発した床版補強工法が上面増厚工法である。鋼繊維入りコンクリートを床版上面に打設して旧床版と一体化させるものである。厚さは5cm程度であるが、床版の曲げ剛性の向上が大きく、有効な工法と言える。ただし、走行レーンと追い越しレーンを分割施工することと、その分割位置を施工時の安全性確保のためにレーン境界から走行レーン側に70~90cm離れたところに設けられる。この位置が走行レーンを通行するトラックの右側車輪の最頻通行位置になっており、分割目地部の施工が悪いと水が入るなどしてSFRCの下の母床版が再劣化するようである。施工パネルの1~2%程度に施工後の再劣化の問題を持っていると聞いている。分割目地部の施工法について改良を加える必要がある。

5. 鋼床版の疲労損傷対策

鋼床版の疲労問題は年を重ねるほど増加しているが、管理者にはその補修・補強は大変煩わしいものと推察できる。補修費用が潤沢にある場合には一気に資金を投入できるが、今は道路財源が乏しくちまちまと治さざるを得ない。その補修の方法についても抜本的というものが無い状態である。鋼床版自身が複雑な溶接構造物であることと、ダブルタイヤの輪荷重の移動に伴って複数個所で局所的な応力集中を独立に誘発しているためである。全ての局所応力集中箇所を同時に補修する必要があるが、応力集中箇所毎に補修・補強方法が異なることがコストと時間を食っている。

これまで鋼床版の疲労損傷対策として取り上げられてきた工法をみると、

①トラフ形状の縦リブと横リブの交差部のスカーラップからの疲労に対しては、縦リブ下フランジと横リブスカーラップ部の橋軸方向変位の相対変位差を無くすことが有効である。写真-1に示すようにアングルで両者を結合する方法がある⁸⁾。

②トラフ形状の縦リブあるいはバルブプレート形の縦リブとデッキプレート間の連続隅肉溶接部の疲労に対しては、輪荷重の走行に伴うリブのねじり変形が原因している。このため、ねじり変形を抑える工夫が必要であり、トラフの中にコンクリート等を充填し、ねじり剛度をあげることが有効である⁹⁾。

また、この隅肉溶接部の両側にダブルタイヤの後輪が

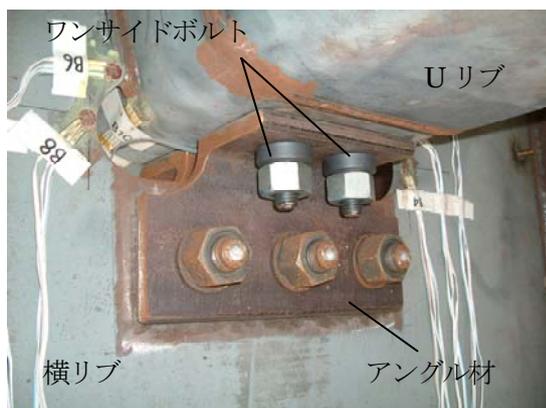


写真-1 アングル補強

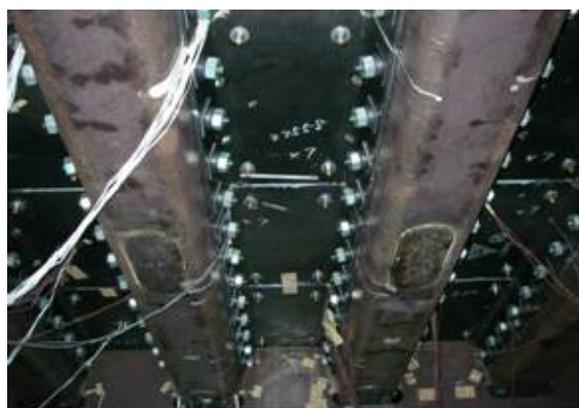


写真-2 デッキプレートへのチャンネル補強

載る場合があり、その時にはデッキプレートに局所的な負の曲げモーメントが発生し、溶接部に大きな圧縮応力が発生する。デッキプレート表面には引張応力が発生する。溶接部には引張の残留応力が存在しているため、デッキプレートの上面、下面側とも疲労亀裂が発生してもよい状態となる。実橋でデッキプレートに貫通亀裂が発生し、路面が陥没する事例も発生していることと符号する。このようなダブルタイヤ載荷に起因する亀裂予防にはデッキプレートの補強が有効ということで、リブ間のデッキプレートの下面に写真-2に示すようなチャンネル形状の板を当て、トラフリブのウェブで高力ボルトによって固定する方法が試みられている¹⁰⁾。

③主桁の垂直補剛材とデッキプレートとの交点の隅肉溶接部において、デッキプレートに補剛材を先端からハの字型の貫通亀裂が発生する。輪荷重がその近傍を通るためにデッキプレートの曲げ変形が補剛材によって拘束されることが原因している。この亀裂の予防対策としては垂直補剛材の上端部にドッグボーン形状の切り欠きを設け、拘束を和らげる方法が提案されているが、合理的な方法であると評価できる¹¹⁾。

以上のように疲労亀裂毎に有効な予防対策例を紹介したが、上記したようにこれらの予防保全対策を全て講じることが経済的に不可能に近い。

④そこで考えられるのが鋼床版の上面にSFRCを打設して合成鋼床版化することである。50mm～70mm程度の厚さでSFRCを打設することによってデッキプレートの合成は大幅に向上し、上記②の疲労亀裂には特に有効となる。また、③の亀裂にも荷重分散効果と曲げ変形抑制が働き有効である。①の亀裂に対しても鋼床版全体でのねじり剛度が向上するので疲労寿命は20倍程度向上すると推測される。筆者もバルブプレートあるいはトラフリブを用いた鋼床版に対して輪荷重走行試験によって大きな長寿命化率を実証している^{12) 13)}。ただし、この工法の場合には交通規制が必要となるが、管理者は万難を排して交通規制期間を確保すればこの最も効率的な予防保全対策を施すことができ、コストも少なくともすむことを認識してほしいものである。

6. 高性能床版防水システム導入

6.1 床版防水の必要性

既存橋梁床版の損傷は大きな輪荷重載荷による疲労現象であり、それに舗装に浸み込んだ雨水が床版上面に発生しているひび割れに入り、ひび割れ面の磨耗を促進させる加速要因であることは周知となっている。水の浸入、漏水は床版に絡むものが多いが、それ以外に伸縮継手部や地覆前面、排水枘回り、歩車道境界からの漏水が鋼部材の腐食劣化をもたらしている。寒冷地ではその水に塩分を含むので、腐食は加速されている。

このような水に絡む劣化現象を防止する方法として橋面防水層を設けること有効である。筆者は塗布系で高性能防水層として開発されたウレタン防水を施して水張り状態で輪荷重走行試験を行ったが、床版への水の浸入がなく骨材化が十分な回数まで防止できることを検証できた¹⁴⁾。平成14年の道路橋示方書でコンクリート系床版に防水層を設置することが義務づけられたこと¹⁵⁾は時宜を得たものと言える。以下に漏水現象の事例を示す。

床版下面においてひび割れに沿って遊離石灰が沈着している損傷状態は日常茶飯事であり、これが床版へ水が浸入している証拠である。それらの遊離石灰に泥が混じっている状態(写真-3)になるともう末期状態といえる。

ただし、局所的である可能性がある。このような場合、写真-4に示すように床版上面の舗装も傷んでいるのが一般的である。それらの部分が部分補修されることがある



写真-3 床版下面の遊離石灰沈着



写真-4 舗装のひび割れ損傷



写真-8 床版を支持する桁の腐食



写真-5 補修した舗装の再損傷



写真-6 舗装下の床版骨材化



写真-7 床版を支持する桁の腐食

が、施工が悪いと写真-5 のように再損傷を起しやすい。これらの損傷箇所を舗装をめくると写真-6 のようにコンクリートが骨材化している。放置すると陥没し床版に孔が空き、大事故に繋がる。

走行する自動車荷重が小さく、床版の疲労損傷が酷く

なくても、床版コンクリートが良質でない場合には雨水が床版を貫通し、床版を支持する主桁等の腐食を招くことがある。写真-7 は歩道の下の部分での支持桁腐食の事例で、写真-8 は大型車交通量の多い車道下での主桁フランジまで錆びた事例である。さらに、雨水は主桁から端横桁、端対傾構、支承にも伝わり、これらを腐食させると共にそれらの機能を低下させる。ひいては橋全体の機能低下、安全性低下も引き起こす。床版上面の雨水の下への浸入を完全に遮断する防水層の設置が必要な訳である。

6.2 高機能防水システムの開発

防水層を施工してもブリスタリングを生じて舗装にポットホール損傷発生や、貫通ひび割れ部や排水口および伸縮装置周りからの漏水があり、補修される事例も多く見受けられる。このように防水層が本来有すべき性能を発揮できない原因としては、

- ・防水層の性能不足、防水層端部処理の不具合
- ・床版コンクリートの表面処理不良
- ・防水層とコンクリートおよび舗装との接着不良
- ・保護層(舗装基層)の影響(熱、キズ等)

等が推定される。

我が国の床版防水は、歴史が浅いこともあって防水性能が十分でなかったのも事実であるが、防水層は高い水密性や遮塩性と共に、交通荷重や温度などの荷重作用に対する耐久性が求められる。このためには、床版防水は防水性能だけの機能だけではなく、「床版+防水層+舗装」の三位一体のシステムとして機能して初めてその要求性能が達成できる。

ここ10年の間に我国でも高機能防水材料としてシート系、塗布系が開発されてきたが、これらに対する合理的な評価方法が無いため、筆者は高機能床版防水工研究委員会を立ち上げ、既存の試験方法による評価に加え、道路橋特有の現象を考慮した新しい試験方法を開発し、システムとしての評価を実施し、開発されている多数の防水材料の比較検討とともに評価方法、ならびに施工法の留意点をまとめた¹⁶⁾。防水層と床版との間に作用するせん断付着力に対する評価法として回転せん断疲労試験機



写真-9 せん断着疲労試験機全景

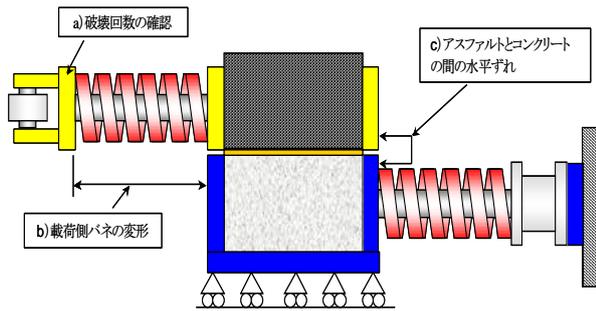


図-4 荷重原理

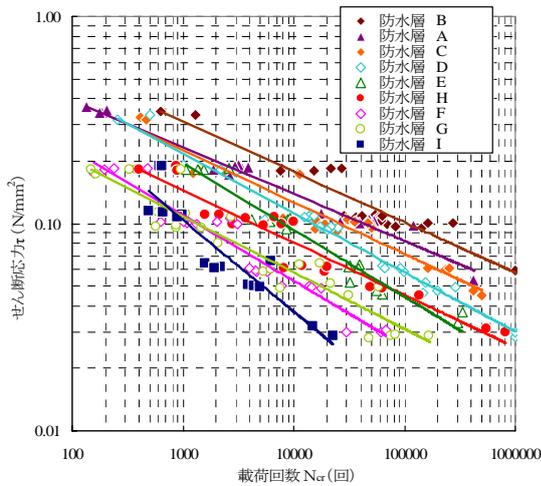


図-5 各種防水層のせん断疲労強度結果

による方法を開発した。写真-9は回転せん断疲労試験機であるが、原理的には図-4に示すように「舗装+防水層+床版」の3層モデルに舗装部前面から荷重を載荷し、床版部背面で反力支持し、中央の境界部にある防水層に繰り返しせん断力を与え、せん断に対する疲労耐力を求めらるものである。

試験結果は図-5に示すとおりで、上から3つのS-N曲線が速硬化性のポリウレタンおよび新しく開発されたアスファルトシートの高機能防水層の結果で、中間の3つが従来型のシート系の結果、下から2つ目が防水層なしの結果である。その上下の2つが流し込み型の防水材の結果である。上方の高機能防水層では防水層と床版の間、

および防水層と舗装との間の接着力が大きく高められていることが理解できる。価格は品質向上に伴い高くなっているが、LCC的考えと安全・安心の面で採用が増加することを期待したい。

6.3 欧州での防水システムの調査

コンクリート構造物の維持管理について長い歴史を有する欧州においては、厳しい気象条件域に位置することから、早くから凍結防止剤の散布に伴う塩害の発生に着目し、補修や予防保全等による劣化対策として合理的な防水システムを導入している。この合理的な防水システムを導入しているドイツ、スイスおよびイギリスに訪問調査を行った¹⁷⁻¹⁹⁾。以下で、これらのヨーロッパ諸国での防水工の施工の現状について概要を紹介し、今後の我が国の防水工のあり方の参考に供したい。

欧州ではドイツ規準(ZTV-BEL-B)、スイス指針SN 640540、イギリス規準(BD47/99)などがあり、各指針では、防水システムの適用範囲、使用材料への要求性能、設計・施工基準、労働条件および環境問題、受取りおよび保証、維持管理に関する内容が規定されている。

ドイツやスイスで用いられる防水システムは、図-6に示すように、アスファルトシート1層、あるいは2層、およびポリウレタン等(塗膜系)の3種を規定している。この内、1層シートのものが最も多く用いられている。イギリスではポリウレタン防水が多く採用されている。

注目したのはその施工方法である。欧州ではコンクリート床版上面の下地処理を重視しており、ウォータージェット(WJ)やブラストにて表面処理した後、プライマーを塗布して微小な空隙を埋めた後、防水層が施工される。このプライマーは床版内からの水分の放出を防止し、防水層でのブリスタリングを抑制している。そして、防水層の上には保護層(舗装の基層)の舗装が施されるが、これにグースアスファルトが使用される。最後に表層が舗装される。このような構造を見ると、3重の防水工となっていることと理解できる。コンクリート表面のWJやブラスト処理は防水層の接着を確実にするもので、この丁寧な施工には驚いた。

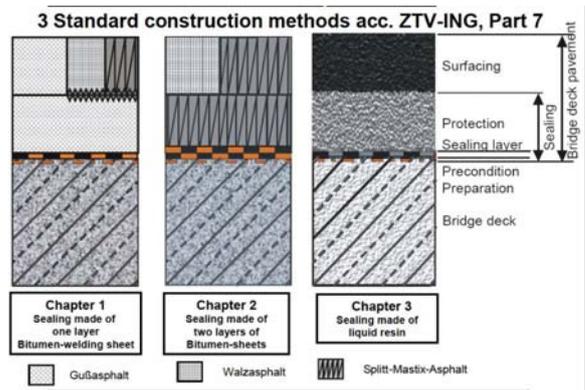


図-6 ドイツでの防水工の種類

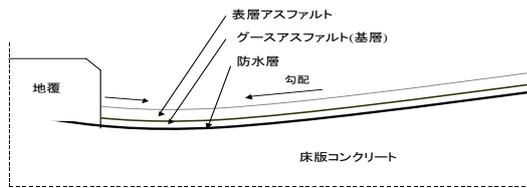


図-7 ドイツの典型的な防水システム

保護層にグースアスファルトを用いる理由は、防水層上の排水問題を解決するとともに、防水層が傷つくことを防いで耐久性を高めることにある。舗装厚は、防水層がアスファルトシートの場合 75-90mm で、液体合成樹脂(ウレタン樹脂)の場合 80mm となっている。

使用材料についても厳しく規制されており、一般原則として、使用する材料は基礎性能試験によって認証された製品とし、かつ工場検査が 5 年以内に実施されたものでなければならない。例えば、防水シートそのものの要求性能については、欠陥の有無等の表面性状、長さ・横ズレ・厚さ等の形状と質量、耐熱性、吸水率、最大引張力、破断時伸び、高熱時の形状安定性、高温時の安定性(160°C, 1 時間後)、冷間曲げ性能、耐高熱性、冷間耐久性などが細かく規定されている。また、保護層がグースとアスコンでは要求性能が若干異なるが、コンクリート下地面や保護層との引張接着強度、せん断強度、ひび割れ追従性、熱間耐久性、防水層の形状変化や挙動等について規定が定められている。

液体合成樹脂防水層は、耐熱性、耐久性に富み、上のアスファルト舗装に適合するポリマーを使用するものとしており、引張強度、破断時伸び、ショア硬度、空隙率が規定されている他、コンクリート下地面や保護層との引張接着強度、ひび割れ追従性、グースアスファルト下面のプリスタリングについての規定もある。

さらに敬服したのは橋面排水に対する細かな配慮である。図-7 示したように、床版端部での地覆前面の床版表面形状を若干窪ませており、まさかのことがあるので、舗装に浸入し防水層表面に到達した雨水を地覆前面の窪みに集め、橋軸方向に導水し、途中で設けられた排水枡の側壁に入るようにしているのである。

我国では時々、床版防水を施工したが、張出し部床版に漏水が発見されることがあり、防水層の施工が完全でないと非難されることがある。このような事例では、防水層を地覆前面で止めていることによって、その端部から地覆のひび割れに漏水したと考えられる。防水層を地覆前面で立ち上げることが必要であるが、ヨーロッパでは防水層を地覆内まで延長するのが一般的であると言われている。このような構造詳細を我国へ導入することを真剣に考える必要があるといえる。水は本当にどこからでも入るので厄介である。構造物において水の浸入を如何に制止するか！これが維持管理の最大の課題である。欧州における防水システムの考え方の基本を導入するこ

とは、維持管理コスト縮減への貢献は極めて大きいと思われる。

7. おわりに

本論文では床版に関する疲労問題にのみ焦点を当てたレビューを行った。この他にも、使用材料、施工法の改良・改善も図られており、さらなる床版構造の発展に研究を期待したい。さらに、維持管理手法の最近のファッションになっているブリッジマネジメントシステム(BMS)やアセットマネジメントシステム(AMS)の構築に、床版が大きな割合を占めるが、そのためには実橋での床版の劣化速度関数の構築が必要である。これまでの輪荷重走行試験機による実験成果の活用を如何に図るかが今後の課題と言えよう。ここ 10 年で橋梁全体の構造が大きく変わったのは床版の耐力・耐久性が輪荷重走行試験機による実験によって有効な成果が得られたためである。これが輪荷重走行試験機が果たした大きな貢献といえる。更なる貢献を期待して、筆を置きたい。

参考文献

- 1) 松井繁之：床版研究の変遷と輪荷重走行試験機の役割，第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.1-12，2006。
- 2) 関口幹夫，長屋祐子，横山 広，大西弘志：ゴムタイヤ式輪荷重走行疲労試験機による RC 床版のはり幅の検討，第 6 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 21-26，2008。
- 3) 街道 浩，松井繁之：鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のせん断疲労強度評価，土木学会論文集，A Vol.64, No.1, pp.60-70，2008。
- 4) 国土交通省，大阪大学，大阪工業大学，九州工業大学，(社)日本橋梁建設協会：国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書—道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究，国総研資料第 472 号，2008。
- 5) 郭 勝華，日野伸一，山口浩平，崔 智宣，山田岳史：鋼繊維補強された軽量 2 種コンクリート版の押抜きせん断耐力の評価，第 6 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.1-8，2008。
- 6) 東山浩士，水越睦視，松井繁之，青木真材：繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐力，構造工学論文集，Vol.54A, pp.703-712，2008。
- 7) 国土交通省道路局長：長寿命化修繕計画策定事業補助制度要綱について，国土交通省HP，2007。
- 8) 服部雅史，大西弘志，高田佳彦，青木康素，松井繁之：鋼床版の U リブと横リブ交差部の疲労損傷対策の検討と輪荷重走行試験，日本鋼構造協会年次論文報告集，第 15 巻，pp.431-438，2007。
- 9) 田畑晶子，青木康素，服部雅史：U リブ内面モルタル充填による既設鋼床版の疲労耐久性向上検討(輪荷重走

- 行試験), 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要, I-217, 2008.
- 10)服部雅史: U リブ鋼床版の疲労損傷に対する補強方法に関する研究, 平成19年度大阪大学大学院修士論文, 2008.
- 11)渡辺直起, 山田 聡, 山田健太郎, 中村桂久, 高木達弘: 鋼床版デッキプレートと垂直補剛材溶接部の疲労強度と補修工法の効果, トピー鉄構技報, No.23, pp.14-22, 2007.
- 12)Matsui, Ohnishi, Matoba: Fatigue Strength of Orthotropic Steel Deck and Retrofitting into Composite Steel Deck, The 6th Japan-German Bridge Symposium, Munich, 73-74 (Abstract), CDR(Full paper), 2005.
- 13)三田村浩, 平石剛紀, 林川俊郎, 松井繁之: 鋼床版の疲労耐久性に関する損傷対策手法の提案, 土木学会第6回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.105-110, 2008.
- 14)Masafumi Hattori, Hiroshi Onishi, Yoshihiko Takada, Yasumoto Aoki, Shigeyuki Matsui: Durability of Reinforcement for Connections between U-Shaped Rib And Cross-Rib in Orthotropic Steel Deck, The 7th German-Japanese Bridge Symposium, Osaka, Abstract pp.192-193, Full paper CDR, 2007.
- 15)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, pp.102-103, 2002.
- 16)(財)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, 2005.
- 17)緒方紀夫, 谷倉 泉, 上坂康雄, 松井繁之: ドイツのコンクリート床版防水システム, 第6回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 187-192, 2008.
- 18)谷倉 泉, 緒方紀夫, 上坂康雄, 松井繁之: スイスのコンクリート床版防水システム, 第6回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 193-198, 2008.
- 19)上坂康雄, 緒方紀夫, 谷倉 泉, 松井繁之: イギリスのコンクリート床版防水システム, 橋梁と基礎 (投稿予定)

(2009年1月16日受付)