

## 床版研究の変遷と輪荷重走行試験機の役割

大阪大学名誉教授・大阪工業大学教授  
工博 松井 繁之

### Review of Researches and Technologies on Highway Bridge Decks and Contribution of Wheel Running Machines

#### 概 要

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、コスト削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現場打ち 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間を席卷している。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。

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命と言える。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。

#### Abstract

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 three decades, development of new types of bridge decks and ones using new materials has been encouraged for getting high durable decks and making innovation of the bridge engineering. Also, many repairing methods for existing bridge slabs have been developed and revised through experimental researches with the wheel running machines. Recently, fatigue cracking of orthotropic steel decks is becoming the most interesting problem in worldwide. The mechanism of those fatigue cracks has been investigated with the wheel trucking machines.

It is well known that the wheel trucking machines have contributed on the above mentioned developments on bridge deck problems. The fatigue tests with those machines have brought an innovative recognition that passing through of wheel loads on decks issued very large stress amplitudes with complicated section force combination in the plate structures. The new technologies based on the theory can be said as an original technology of Japan. Grade up of those technologies should be carried out continuously and spread of the technologies to the world is strongly expected.

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

#### 1. 床版に関する現状認識

現在も長引く不況の最中であり、公共投資の減少が続いている。21 世紀初頭までに現在ある 7,600km の高規格幹線道路延長をドイツ並みの 14000km のネットワークに完成させることが目標であったのであるが、マスコミによる公共事業費のコスト高に対する厳しい批

判が、道路建設の縮減と建設の合理化が強く要請されるためである。第二東名・名神の建設も暫定 2 車線での建設が余儀なくされている。一方で、これまで建設された社会基盤ストックは高齢化が徐々にせまり、更新せずにこれらの維持管理を行い、延命化することが常識となっている。しかし、2 次、3 次の補修・補強は大変コスト高になる可能性があり、適切な判断で更新を考えたほうがライフサ

イクルコスト面で合理的であると考えられるものも多い。

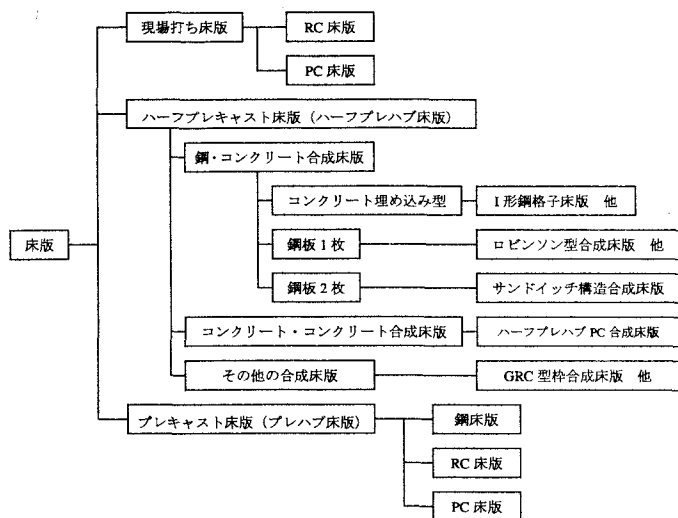
このような現状を橋梁技術に限定してみると、省力化、大型化、単純化、プレハブ化を柱とした建設費削減対策が採られている。すでに開通している第二東名の最初の区間であった大府高架橋では、主桁本数を従来5本程度で架設していたものを3本にし(小数主桁化)、それらを横方向に結ぶ横桁等も単純化した。さらに、桁の制作に極力人手がかからないように継手の現場溶接化を試みている。ただし、主桁を3本にしたことによって、その上に乗せて路面を形成し、自動車荷重を直接支える床版の支持間隔が大きくなったために、強度の大きいプレストレスを導入したプレキャストパネルを採用することとなった。工期短縮と品質向上を目指したプレハブ化で、幅方向には一枚で、橋軸方向に2m幅のパネルを工場制作し、現場でトラッククレーンによって架設していくものである。このような合理化が建設費削減の大きな因子となっている。

従来、床版(橋の路面を形成する板状の部材一舗装の下で見えない)として、ほとんどの橋梁では鉄筋コンクリート床版(以下 RC 床版という)が採用されてきたが、これが昭和 40 年代の初頭から損傷事故をしばしば引き起こし、大きな問題となった<sup>1/</sup>。この問題の発生機構については、次章で述べるように筆者らの研究で疲労現象として明確になったが、既設橋梁が多数あり、今なお損傷報告が後を絶たない状況である。従来の RC 床版は疲労耐久性に劣るとの観点からも上記のようなプレストレスを与えたプレキャスト床版が要求される状況となっている。

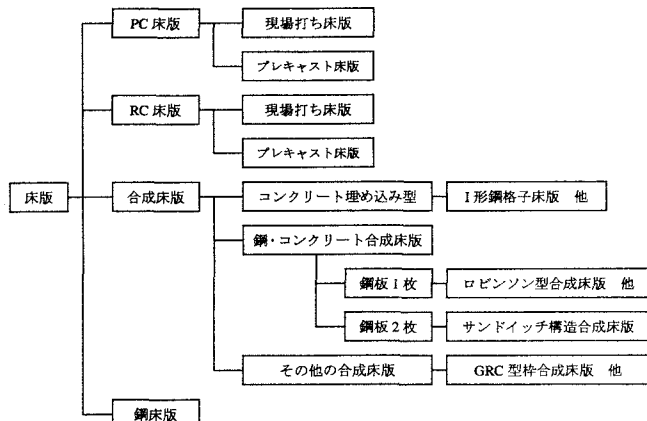
しかし、今後架設される橋梁全部にプレキャスト床版を適用するのがよいのかという疑問が起こるが、答えは No である。例えば、第二東名・名神を例にとると、総延長 490km の内、橋梁部分は 44%と言われているが、平野部を通るのはわずかで、山間部を貫通する計画である。そうすると、谷間とか、大きな河川を渡河する場所が多くなり、先に延べたような大型のプレキャスト床版を架設することが不可能となる。小型・軽量化したものや、準プレハブ化、あるいは、現場打設が考えられる。型枠代わりとして、小さく、かつ、厚さの薄いプレキャストコンクリート版を桁間に設置し、その後現場コンクリートを打設する半プレハブ化は、大きなクレーンを必要としない。鋼材をより多く使用した鋼・コンクリート合成床版も、鋼部材の準プレハブ化が可能である。一方、現場打設の床版は型枠作業を必要とし、人手がかかるが、後で橋軸直角方向にプレストレスを与えることによって耐久性のある床版とすることができる。一昨年に完成した藁科川橋は2主桁橋であるが、その桁間隔は11mというこれまでに例を見ないものである。この橋の床版では移動型枠作業車を用いた場所打ちコンクリートの横締め PC 床版が採用された。ドイツのスペックを参考にし、独自の曲げモーメント式を誘導して設計された。支間中央の床版厚は 36cm となった。

以上のように、床版には橋梁の架設現場の条件によって適材適所の構造が考えられる。よって、発注者は勿論であるが、設計コンサルタントの技術者も各種床版の正確な情報を把握しておく必要がある。これまで床版研究が非常に盛んに行われたが、大阪大学、大阪工業大学、および旧建設省土木研究所等の輪荷重走行試験機による研究がこの 30 年間における床版構造発展に対して先導的役割を果たしたと言える<sup>2/</sup>。筆者は床版の分類法として図一

(a)のようなものを提案している。図一(b)は従来の形式別の分類である。上記のように橋梁が位置する環境条件で施工方法が当然かわることを考慮したものである。同じ形式の床版で現場打ちもあるが、フルプレキャストの考えられるので、今後、床版開発を行う時にはこの対応を考え、フレキシブルに変更できるようにしておく必要がある。当然、設計法が異なることに注意すべきである。



(a) 架設場所を考えた床版の分類法



(b) 構造別床版の分類法

図一 道路橋床版の分類

## 2. RC 床版の劣化損傷問題とその機構説明

昭和 30 年代の終わり頃、我国は飛躍的な経済成長を続け、東京オリンピックと大阪における万博の誘致に成功した。これらの2つのビッグプロジェクトを遂行するために、基本的社会基盤である道路網の整備が必要となり、東名・名神高速道路や首都高速・阪神高速等の本格的な高速自動車専用道の建設が突貫工事で行われた。その建設とともに、物資の輸送手段は鉄道から自動車へとシフトしていった。

昭和 40 年代の初頭頃になって、これらの高速道路の橋梁床版に 20~30cm 大の孔があくという損傷事故が発生した。このような事故は始めてであり、新聞は手抜き工事ではないかとの批判をした。早速、土木学会関西支部において技術検討委員会が組織され解明に乗り出した<sup>3/</sup>。筆者もその一員に加わった。種々の検討の結

果、上記のような陥没状態に至るまでの床版下面におけるコンクリートのひび割れ進展プロセスが図-2のように説明できるので疲労現象ではないかとの見方が強まった。そこで既往の疲労実験データを探して疲労寿命推定を行ったが、全く説明が付かない程推定寿命は長いものであった。実際では、建設後5年程度で発生したのもあったので、再び別の原因を模索しかけたことを記憶している。

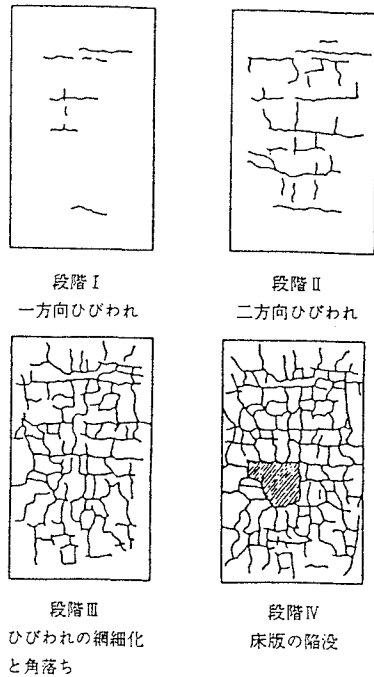


図-2 実橋における劣化のプロセス

しかし、トラック輸送システムがすでに定着していたことから、大型トラックが大幅な過積載で走っている状況を見るにつけて、疲労であるとの考えは捨てることはできず、苦悩を続けた。そして、筆者は床版下面の曲げひびわれ状態が実験と実橋では全く違うことに着目して、疲労実験における荷重のかかり方と実橋でのかかり方の違いに気付いた。前者では油圧ジャッキで一つの着目点に上下に脈動する荷重を載荷するが、実橋では自動車が一定荷重のまま走り抜けているという移動載荷を繰り返している点の違いを大きな原因ではないかと着目したわけである。この移動性を再現する載荷方法を取り入れ、かつ、200万回程度の繰り返し載荷を短い時間で行える方法を開発しなければならぬと確信したのである。

そして、新規に開発した装置が図-3に示す輪荷重走行試験機である。8~30ton程度まで載荷できて、車輪荷重を走行範囲2mの間に往復運動させることを考えた。20日程度で約100万往復(200万回載荷)できるならば疲労試験機として使用できると考え、図のように回転アームを取り付けて、これの回転運動を輪荷重の往復運動に変える装置とした/4/。

この試験機を使いこなすまで約一ヶ月程費やした。そして、実物大の床版モデルを多数製作し、疲労実験を繰り返した。疲労寿命に到達すると床版のたわみが大きくなるので、変位をリレー装置に取り込み、試験機を自動的に停止させることにしたので、試験機が停止すると破壊したものと判断し実験を終了して破壊状況を観察し

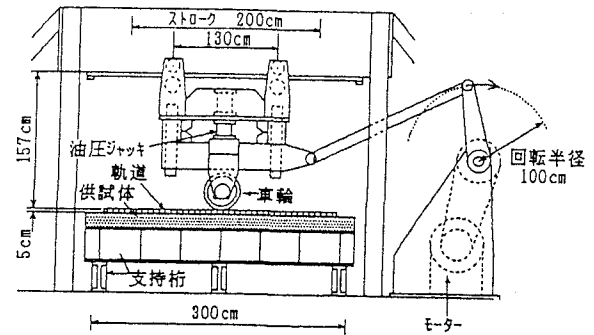


図-3 大阪大学の輪荷重走行試験機

た。試験体はすべて床版の一部が陥没する破壊状況を呈していた。その断面を切断して内部の破壊状況を調べると図-4のようにコンクリートがせん断破壊している押しぬきせん断破壊であることが分かった。コンクリートをすべて除去して、鉄筋の疲労破壊の有無を調べたが、全く疲労破壊は見つからなかった。このような観察から、筆者はこれで実橋での陥没現象が再現できたと確信したのである。

図-5に輪荷重走行試験機によるS-N曲線を示したが、同時に既往の定荷に繰り返し荷重を与える方法によるS-N曲線も併記した。一般にコンクリート系の構造物、あるいは材料ではS-N曲線の縦軸は載荷荷重を静的強度で除し、無次元量で表現している。この図において2つの試験方法によるS-N曲線の違いを読み取ることができる。走行する輪荷重の下では、疲労強度は一定点載荷のもの約1/2に低下しているのである。回数で比較すると実に約8000倍~1万倍の速さで破壊することになる。都市高速道路における橋梁床版の疲労寿命推定にこれらのS-N曲線を適用すると、例えば、実橋の疲労破壊寿命が5~10年程度の床版に対して、一定点載荷によるS-N曲線を用いて寿命計算すると8000年~1万年程度となるが、走行実験から得られたS-N曲線による約80~100年程度となり、飛躍的に推定精度が向上した。破壊性状が実橋とよく似たものとなることが実用性の高い実験結果と強調できる。

しかし、まだ10倍程度の差が残っている。これは実験方法に問

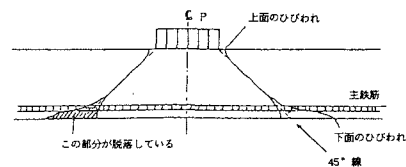


図-4 走行試験による床版の破壊断面

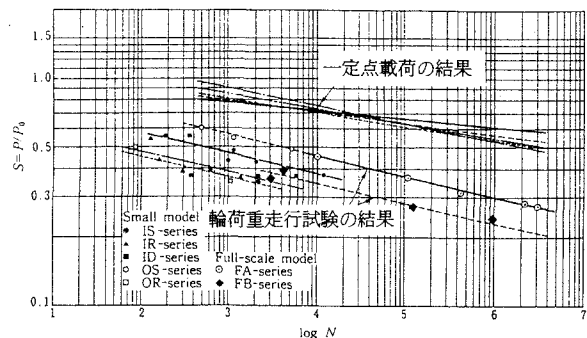


図-5 走行試験で得られたS-N曲線

題があるためではなく、実橋床版では他の影響があると考えた。水の影響である。橋は雨曝しの構造物である。床版の上にはアスファルト舗装を載せるが、これには防水性は期待できない空気量の多い混合材料であり、浸透性が高く、かつ、保水性も高いという特徴を持っている。筆者の観察によると1時間の一雨で約1週間程度水を留めている。この水が床版上面に発生しているひび割れに浸入するのである。床版上面のひび割れは輪荷重によって発生するねじりモーメントによって橋軸直角方向に発生する。そして、これらのひび割れを挟む両側のコンクリートが、開閉、水平ずれ、鉛直ずれの変位を起こし、ひび割れ面相互の擦り合わせ現象が車の移動毎に起こり、摩耗する。これに水が加わると、砥石で刃物を砥ぐように、面の摩耗劣化は大幅に加速されるのである。

このような水による劣化の加速現象を実験的に評価するため、床版供試体上面に堰堤を設け、5mm程度の深さに水を入れて輪荷重走行試験を行ったところ、予測どりの結果を得た。水張り湿潤状態では、乾燥状態の場合よりも40倍～300倍速く破壊する結果となったのである。そして、床版上面の破壊部位では、圧縮側コンクリートが泥と砂利に分離してしまっていた。このような現象を骨材化現象と名付けたが、実橋の陥没箇所においても、必ずと言ってよい程、この骨材化現象が観察される。

この水張り状態での S-N 曲線で先の都市内道路での疲労寿命を求めると1年未満となる。よって、輪荷重走行試験機を用いて、乾燥状態で行った床版の S-N 結果は最大寿命を、湿潤状態での S-N 結果からは最小寿命が評価できるといえる。実際の橋梁床版の寿命はこれらの中間になるものと推定できるようになった。このような実験経験から、筆者は床版の寿命延長を計る有効手段として、舗装と床版の間に防水工を設置することを強く提唱している。

輪荷重走行試験機によって判明したRC床版の疲労破壊機構について以下のようにまとめている。図-6に図示したRC床版の疲労破壊過程で説明する。すなわち、現場打ちコンクリート床版では、輪荷重の載荷によって直交2方向の曲げモーメントが発生し、床版下面では(a)図のような格子状ひび割れが発生する。ただし、支持桁が床版コンクリートの自己収縮・乾燥収縮を拘束するため、橋軸直角方向に最初に発生する傾向にある。橋軸方向の収縮ひずみ

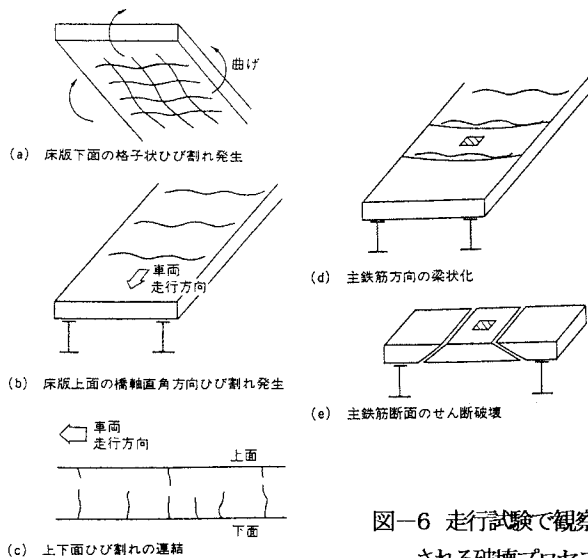


図-6 走行試験で観察される破壊プロセス

に曲げによるひずみが重なり、橋軸直角方向のひび割れが先に発生する。その後、(a)図のように格子状になる。同時に、床版上面にも(b)図のような橋軸直角方向のひび割れが大きな間隔で発生する。一般に、厚さが18cmから22cm程度の床版では40-50cm程度の間隔となる。この上面ひび割れはねじりモーメントに起因するもので、支持桁付近で卓越するので支持桁付近から床版中央へと進展する。ひび割れ開始点で表面の引張主応力が交番し、輪荷重走行の繰返しによって発生するため、疲労ひび割れであると説明できる。さらに繰返し回数が進むと、これら上下からのひび割れがドッキングして、貫通ひび割れとなる((C)図)。この結果、異方性化が進み、橋軸方向への荷重分配効果は低下し、主鉄筋断面の荷重負担が増加する。さらに継続して輪荷重が走行すると、ひび割れはあまり増加しない状態が継続するが、たわみは徐々に増加する。これは貫通ひび割れに作用するせん断力とねじりモーメントが交番断面力で、それらの繰返し作用によってひび割れ面の摩耗が進行するためである。実験中、この段階に達した床版では、下面ひび割れからコンクリートの粉が多量に落下するのが観察される。ついでには、(d)図のように配力鉄筋のみが連結しているだけの、主鉄筋方向のはり状となる。このはり幅の平均は40～50cmであるので、当然、この断面には過大な断面力が作用することになり(異方性による荷重分配作用の低下と過小な有効幅のため)、この断面はせん断疲労を受け、急速で脆性的に破壊する。これが最終破壊である。実橋ではこれらすべての段階の現象に対して、舗装から浸透した雨水が影響し、疲労破壊寿命を大幅に短縮させている。

### 3. 輪荷重走行試験機の普及状況

筆者が輪荷重走行試験機を開発してから二十数年経過したが、最初は、上記のようなRC床版の損傷機構の解明のための基本疲労実験を勢力的に行い、成果を公表して来た結果、輪荷重走行試験機による床版の疲労実験法が認められるようになり、約5年後に板構造では大先輩の大阪工業大学の岡村教授が同種の試験装置を同大学の実験場に設置された(6)。その装置はゴムタイヤを付けた載荷部を自走させるもので、実験室の関係から14m程度の走行ができるように設計された。大阪大学方式のクランク式の場合には載荷車輪を鉄輪にしたため、鉄輪を直接載荷すると線荷重となり、コンクリート表面が早期に摩耗すると予想し、面荷重に変換するためにキャタピラ方式の特殊軌道を床版上に設置し荷重を載荷する方法を取った。舗装に対する影響度を評価するとか、床版以外の部材でタイヤが直接作用する場合の挙動を調べることを可能にするため大阪工大型のゴムタイヤ方式の装置が必要であった。

この2つが基本となって床版研究が進み、これらの試験機の威力と効果が広く認識されることとなり、平成7年から8年にかけて急激にこの種の装置が増加した。阪大型の鉄輪方式のものが9台、大工大型の自走式のものが3台、特殊形式のものが3台が現在稼働中である。

独立法人土木研究所の2台は、輪荷重の走行範囲を3m、最大荷重50トンと大型化している。旧日本道路公団保有のものは左右にタイヤを配置して軸重でもかけられるようにした大型のものである。

大工大タイプのゴムタイヤで自走式のもの、東京都土木研究所および企業に1台づつが保有されている。

全国で計15装置あるが、疲労実験には日数を要するので、何れの試験機もフル稼働状態にあり、各種の実験プロジェクトが現在も推進されている。有効な研究成果は着実に蓄積されつつある。

しかし、各試験機において同種であっても車輪の載荷面積が異なったり、試験機の重量、速度が違うことによる結果の相違が懸念されるので、土木学会鋼橋床版の調査研究小委員会で共通試験プロジェクトが作成され、同じ条件で作成した床版供試体を用いた比較試験が行われた。成果はこの第5回床版シンポジウムで公表されることになっている。そのため、ここではその内容は割愛したい。

#### 4. 床版の新技术と輪荷重走行試験機の役割

橋梁の合理化と建設費削減の要求のため、また、床版自身の耐久性向上のため、床版に関する新技术の開発が活発であることは1で述べたとおりである。現在、道路橋の床版として開発されているものを整理すると図-1(b)のようになる<sup>7)</sup>。大きく分けて、従来からのRC床版とPC床版に代表されるコンクリート床版系と、鋼とコンクリートを合成した床版系、および、鋼材だけでつくる鋼床版となる。現在、開発競争で熾烈に競合しているのは前の2者である。

これら2つの系列の床版に要求される基本性能は実用に供し得る耐久性である。ただし、耐久性には疲労耐久性と自然環境因子による環境劣化に対する耐久性があることに注意していただきたい。ここでは話しを簡単にするため、疲労耐久性を中心にした新技术について述べることにする。

##### 4.1 コンクリート系床版での新技术

床版に要求される疲労耐久性の確保はどのようにするのか、との技術課題への基本回答として挙げられるのが以下のものであるが、第3のものが構造改革による解決方法である。新技术として開発競争が盛んである。

###### ① 自動車の過積載を厳しく取り締まること。

道路橋床版が疲労で劣化する外的要因が過積載による大型トラックの走行であると断言できる。警察がこのような違反者の取り締まりを厳しく行ったら床版問題の90%は無くなるのではないかと考えられる。警察も人手不足の状態であるので、頻度を高めた取締りは不可能と思われる。しかし、運転手に厳しいペナルティを科して、運転者にも疲労損傷の認識を植え付けなければならない。違反すると、自動車免許の1ヶ月停止と2ヶ月分の給料相当の罰金をとればかなりの成果を生むのではないかと考えている。

###### ② 床版上面に防水工を設けること。

これによって乾燥状態の疲労寿命が期待できる。よって、現状の床版のままでも約10倍程度の寿命の伸びが期待できるものと推定している。

###### ③ 疲労損傷機構に立脚した構造改革を計る。

これには種々の方法が考えられる。ここでは一例を示すことにする。まず、図-6(a)、(b)の初期ひび割れの発生を抑えることによって橋軸方向の剛性が大きく残存し、荷重分配が良好となり疲労耐

久性が向上するであろう。方法として、橋軸方法にプレストレスを導入するのが最初に推奨できる。別の方法としてプレキャスト化が考えられる。すなわち、PCa パネルは工場製品であり、単体で製作するため、コンクリートの乾燥収縮に対する拘束は内部の鉄筋のみであり、拘束度は非常に小さい。また、現場に架設されるまでには相当な日数が経過しており、架設後の乾燥収縮ひずみは大きくならず、活荷重モーメントによるひずみとの累積ひずみは当然小さく、ひび割れ発生荷重が大きくなるか、あるいは、発生寿命が延びる。

PCa パネルが主鉄筋方向(橋軸直角方向)にプレストレスされている場合には、橋軸方向ひび割れは出にくく、橋軸直角方向ひび割れが卓越する。しかし、橋軸直角の主鉄筋断面の剛性が大きいため疲労の進行が抑制される。すなわち、初期状態から大きな異方性が発現し、橋軸方向断面の荷重分担が減少して、ひび割れ面の摩擦速度が小さくなると考えられる。また、図-6(c)、(d)のような貫通ひび割れ間隔がPCa パネルの幅程度になると考えられ、その幅が1.5~2m程度であるので、有効幅が大きくなって主鉄筋断面の疲労速度はさらに小さくなる。

橋軸方向にポストテンション方式によりプレストレスを導入する場合には、橋軸直角方向ひび割れを防止できるとともに、床版は橋軸方向の剛性が高い異方性板として挙動するので、輪荷重に対する有効幅が大きくなり、飛躍的な耐荷力増と疲労寿命増加をもたらす。表-1は同じ床版厚のRC床版(18cm 厚)とプレストレスした床版(供試体名SBの後の数字が床版厚cm 単位)に関する筆者の疲労実験例であるが、橋軸方向プレストレスによって床版中央のたわみはほとんど増加せず、耐久性が高いことが認められるであろう<sup>8)</sup>。

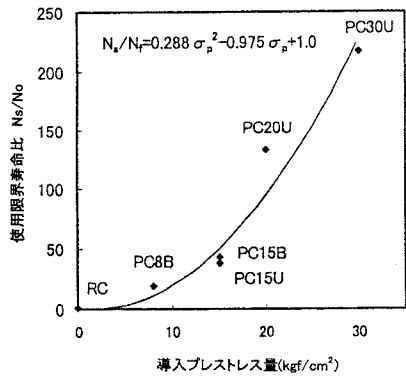
表-1 RC床版とPC床版の比較

試験体	15tf	18tf	21tf	水張15tf	実験終了時の状況
RPC18	50万回	100万回	—	—	破壊の兆候無し
PC18	50万回	100万回	22万回	—	破壊の兆候無し
PC16	52万回	100万回	—	20万回	破壊の兆候無し
PC16	50万回	13万回	—	—	格子状ひび割れ
RC18	—	84万回	—	—	せん断破壊
RC18	—	—	21万回	—	せん断破壊
RC18	—	—	—	20万回	せん断破壊

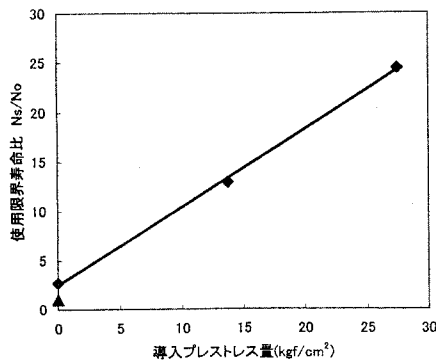
註) RPC18はRC版での10tf-2万回走行あり

図-7にプレストレスした床版の疲労寿命向上度を評価した研究成果を示した<sup>9,10)</sup>。ただし、床版厚が6cm という実物の約1/3モデルによる結果であることに注意していただきたい。実物大の床版の疲労試験は現有の試験機では能力不足である。さて、図-7(a)は橋軸方向にプレストレスした場合の結果であるが、コンクリートに予め導入される圧縮応力(プレストレス)が15kgf/cm<sup>2</sup>程度で、約10倍も疲労寿命が延びることが認められる。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、20kgf/cm<sup>2</sup>程度を推奨したいところである。

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ことは上記のプレキャスト床版と同様に、橋軸直角方向の版剛性の向上による効果によるもので、このようなプレストレスによる疲労寿命効果を図-7(b)に示した。やはり、疲労寿命はプレストレス量と線形関係で向上するこ



(a) 橋軸方向にプレストレスした場合



(b) 橋軸直角方向にプレストレスした場合

図-7 PC床版の疲労寿命向上度

とが同える。ただし、この場合、大きすぎるプレストレスを入れる

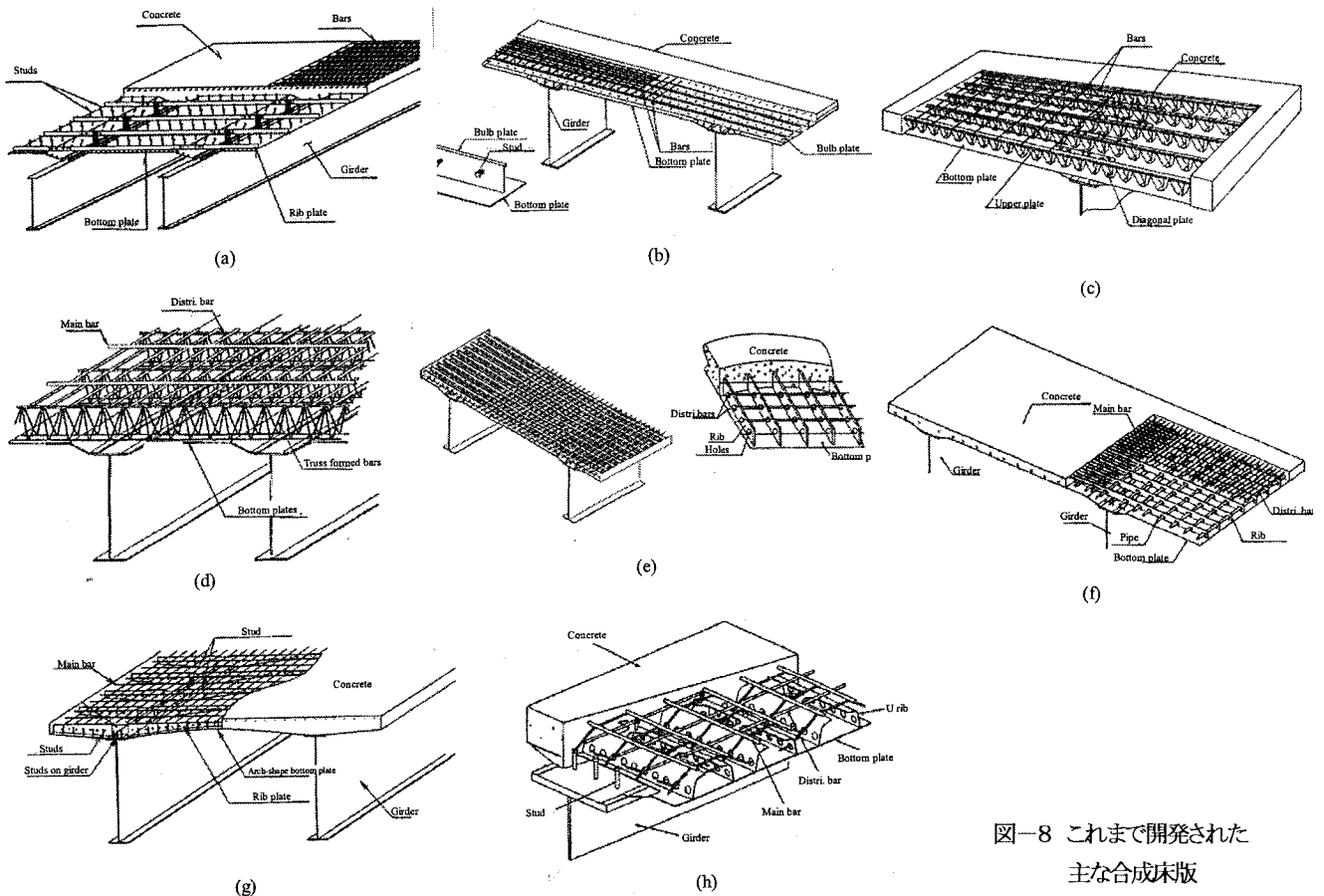


図-8 これまで開発された  
主な合成床版

と、ケーブル端部付近で大きな支圧力が働き、これによってケーブルに沿ったひび割れが発生する可能性がある。このようなひび割れが橋軸直角方向に大きく進展すると逆に疲労寿命を短くしてしまう可能性があり、注意する必要がある。

直交2方向にプレストレスを導入する場合にはもはや無限大と言える疲労耐久性が期待できるものと推測される。また、橋軸方向にプレストレスを入れたPCa床版の疲労実験を水張り状態で行ったが、水に対する抵抗性が高く、コンクリートが粉砕される骨材化現象は発生しなかった。

橋軸方向プレストレスをしない場合や、パネルとパネル間の継手部充填コンクリートの施工が悪い場合には早期に水が漏れ、その部分の骨材化はやはり発生する。また、水が漏れることによる床版下面の汚れや、内部の鋼材の腐食が心配されるので、プレストレスしない場合には、継手部上面には適切な防水工を設置する必要がある。ちなみに、第二東名の東海大府高架橋では防水工を設置することが規定されている。

上記で述べたプレストレスの効果評価は当然筆者らの輪荷重走行試験機による疲労実験成果であるが、図-7のような定量的な結果は、我国は勿論、世界でも初めて得られたものと自負している。このような結果から、プレストレスの効果が認められて、耐久性のある床版の開発が活発になることを願っている。

#### 4.2 合成床版その他の方法

コンクリート系床版は一般的に床版厚が大きくなり、死荷重増が主桁の耐力不足を招いたり、大型プレキャスト版の架設には大型の

重機(クレーン車など)が必要となるなど、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・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その剛性を期待するもので、鋼材部分を工場で剛性のある鋼殻としてセミプレハブ化ができる。軽量であるが故に、現場では簡単な架設機材で設置できるとともに、後に打設するコンクリートの型枠になり、かつ、剛性があるので支保工も不要にする場合が多い。そして、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が期待できる。このような合成床版について、図-8に示したような種々の構造のものが開発されている<sup>7)</sup>。筆者もこのような合成床版の研究についても逸早く着手しており、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。このような研究の成果は実橋にも応用されており、企業化に直結する研究となっている。

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をずれ止めとして用いた合成床版で見られた破壊現象である。従来の定点載荷による疲労実験では一般に載荷点の外側の曲げモーメントおよびせん断力の大きい領域においてスタッドの根元部で鋼板に亀裂が発生することが認められており、スタッドの溶接部周辺の鋼板に、床版としての曲げ応力にスタッドに作用するせん断力による局部曲げ応力とせん断応力の組み合わせとさらに形状による応力集中が加わるためである。よって、筆者らはこれらの亀裂に着目した疲労設計法を提案していた。ところが、同じ合成床版を輪荷重走

行試験機によって疲労試験を実施したところ、たわみはある時点から増加するものの、床版下面の鋼板には一向に亀裂が発生しなかった。たわみがRC床版の破壊時のたわみ量と同じレベルに達した時点で実験を終了し、内部を観察することにした。コンクリートを丁寧にはつったところ、写真-1に示すようにスタッドがコンクリートと一緒に取れてしまった<sup>11)</sup>。これはプレーカーによって破壊したのではなく、スタッドの溶接部に疲労亀裂が発生し、溶接部で分離していたためであった。

有限要素法による解析の結果、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が理解できた。そこで、この現象の再現とより性格な疲労データを収集するために、図-9に示す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製作し、120度の範囲で回転しながら大きさも変動するせん断力をかける疲労実験を実施した。その結果を図-10に示すが、床版から得られたデータの下限值あたりで分布する実験データが収集できた。これらの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った。この驚くべき現象はその後の実験でも確認されており、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た。そして土木学会合成構造設計指針(案)に採用されるに至った<sup>7)</sup>。

異種の構造材料である鋼とコンクリートとが一体化して一つの構造体となるのが合成構造であるので、上記の鋼の変わりに、別の材料の選択が考えられる。筆者がこれまで関わったのが、FRP合成床版とプレキャストコンクリート合成床版である。前者はこれまで使ってきた木製の型枠代りにFRP板を使用するものであり、低開発国

の森林資源維持にささやかなりとも貢献できるものと思っている。ガラスファイバー入りのプラスチック板を特別押し出し成形した図-11のような形状のものを共同開発した<sup>12)</sup>。T形リブによって生コンクリートの打設時の死荷重を担う剛性確保をさせている。コンクリート硬化後はこの型枠も強度部材として断面剛性に寄与させている。引張強度が大きいコンクリートのひび割れを抑制して、高い剛性を大きな荷重まで保持できる。この保持を確実なものにするために、型枠のコンクリートとの接触面にエポキシ樹脂を塗布し、それに砂を付着させてコンクリートとの付着強度を高めるという工夫も考案した。この工夫は鋼・コンクリート合成床版にも生かされている。現在、打ち

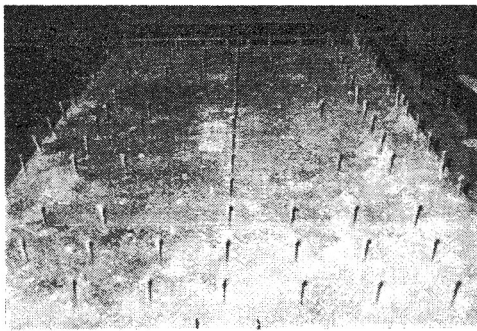


写真-1 スタッドを用いた合成床版のスタッドの破壊状況

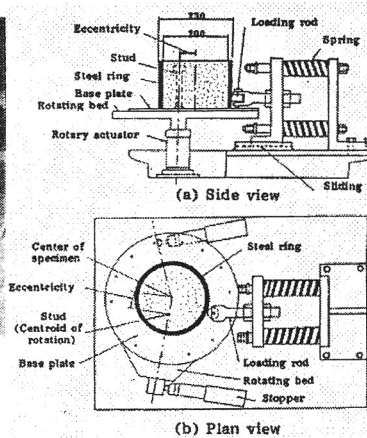


図-9 スタッドの回転せん断疲労試験機

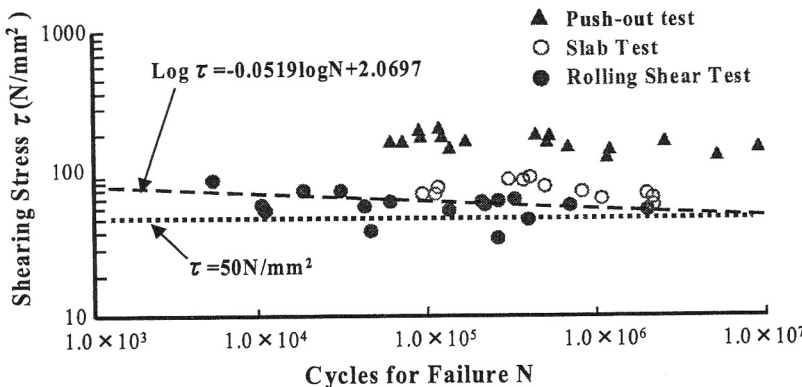


図-10 スタッドの疲労試験結果

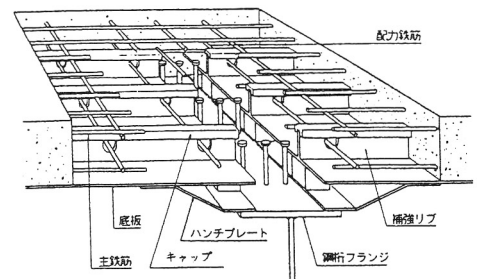


図-11 FRP合成床版



替え床版として、図-12に示すような鋼管をFRP板に内蔵させたものを型枠として採用する工法を開発し、各種の確認試験を実施している/13/。

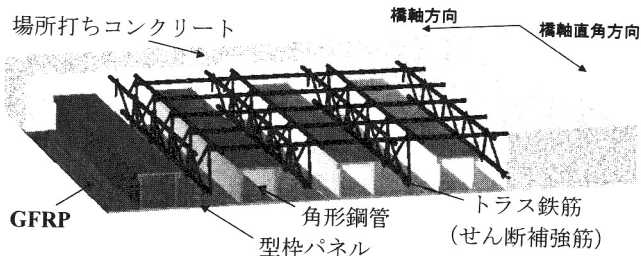


図-12 角形鋼管内蔵FRP合成床版

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として開発された。全厚のプレキャスト版の利点はすでに上で述べたが、深い谷間の山間部や、架設空間の狭い都市内では、大型車両や大型クレーン車の進入が難しい場合が多い。このような場所での耐久性のある床版を短い工期で建設したい場合には、小型のプレキャスト版工法である本床版形式が有利性を発揮すると考えている。この期待を満足するには、やはりコンクリート版と後打ちコンクリートとの合成効果が確保できて、長い耐久性を確保できなくてはならない。本プレキャスト版に図-13に示したようなトラス鉄筋を適当な間隔で配置してこれらをずれ止めとして水平せん断力を分担させるようにしている/14/。

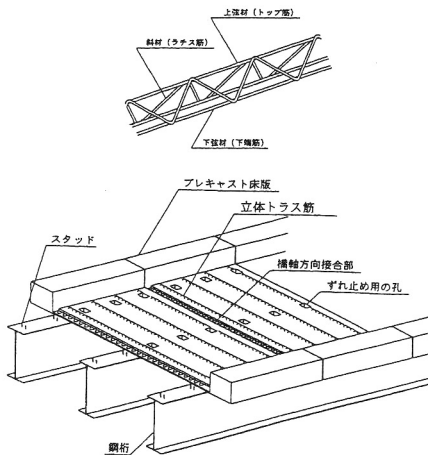


図-13 ハーフプレハブ合成床版

以上のような特殊な合成床版について、大阪大学の輪荷重走行試験機による疲労試験、ならびに、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によってその耐久性が評価された。後者の実験方法については後述するが、16トンの荷重から4万回毎に2トンづつ増加させ40トン、52万回まで載荷するプログラムである。この最終荷重、最終回数まで持ちこたえた場合にはPC版と同等以上の疲労耐力を有していると認定されるものである。両合成床版ともこの目標をクリアしている。

#### 4.3 研究の国際化

1994年にカナダ・ノバスティア州の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出席した。その時、主催者のマフティ教授らが進めている床版開発に目途が付いたとのことで実験等が公開されることとなり、筆者も専門としているので大変興味をもって参加した。その床版は、内部には全く鉄筋を配置せず、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、下面側には初期曲げモーメントによるひび割れが入り、これが引き金になって破壊することを防ぐために、コンクリートにポリプロピレン繊維をチョップ状にカットしたものを混入するファイバーコンクリートを使用することになっている。そして、支持する桁が横方向に変位するとアーチ効果が低減するので、桁の横移動を防止するために、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。この結果、この鋼棒によるタイ材とコンクリート床版内に形成されるアーチからなるタイドアーチで荷重を担わせることになる(図-14)。

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、安全性を確認したと強調したが、筆者の輪荷重走行試験の経験から、彼らの言い分に不安を抱いた。そこで、たまたま、輪荷重走行試験機による疲労実験の研究成果をスライドにして持参していたので、彼等に討議を申し込んで、自動車の走り抜けを再現する実験法による疲労試験を行って安全性を確認する必要性を強調した。彼等は相当に驚いた様子で、検討してみたいと返答したが、試験機の無いことが明らかであるので、ポリプロピレン繊維の提供とコンクリートの配合を教えれば、国際交流として、大阪大学で実験を行ってよいと提案した。是非にやってみてほしいとの申し込みを受けて、2年後には小型モデルによる実験を行い、引き続き実物大の疲労実験も行った。結果は、ある程度までは理論通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伺えた。また、アーチ効果は橋軸方向の中央部では確実に見られるが、端横桁付

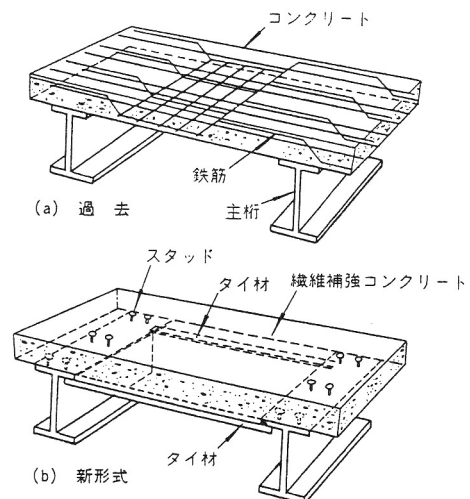


図-14 カナダで開発されたスチールフリー床版



近ではこれによる単純支持のためにアーチ効果が現れず、中央のひび割れが横桁端に向かってYの字形に成長し、この部位で曲げ破壊、せん断破壊が予測できた。実験後、この床版を破壊するためトラックに積載した時、主桁の均等な支持がされなかったことが原因して、この端部部位が破壊してしまった。以上のような実験結果をカナダグループに報告し、端部では最小の鉄筋を配置すること、ならびに、既存橋梁の床版では床版下面から炭素繊維シート接着工法による補強を勧告した。

韓国では日本と同様の床版問題をもっており(理由は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)、やはり、プレキャスト床版の開発を目指しており、筆者の研究成果を参考に床版研究を実施している。そして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。卒業生と共に試験機メーカーの技術者の指導を行った。2004年、その機械が完成したとの報告があり、馴らし運転後に本格的に実験したいとのことであった。今回の第6回床版シンポジウムでその成果の一部が発表されることを期待している。

1997年、スイスローザンヌ工科大学の教授が、同国の床版設計が安全側過ぎるため疲労を考慮した合理設計を行いたいとのことで、筆者に輪荷重走行試験機による疲労実験データと論文の提供を申し込んできた。たまたま、スイスに国際会議に出席するため行くことになっていたもので、当地にて同教授の考えを聞き、設計法について討議した。私は輪荷重走行試験機による床版の疲労強度は既往の定点載荷による疲労実験で得られる疲労強度の約半分に低下するから、同国の設計法はそれほど安全過ぎることは無いので、改定の必要は無いと提案した。しかし、同教授は当地では、日本などのような過積載車のトラックの横行は無いのでやはり安全側であると主張し、改定の意志を貫いている。床版の損傷の外的要因は当然過大な輪荷重の走行にあると言えるので、ヨーロッパ等の先進国におけるドライバーのマナーの良さに感心したことを覚えている。今少し、議論を続ける約束をしている。アメリカやカナダでも最近になってやっと疲労問題が出てきたとの情報を得ているのでこれを伝え、耐久性の低減を来たさないよう進言したい。

## 5. 既存橋梁床版の補修・補強の研究

ひび割れ損傷を受けたRC床版を補修・補強して延命する維持管理は、損傷事故が発生して以来、粛々と続いている。放置して床版に穴があき自動車事故でも起こすと、道路管理者は厳しく批判されるため、橋梁の維持管理費中に占める床版の工事費は非常に大きい。よって、合理的で耐久性が高いものが要求される反面、経済的なものが好まれる。

この補修・補強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上面増厚工法と言える<sup>1)</sup>。

これらの工法の効果・良否についていろいろな意見があると思われるが、その判断は非常に困難である。損傷の早いうちに工事を行うと上記の3つはそれぞれの所期の特徴が発揮されて高い効果を持続できる。しかし、劣化が進んでいる場合には、そ

の局所の悪い所を除去しないで単純に工事を行うとその部位からの損傷が進行して効果を減じるとともに工法の信頼性を傷つけることになる。よって、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。

ところで、これらの補修・補強工法の効果についても輪荷重走行試験機による疲労実験によって評価することが適切である。上記の3種の工法の効果については、首都高速道路公団と阪神高速道路公団の共同研究で比較され、また、筆者らの研究でそれぞれの延命効果について評価されてきた。しかし、実橋では上記のような損傷の進行度の評価が困難であるため、実験どう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。

国土交通省はじめ、日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団では既存橋梁床版の補修・補強に上記のものを採用し、一通りの補強工事を終えている。しかし、まだ未補強床版もあるため、また、補強済み床版で再損傷が起きていることもあり、今尚補強工事は多く発注されている。しかし、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、炭素繊維シートあ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。

筆者はこれまで、国土交通省土木研究所、首都高速道路公団ならびに阪神高速道路公団、炭素繊維補強研究会、アラミド繊維補強研究会、その他からの委託研究によって炭素繊維シート補強の効果評価の疲労実験を実施してきた<sup>15)</sup>。それらの研究成果をまとめると、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(図-15)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。

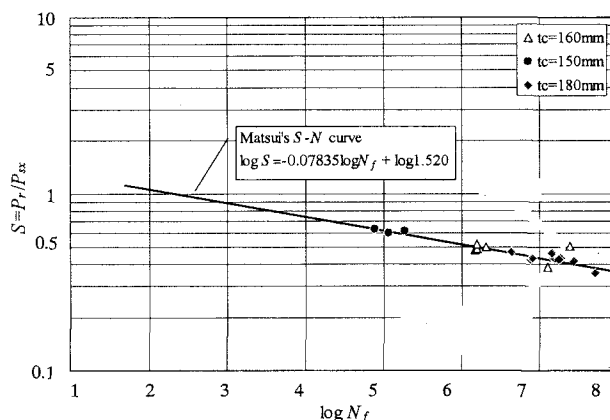


図-15 繊維シート補強したRC床版のS-N結果

その他の補強工法、すなわち、樹脂モルタルと補強鉄筋を用いた下面増厚工法、特殊パネルを上面に貼り付ける工法なども開発され、補強効果についての研究成果がある。

## 6. 独特な研究、応用研究、特殊研究

### 6.1 建設省土木研究所での疲労実験プログラム

輪荷重走行試験機による疲労実験では、設計輪荷重に衝撃係数を掛けた約14トンを基準値として載荷する。この荷重は実橋で実測した大型トラックの最大軸重30トンの半分に近いことから15トンとしたり、さらに20%増しの18トンなどを載荷して、破壊までの寿命を求める方法が採られている。供試体床版が非常に強い場合にはこのような荷重で200万回以内に破壊することが無いと予想される場合は、200万回で載荷を終了して、十分な耐久性があると判定するか、例えば15トンを10万回、18トンで80万回、21トンで破壊まで載荷かする階段載荷を採用して、結果をマイナー則を利用してある荷重で一定に掛けたとしての換算等価破壊回数を求め、寿命比較して耐久性を評価するのが一般的である。

しかし、非常に床版厚が大きい床版とか、PC床版では上記のような載荷範囲では到底破壊させることが出来ない。土木研究所の元橋梁室長であった西川和廣氏（現、国立政策総合研究所次長）は、出来るだけ破壊の形式を知りたいと考えて図-16に示した階段載荷法を考案した。すなわち、初期荷重を16トンで開始し、4万回毎に2トンづつ上昇させ、最終の40トンでトータル52万回まで載荷するものである。この全ステップ終了後でも供試体が破壊していない場合、その床版をプレミアム床版と名づけてもよいとのことであった。

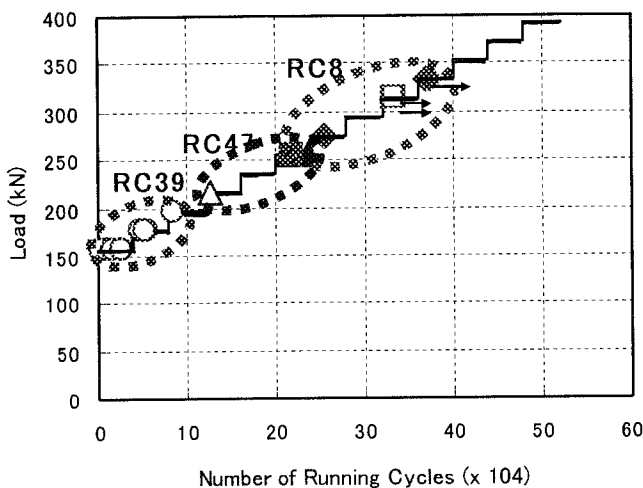


図-16 土木研究所での載荷プログラム

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つは図-16に示されたステップで破壊し、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。新しく開発された合成床版の多くはこの全ステップをクリアすることを努力目標とし

て構造競争が行われたようである。少々過剰ではないかとの意見もあるが、仮にコンクリートの暑さを1cm少なくすると36トン~38トンレベルに低下する。2cmになると格段に低下するものと思われる。よって、施工精度のことも考えるとそれほど無駄な要求でも無いと考えられる。

既存橋梁の補修工法の評価は、平成8年示方書で「設計された床版の寿命レベルを確保すればよい」と認識されている傾向が伺える。

### 6.2 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せている。この疲労亀裂は世界的なもので、筆者が最初に知ったのは14年前、イギリスのセバーン吊橋を訪問したときであった。この吊橋は有名な台形のボックスガーターを補剛桁に使用したものであったが、上フランジの鋼床版のリブとの溶接部に疲労亀裂が6000mも入っているということであった。当初設計時で見積もった交通量が大幅に増加したためであるとの弁明を聞いた覚えがある。

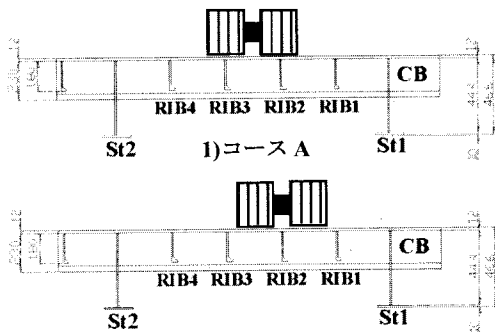
わが国での鋼床版の歴史は約30年ということであるが、RC床版の損傷が過積載車の載荷の影響であることと同様に、鋼床版にも影響していると強く思われる。昨年ドイツでのシンポジウムで筆者の鋼床版の研究を発表したが、大変興味を持っていただいた/16/。セッション後、数人の研究者らと意見交換したが、ドイツでの疲労亀裂発生位置はトラックが主に走る走行レーン下に限るとのことであった。わが国では、片側2車線の橋梁の場合には走行レーンはもちろんであるが、追い越しレーンでも発生している。これはトラックがレーンを守らず、走行レーンを暴走するマナーの悪さが誘発したものと思っている。

ところで、この鋼床版の研究をここ3年間、継続的にこなってきた。一つは、寒冷地で冬季に鋼床版の舗装が凍結するのでこれ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て防御できるが、そのようなものをアスファルト舗装内には入れることはナンセンスで、舗装の代わりに鋼繊維入りコンクリートを使用すればよいと考えられるが、局所的な破損等が起らないか否か、また、コンクリートと鋼床版の合成によって疲労亀裂発生も起らないよう応力低減が図れるか否かの検討をおこなった。二つめは、京都にある御幸橋が廃橋になるが、ここの鋼床版で疲労亀裂発生の機構、ならびに、亀裂防止の方策として上面にコンクリートを打設して合成床版化が考えられるが、その妥当性について検証する研究である。以上の二つはバルブプレートのリブに用いたものであった。三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。

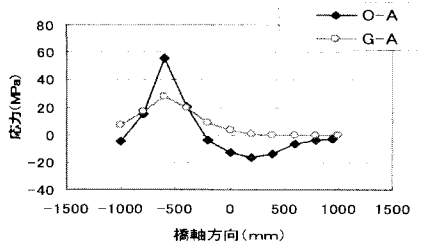
この3種の研究で舗装等のない裸の鋼床版の実験を行うと、実橋で見られる疲労亀裂が容易に発生した。原因として溶接の問題もあることであるが、特に1.3m~1.5m毎に配置されている横リブを跨いで輪荷重が走行することによって横リブ各部の応力が交番すること、また、たてリブ間あるいはトラフリブのウェブを挟んで後輪のダブルタイヤが走行し、デッキプレー

トの溶接部に大きな曲げ応力が発生することなど検証できた。従来の定点載荷で、かつ、500×200mmの載荷板を使った試験では上記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いえる。鋼床版の実験でも輪荷重走行試験機が必要であり、かつ、ダブルタイヤ荷重が作用するような機構で載荷する必要がある。

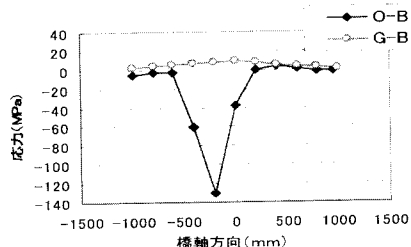
さて、鋼繊維入りコンクリートを打設した合成鋼床版の実験結果として、溶接部における実測ひずみとFEM解析による解析値との比較を図-17に示すが、縦リブと横リブの交点では応力は40%程度に減少、デッキプレートと縦リブの溶接部では実に5%程度に減少する/17/。これが合成効果である。ただし、この合成効果が長く持続しなければならないが、その要がスタッドの疲労耐久性であり、また、上部のコンクリートにひび割れが入らず連続体として存続することである。鋼繊維をいれることによってコンクリートは連続体となる。今後、これらの設計が重要となると思われる。



(a) 疲労実験での載荷方法



(b) 縦リブと横リブ交差部の応力変化



(c) デッキプレートと縦リブの溶接部応力の変化

図-17 鋼床版の合成化の効果

### 6.3 ガードレールに刺さった三角形鋼板の原因説明

ここで、床版ではないが、興味ある輪荷重走行試験機の使い方を報告しておきたい。

昨年の夏頃、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ているのを讀んだが、その後、しばらく忘れていた。その後、2ヶ月経った頃、ある企業の人が見かねてきて、あの三角形の鉄片は自動車が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考えて、このような製品を試作しました。については、これから中古車の自動車を購入して衝突実験を行いたいと思いますが、ご意見を頂きたいとのことであった。

いろいろ、討論を行い、運動場でガードレールを設置し、自動車を衝突させるには中古車を十数台を用意する必要がある。それでも成功の可能性は低いと考え、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のではと提案した。その技術者は即座に理解したようで、2週間で全てを準備しますので、ぜひゴンゴロを使わせていただきたいと懇請され、承諾した。報道関係者も集まりテレビカメラに囲まれる中、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る瞬間までは大変な緊張であった。瞬時に実験が終了したが、見事に再現に成功した。さらに数回、衝突角度を変えて実験したが、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。つまり、継目の鉄板の重なりが斜めになり衝撃的に衝突させない効果が発揮されたのである。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。

## 7. 今後の課題

冒頭で述べたように、現在、第二東名・名神の建設が着実に進められているが、建設コストの縮減とより合理的な構造開発を要求しており、新技術開発の競争が行われている。このような状況において、第一期に採用されたプレキャスト床版の継続的な適用に対する再検討と設計法の見直し、より広幅員の2主桁橋での床版構造の模索、主桁と床版とを剛結した合成桁橋の採用が議論されている。国道交通省でも管轄する国道での橋梁の維持管理業務が今後急速に増加する傾向にあり、二次の補修・補強を必要とする床版も増えている。設計荷重が増大したB活荷重対応が未着手の橋梁もあり、取り替えた方が経済的な場合もあると考えられる。新規床版の形式選定と設計法の見直しの必要性に迫られている/18/。

また、床版の耐久性が向上すれば主桁との合成構造化が橋梁全体のコストダウンにつながる。この合成構造を連続桁形式に拡張することが自動車の走行性から望まれている。この場合、中間支点上では床版には大きな負の曲げモーメントが作用し、全厚に亘ってひび割れが発生するが、それに雨水が浸入して骨材化が懸念されるので、適切な防水工が必要である。この防水工

に最近開発された高機能防水システムがあるが、まだ防水工に対する認知が低く、経済性のみで選定されている現状である。正しい情報収集とライフサイクルコストの評価、ネットワークで考える維持管理体制の整備を行うことによって、合理的な維持管理が達成できる。

以上のように、まだ多くの課題が未解決の状況にあり鋭意研究は進められることと思われるが、実験も伴うので、それぞれの研究機関で行うには時間的効率が悪い。よって、輪荷重走行試験機を保有している全機関の共同研究体制の確立が必要であると感じている。

#### 参考文献

- 1) 松井ほか：RC床版の耐荷力と耐久性，土木学会関西支部昭和60年度講習会テキスト—既存橋梁の耐荷力と耐久性—，pp.25-116，1985.7
- 2) 松井：床版の技術開発—耐久性の向上、施工合理化—，橋梁と基礎、Vol.31, No.8, pp.84-94, 1997.
- 3) 土木学会関西支部：鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ—講習会，鉄筋コンクリート床版の設計法の現状と問題点，27（1977）。
- 4) 前田・松井：移動輪荷重走行装置による道路橋床版の疲労に関する研究，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.221-224，1984
- 5) 松井：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，第9回コンクリート工学年次論文報告集，pp.627-632，1987
- 6) 堀川・加藤・吉川・山口・園田：鋼板接着工法で補強されたひび割れ損傷 RC 床版の耐久性，構造工学論文集 Vol.44A, pp.1083-1094, 1998.
- 7) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，pp.71-74，平成9年9月。
- 8) 栗原・金崎・金田・松井：橋軸方向にプレストレスを導入した RC プレキャスト床版の疲労性状，構造工学論文集 Vol.44A, pp.1365-1372, 1998.
- 9) 東山・松井：走行荷重による橋軸方向プレストレスしたコンクリート床版の疲労耐久性に関する研究，土木学会論文集 I 部門，1998。（印刷中）
- 10) 大西弘志・松井繁之：橋軸直角方向にプレストレスを導入した鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性，構造工学論文集 Vol.44A, pp.1373-1382, 1998.
- 11) Matsui: Alternation of Fatigue Failure Mode by Changing Loading Methods-Fatigue Study on Three Different Decks, 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On Short and Medium Span Bridges, Calgary, Canada, pp.1583-1592, 1998.
- 12) 松井・石崎・久保：ERP 永久型枠を用いた RC 床版の静的強度・疲労耐久性に関する研究，構造工学論文集 Vol.40A, pp.1413-1424, 1994.
- 13) 久保・能登・松井・長尾・石崎・平山・宮永・小牧：鋼材と FRP のハイブリッド型枠を用いた合成床版の開発、FRP の橋梁への適用

に関する国際コロキウム/第2回 FRP 橋梁に関するシンポジウム、81-84, Jan.2006

14) 岡本・川島・木村・平岩・土谷・松井：トラス鉄筋付 PC 版合成床版の疲労耐久性、土木学会・鋼橋床版シンポジウム論文集、1998.

15) Chai, Onishi & Matsui: Application of CFRP sheets with high fiber density in strengthening RC slabs subjected to fatigue load, IABMAS' 6, Porto, Portugal, July, 2006. (印刷中)

16) Matsui, Ohnishi, Matoba: Fatigue Strength of Orthotropic Steel Deck and Retrofitting into Composite Steel Deck, 6<sup>th</sup> Japan-German Bridge Symposium, Munich, 73-74 (Abstract), CDR (Full paper), June 2005.

17) 服部・的場・松井・伊藤・古市：既設鋼床版の合成床版化による疲労耐久性向上に関する研究、平成18年度土木学会関西支部年次学術講演会、I-55, 2006.6.

18) 西川：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案、橋梁と基礎 Vol.31, No.8, pp.64-72, 1997.