

鋼床版橋梁の疲労損傷を対象とした調査点検手法の立案に向けた実橋調査

A Field Investigation of Orthotropic Deck Bridges to Draft Investigation of Fatigue Damages

川畑篤敬*, 井口 進*, 内田大介*, 松下裕明*, 玉越隆史**, 石尾真理**

Atsunori Kawabata, Susumu Inokuchi, Daisuke Uchida, Hiroaki Matsushita, Takashi Tamakoshi and Mari Ishio

* (社)日本橋梁建設協会 鋼床版検討特別委員会 (〒104-0061 東京都中央区銀座2丁目2番18号)

** 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

We have just faced to the many difficulties with the problems about fatigue damage of orthotropic steel bridges in Japan. One of them will be a peculiar fatigue crack even around world. This crack initiates at the root of weld of deck plates and trough ribs, and propagates to surface of the deck plate to affect traffics. One of the causes of this fatigue crack seems to be a heavy traffics and over-loaded axils, but we do not yet find specific one. And we have so many stocks of bridges that we should investigate them in useful and efficient way, and find the seeds to solve of these fatigue problems.

This report declares our challenges against those problems with an efficient field investigation of orthotropic decks bridges or to examine about a factor of them.

Key Words: Orthotropic Deck Bridges, Fatigue Cracks, Field Investigation

キーワード: 鋼床版, 疲労損傷, 現地調査

1. はじめに

近年、供用後 20 年程度が経過した交通量が多い路線の鋼床版橋梁において、疲労損傷の報告がなされている。中でも、これまで国内では報告事例のなかった閉断面の縦リブ（以下、縦リブ）とデッキプレートの溶接部における疲労損傷が確認されている¹⁾。縦リブとデッキプレートとの溶接部における疲労損傷は、溶接ルート部から溶接ビード方向に進展する「ビード貫通型クラック」と、デッキプレートの板厚方向に進展する「デッキプレート貫通型クラック」に分類される。このうち、デッキプレート貫通型クラックは、デッキプレート上面までき裂が貫通し、路面に異常が発生して初めてその存在が明らかになること、車輛の走行性に影響を及ぼす可能性があることから、特に緊急性の高い疲労損傷といえる。

一方で、鋼床版の疲労損傷に重点が置かれた調査点検要領は、十分に整備されていないのが現状である。また、現在抱えている膨大な鋼床版のストックに対して、いかに効率よく調査点検を行うかが、維持管理上重要な課題となっている。

こうした背景の下、筆者らは、鋼床版の疲労に特化した調査点検手法の立案に向けた検討を行ってきた²⁾。具体的には、調査点検の対象橋梁の選定にあたってのスクリーニング法や調査点検手法について検討を行い、これらを実践することでその適用性について検討した。

本文では、鋼床版の調査点検手法の立案に向けた一連の検討についてその概要を述べるものである。

2. 調査点検手法の立案に向けた方針と実践手順

2.1 調査点検の方針

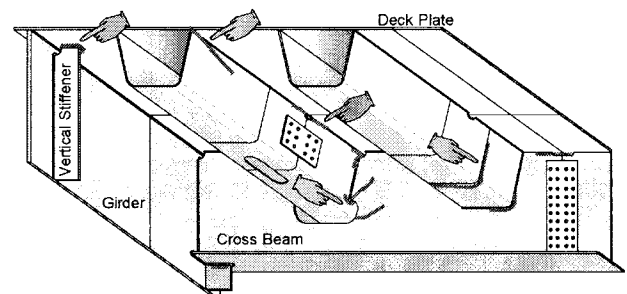


図-1 主な鋼床版の疲労損傷

本研究では、前述のデッキプレート貫通型クラックを中心として、鋼床版の疲労損傷の全般を対象としている（図-1）。

鋼床版の疲労損傷は、鋼床版が直接輪荷重を受けることによって生じる局部変形と、それによって発生する溶接部の局所的な応力集中が最大の原因である。この応力集中は、標準的な鋼床版の設計法では考慮されない。これは、鋼橋の疲労の独特の問題とよく、疲労損傷の調査点検を行うにあたっては、一般的な橋梁点検マニュアルの類の適用のみならず、鋼床版の疲労損傷の発生部位とそこに発生する応力との関係、またその応力を発生させる要因について、十分に理解しておく必要がある。

本研究では、このような鋼床版の疲労の特殊性について十分に配慮したスクリーニングや調査点検手法の立案に向けた検討を行うことを目指している。

2.2 調査点検のながれ

本研究では、その内容によって、調査点検を表-1に示した4段階に分類している。それぞれの段階で Step1～Step4 と称しているが、本研究で便宜的に分類してい

表-1 調査点検の種類

ステップ	目的と内容		方法	
机上調査 (Step-1)	調査橋梁 の選定	図面の収集分析 交通センサス等の データ分析	---	---
簡易調査 (Step-2)	現地情報 の収集、 損傷度合 の予測	現地調査 (交通実態、舗装 の劣化など)	目視、体感、 計数	主に橋面からの目 視調査
桁内調査 (Step-3)	損傷調査	桁内部調査を含 む本格調査	目視、 非破壊検査	鋼床版裏面、箱桁 内部からの調査、足 場からの調査
詳細調査 (Step-4)	損傷調査 損傷要因調査	桁内部調査を含 む本格調査	非破壊検査、 応力頻度測定	鋼床版裏面、箱桁 内部からの調査、足 場からの調査

るのであって、立案する調査点検のフローをそのまま表現しているわけではない。

2.3 机上検討(Step-1)

机上検討は、橋梁台帳などの橋梁リストから、道路管理者が調査点検を行う対象を選定する。

1) 調査対象地域の選定

地域とは、阪神湾岸地域というような広域地域や、特定の路線を意味する。調査対象地域の選定にあたっては、その地域で予想される交通実態や地域特性を考慮する。

2) 調査対象地域における鋼床版橋梁リストの作成

調査対象地域を選定した後、橋梁台帳などのデータベースから地域内の全ての鋼床版橋梁リストを作成する。

3) 調査対象橋梁の選定

橋梁リストの全橋について、以下に示す項目をチェックし、あらかじめ設定したスクリーニング条件により、簡易調査対象橋梁の選定を行う。ここでは、本研究において設定したスクリーニング条件を示す。

① 供用年数

データベースなどから供用年数を確認する。本研究では、10年、20年、30年以上の3ランクに分類した。

② 鋼床版構造

完成図書から、鋼床版構造を確認する。本研究では、縦リブの種類（閉断面の縦リブを優先）、縦リブ支間（2,500mmを超えるものを優先）、主桁と輪荷重位置（一致しているものを優先）、縦リブの継手形式（溶接継手を優先）などを確認項目とした。

③ 交通実態

交通センサスデータなどから、各橋の大型車交通量と混入率を把握する。また、過去のデータから、累積大型車交通量を算出する。この場合、1車線あたりの交通量として把握することが重要である。

④ 地域特性

選定した地域の地域特性を把握することで、各橋における交通実態を推測する。地域特性とは、地理、土地利用、産業、交通網など、いわゆる交通計画学的な視点が必要となる。

具体的には、一般に交通量が少ないと思われる田園

地区の橋梁が、実際には大型車の抜け道になっている事例や、重量物の製作工場からの大型車の日常的な通行路線になっている事例などがある。

本研究では、これまで疲労損傷の報告がなされた橋梁の地域特性を考察し、特に港湾、重工業地区の重交通路線に位置する橋梁に重点を置いた。また、対象橋梁が河川の最も河口側（下流側）に位置する場合は、重要性が高いと判断した。

以上の手順により1次スクリーニングを行い、次に行う簡易調査の対象とした計53橋の位置を図-2に示す。

2.4 簡易調査(Step-2)

簡易調査は、机上検討で作成した対象橋梁リストに基づき、現地情報の収集を目的として現地に赴いて調査するものである。簡易調査にあたっては、調査員は以下に示す調査項目を事前に確認しておく必要がある。

① 完成図書との整合性の確認

机上調査で確認した完成図書と、現地の状況が大きく異なっている場合がある。供用開始からの車線数の増減、橋梁本体の改造などが例として挙げられる。

② 舗装劣化状況の確認

鋼床版の舗装は、その路線の交通実態や、鋼床版の健全性を把握する重要なバロメータといえる。また、部分的な補修が頻繁になされている場合は、鋼床版の疲労の危険性が高いといえる。なお、舗装の劣化と鋼

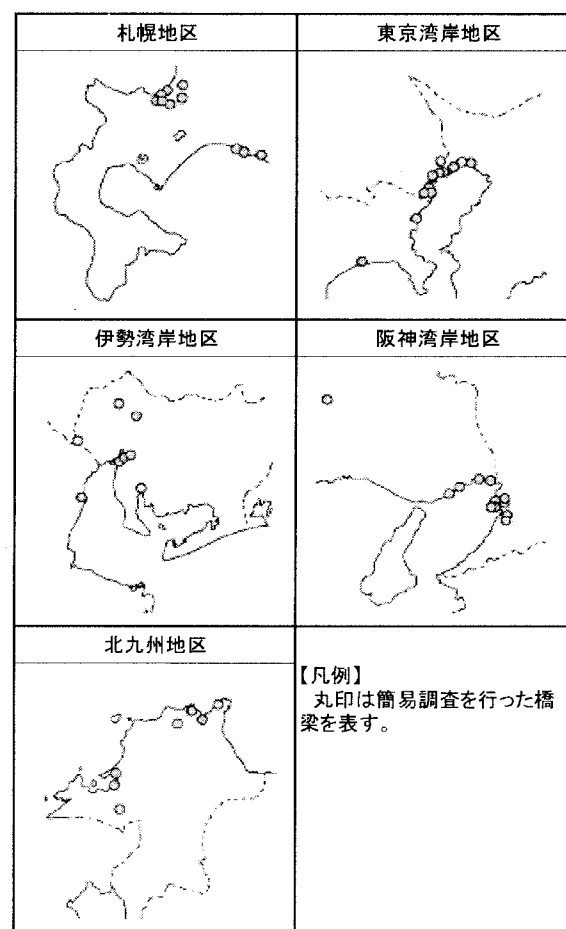


図-2 本研究にて簡易調査を行った橋梁



図-3 レーン変更をする大型車



図-4 橋梁前方で右折するため第二車線に集中する大型車



図-5 対面交通の大型車

床版の疲労との関係については次の3節で述べる。

③ 交通実態の把握

交通実態を把握するために、路線交通量、大型車交通量、大型車の種類や荷物の種類、走行速度などのパラメータを調査する。この場合、簡易な交通量実態調査（車輛台数、車種、軸数等）を行うのが有効である。

④ 交通状況の把握

交通状況とは、各車線が実際にどのような使用をされているか把握する。これは、橋梁の完成図書のみで把握することは困難であり、現地で確認することのみ把握できることである。例えば、大型車が第二車線から第三車線に頻りにレーン変更するケース（図-3）や前方にある交差点から先の交通状況によって、第二車線に大型車が集中しているケース（図-4）などが考えられる。これらは、橋梁の前後での合流や分離、交差点などの路線状況によって決定されるものであり、単に交通量を車線数で除することで車線あたりの大型車交通量が求まらないことを意味している。

⑤ 輪荷重走行位置の確認

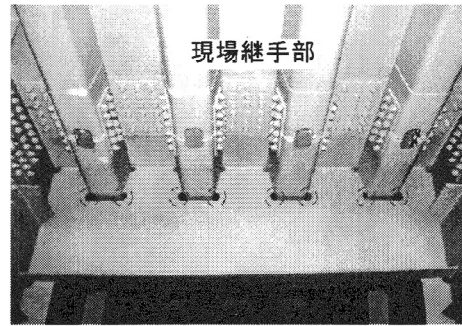


図-6 縦リブと横リブ交差部の調査重点部

舗装のわだち掘れなどの状態や目視調査から、大型車の輪荷重走行位置を確認する。路面の幅員が狭い場合や、片側1車線の対面交通の場合（図-5）、さらには簡易の壁高欄やガードレールが設置されている場合など、ドライバーの心理的に狭隘な印象を与え、走行位置のばらつきを小さくし、これが鋼床版の疲労に大きく影響するような場合もある。

⑥ その他

現地で確認された事項については、全て調査事項とする。例としては、伸縮装置や高欄の損傷、塗装の劣化、桁の振動などが挙げられる。また、桁内調査の実施に向けて、マンホールの位置の確認など桁内へのアプローチ方法についても検討しておくのがよい。

以上の調査・点検結果は、簡易調査終了毎にその都度報告書としてまとめる。

2.5 桁内調査(Step-3)

桁内調査は、簡易調査の結果、疲労損傷の発生が懸念される橋梁を対象に、疲労損傷の有無の確認を目的として実施するものである。具体的には、箱桁内部や検査路などから鋼床版下面の損傷の有無を目視により調査する。

① 目視調査の留意点

目視調査を行うにあたって、調査員は鋼床版の疲労損傷の種類と、その発生位置や損傷の要因について理解し、重点的な調査位置を把握しておく必要がある。

例えば、デッキプレート貫通型クラックの場合、簡易調査において舗装に異常が認められた部分を調査重点部として、超音波探傷試験を行う。また、ビード貫通型クラックは、輪荷重直下の溶接線を中心に目視調査することが基本である。また、縦リブと横リブ交差部のスリット周辺の損傷については、縦リブ内部に設けられる密閉ダイヤフラムによる拘束が交差部の応力に与える影響³⁾を考慮して、図-6のように縦リブ現場継手部に隣接する交差部を重点的に調査する。

② 溶接部の調査

デッキプレートと縦リブの溶接部などにおけるビード形状を把握するため、印象材などによる型取りや、超音波探傷法を利用した溶込み量の確認を行う。

③ 橋梁本体の健全性の確認

塗装の健全性や排水機能の確認（図-7）、高力ボルト接合部の不具合（図-8）など、疲労損傷の

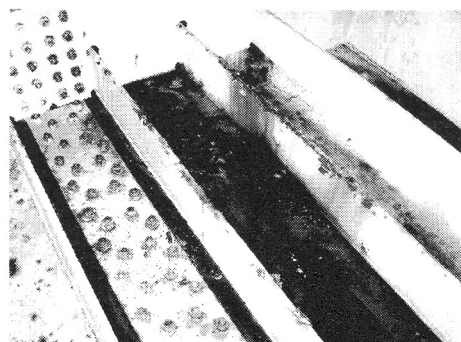


図-7 排水機能の不全による箱桁内の滞水

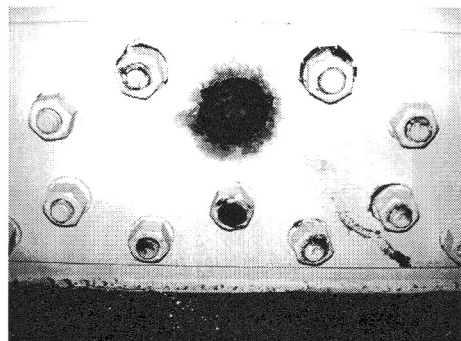


図-8 デッキプレート添接部の高力ボルトの脱落

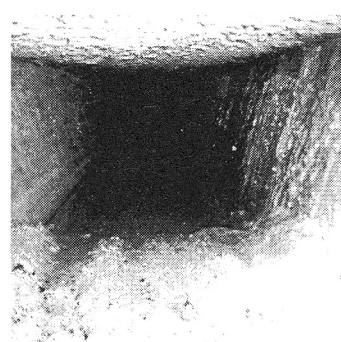


図-9 デッキプレート貫通型クラックが発生した縦リブ内部

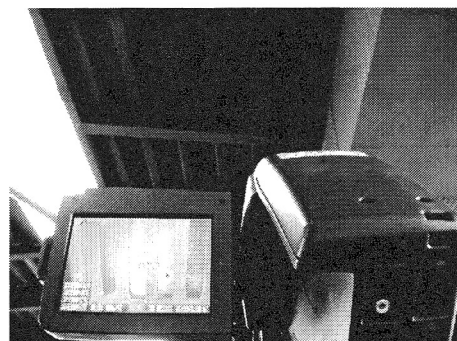


図-10 サーモレーサによる調査

確認とともに橋梁本体の健全性についても確認する。

④ 超音波探傷試験

超音波探傷試験は、目視調査によって塗膜割れなど、疲労損傷の可能性がある部位はもちろんのこと、デッキプレート貫通型クラックの発生の可能性を把握することを目的に実施する。しかし、溶接線全長を対象に超音波探傷試験を実施することは極めて困難であり、あらかじめ探傷箇所を絞り込む必要がある。具体的には、簡易調査において、舗装劣化が激しい箇所を中心に実施するのが効率的である。

⑤ 打音検査と赤外線カメラによる調査

デッキプレート貫通型クラックが発生した場合、き裂部分から縦リブ内部に路面の雨水およびアスファルト成分を含んだ泥分が流入し、これが堆積している場合が多い(図-9)。本研究では、デッキプレート貫通型クラックによる縦リブ内部への堆積物の有無を確認することを目的に、縦リブの打音検査や、アプローチが困難な箇所については赤外線サーモレーサによる遠隔撮影による調査を行い、その適用性の検討を行った⁴⁾(図-10)。

桁内調査の結果は、各橋梁で報告書をまとめ、以降の詳細調査の必要性について検討する。

2.6 詳細調査と応力測定(Step-4)

詳細調査は、実橋で応力測定を実施し、疲労損傷が確認された鋼床版の応力状態を把握するとともに、今後の点検調査の優先度を定める基本資料を得るものである。

本研究においても、デッキプレート貫通型クラックが発生した鋼床版を中心に5橋で応力測定を行った。また、これまでの疲労損傷事例を整理することで、デッキプレ

ート貫通型クラックの発生した鋼床版の特性について考察した。詳細は、第4章に述べることにする。

3. 舗装の損傷と鋼床版の疲労損傷事例

鋼床版の舗装は、一般に厚さ12mmのデッキプレート上に厚さ70~80mmのアスファルト舗装が施工された非常に薄い版構造であり、コンクリート系床版に比べると、輪荷重による床版の局部変形の状態がそのままアスファルト表面に呈することになる。言い換えれば、鋼床版の状態を舗装がそのまま表現しており、舗装の状態が鋼床版の健全性を示す一つのバロメータになるといえる。

筆者らは、図-2に示した鋼床版橋梁について、簡易調査で確認した舗装の劣化と桁内調査で実際に確認した鋼床版の疲労損傷事例についてその関係を整理した。表-2に一覧表として示す。

(1) デッキプレート貫通型クラック

表中①は、縦リブとデッキプレート溶接部において、デッキプレート貫通型クラックが発生した鋼床版舗装の状態を示す。クラックが溶接線に沿ってある程度成長すると、デッキプレートが局部的に沈み込むために、舗装表面に亀甲(蜘蛛の巣)状のひび割れが発生することが特徴である⁵⁾。また、ひび割れと同時に、繰り返し同じ箇所が補修舗装された痕跡がある場合は、この種の疲労損傷に対して特に注意しなければならない。

(2) 溶接ビード貫通型クラック

表中②は、縦リブとデッキプレート溶接部において、溶接ビード貫通型クラックが発生した鋼床版舗装の状態を示す。この事例の鋼床版では、大型車の通行量が多く、縦リブ溶接線位置と一致した箇所に舗装の縦ひび割れが

表-2 舗装の劣化とその箇所で確認された鋼床版の損傷

	①デッキプレート貫通型クラック	②溶接ビード貫通型クラック	③垂直補剛材上端部クラック	④垂直補剛材上端部クラック	⑤桁端部の舗装ずれと滞水
舗装のひび割れと鋼床版の損傷					
	亀甲状ひび割れと陥没。頻繁な補修痕	縦リブ溶接線に沿ったひび割れ	垂直補剛材位置での亀甲状ひび割れ	垂直補剛材間隔に一致したひび割れ	舗装のずれ 舗装の浮き出し デッキプレート上面の滞水
		デッキプレート貫通 垂直補剛材	垂直補剛材 溶接ビード貫通		

複数確認されている。図-11 は、縦リブ溶接部位置の舗装表面に人工き裂（縦方向のひび割れ）を導入した場合の縦リブ溶接部近傍の応力変化を示したものであり⁶⁾、舗装のひび割れが鋼床版の局部応力を高めることを示唆している。つまり、舗装のひび割れ位置が桁内調査の際の目視調査において着目すべき部位になるといえる。

(3) 垂直補剛材上端部のデッキプレート貫通型クラック

表中③は、主桁垂直補剛材上端部において、デッキプレート貫通型クラックが発生した鋼床版舗装の状態を示す。垂直補剛材位置において、①と同様に亀甲状のひび割れが発生しているのが特徴である。

(4) 垂直補剛材上端部の溶接ビード貫通型クラック

表中④は、主桁垂直補剛材上端部において、溶接ビード貫通型クラックが発生した鋼床版舗装の状態を示す。垂直補剛材の間隔で、舗装表面にひび割れが発生しているのが確認できる。

(5) 桁端部での舗装ずれとデッキプレート上面での滞水

表中⑤は、桁端部の縦断勾配の低い側において、衝撃や縦断勾配によって舗装のずれが発生したものである。舗装のひび割れから雨水が浸入・デッキプレート上面に滞水し、デッキプレートを腐食させて板厚が減少している可能性がある。また、伸縮装置の損傷によっても、雨水が浸入する場合もある。

このように、鋼床版舗装の状態は、鋼床版の健全性を示す重要な情報を示している可能性がある。つまり、路面上からの調査において、舗装の状況で簡易に鋼床版の健全性を判断することも可能であるといえる。

4. 応力測定の概要と結果

4.1 応力測定の概要

詳細調査 (Step-4) における応力測定とは、軸重が既

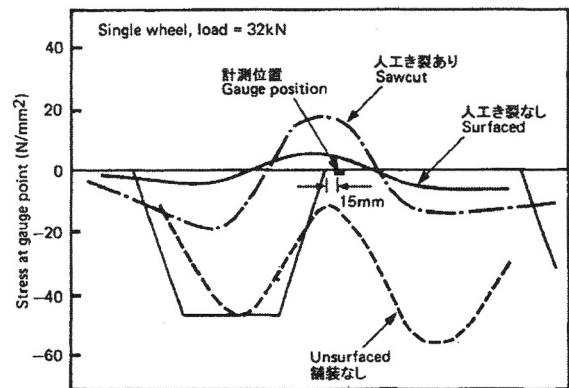


図-11 舗装に人工き裂を入れた場合の鋼床版の応力⁶⁾

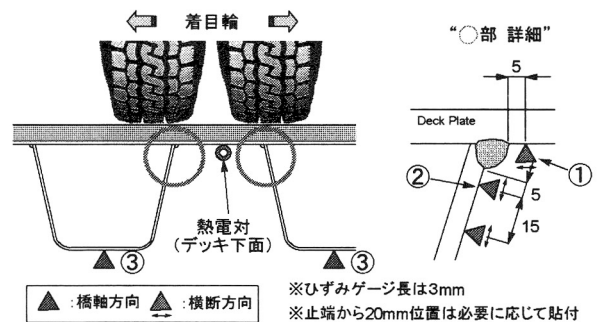


図-12 応力測定標準位置

知な荷重車による動的載荷試験と、原則平日 72 時間の応力頻度測定で構成される。荷重車の載荷試験は、荷重の載荷位置や荷重車の走行速度と鋼床版の発生応力との関係を知るのに加え、応力頻度測定のためのキャリブレーションの役割も果たす。

応力測定を行うのは、原則として、桁内調査において疲労損傷が確認されたか、発生が懸念される橋梁を対象とする。疲労損傷が確認された橋梁については、損傷位置近傍もしくは同一溶接線上を計測点とする。

本研究では、デッキプレートと縦リブ溶接部については、他の実験や研究機関による検討事例と比較できるように、標準的な応力測定位置（ひずみゲージ位置）を図-12のように定めた。即ち、着目する溶接部のビード止端から5mm位置にゲージ長3mmのものを貼付する。デッキプレートと縦リブ溶接部の応力状態は、デッキプレート側①、縦リブ側②でのひずみを検証の指標とする。縦リブ下フランジのゲージ③は、縦リブの荷重支持分担率や、舗装の剛性の評価などに用いる。

4.2 頻度測定結果

本文では、紙面の都合上、表-3に示した5橋の応力頻度測定結果について報告する。対象橋梁には、実際に疲労損傷が確認された橋梁を含んでいる。

表-4は、各橋梁での測定結果のうち、縦リブとデッキプレート溶接部のデッキプレート側（ゲージ①）の応力の頻度測定結果を示したものである。ここでは、レインフロー法によって得られた応力範囲で整理した。B橋を除く4橋は、同一時期の計測結果である。

計測結果から求めた等価応力度（ $m=3$ 、打切り限界考慮せず）でみると、デッキプレート貫通型クラックが確認されたA橋およびB橋の等価応力度 30 N/mm^2 以上であり、他の3橋に比べて高い水準にあることが判る。夏期に計測したB橋では、着目部の最大発生応力度が 170 N/mm^2 を超えており、交通荷重実態が厳しいことが伺える。またA橋は、橋面舗装が激しく劣化しており、舗装の剛性が期待できる時期の計測にもかかわらず高い水準となっている。このように、デッキプレート貫通型クラックが確認された鋼床版では、溶接部近傍の応力が高い状態にあり、デッキプレート下面における夏期の等価応力度で 30 N/mm^2 以上となっている。なお、ビード貫通型クラックが発生したE橋については、縦リブ側（ゲージ②）にも着目する必要がある、引き続き分析したい。

次に、表-3に示した5橋に加え、本研究で調査対象とした閉断面の縦リブを用いた鋼床版橋梁について、大型車交通量（平成11年度交通センサデータより）と供用年数との関係を整理したものを図-13に示す。疲労損傷が確認された橋梁のほとんどが、図中の大型車の累積交通台数の一定曲線②（累積台数 2.5×10^7 台）以上の領域に位置していることが判る。累積交通台数のみで疲労損傷の有無を判断できないが、この曲線②が今後の桁内調査の優先度を判断する重要な指標の一つになるといえる。

5. まとめ

本文では、効率的な鋼床版の疲労に着目した調査点検手法の確立に向けた取り組みについて述べた。実橋の調査点検や応力測定を行う中で、鋼床版の疲労に関わる貴重な基礎データを蓄積した。今後は、得られたデータのさらなる分析を進めるとともに、調査点検要領に反映できる有効な提案を行っていきたいと考えている。

表-3 応力頻度測定を行った橋梁の概要

橋梁名	完成年	デッキプレート厚 (mm)	縦リブ厚 (mm)	路線の特徴	確認されている疲労損傷
A橋	1978	12	8	湾岸工業地域産業道路	デッキプレート貫通型クラック
B橋	1980	12	8	湾岸工業地域産業道路	デッキプレート貫通型クラック
C橋	1993	12	6	都市間の連絡道路	今のところ未確認
D橋	1983	12	8	都市間の連絡道路	垂直補剛材上端部 縦リブ突き合わせ溶接部
E橋	1984	12	8	湾岸工業地域産業道路	ビード貫通型クラック

表-4 応力頻度測定結果

橋梁名	デッキプレート下面 (N/mm^2)			総カウント数 (回)	応力計測時期
	等価応力度	上位5%応力度	最大応力度		
A橋*	33.3	57.6	115.0	19,573*	3月 (外気温 $2.9^\circ\text{C} \sim 15.8^\circ\text{C}$)
B橋	34.6	55.5	170.4	79,513	8月 (外気温 $26.0^\circ\text{C} \sim 34.0^\circ\text{C}$) (デッキ下面 最高 47.5°C)
C橋	7.4	3.9	35.5	19,993	10月 (デッキ下面 $4.0^\circ\text{C} \sim 26.3^\circ\text{C}$)
D橋	10.6	16.1	32.0	10,929	3月 (デッキ下面 $4.4^\circ\text{C} \sim 25.4^\circ\text{C}$)
E橋	15.4	36.0	76.0	20,479	3月 (デッキ下面 $5.2^\circ\text{C} \sim 26.7^\circ\text{C}$)

*A橋のみ24時間頻度計測。総カウント数24時間分

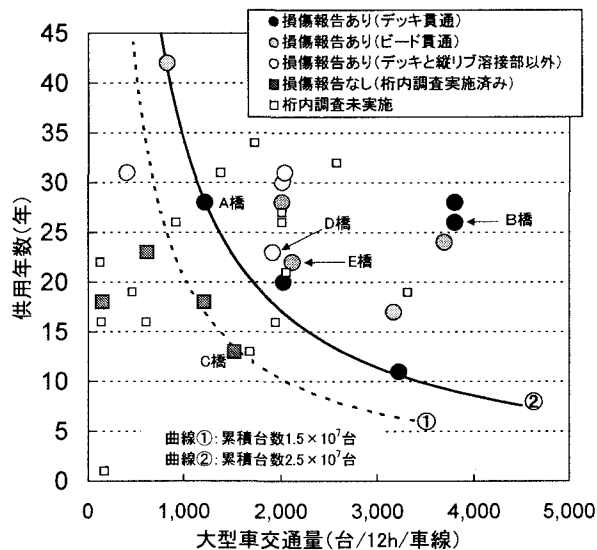


図-13 調査対象の鋼床版橋梁の大型車交通量と供用年数との関係

参考文献

- 例えば、西川：SFRCによる鋼床版舗装—鋼とコンクリートの新しい関係—、橋梁と基礎 (2005.8)
- 川畑、井口、松下、山地、佐藤、玉越、水津：鋼床版橋梁点検手法確立のための現地調査、土木学会第60回年次学術講演会概要集 (2005.9)
- 井口、寺尾、西野、村越：鋼床版SFRC舗装施工前の静的載荷試験、土木学会第60回年次学術講演会概要集 (2005.9)
- 木内、玉越、中洲、川畑：鋼床版の簡易検査手法（非破壊検査の適用性）、土木学会第61回年次学術講演会概要集（投稿中） (2006.9)
- Pe.de.Jong：Overview Fatigue Phenomenon in Orthotropic Bridge Decks in the Netherlands, 2004 Orthotropic Bridge Conference, Sacramento, California, U.S.A. pp.489-512.
- Tim Gurney: STATE-OF-THE-ART REVIEW 8 FATIGUE OF STEEL BRIDGE DECKS, TRANSPORT RESEARCH LABORATORY Department of Transport 1992