

3. 鋼床版の維持管理における調査方法 —実態調査に基づく鋼床版の点検手法の検討—

技術委員会 鋼床版小委員会

1. はじめに

近年、交通量が多い路線の鋼床版橋梁において、建設当初の想定を超えた大型車両の交通量が原因と考えられる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、Uリブ）とデッキプレートとの溶接部における疲労損傷が確認されている¹⁾。主な疲労損傷の箇所を図-1に示す。U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「ビード進展き裂」と、デッキプレートの板厚方向に進展する「デッキ進展き裂」に分類される。このうち、デッキ進展き裂は、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、車輛の走行性に悪影響を及ぼす可能性があることから、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、当協会と国土技術政策総合研究所との共同研究により、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抽出方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。また、研究活動の一環として、実際の鋼床版橋梁の置かれている現状や疲労損傷の有無、橋梁本体の健全性を確認するために全国の鋼床版橋梁を対象として現地調査を行った。

本文では、上記の共同研究による成果として取りまとめた報告書をもとに、その概要について述べる。

2. 鋼床版の概要

鋼床版は、自動車荷重を直接受けるデッキプレートと、これを下面から橋軸方向、橋軸直角方向に支持し

て剛性を付加する、縦リブと横リブによって構成された床版である（図-2）。そして、コンクリート系床版と比較して軽量であるため、長支間の橋梁や地盤条件の悪い箇所での架橋において優位性が発揮される。また、床版を含めた桁高を低くできるため、桁高の制約が厳しい箇所においても採用されることがある。

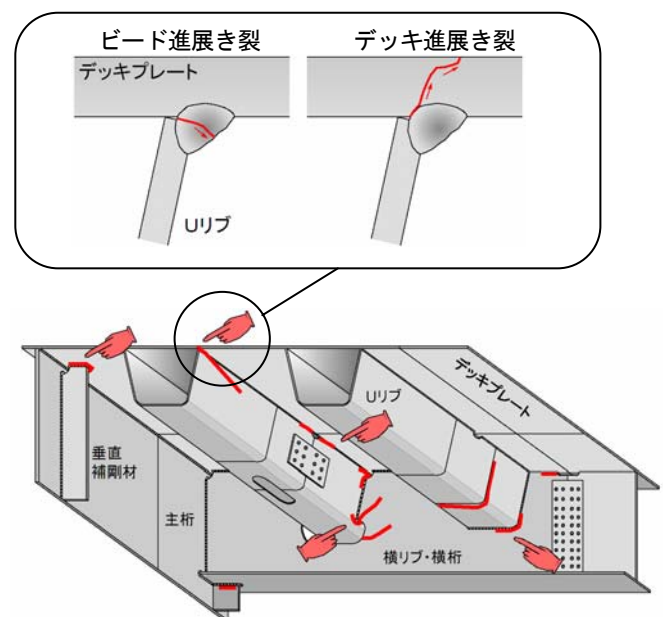


図-1 主な鋼床版の疲労損傷

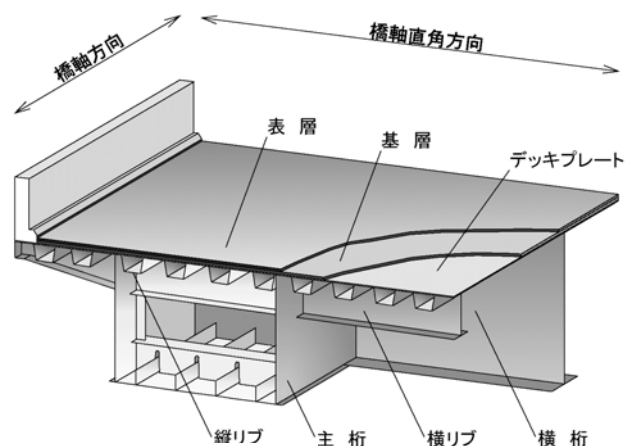


図-2 鋼床版の構造の例

鋼床版の疲労設計について、「鋼道路橋の疲労設計指針」³⁾では、鋼床版構造の条件を限定した上で、疲労耐久性が確保できる構造詳細を規定している。これは、鋼床版の溶接継手部は一般的な鋼桁の溶接継手とは異なり、局所的な変形挙動が疲労損傷に対する主要因となること、輪荷重の形状や、輪荷重走行位置の分布などの影響が大きいこと、さらに季節によって変動する舗装剛性の影響も考慮する必要があることから、通常の設計計算で得られる応力範囲を基にした疲労耐久性の評価が困難なためである。

3. 調査点検手法の立案に向けた方針と実践手順

3. 1 調査点検の方針

本研究では、緊急性の高いデッキ進展き裂を中心として、鋼床版の疲労損傷の全般を対象としている（図-1）。

前述のように、鋼床版の疲労損傷は、通常の設計計算では考慮していない、複雑な変形挙動とそれに起因する応力集中が原因となる。そのため、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。

調査点検手法を立案するにあたっては、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調査対象の抽出方法や調査点検手法について検討を行うことを目指している。

3. 2 調査点検の手順

効率的にき裂発生の危険性の高い鋼床版および部位の抽出を行うために、4つの段階に分けて調査することを基本とする（図-3）。

なお、実際の調査では現地状況や収集可能な資料によって、ここに示す4段階の手順で行わず、いくつかの調査を並行して行う方が効率的な場合もあると考えられる。そのため、ここに示す各段階の構成や内容はあくまで目安であり、調査対象や現地状況に応じて適切なものとなるよう計画するのがよい。

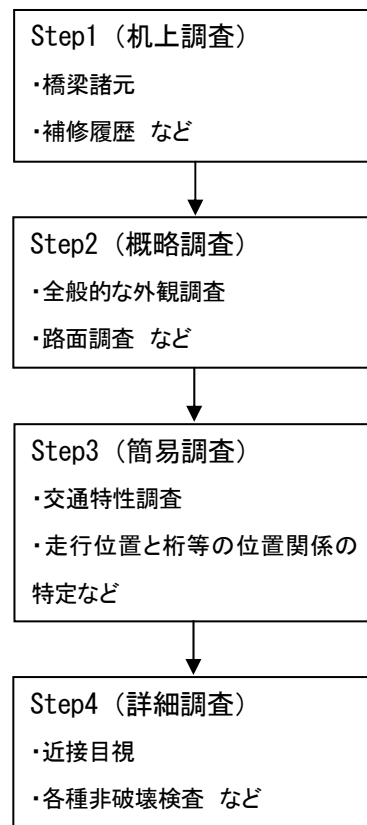


図-3 段階調査の手順

3. 3 机上調査 (Step-1)

机上調査は、鋼床版橋梁の中からデッキ進展き裂を生じる可能性のある橋梁を抽出する目的で行うこととする。橋梁台帳、設計図書等、製作・施工報告書、点検・補修に関する資料、架橋環境条件に関する資料より、次の項目について着目する。

- 1) 鋼床版の構造諸元
- 2) 大型車交通量（供用以来の累積台数）
- 3) 舗装の更新や修復履歴
- 4) 鋼床版の既往の疲労損傷の有無やその種類

ここでは、机上調査により次に行う概略調査の対象橋梁として計50橋を抽出した（図-4）。これらの橋梁には、以下に示す3つの特徴がみられる。

- ①供用後20年程度経過している。
- ②大都市圏、湾岸地域、都市間幹線などの重交通路線に位置している。
- ③過去に舗装の打ち替えが頻繁に行われている。

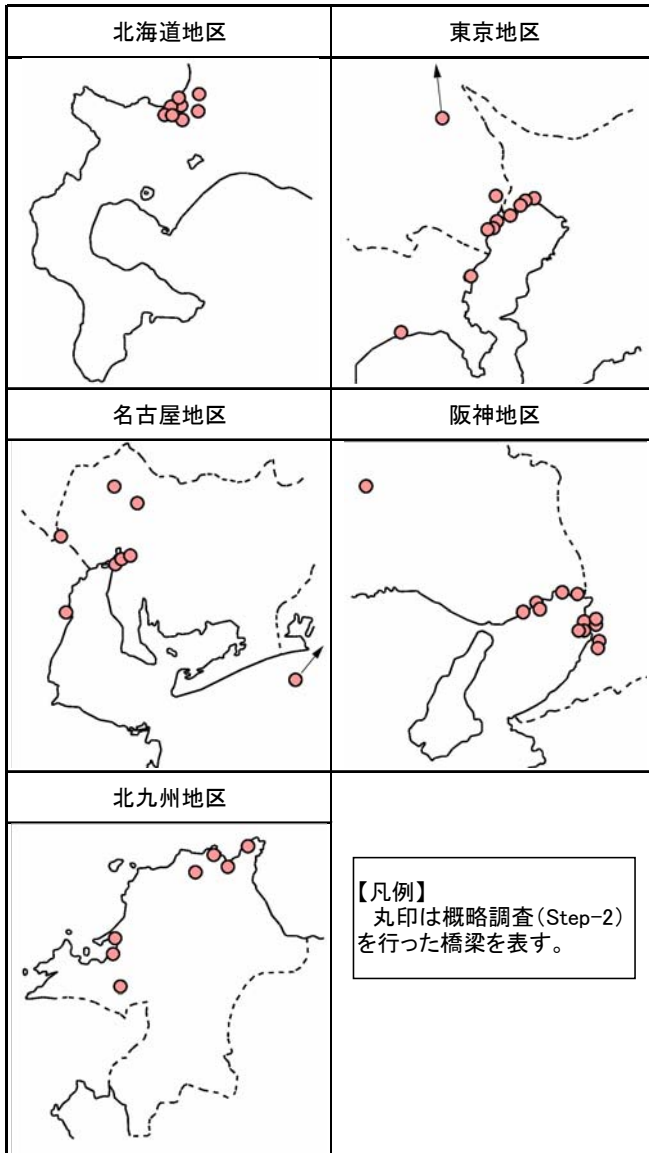


図-4 本研究にて概略調査を行った橋梁

3. 4 概略調査 (Step-2)






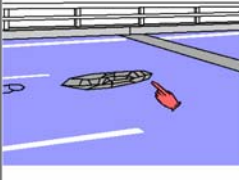
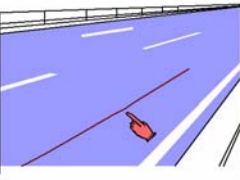

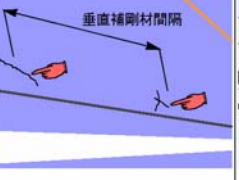
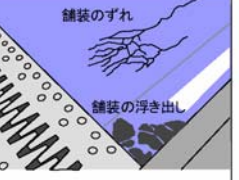
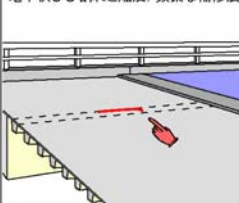


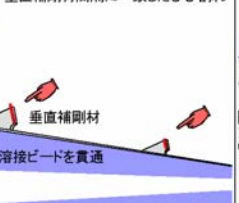
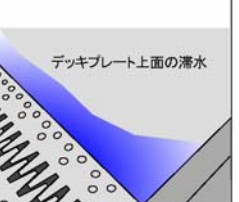
概略調査は、机上検討で抽出された橋梁に対して、デッキ進展き裂の可能性のより高い橋梁および径間を抽出することを目的とする。

交通規制や足場設置や電源の確保などが必要となる、近接の目視調査、非破壊検査や舗装部撤去等の調査に対して、あらかじめ調査対象径間などをより限定した領域に絞り込むものが概略調査である。歩道あるいは走行車両からの外観目視調査を基本として、舗装の変状に着目した調査を行う。

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。アスファルト舗装の疲労耐久性は鋼床版の溶接部よりも低く、劣化のメカニズムも異なるため、舗装が損傷している箇所にも必ずしも鋼床版の疲労損傷が生じているとは限らないが、舗装の状態は、その路線の交通実態や、鋼床版の健全性を推察するための重要なバロメータである。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。

図-4 で示した鋼床版橋梁について、概略調査で確認した舗装のひび割れと詳細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結果を示す。表-2 に一覧表として示す。

表-2 舗装のひび割れとその箇所を確認された鋼床版の損傷

	①デッキ進展き裂	②ビード進展き裂	③垂直補剛材部のデッキ進展き裂	④垂直補剛材部のビード進展き裂	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
					
		デッキプレートを貫通 垂直補剛材	垂直補剛材間隔 溶接ビードを貫通	垂直補剛材 溶接ビードを貫通	デッキプレート上面の滞水

(1) デッキ進展き裂

表-2 中①は、Uリブとデッキプレート溶接部において、デッキ進展き裂が発生した鋼床版舗装の状態を示す。き裂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、舗装表面に亀甲あるいは蜘蛛の巣状のひび割れが発生することが特徴である⁴⁾。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) ビード進展き裂

表-2 中②は、縦リブとデッキプレート溶接部において、ビード進展き裂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複数確認されている。図-5 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⁷⁾、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はより大きな疲労被害を受けている可能性が高く、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。

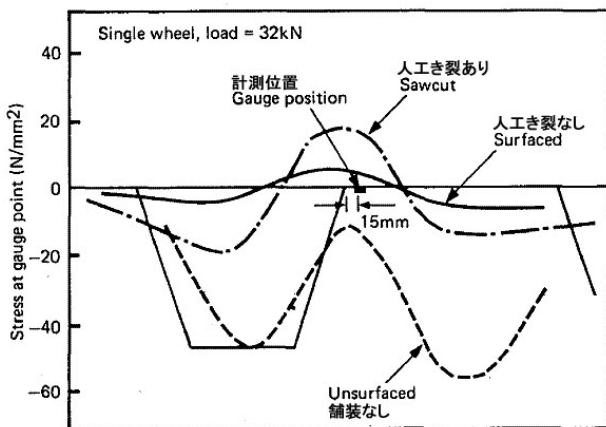


図-5 舗装に人工き裂を入れた場合の鋼床版の応力⁵⁾

(3) 垂直補剛材部のデッキ進展き裂

表-2 中③は、主桁垂直補剛材上端部において、デッキ進展き裂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) 垂直補剛材部のビード進展き裂

表-2 中④は、主桁垂直補剛材上端部において、ビード進展き裂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) 桁端部の舗装ずれとデッキプレート上面の滞水

表-2 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、舗装の状況で鋼床版の健全性を簡易的に判断することも可能であるといえる。

3. 5 簡易調査 (Step-3)

簡易調査は、供用性やコスト面への影響が大きい詳細調査を行う前に、調査対象部位を絞り込むことを目的とし、概略調査で抽出された橋梁に対して、デッキ進展き裂の有無の可能性に対する評価を行うものである。

具体的には、これまでの調査 Step で得られた情報をもとに実際の交通状況、車両走行位置、舗装の損傷位置を把握する。その他、橋梁本体の健全性に関わる損傷についても把握する。

(1) 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(写真-1, 写真-2)。この場合、簡易な交通量実態調査(車輛台数、車種、軸数等)が有効である(写真-3, 写真-4)。

また、交通流の実態として、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とも重要である。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、現地を確認することで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繁にレーン変更するケース(写真-5)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(写真-6)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。交通

センサデータからは、上記のような交通流の把握はできないため、現地での簡易な交通量実態調査を行うことは重要である。



写真-1 港湾荷役車両の多い交通



写真-2 鉄鋼荷役車両の多い交通



写真-3 ビデオカメラによる計測



写真-4 簡易な目視調査



写真-5 大型車の頻繁な車線変更



写真-6 右折レーンへの交通集中

(2) 輪荷重走行位置の確認

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(写真-7)、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(写真-8)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。



写真-7 大型車の離合



写真-8 ガードレールの設置による圧迫感

(3) 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、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（写真-9、写真-10）。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。



写真-9 伸縮装置の損傷



写真-10 高欄の腐食

3.6 詳細調査 (Step-4)

詳細調査は、簡易調査で抽出された鋼床版について、デッキ進展き裂を含む疲労損傷の発生の有無を確認することを目的とする。

スクリーニングによる絞り込みが行われた鋼床版に対し、具体的に疲労損傷の発生の有無を確認するとともに、今後の補修補強など当該橋梁の維持管理計画の策定に必要な情報を得るものが詳細調査である。

鋼床版裏面、箱桁内部からの目視調査（舗装は適宜撤去）、磁粉探傷や超音波探傷試験などの非破壊検査、場合に応じて舗装撤去調査、溶接ビード形状の確認、ウリブ内部の堆積物の確認、応力測定などの詳細調査を行う。

(1) 目視調査の留意点

目視調査を行うにあたっては、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、デッキ進展き裂の場合、簡易調査において舗装に異常が認められた部位を調査重点箇所として、超音波探傷試験を行う。

また、ビード進展き裂は、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、ウリブと横リブ交差部のスリット周辺の損傷については、ウ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⁶⁾を考慮して、写真-11のようにウリブ現場継手部に隣接する交差部を重点的に調査する。



写真-11 ウリブと横リブ交差部の調査重点

(2) 溶接部の調査

デッキプレートとウリブの溶接部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（写真-12）、超音波探傷法を利用した溶込み量の確認を行う。

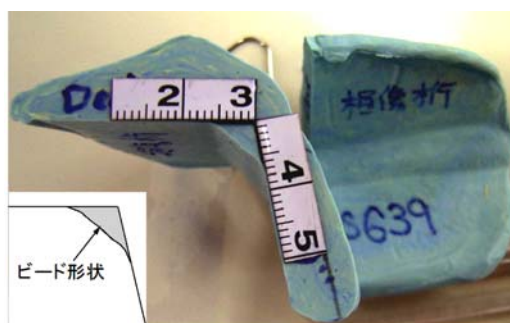


写真-12 印象材によるビード形状の計測

(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（写真-13）、高力ボルト接合部の不具合（写真-14）など、疲労損傷および橋梁本体の健全性について確認する。

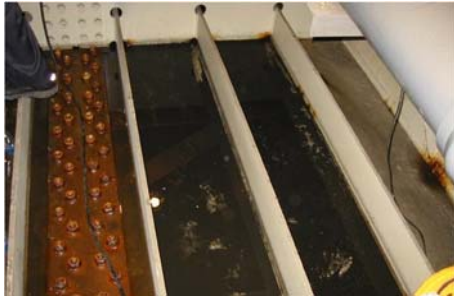


写真-13 排水機能の不全による箱桁内の滞水



写真-14 デッキプレート添接部の高力ボルトの脱落

(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、デッキ進展き裂の発生の有無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の近傍を中心に実施するのが効率的である。

(5) Uリブ内部の堆積物の調査

デッキ進展き裂が発生した場合、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ことが多い(写真-15)。本研究では、デッキ進展き裂によるUリブ内部への堆積物の有無を確認することを目的に、たたき検査(写真-16)や超音波検査(写真-17)、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(写真-18)を行い、その適用性を検証した⁷⁾。



写真-15 デッキ進展き裂が発生したUリブ内部



写真-16 Uリブのたたき検査

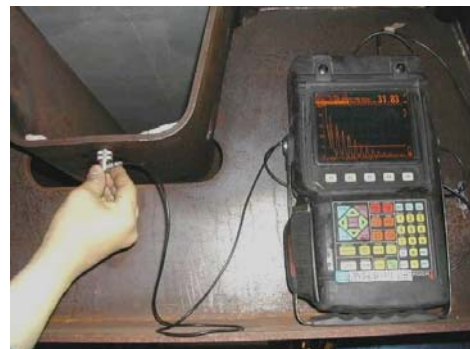


写真-17 超音波検査



写真-18 サーモレーサによる調査

4. 応力測定の概要と結果

4. 1 応力測定の概要

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し、今後の点検調査の優先度を定める基本資料を得るものが応力測定である。

本研究においても、デッキ進展き裂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、デッキ進展き裂の発生した鋼床版の特性について考察した。

詳細調査 (Step-4) における応力測定は、軸重が既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、応力頻度測定結果から実交通状態を推察する際にも役立つ。

応力測定を行うのは、原則として、詳細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が、計測位置に疲労損傷がないことを事前に確認しておく必要がある。

本研究では、デッキプレートとU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-6 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 のひずみゲージを貼付する。デッキプレートとUリブ溶接部の応力状態は、デッキプレート側①、U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、U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。

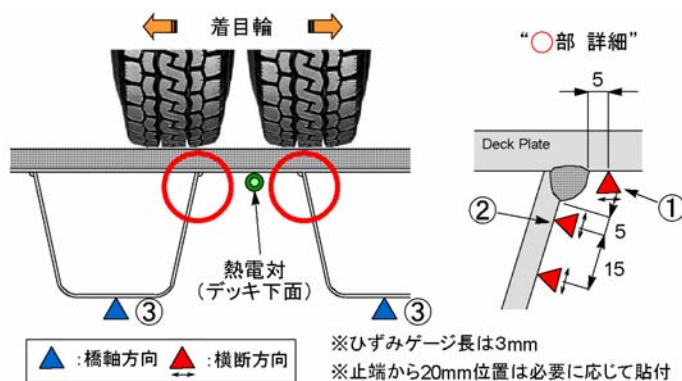


図-6 応力測定の標準位置

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、U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。C1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範囲 (疲労設計曲線の傾きを表す係数 $m=3$, 打ち切り限界考慮せず) でみると、デッキ進展き裂が確認された M2 橋および C1 橋の等価応力範囲は 30N/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 M2 橋では、着目部の最大発生応力範囲が 170N/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 C1 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、デッキ進展き裂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範囲で 30N/mm^2 以上となっている。

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)	Uリブ厚 (mm)	路線の特徴	確認されている疲労損傷
M2橋	1980	12	8	湾岸工業地域産業道路	デッキ進展き裂
C1橋	1978	12	8	湾岸工業地域産業道路	デッキ進展き裂
O12橋	1984	12	8	湾岸工業地域産業道路	ビード進展き裂
C7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
H7橋	1993	12	6	都市間の連絡道路	今のところ未確認

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
	等価応力範囲	上位5%応力範囲	最大応力範囲		
M2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)
C1橋*	33.3	57.6	115.0	19,573*	3月 (外気温 $2.9^\circ\text{C} \sim 15.8^\circ\text{C}$)
O12橋	15.4	36.0	76.0	20,479	3月 (デッキ下面 $5.2^\circ\text{C} \sim 26.7^\circ\text{C}$)
C7橋	10.6	16.1	32.0	10,929	3月 (デッキ下面 $4.4^\circ\text{C} \sim 25.4^\circ\text{C}$)
H7橋	7.4	3.9	35.5	19,993	10月 (デッキ下面 $4.0^\circ\text{C} \sim 26.3^\circ\text{C}$)

*C1橋のみ24時間頻度計測、総カウント数24時間分

次に、表-3 に示した5橋に加え、本研究で調査対象としたU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-75 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①（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①が今後の詳細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。

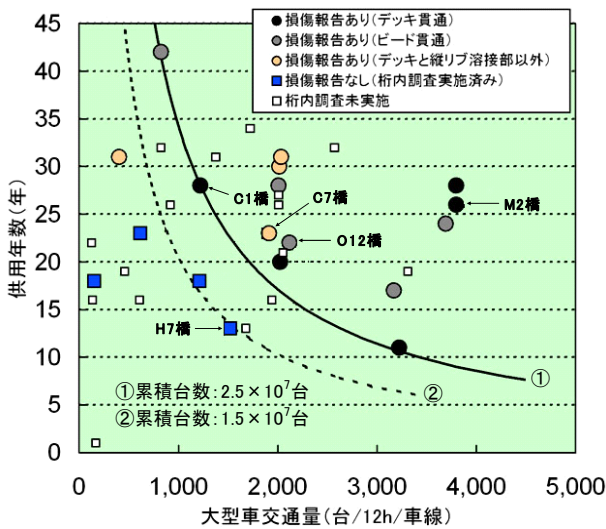


図-7 調査対象の鋼床版橋梁の大型車交通量と供用年数との関係

5. まとめ

本文では、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関して、以下のことについて述べた。

- 1) 鋼床版のデッキ進展き裂を主眼に点検や調査の対象橋梁の絞込み手法を提案した。
- 2) これらの損傷が疑われる部位に対する有効な調査手段の検証を行った。
- 3) 実橋の調査点検や応力頻度測定を行った。その結果、疲労損傷が発生している鋼床版は、重交通路線でかつ、厳しい疲労環境にある橋梁に集中していることが分かった。

6. 今後の展望

鋼床版の疲労損傷に対しては、種々の機関において検討が行われており、緊急を要する損傷に対しては、最新の知見に基づいた補修・補強が実施されている。

当協会では、疲労損傷の発生メカニズムの解明のほか、国土技術政策総合研究所および土木研究所との共同研究において、デッキプレートの増厚を主眼とした構造改良の検討を行っている。

また、鋼床版の疲労き裂全般についても対象として、デッキプレートの増厚のみならず、さまざまな角度から鋼床版の耐久性向上に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 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）
- 2) 国土交通省・国土技術政策総合研究所、(社)日本橋梁建設協会：鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究—実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討—、国総研資料NO.471、(2008.8)
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、(2002.3)
- 4) 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.
- 5) Tim Gurney: STATE-OF-THE-ART REVIEW 8 FATIGUE OF STEEL BRIDGE DECKS, TRANSPORT RESEARCH LABORATORY Department of Transport 1992
- 6) 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)
- 7) 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(2006.9)