

## 第3章 デッキプレート貫通き裂に着目した鋼床版の段階的調査手法

### 3.1 はじめに

前述したように、デッキプレート貫通き裂は、外観目視で発見ができない上、超音波探傷試験などの非破壊検査を用いても、膨大な数の橋梁、さらにそのトラフリブの溶接線全てを網羅的に調査することは非効率で膨大な作業となる。

そのためデッキプレート貫通き裂の検出を目的とした鋼床版橋梁の点検調査手法について、ある程度の信頼性を維持しつつ効率的に行うことができる段階的調査手法について検討する。

本研究では、第1章及び第2章でデッキプレート貫通き裂の発生と密接に関連があると思われる事項（損傷形態や構造的条件など）について実際にき裂を生じた実橋の調査と FEM モデルによる数値解析からその抽出について検討を行った。

本章では、これらの結果をふまえてデッキプレート貫通き裂に着目した鋼床版橋梁の段階的調査方法について検討する。段階的調査方法の手順は一般に道路橋で行われる定期点検から詳細調査に至る手順を参考に以下の段階を基本にその具体的な内容について検討する。

#### ①Step1（机上調査）

膨大な数の鋼床版橋梁から、過去にデッキプレート貫通き裂の発生が報告されている橋梁との比較において構造諸元（縦リブの構造、デッキプレート、トラフリブの厚さ）及び、使用条件（供用年数、交通量、架橋状況）、損傷実態（舗装の補修履歴など）などが類似あるいはデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接線の応力変動振幅の観点から同程度以上に厳しいと考えられるものを抽出する。

#### ②Step2（概略調査）

実際にデッキプレート貫通き裂を生じた橋梁に対する現地調査結果を考慮し、現地の交通実態や舗装の損傷等を外観目視で確認し、き裂発生の可能性の高い橋梁や径間を抽出する。

#### ③Step3（簡易調査）

概略調査でき裂発生の可能性が高い状態であると抽出された橋（あるいは径間）について、実際の車両走行位置、及び、舗装の損傷位置、並びに、トラフリブ、及び、主げたの位置との関係を確認し、桁下からのより詳細な調査を行う対象箇所を絞り込みを行う。

なお、この段階では次の段階で行う非破壊検査や塗膜除去・復旧の方法、調査や作業のための各部位への具体的な近接手段、資機材や電源の確保などの実施計画の作成に必要な情報の把握も行うことになる。

#### ④Step4（詳細調査）

デッキプレート貫通き裂の発生の有無、位置等の特定を行うために、非破壊検査機器による調査や必要に応じて部分的な舗装の除去による上面からのき裂確認など詳細な調査を行う。



図 3.1-1 段階的調査手法のイメージ

### 3.2 机上調査(Step1)

机上調査は、実際の橋梁に対する現地調査を行う前に、以下の観点から点検調書や橋梁台帳などのデータや設計図書、工事記録などの文書等から、デッキプレート貫通き裂を生じる可能性が相対的に高いと考えられる橋梁を絞り込むことを目的とする。

主な絞り込みの観点は、前章までの検討結果を踏まえて以下のものが考えられる。

①鋼床版の構造諸元に次の条件に合致するものが用いられている。

- ・デッキプレート厚 12mm
- ・トラフリブの厚さ 6mm または 8mm

②供用開始以来の1車線あたりの累積大型車交通量が2000万台以上であること。

③舗装の更新履歴があるか、または舗装の補修履歴が多いこと。

(特に特定の位置の車線方向にポットホールの発生や連続的なひびわれが報告されている場合は優先度が高い)

なお、この段階では個別の径間までの特定は行わず、上記条件により多く合致する橋梁を絞り込むにとどめる。これは、デッキプレート厚が12mmを超えるものについても非破壊検査(超音波探傷試験)によってデッキプレート方向へのき裂が検出された事例があることと、多径間連続の橋梁においてデッキプレート貫通き裂の発生位置について橋軸方向に特段の傾向が見い出せていないことによる。

### 3.3 概略調査 (Step2)

#### 3.3.1 概要

概略調査は、Step1 で抽出された調査対象橋梁に対して、実際に現地における現況の確認を行い、その結果からデッキプレート貫通き裂の発生の可能性の高い橋梁や径間を抽出することを目的とする。

デッキプレート貫通き裂の発生の有無を確認するためには、最終的にはデッキプレートとトラフリブの溶接部に近接しての超音波探傷試験などの非破壊検査、あるいは舗装の部分撤去など、いずれも足場や電源等の資機材の準備や交通規制などが必要となる。そのため比較的大規模な橋梁が多い供用中の鋼床版橋梁に対して、これらの調査を行うためにはあらかじめ調査対象径間などをより限定した領域に対象部位を絞り込むことが効率的、経済的に調査を行うためには不可欠である。

ここでは、主に全般的な外観目視による、現地の交通実態や舗装の損傷等の把握によってデッキプレート貫通き裂発生の可能性の高い径間を絞り込む方法について検討する。

#### 3.3.2 舗装調査

##### (1) 概要

デッキプレート貫通き裂が生じている橋梁の実態調査ではいずれも舗装の損傷が著しいことから、舗装の損傷実態の傾向と特徴について分析し、Step2 としてのデッキプレート貫通き裂に関する調査・点検のスクリーニングが行える手法について検討する。

薄肉であるデッキプレートに施工される鋼床版舗装は、デッキプレートと合成状態が十分に保持されていれば、鋼床版の変形に追従して変形する。したがって、鋼床版の変形状態そのものを映し出していると言える。つまり、鋼床版に疲労損傷が発生しその変形状態が健全な場合と異なったものとなった場合には橋面舗装の変状に現れる可能性がある。例えば、文献 3.1) では、縦リブ（トラフリブ）とデッキプレート溶接部に発生した鋼床版のき裂損傷が鋼床版のたわみや応力、路面の走行性に与える影響を考察している。また、橋面舗装の劣化が鋼床版の疲労損傷を促進する可能性もある。文献 3.2) では、縦リブ（トラフリブ）ウェブ上の舗装表面に人為的に橋軸方向のひび割れ（Saw Cut）を導入した場合の、トラフリブとデッキプレート溶接部近傍の応力状態について検討しており、舗装のひび割れによってデッキプレートの応力は位置によっては舗装が健全な場合の約 1.5 倍になることが示されている（図 3.3-1）。

これらのことから、舗装の劣化や損傷の状況を路面上から観察することで、デッキプレート貫通き裂またはそれ以外の鋼床版のデッキプレートとの溶接線などにき裂損傷が生じている可能性が高いことを推定できる可能性がある。

ここでは、鋼床版舗装に見られる損傷形態と鋼床版の疲労き裂との関係について考察を行い、デッキプレート貫通き裂またはそれ以外の鋼床版のデッキプレートとの溶接線などに生じるき裂発生の可能性の有無を推定する方法について提案する。

なお、特に交通実態が厳しい橋梁では、写真 3.3-1 に示すように、頻繁に舗装補修が行われている場合があり、舗装の補修痕についても鋼床版の損傷との関係について考察する。

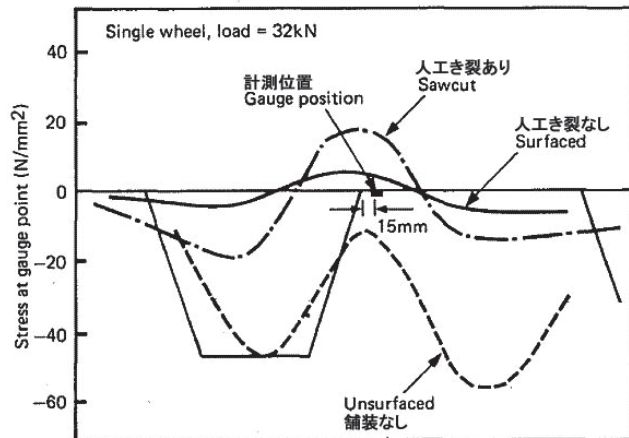


図 3.3-1 舗装に人工き裂を導入した場合の鋼床版の応力（文献 3.2 を和訳）



a) 部分補修の例 1 (M10 橋)

b) 部分補修の例 (M7-1)

写真 3.3-1 舗装の部分補修が頻繁に行われている鋼床版橋梁

## (2) 舗装の損傷形態と鋼床版の損傷の関係

第 4 章で述べるのべ 50 橋（うちデッキプレート貫通き裂事例は 3 橋）の実橋調査結果から、鋼床版の損傷形態と舗装の状態との関係を整理する。なお、舗装の劣化のほか、伸縮装置や排水装置、高欄などの付属物の機能が十分に発揮できているかという点にも注意した。

### 1) デッキプレート貫通き裂

デッキプレートとトラフリブの縦方向溶接継手部でルートからデッキプレート上面方向にき裂するデッキプレート貫通き裂が進展した場合、トラフリブの内面にあたるデッキプレートに局所的な鉛直変位が発生し、中には路面の陥没に至るものもある。

このようなデッキプレート上面の不整では輪荷重による作用もあり、舗装はその部位で下方に撓むような変形を生じさせられることから、図 3.3-2 に示すような蜘蛛の巣状の舗装のき裂や楕円状の凹みが発生する。写真 3.3-2 の例では、デッキプレート貫通き裂が 1 本のトラフリブの両側の溶接部で発生し、その箇所では蜘蛛の巣状の舗装ひび割れがあったことが

確認されている。

また、舗装面の部分的な陥没に至らない場合でも、デッキプレート貫通き裂によってデッキプレート表面に橋軸方向に不連続な部分が生じると、輪荷重の载荷などの影響に対してき裂を挟んだ両側でデッキプレート表面の変位が不連続になるため舗装面には橋軸方向のひびわれが生じることが考えられる。

写真 3.3-3 に、実際にデッキプレートに貫通き裂が確認された箇所での舗装のひび割れ事例を示す。

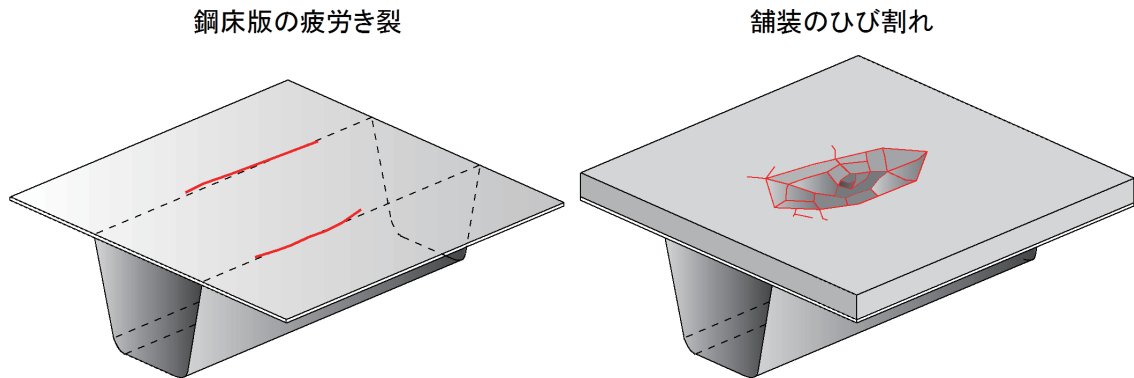
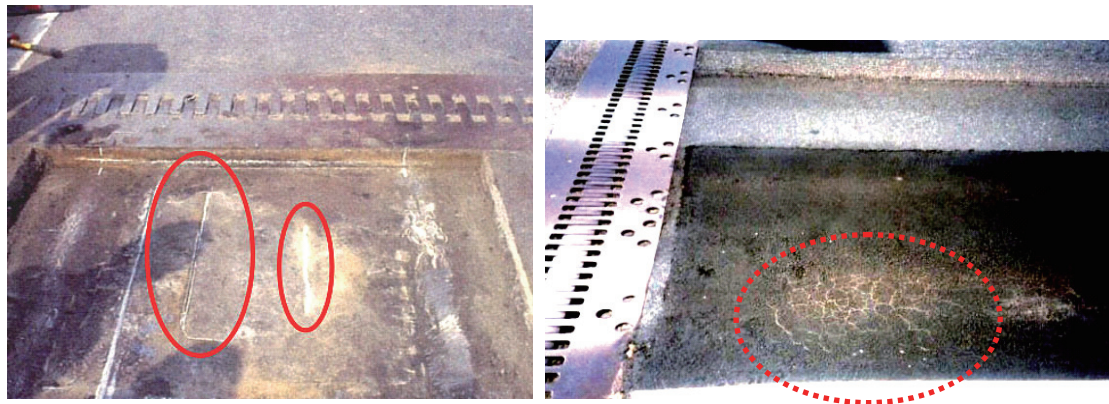


図 3.3-2 デッキプレート貫通き裂と舗装のひび割れ



a) 鋼床版の疲労き裂

b) 蜘蛛の巣状のひび割れの例 1

写真 3.3-2 デッキプレート貫通き裂と舗装のひび割れ



写真 3.3-3 デッキプレート貫通き裂上に確認された舗装のひび割れの事例

## 2) ビード貫通き裂

例えば、デッキプレートとトラフリブ溶接部のルートから溶接ビード方向に疲労き裂が進展した場合、疲労き裂が発生した溶接線上に橋軸方向の舗装ひび割れが発生していることが多い（図 3.3-3）。

疲労き裂の発生と舗装ひび割れの発生の前後関係は明らかでないが、前出の文献 3.2) に示されるように、溶接線上の橋軸方向ひび割れが発生している場合、溶接部近傍の応力が高くなることが確認されている。写真 3.3-4 に、実際に確認されたビード貫通き裂と、そのき裂発生箇所上の舗装ひび割れを示す。なお、舗装のひびわれは、写真 3.3-5 のようにトラフリブのウェブ間隔よりも狭い幅で複数並行して生じるものもあり、必ずしもトラフリブのウェブ位置と完全には一致しない位置で現れる場合があるものと考えられる。

また、写真 3.3-6 に示すようにデッキプレート貫通き裂が生じた場合にも現れる舗装のひびわれと特段の相違はなく、デッキプレート貫通き裂か否かを舗装のひびわれだけで特定することは困難であるので注意が必要である。

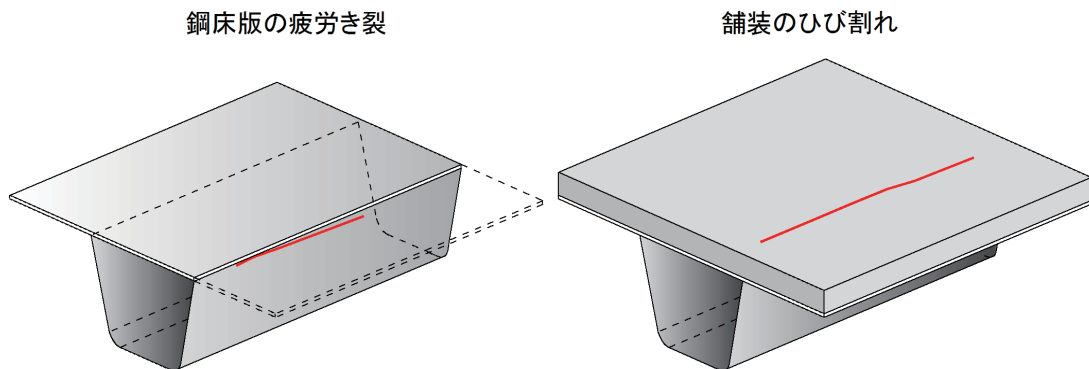
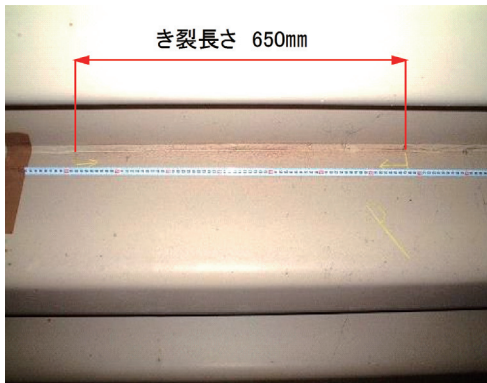


図 3.3-3 ビード貫通き裂と舗装のひび割れ



a) 鋼床版のビード貫通き裂



b) 舗装のひび割れの例

写真 3.3-4 ビード貫通き裂と舗装のひび割れ



写真 3.3-5 舗装のひび割れ

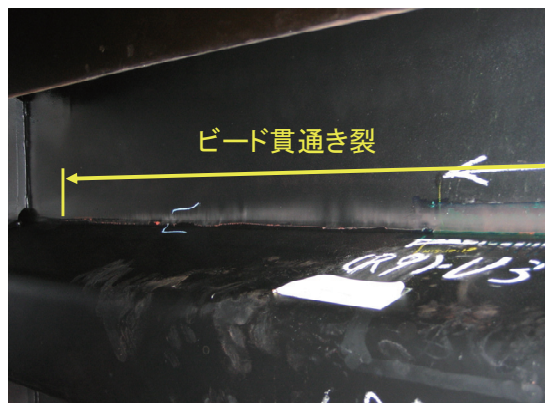


写真 3.3-6 ビード貫通き裂と舗装のひび割れ

### 3) 主桁垂直補剛材上端部におけるデッキプレート貫通き裂

主桁垂直補剛材上端部とデッキプレート溶接部における疲労き裂は、補剛材側の溶接止端に沿って進展するものと、デッキプレート側に進展するものに分類される。このうち後者は、



デッキプレートの板厚方向に進展し、場合によってはデッキプレート貫通き裂となる。この場合、輪荷重の直上載荷によってデッキプレートが局部的に変形するため、(1)と同様に局部的に蜘蛛の巣状の舗装ひび割れが発生する場合があることが確認されている。

図 3.3-4 に、実際に確認された垂直補剛材上端部におけるデッキプレート貫通き裂と、そのき裂発生箇所上の舗装ひび割れを示す。この損傷事例では、疲労き裂はデッキプレートを貫通し、路面からの雨水がデッキプレート下面側に浸透していた。

なお、デッキプレートとトラフリップの縦方向溶接から生じるデッキプレート貫通き裂とは桁内の部材位置を確認することで容易に区別できるが、概略調査の段階では正確な桁内の部材位置との関係が明らかでないことが多く、概略調査の段階でも図面等が容易に入手できる場合には用意しておくことでより確実なスクリーニングができる。

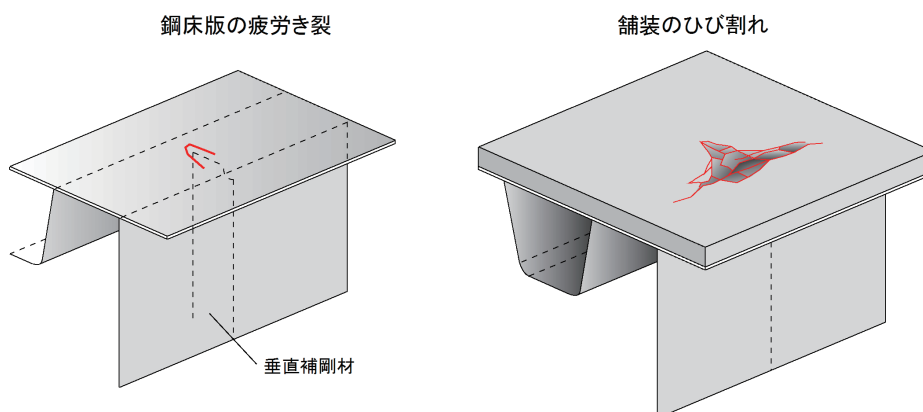


図 3.3-4 デッキプレート貫通き裂と舗装のひび割れ



a) 鋼床版の疲労き裂

b) 舗装のひび割れ

写真 3.3-4 デッキプレート貫通き裂と舗装のひび割れ (C7 橋の事例)

#### 4) 主桁垂直補剛材上端部におけるビードき裂

主桁垂直補剛材上端部とデッキプレート溶接部における疲労き裂のうち、補剛材側の溶接止端に沿って進展した事例では、補剛材の位置に一致する舗装のひび割れが発生する場合が多い (図 3.3-5)。

垂直補剛材上端部での疲労損傷は、輪荷重が垂直補剛材の直上を移動することによるものであり、輪荷重の通過位置が主桁ウェブと一致することが要因の一つと考えられる。

写真 3.3-5 に、実際に確認された垂直補剛材上端部におけるビードき裂と、そのき裂発生箇所上の舗装ひび割れを示す。

舗装ひび割れの向きや長さは必ずしも垂直補剛材のデッキプレートとの溶接の方向や長さとは一致しないものもあるが、その発生位置が、桁内の垂直補剛材の間隔に概ね一致する位置毎に規則的に現れる傾向がある。このように、橋軸方向に規則的に生じるひび割れは、橋の構造的要因が深く関わっている場合が多いため、注意する必要がある。

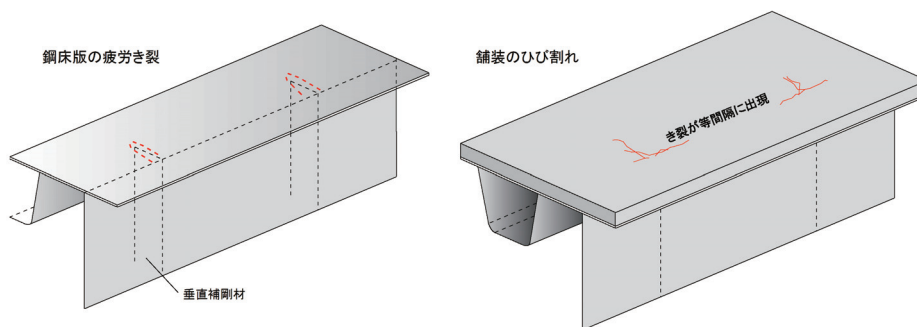


図 3.3-5 ビードき裂と舗装のひび割れ



a) 鋼床版の疲労き裂

b) 舗装のひび割れ

写真 3.3-5 ビードき裂と舗装のひび割れ

## 5) その他

写真 3.3-6 は、桁端部における舗装劣化状況を示しているが、舗装の劣化箇所のほか、伸縮装置の背面から雨水が浸透し、桁端部のデッキプレート上に滞水している可能性が指摘される。実際、舗装のひび割れには鏝状の粉体が堆積しており、デッキプレートの発錆が懸念される。写真 3.3-7 は、舗装打換え工事において確認された、伸縮装置背面（コバ面）の発錆状況である。伸縮装置の背面から雨水が浸透し滞水していることを示している。

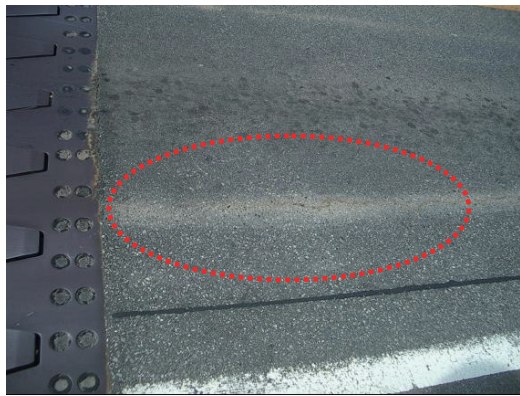


写真 3.3-6 伸縮装置付近の舗装劣化事例

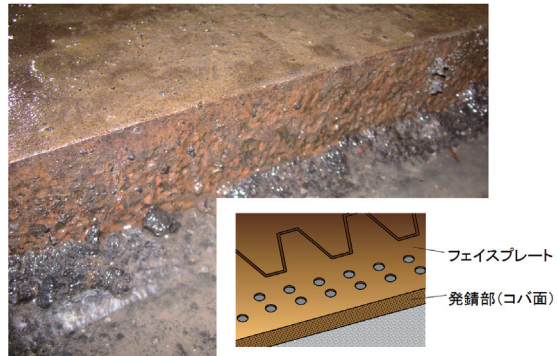


写真 3.3-7 伸縮装置コバ面の発錆

## 6) その他の舗装の損傷

### (a) 桁端部での局所的な舗装面の劣化

写真 3.3-8 は、桁端部における舗装劣化状況の例である。この位置は、右上から左下方向に縦断勾配があり、同じ方向に車両が通行する。トラフリブ位置での舗装ひび割れのほか、車両の制動力によると思われる舗装のずれが確認できる。桁端部では伸縮装置部の路面の段差に起因して輪荷重による衝撃の影響が卓越する部位でもあり、鋼床版の疲労環境としても相対的に厳しい条件でもある。

このような場合、舗装本体による防水機能の低下が生じている可能性があり、その場合には舗装と鋼床版のデッキプレート上面にまで水が到達して、舗装付着力低下による鋼床版の一体性の低下や一般に一次防錆しかされない鋼床版の母材鋼板に腐食が生じる可能性もある。また、デッキプレート貫通き裂が生じているとトラフリブ内への滞水が生じることもあり、床版の劣化が急速に進展することも考えられる。そのため、このような変状が確認された場合には舗装のみならず、舗装と鋼床版の一体性、当該部位の鋼床版の健全性について確認し補修等の適切な対応を速やかに実施することが必要と考えられる。

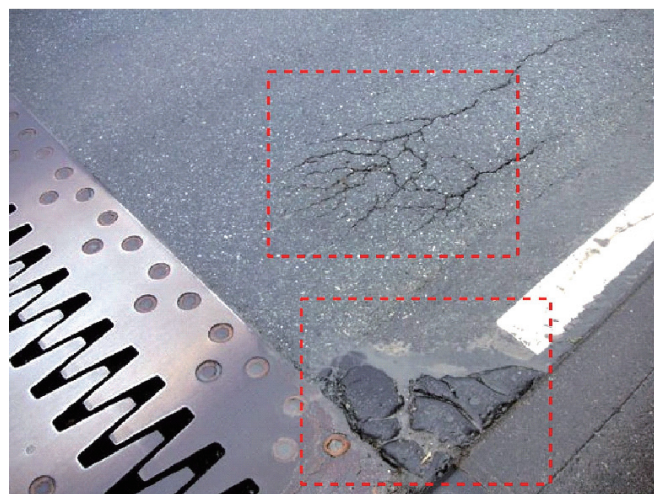


写真 3.3-8 伸縮装置付近の舗装劣化事例

### (b) 橋軸直角方向（トラフリブと直交する方向）の舗装のひびわれ

写真 3.3-9 および写真 3.3-10 は、舗装に発生した横断方向（橋軸直角方向、あるいはトラフリブと直交する方向）の断続的なひび割れの例である。

構造的に負曲げが卓越するなどの特殊な条件がなく、このような車線方向と直交する方向に長く連続的に顕著なひびわれが生じる場合、主げたウェブやトラフリブの存在など鋼床版構造、あるいはその上を通過する輪荷重による鋼床版の変形等の挙動とは位置や方向が一致しないため関連性は少ないと考えられる。

写真 3.3-9 の例は、縦断勾配の厳しい斜張橋の例であり、車両の制動力に起因する舗装のずれ挙動が関わっていることが疑われる。

写真 3.3-10 の例は、縦断勾配はさほど厳しいものではない。そのため車両の制動力に加えてデッキプレートと舗装との付着力の不足も要因となっている可能性がある。このように車両進行方向に一致する方向にトラフリブが配置された鋼床版における、車両進行方向とは直交する舗装のひびわれは鋼床版のき裂等の損傷とは異なる理由であることが多い。なお、このような舗装面の大きなひびわれは、舗装内部への雨水等の浸入を生じることから(a)に示した桁端部の局部劣化の場合と同様に、鋼床版の劣化につながる可能性がある。

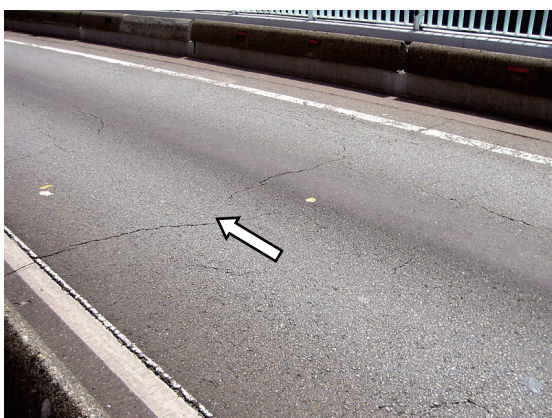


写真 3.3-9 横断方向の舗装ひび割れ



写真 3.3-10 横断方向の舗装ひび割れ

### (c) 舗装の部分的な剥離（ポットホール）

写真 3.3-11 は、デッキプレート貫通き裂が発生したC1橋における舗装の劣化状況である。車輪通過位置近傍に位置する舗装（表層）が一部剥離しており、車線方向にその前後の舗装で著しいひびわれが発生している。

過去にデッキプレート貫通き裂が同一のトラフリブの両ウェブで同時に発生して路面陥没に至った橋梁においても、過去の補修履歴から、特定の位置の車線方向に何度もポットホールや舗装のひびわれを生じ、補修を繰り返していた事実が確認されたものもある。

このように、車線方向に舗装のひびわれやポットホールの発生が多発する場合には、少なくともその車線位置の鋼床版は厳しい荷重環境になっていることから、デッキプレート貫通き裂がすでに発生しているか、相対的に発生の可能性が高い条件であると考えられ、き裂調査の優先度は相対的に高いといえる。



写真 3.3-11 舗装の剥離によるポットホール（右は矢印部分の拡大）

(d) 著しいわだち（轍）ぼれ

写真 3.3-12 は、デッキプレート貫通き裂が発生した橋梁における舗装の劣化状況である。この路線は、大型車交通量が多く車両走行位置で顕著なわだち掘れが発生しているのが確認された。わだち掘れは、大型車の後輪（ダブルタイヤ）に一致する形状を呈しており、大型車の後輪がわだち掘れに沿うようにほぼ同じ位置を走行する条件となっていることが疑われる。

このような著しいわだち掘れを生じると、舗装の輪荷重の分散効果が損なわれ、鋼床版にとってはより厳しい疲労環境となる。また大型車の車輪通過位置が分散せず、ほぼ同じ位置に載荷が繰り返されることも疲労環境の厳しさを増す要因となる。

そのため、大型車混入率が高い重交通路線において、大型車の車輪位置に一致する著しいわだち掘れが生じている場合には、少なくともその車線位置の鋼床版は厳しい荷重環境になっていることから、デッキプレート貫通き裂がすでに発生しているか、相対的に発生の可能性が高い条件であると考えられ、き裂調査の優先度は相対的に高いといえる。

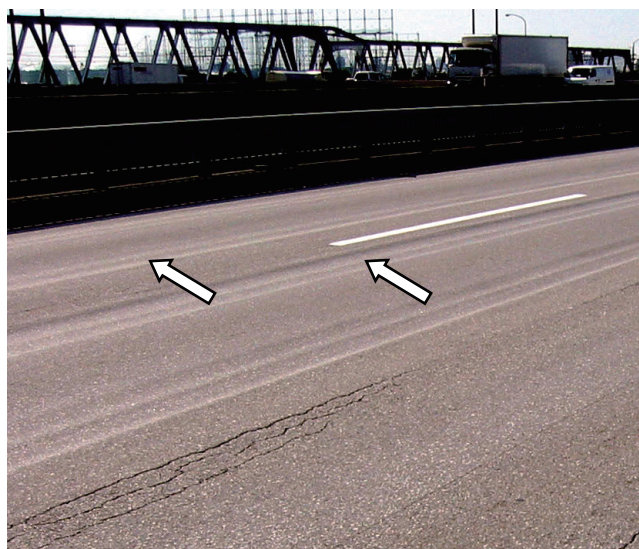


写真 3.3-12 走行位置のわだち掘れ

#### (e) 主げたウェブ位置に一致する舗装のひびわれ

写真 3.3-13 は、箱桁の主げたウェブ位置に一致する位置に車線方向に連続的に舗装のひびわれが発生した例である。鋼床版路面では車輪通過位置がトラフリブのない位置である場合でもこのような主げたウェブに一致する位置で舗装のひびわれが生じることがある。

主げたウェブの近傍を車線が通過する場合には、主げたウェブの存在によりトラフリブのウェブ近傍を車輪が通過する場合同様に、舗装に局所的な変形が生じることでひびわれが発生しやすいものと考えられる。

このような場合、主げたウェブは通常両側からの連続溶接でデッキプレートと接合されているためき裂は生じにくい。しかし主げたウェブに設けられている垂直補剛材では輪荷重の通過に伴いその上端で大きな応力変化が生じることから垂直補剛材上端部とデッキプレート下面との溶接部で疲労損傷の発生が懸念される。

過去には、斜めウェブを有する主げた位置で鋼床版の補剛リブをかねてコーナプレートタイプの閉断面構造を設けた橋梁が作られたことがあった。コーナプレートとデッキプレートの溶接は片側からの溶接となり疲労耐久性に劣る溶接構造となることから、現在では用いない方がよい構造とされており、このような構造が用いられている橋梁では主げた位置の近傍でコーナプレートの溶接に関わるき裂損傷の発生も懸念されるため注意が必要である。(写真 3.3-14)



写真 3.3-13 主げたウェブ上のひび割れ



写真 3.3-14 コーナープレート部の疲労損傷（補修跡）

### 3.3.3 舗装以外の変状の調査

本研究で実施した路面からの実橋の状況調査では、舗装の劣化状況を把握することのほか、伸縮装置や排水装置、高欄などの状態についても調査を実施した。その結果、これらの舗装面から確認できる伸縮装置や排水装置、高欄などの変状の中には間接的に舗装の劣化やさらには鋼床版の劣化と関連をもつ可能性のあるものもあることが確認できた。ここでは、本研究の調査で確認された代表的な事例について鋼床版の耐久性への影響の観点から整理する。

#### (1) 伸縮装置

桁の伸縮量が大きい鋼床版では、フィンガージョイントやビーム型の伸縮装置が多く、フェイスプレートなど伸縮措置本体と鋼床版とが高力ボルトに連結されているのが一般的である。伸縮装置部では装置そのものの段差に加え、橋台側のパラペットと一般部の境界部など構造的な段差が生じやすい。またそれらを通る車輪の衝撃の影響も大きくなることから床版への輪荷重が一般部に比べて大きくなるだけでなく、その前後の舗装の劣化が一般部より促進されやすく、同じ位置で集中的に負荷されることもあって鋼床版への荷重の影響がさらに大きくなるという悪循環となりやすい。

段差通過による輪荷重の拡大の程度については車両のサスペンションの条件や段差の形状、タイヤの空気圧など様々な要因が関わるため一概ではないが、図 3.3-6 に示すように 9 車種の車両が 10, 20, 30mm の段差を時速 40km 及び 80km で通過した際の軸重変動を車軸から算出した結果<sup>3.3)</sup>から段差の通過に起因する動的倍率が大きくなることが分かる。また、図 3.3-7 に示すとおり、多軸車では同じ車両のいずれかの車軸が大きく変動した場合に、他の車軸にも影響を与える。

段差通過による輪荷重の拡大の程度については車両のサスペンションの条件や段差の形状、タイヤの空気圧など様々な要因が関わるため一概ではないが、段差が通過した当該軸変動が直接影響する範囲よりも広い範囲で平滑な一般部を走行する条件に比べて大きな輪荷重が路面に作用するものと考えられる。

このように、伸縮装置部の段差やその前後の路面不陸の影響は、それによってさらなる段差の拡大を招くとともに、その結果として舗装の劣化を促進することとなる。また輪荷重の動的影響が大きくなり鋼床版にとって相対的に厳しい環境となるため、伸縮装置部に著しい段差が生じている場合や伸縮装置部前後に顕著な不陸がある場合で桁端部の舗装にひび割れ等の劣化が生じている場合には、少なくともその近傍では鋼床版は厳しい疲労荷重となっている可能性があり、き裂調査の優先度は相対的に高いといえる。また疲労損傷が生じていない場合にも疲労耐久性確保の観点からはできるだけ段差や不陸が小さくなるよう早期に是正することが望ましいといえる。

写真 3.3-15～写真 3.3-17 に伸縮装置の損傷事例と不具合事例を示す。



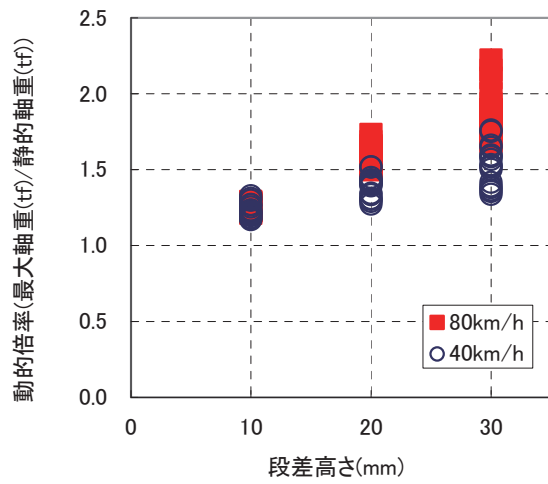


図 3.3-6 動的軸重に及ぼす段差量の影響<sup>3.7)</sup>

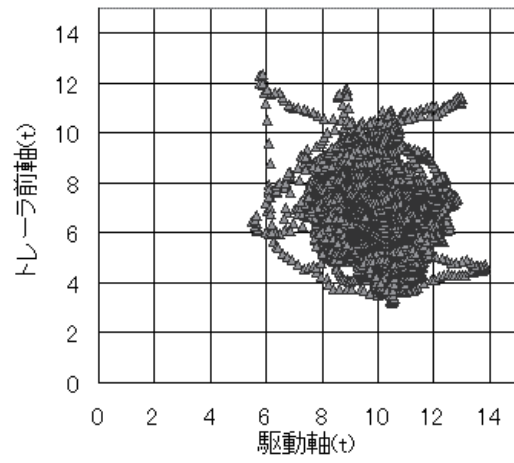


図 3.3-7 車両の軸同士の軸重の関係<sup>3.7)</sup>



写真 3.3-15 フェイスプレート取付けボルトの脱落



写真 3.3-16 ビーム型伸縮装置の破損事例



写真 3.3-17 段差の生じた伸縮装置

## (2) 排水機能

排水柵に土砂が流入するなどにより、排水機能が著しく低下している例が多く見られる(写真 3.3-18)。

舗装面での滞水を生じるなど円滑な路面の排水が行われない場合は、舗装そのものの劣化を促進させるだけでなく、舗装下面に雨水が侵入する危険性が増大し、結果的にデッキプレート上で滞水を生じると舗装の著しい劣化の促進、鋼床版デッキプレートの腐食促進、デッキプレート貫通き裂を生じた場合にトラフリブ内部への滞水と腐食促進など様々な橋梁の劣化の誘発・促進につながることになるので注意が必要である。

## (3) その他の損傷

路面調査では、鋼床版の疲労耐久性の観点からは直接的には関係がないと思われるものの、橋全体として耐久性の低下など性能に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる多くの損傷や変状がみられた。また桁内への鳥類の侵入・営巣・排泄物の堆積などでは鋼床版をはじめ桁内からの点検作業にも支障を及ぼす可能性があり注意が必要であると考えられた。

代表的なものを以下に示す。

- 1) 鋼部材の局所的な変形，座屈
- 2) 排水管など付属物の損傷 (写真-3.3.19)
- 3) 標識柱や照明柱，壁高欄などの損傷 (写真-3.3.20)。
- 4) 支承の腐食，損傷
- 5) 鳥等の排泄物による害
- 6) 土砂の堆積
- 7) 火災による熱損傷



写真 3.3-18 土砂の流入により閉塞した排水柵



写真 3.3-19 凍結防止剤により腐食した排水管



写真 3.3-20 高欄の腐食

### 3.3.4 まとめ

本節では、概略調査は、Step1 で抽出された調査対象橋梁に対して、実際に現地における現況の確認を行い、その結果からデッキプレート貫通き裂の発生の可能性の高い橋梁や径間を抽出するための方法について検討を行った。




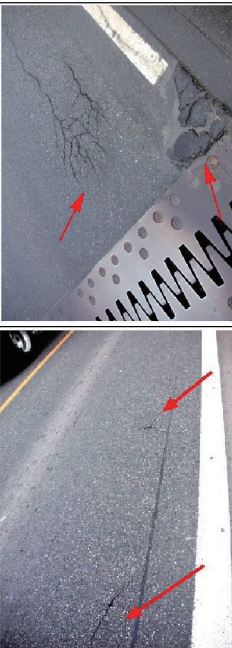
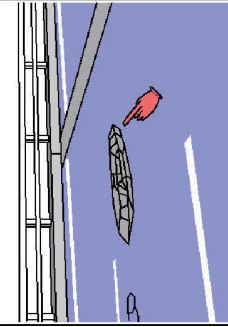
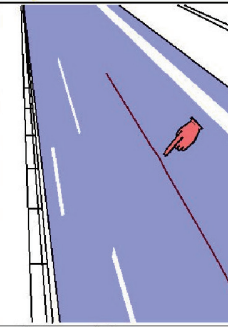
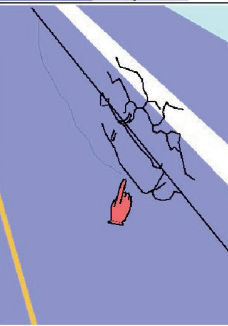
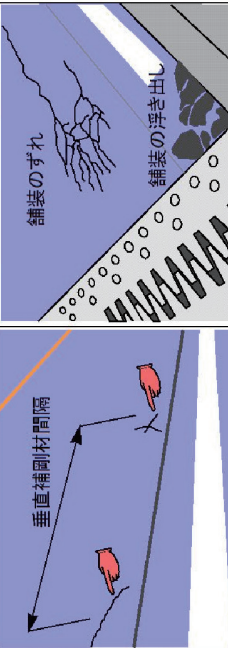
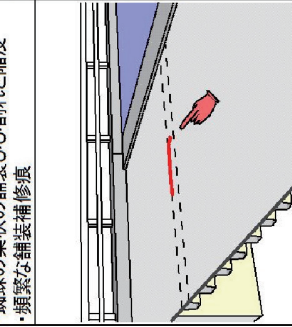
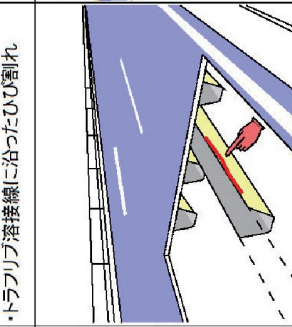

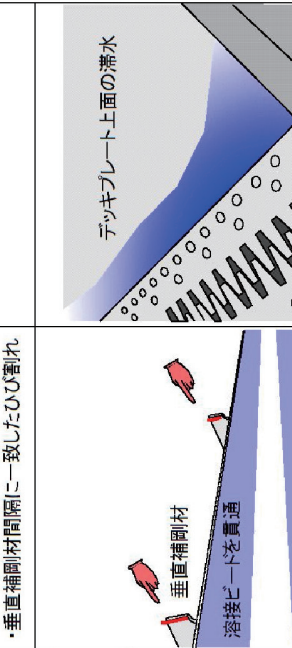
















現地で比較的容易にできる一次スクリーニングの観点から、主に橋面舗装を対象とした路面調査に着目してそれらの結果からデッキプレート貫通き裂の可能性の高い橋梁の絞り込みが行えるかどうかを、実橋調査をもとに検討した。

結果をまとめると、表 3.3-1 のようになる。鋼床版舗装は、デッキプレート上面に直接施工され一体化されているため、舗装の変状から鋼床版の交通荷重実態、鋼床版そのもののき裂等の異常の有無を推定することのできる様々な情報が得られる可能性が高いことがわかった。特に、デッキプレート近傍に発生したき裂損傷に対しては、デッキプレートの挙動の変化や変形状態を反映して舗装のひびわれという形で路面に現れる場合が多い。

以上のことから、概略調査で把握される構造諸元や過去の点検記録など様々な情報に現地での外観目視による舗装面の調査結果を組み合わせることは、デッキプレート貫通き裂のみならずデッキプレート近傍の鋼床版の疲労き裂といった損傷が発生している可能性の高い橋梁および径間を絞り込む手法として有効のものであると考えられる。

ただし、厳しい交通状況下にある場合などでは鋼床版の変状とは関係なく、舗装に様々なひびわれなどの変状が顕著に現れる場合も多い。そのため、実際にデッキプレート貫通き裂の検出のための非破壊検査の実施や一部舗装撤去を行うためには、このステップで主に舗装変状から絞り込んだ橋梁や径間のなかからさらに鋼床版の損傷との関連がある可能性が高い箇所を絞り込む必要がある。

表 3.3-1 舗装の劣化とその箇所を確認された鋼床版の損傷

|   | トラフリブとデッキプレート貫通き裂  | ② 溶接ビード貫通き裂   | 主桁の垂直補剛材上端部  | ⑤ 桁端部の舗装ずれと滞水   |
|---|--|---|--|---|
| ① |   |                            |                            |                            |
|   |   |                            |                            |                            |
|   | <p>・軋時の異状の舗装ひび割れと陥没<br/>・頻繁な舗装補修痕</p>  | <p>・トラフリブ溶接線に沿ったひび割れ</p>  | <p>・垂直補剛材位置での亀甲状ひび割れ</p>  | <p>・垂直補剛材間隔に一致したひび割れ</p>  |
|   |                                       |                          |                          |                          |
|   |                                       |                          |                          |                          |
|   |                                       |                          |                          |                          |
|   |                                       |                          |                          |                          |

舗装のひび割れと鋼床版の損傷

### 3.4 簡易調査 (Step3)

#### 3.4.1 概要

デッキプレートの膨大な溶接線の中から、桁下からの外観調査では視認不能なデッキプレート貫通き裂を確認するには、非破壊検査による検出あるいは橋面舗装の一部撤去による確認等、詳細調査 (Step4) で示すような作業が必要となるため、調査対象とする部位をできるだけ正確に絞り込む必要がある。そのため簡易調査 (Step3) として、概略調査 (Step2) までで、き裂発生の可能性が高い状態であると抽出された橋 (あるいは径間) について、実際の交通状況、車両走行位置、舗装の損傷位置、トラフリブや主げたなどの構造部材の位置などの関係を確認し、デッキプレート貫通き裂の発生する可能性の高い箇所をより詳細に絞り込む。

なお、この段階では次の段階で行う非破壊検査や塗膜除去・復旧の方法、調査や作業のための各部位への具体的なアプローチの方法、資機材の搬入や電源の確保など、点検計画の作成に必要な情報の把握も行うことになる。

#### 3.4.2 交通特性の把握

##### (1) 概要

デッキプレート貫通き裂には、これまでの検討において車輪通過位置近傍におけるトラフリブとデッキプレートの溶接部における局所的な応力変動が支配的に影響している可能性が高いものと考えられ、その発生によって舗装面にひび割れ等の変状を生じることが多いと考えられる。一方、舗装のひび割れ等の変状には鋼床版の変状と関わりなく発生するものも多く、ここでは交通状況を把握することで鋼床版の変状が生じている可能性が高いものを絞り込む手法について検討する。

道路橋の交通環境については、全国で道路交通センサが行われており路線やある距離区間の単位では大型車混入率なども把握されている場合が多い。しかし必ずしも調査地点が該当橋で調査された結果でなく、交差点による分合流などもあり交通状況が一致しない場合もある。また、車種タイプ毎の交通量や走行位置の特徴などの詳細は把握されないことから、鋼床版の疲労の観点からより危険性の高い部位を抽出するためには、重交通の程度、重車両の走行位置の偏りの有無などの交通特性を実地に把握することが有効であると考えられる。

一方、道路橋上を通行する車両の重量を計測する手法として、埋設型重量計やマット式重量計を路面に設置して直接的に測定する方法がある。しかしながら、この方法はコストや交通への影響といった点で課題が多い。そこで、橋梁部材の応答を介して間接的に重量を推定する手法 (Bridge Weigh-in-Motion System。以下「BWIM」という。) が数多く開発されており、比較的正確な荷重実態の把握には有効である<sup>3.5), 3.6)</sup>。

しかしここでは、デッキプレートの膨大な溶接線の中から、調査対象とする部位をできるだけ簡易に絞り込む目的から、特別な機器等を要せず供用中道路で交通流に支障をきたすことなく簡易な交通量と通行車両の種類、積載物、走行車線・位置などについて、簡便に把握できる手法について検討する。

## (2) 簡易交通実態調査の方法

### 1) 調査項目

鋼床版の疲労耐久性に関わる要因として、簡易調査では以下の交通特性に関する項目についてできるだけ簡易に把握できる手法を検討する。

- ①大型車交通量（供用からの履歴）
- ②大型車重量特性（重車両の混入割合など車種特性）
- ③大型車走行特性（走行位置，車線変更の有無）

### 2) 調査方法

鋼床版の疲労き裂の発生には、履歴荷重による変動応力振幅とその繰り返し回数が支配的な影響を及ぼすと考えられる。一方、疲労現象の特徴と鋼床版のデッキプレートに施される溶接線の品質のばらつきや荷重のばらつき等を考慮すると、厳密な交通荷重やそれによる応力履歴との対比は困難かつ本質的ではないと考えられる。

そのため、本調査の位置づけから、ここでは特別な機器等を要せず供用中道路で交通流に支障を来たすことなく1日程度で概略の交通特性を把握する方法を検討した。

大型車の混入率や車種構成の把握には、現地での調査員によるカウンターによる計量が行われることが多く有効である。一方、カウンターによる読み取りでは走行位置のばらつきや車線変更などの走行特性は別途調査することが必要となる。そのため本研究では、簡易に長時間録画が可能な小型ビデオ機器による定点での一定時間の動画撮影と目視による読み取りを平行して行い、事後にそれらの動画から車両台数や車種構成など様々なデータをとりだすこととした（写真3.4-1）（写真3.4-2）。

交通特性を短時間の計測で推定することから、昼夜率やどのような物流特性なのかの情報を別途補うことが不可欠であるが、その際、写真3.4-3～写真3.4-5、表3.4-1を参考にして積載物の推定を行なうことは、路線特性や超重車両の混入の程度を推定するための重要な情報となる。交通量調査の結果は（3）に述べる。



写真 3. 4-1 ビデオカメラによる調査



写真 3. 4-2 目視による簡易交通量調査






写真 3. 4-3 港湾荷役の多い交通状況例



写真 3. 4-4 鉄鋼荷役の多い交通状況例

表 3. 4-1 コンテナ 1 つあたりの積載量 (参考)

| 分類  | 12フィートコンテナ   | 20フィートコンテナ   | 40フィートコンテナ  |
|-----|--|--|---|
| 積載量 | 5,000kg  | 24,000kg   | 32,000kg  |
|     |  |  |  |



(a) 鉄鋼コイル (最大約 450kN)



(b) 超重量車両

写真 3. 4-5 車両積載物の例

### 3) 調査対象

本研究で簡易調査を試みた橋梁を表 3. 4-2 に示す。これらに対しては 15 分間の目視による調査と動画の撮影を行った。

### (3) 調査結果

車両走行位置については、第 1 章の図 1. 3-5 あるいは図 1. 3-7 に示すように、デッキプレート貫通き裂の生じた橋梁においても、特に車線位置直下に一致した部位での発生が突出していることから、車線位置を特定し、トラフリブや箱桁との位置関係を把握しておくことが重要であり、点検箇所抽出にも活用することができる。輪荷重の走行位置は、目視やビデオ

オによる車線内の分布解析等により行うことも可能であるが、本研究においては目視による簡易調査を行い、地覆から舗装のわだち掘れまでの距離を確認することで、トラフリブや箱桁と輪荷重走行位置の関係を把握することができることがわかった。

表 3.4-2 に交通量調査結果を示す。車種別に走行台数とその割合を示している。交通状況を把握するための指標として大型車混入率(中型トラック以上の車両②～⑥が全車両に占める割合)が挙げられるが、表には簡易調査により得られた大型車混入率と、比較検討のため、交通センサスにより得られた大型車混入率(平日昼間 12 時間)も併記している。

簡易調査と交通センサスの結果を比較すると、いずれのケースも簡易調査結果の値が高めに出ていることがわかる。表 3.4-2 中の橋梁記号 H7, 03, 014 の 3 ケースは簡易調査と交通センサスの結果に大きな差が見られるが、それ以外のケースでは両者が大きく乖離することではなく、C3 のように交通センサスの結果に対してよい精度で大型車混入率を推定できていくケースもある。H7 で交通センサスの値と比較して調査結果が大きく異なった原因として、計測時に調査地点の周辺で工事が実施されておりダンプトラックが計測地点を頻繁に通過していたこと、また計測時間が日中のため通退勤等の乗用車が少なかったことが考えられる。03, 014 で差が生じた原因を具体的に特定することはできないが、計測時に通常の状態とは異なる周辺状況があったことが推察される。また、交通センサスの値は観測地点直近の国土交通省直轄国道の値であるため、これも両者の差の要因として考えられる。

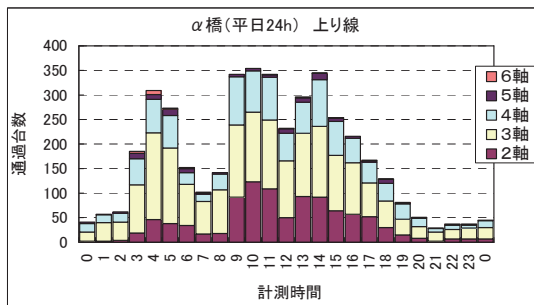
図 3.4-1 は、国土交通省管内の別の路線に位置する  $\alpha$  橋、 $\beta$  橋の平日 1 日間の時間別交通量の測定結果である。この 2 橋の交通量分布を比較すると、交通量が多い時間帯、少ない時間帯が橋梁によって様々であることがわかる。一方、 $\alpha$  橋の 1 日ごとの交通量分布を示した図 3.4-2 から、平日に限っては比較的似たような分布形状を示していることがわかる。以上のことから、対象とする路線の時間帯ごとの概略交通特性を把握した上で 15 分間の調査を実施することは、交通車両の概況を把握するためには有効な手段であると考えられる。



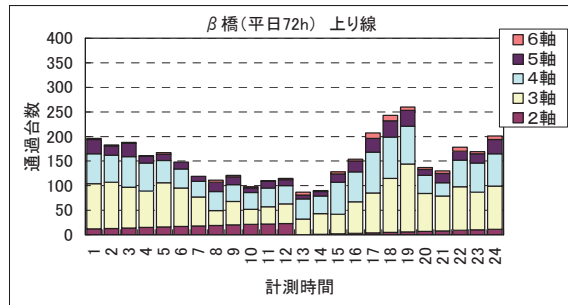
表 3.4-2 目視による簡易交通量調査の結果

| 調査データ   | 橋梁記号                      | H7          | M8-2          | C3          | 03          | 012         | 014         | Q2          |            |
|---------|---------------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|         | 調査年月日                     | 2005/8/10   | 2006/3/30     | 2006/3/7    | 2006/6/14   | 2006/3/31   | 2006/8/3    | 2005/12/2   |            |
|         | 調査時刻                      | 14:13-14:28 | 14:30-14:45   | 10:00-10:15 | 14:05-14:20 | 13:30-13:45 | 14:10-14:25 | 12:45-13:00 |            |
| 計測結果    | 車種                        | 代表車両モデル     | 走行台数 ( ) 内は割合 |             |             |             |             |             |            |
|         | ①乗用車                      |             | 198 (47%)     | 125 (43%)   | 454 (62%)   | 106 (48%)   | 469 (52%)   | 128 (42%)   | 311 (79%)  |
|         | ②中型トラック (バス含む)            |             | 101 (24%)     | 98 (34%)    | 125 (17%)   | 31 (14%)    | 192 (21%)   | 65 (21%)    | 40 (10%)   |
|         | ③大型トラック (3軸車) (ダンプトラック含む) |             | 93 (22%)      | 22 (8%)     | 96 (13%)    | 8 (4%)      | 108 (12%)   | 29 (10%)    | 43 (11%)   |
|         | ④大型トラック (4軸車) (ダンプトラック含む) |             | 26 (6%)       | 27 (9%)     | 38 (5%)     | 59 (27%)    | 99 (11%)    | 74 (24%)    | 0 (0%)     |
|         | ⑤大型トレーラ (5軸車)             |             | 1 (0%)        | 17 (6%)     | 15 (2%)     | 18 (8%)     | 27 (3%)     | 8 (3%)      | 1 (0%)     |
|         | ⑥大型トレーラ (6軸車)             |             | 1 (0%)        | 2 (1%)      | 0 (0%)      | 0 (0%)      | 5 (1%)      | 0 (0%)      | 0 (0%)     |
|         | 合計                        |             | 420 (100%)    | 291 (100%)  | 728 (100%)  | 222 (100%)  | 900 (100%)  | 304 (100%)  | 395 (100%) |
| 大型車混入率* | 15分簡易調査                   | 49.7%       | 57.0%         | 37.6%       | 52.3%       | 47.9%       | 57.9%       | 21.3%       |            |
|         | 交通センサス                    | 25.2%       | 49.0%         | 34.2%       | 21.1%       | 38.5%       | 21.2%       | 15.1%       |            |

\*大型車とは車種 (②~⑥) を示す。

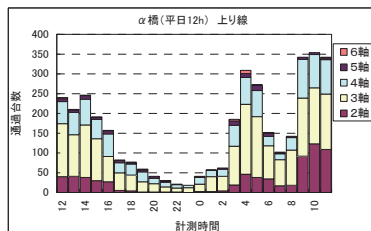


(a) α橋

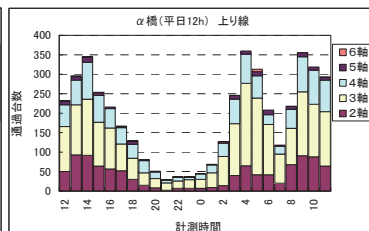


(b) β橋

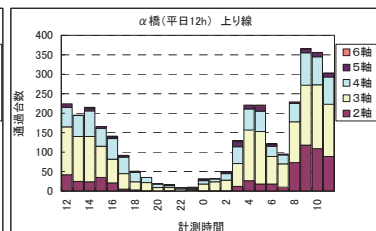
図 3.4-1 国総研 BWIM による 24 時間計測 (異なる橋梁の時刻別交通量の比較) 3.5)3.6)



(a) 1 日目



(b) 2 日目



(c) 3 日目

図 3.4-2 国総研 BWIM による α 橋の 72 時間計測 (日ごとの時刻別交通量分布の比較) 3.5)3.6)

(3) 留意事項

橋梁の前後の道路事情によっては、大型車が必ずしも第一車線に多くみられるとは限らないことがあるため、対象橋梁が複数の車線を有する場合や合流、分岐などの車線がある場合などに、鋼床版上での車両の走行傾向を把握する必要があることがわかった（図 3.4-2、写真 3.4-6、写真 3.4-7）。また、5章「鋼床版の応力測定」で詳述するが、交通実態とともに車両の走行速度についても、鋼床版の発生応力との間には関係があることが指摘されており、渋滞や車両の停留が多い場合は、鋼床版への疲労損傷度もより大きくなると考えられるため同時に把握を行うべきである。

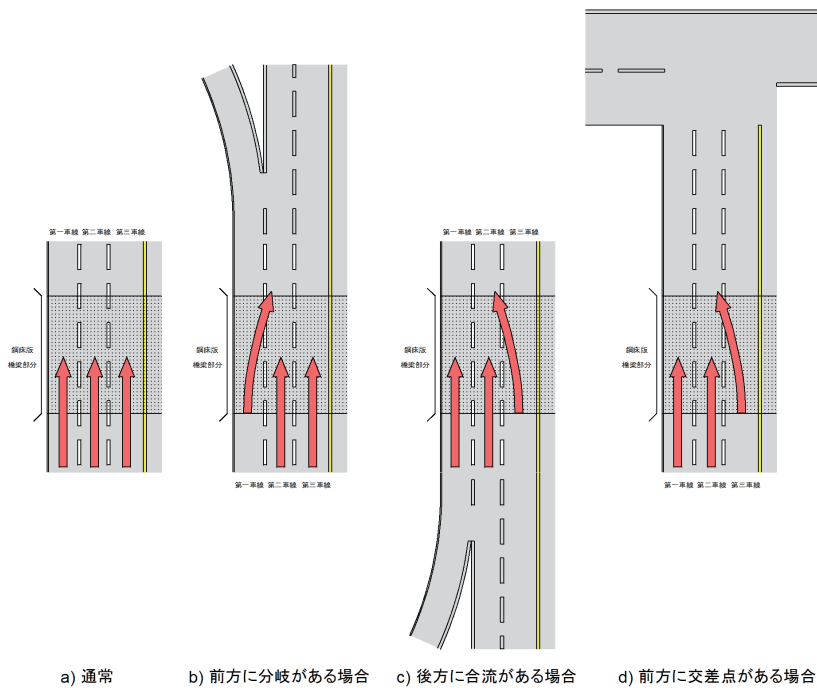


図 3.4-2 橋梁の前後での道路事情にみる大型車走行の傾向の一例

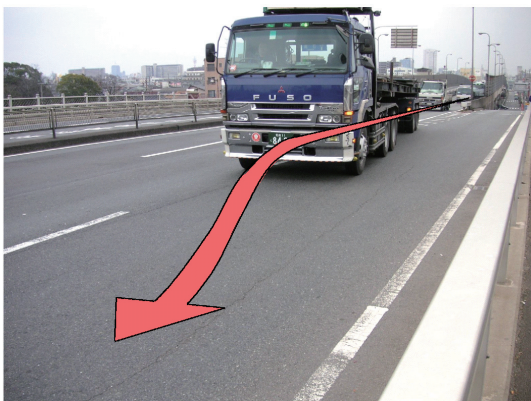


写真 3.4-6 橋梁の後方に合流がある場合の大型車の車線変更例



写真 3.4-7 橋梁の前方に交差点がある場合の第二車線への大型車の集中例

### 3.4.3 まとめ

本節では、デッキプレート貫通き裂の一要因であり、調査箇所の抽出にも活用できる大型車の交通状況、及び、車線位置の特定方法について検討した。結果を以下に示す。

#### ①車線位置の特定

輪荷重の走行位置は、目視やビデオによる車線内の分布解析等により行うことができる。目視による簡易調査では、舗装のわだち掘れから、路肩の地覆までの距離を確認することで、トラフリブや箱桁と輪荷重走行位置の関係を把握することができることがわかった。

#### ②交通状況・特性の把握

実橋について簡易交通量調査法について検討した結果、対象とする路線の時間帯ごとの交通特性をふまえた上で調査を実施することで、15分間と簡易な調査でも、交通車両の概況を把握することが可能であることが分かった。

また、橋梁の前後の道路事情によっては、大型車が必ずしも第一車線に多くみられるとは限らないことがあるため、対象橋梁が複数の車線を有する場合や、合流分岐などの車線がある場合などに、鋼床版上での車両の走行傾向を把握する必要があることがわかった。

### 3.5 詳細調査（目視調査）(Step4)

#### 3.5.1 概要

前節の簡易調査までで概ね特定した、デッキプレート貫通き裂が既に発生しているかその可能性が高いと考えられる部位に着目して、き裂の検出およびその状況を把握するために詳細調査を行う。

調査は、けた内外からの近接目視、種々の非破壊検査機器による調査を組み合わせを行い、き裂位置の特定、その進行状況など今後の維持管理に必要な情報を取得する。

既にデッキプレート貫通き裂を生じている可能性が極めて高いと考えられる場合には、デッキプレートの上面から舗装を切削して直接き裂の有無やその状況を調査することが最も確実な方法である。

しかし、舗装を一部撤去して行う調査には、①交通規制を伴うこと、②接着層の存在などからデッキプレートを損傷せずかつ短期間で舗装の撤去を行うことが困難であること、③デッキプレート面に向かっていてもまだ上面に開口していないき裂は視認できないこと、などの問題がある。

ここでは前段階までに対象部位として径間や部位に対して、鋼床版下面側からの調査を行って、デッキプレート貫通き裂に限らず鋼床版関連の様々な変状を把握するとともに、簡易調査で把握した交通状況と実際のトラフリブや主げたの位置の照合を行い、非破壊検査部位の特定と検査の実施、さらには必要に応じて舗装を一部撤去して鋼床版上面側のき裂確認を行う部位の特定と調査の実施を行うこととなる。

#### 3.5.2 目視調査（鋼床版下面）

##### (1) 調査方法

鋼床版下面からの目視調査ではデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接のルート部からデッキプレート上面に向かう貫通き裂は検出できない。

一方、デッキプレートと主げたウェブの垂直補剛材上端部との溶接からのき裂が進展してデッキプレート上面に貫通するき裂はデッキプレート下面にも疲労き裂が生じている可能性が高いと考えられること、またデッキプレート下面から視認できる塗膜割れや錆汁の漏出、開口き裂などの変状、溶接ビードの形状などの溶接品質を詳細に把握することで鋼床版全体の疲労耐久性の良悪や疲労環境がある程度推定可能と考えられることなどから、**a. 箱げた内部からの調査(写真 3.5-1)**、**b. 検査路からの調査(写真 3.5-2)**、**c. 高所作業車からの調査(写真 3.5-3)**、**d. 双眼鏡による調査(写真 3.5-4)**、**e. 仮設足場からの調査(写真 3.5-5)**などを実施した。



写真 3.5-1 箱げた内部からの調査状況



写真 3.5-2 検査路からの調査状況



写真 3.5-3 高所作業車からの調査状況



写真 3.5-4 双眼鏡による調査状況



写真 3.5-5 仮設足場からの調査状況

## (2) 調査対象

デッキプレート下面から確認可能なき裂全般を目視で確認する（図 3.5-1）。

特に下記の損傷部位に着目し，塗膜割れ，錆の発生などが近接の程度と着目部位に応じて目視でどの程度把握できるかを調査するとともに，き裂検出の観点からの問題点，調査にあたっての留意点について検討した。

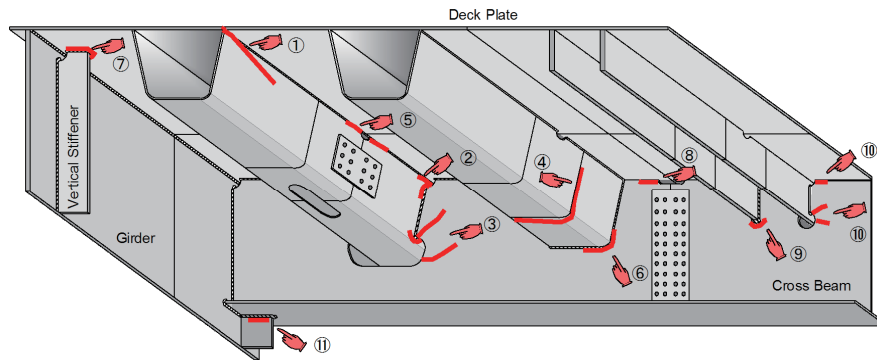


図 3.5-1 主な鋼床版の疲労損傷

(3) 調査結果

1) トラフリブとデッキプレートの溶接部

輪荷重直下に位置するトラフリブとデッキプレートの溶接部に発生することの多いき裂である。塗膜割れ（写真 3.5-6）や錆の発生（写真 3.5-7）によってき裂の発生を疑うことができる。しかし錆汁を伴わないような塗膜割れでは開口き裂の有無の断定は困難であり、スクレーパーなどによる塗膜の部分的な除去により確認することも必要である。

（写真 3.5-8, 写真 3.5-9）



写真 3.5-6 トラフリブ・デッキプレート  
溶接部の塗膜割れ



写真 3.5-7 トラフリブ・デッキプレート  
溶接部の発錆

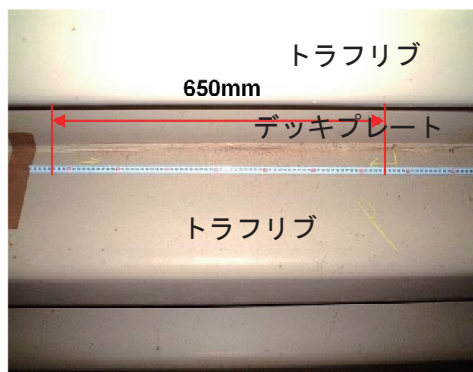


写真 3.5-8 トラフリブ・デッキプレート  
溶接部の塗膜割れ



写真 3.5-9 塗膜の部分的な除去  
（除去後に磁粉探傷試験実施）

## 2) トラフリブと横リブ交差部の上側スカラップ周辺

輪荷重直下のトラフリブと横リブ（または横げた）交差部を中心に調査を行った（写真 3.5-10）。本調査ではき裂は確認されなかった。なお、この位置のき裂の目視調査では、トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接のビードと異なり、狭隘部で陰となるスカラップの内面の詳細な確認が必要となるため、十分な近接を行う必要がある。（写真 3.5-11）



写真 3.5-10 交差部の発錆



写真 3.5-11 スカラップ周辺の塗膜割れ

## 3) トラフリブと横リブ交差部の下側スリット周辺

損傷 2)と同様に、き裂や塗膜割れは輪荷重直下のトラフリブと横リブ交差部に多くみられる（写真 3.5-12, 写真 3.5-13）。この位置のき裂の目視調査も損傷 2)と同様に狭隘部で陰となるスリットのコバやまわし溶接の止端部を詳細に確認する必要があるため、調査においては十分に近接する必要がある。

なお、この種の疲労損傷のうち、トラフリブ側の溶接止端部に発生する疲労き裂は、トラフリブの現場高力ボルト接合部に設けられる防錆用の密閉ダイアフラムの拘束が大きな影響を与える可能性が指摘されており、本調査においてもトラフリブの現場高力ボルト接合部に隣接する交差部について特に注意して確認を行った。



写真 3.5-12 トラフリブ・横リブ交差部の塗膜割れ



写真 3.5-13 トラフリブ・横リブ交差部の発錆

#### 4) トラフリブ現場溶接継手部

輪荷重直下に位置するトラフリブどうしの突合せ溶接に発生することの多いき裂である（写真 3.5-14）。

デッキプレートとトラフリブの縦方向溶接のビードへの調査と同様に下面から容易に視認できるが、上向きや横向きで施工された現場溶接となっていることが多く溶接ビードに著しい不整が見られることが多い。そのため塗膜割れやき裂をそれらと誤認したり見落とす危険性があり十分な近接により慎重に調査する必要があると考えられた。



写真 3.5-14 トラフリブ現場溶接継手部の発錆の例



#### 5) トラフリブ現場高力ボルト継手部のスカラップ周辺

主に輪荷重直下にスカラップの存在の影響から局所的な応力集中が生じやすく、き裂が生じやすい条件にある。スカラップ長が大きい場合には、局所的な応力がより大きくなると考えられることから本研究の現地調査においても調査を行った。(写真 3.5-15)。

トラフリブの内面側も溶接されるため、まわし溶接の止端部を詳細に確認するためには十分に近接する必要がある。

本研究の現地調査においては対象箇所なき裂の発生は確認されなかった。実橋におけるき裂発生事例については文献 3.4) を参照されたい。



写真 3.5-15 トラフリブ現場高力ボルト継手部

#### 6) トラフリブと端横リブ（または端横げた）の溶接部

対象箇所はけた端部に限られることから少ない。本研究の調査においても対象橋梁の対象箇所すべての確認を行った(写真 3.5-16)。トラフリブが横リブを貫通している構造では製作時において端横リブの拘束による溶接割れが発生していた可能性もあるため、き裂が確認された場合でも発生原因の調査が必要である。



写真 3.5-16 トラフリブ・端横リブ（または端横げた）溶接部の塗膜割れ

#### 7) 主げた垂直補剛材上端部とデッキプレート下面との溶接部

主げたウェブ位置と輪荷重位置が一致している場合に発生することが多く、前段階の調査で鋼床版構造と路面の交通状況調査から調査優先度の高い位置の特定は容易である。

本研究における調査でも、概略調査で舗装のひび割れの有無を確認することにより、損傷発生の可能性がある程度判断できた。

主げたウェブ位置と輪荷重位置が一致している場合には、該当箇所の荷重条件と構造条件が同じであるため、橋梁の全長にわたってすべて同様にき裂が発生することが多いと考えられるが、実調査においても塗膜割れや一部のき裂の確認によって裏付けられた（写真 3.5-17）。

なお、き裂は溶接ビードに沿って進展するものが多いが、途中から進展方向が橋軸方向に変わってデッキプレート貫通型となるものが確認できた。

なお垂直補剛材の先端付近の溶接ビードが起点のものも多くみられ、比較的視認しやすい塗膜割れによってき裂の発生を疑うことができるものが多い。

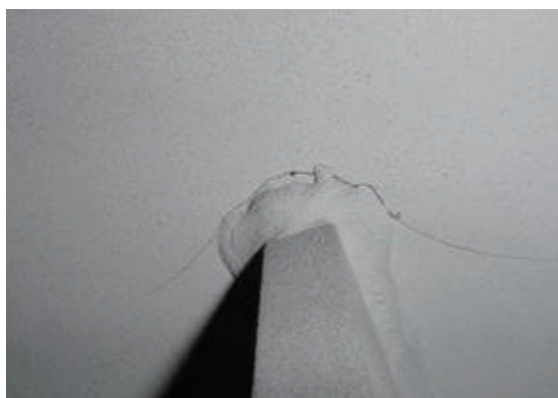
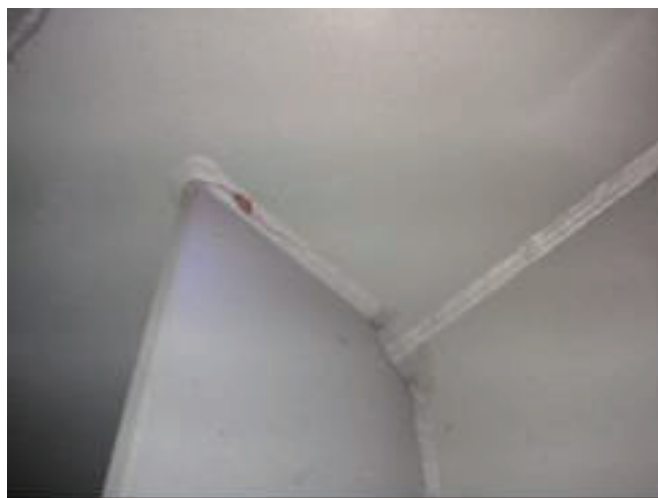


写真 3.5-17 主げた垂直補剛材上端部・デッキプレート下面溶接部の塗膜割れ

#### 8) 横リブ現場継手部のスカラップ周辺

損傷 5) と同様に、主に輪荷重直下にスカラップが位置する場合に発生の可能性はある。特にスカラップ長が大きい場合については注意して調査を行った。

本研究の現地調査においては対象箇所にき裂の発生は確認されなかった。実橋におけるき裂発生事例については文献 3.4) を参照されたい。

#### 9) 開断面リブと端横リブ（または端横げた）の溶接部

損傷 6)と同様に対象箇所が少ないため、調査対象橋梁の開断面リブと端横リブ（または端横げた）との溶接部の全数について目視で調査を行った。

本研究の現地調査においては対象箇所にき裂の発生は確認されなかった。実橋におけるき裂発生事例については文献 3.4) を参照されたい。

#### 10) 開断面リブと横リブの交差部

輪荷重直下の開断面リブに多く見られるため、閉断面のトラフリブと同様、あらかじめ輪荷重の載荷位置を確認した上で重点的な調査を行った。

本研究の現地調査においては対象箇所にき裂の発生は確認されなかった。実橋におけるき裂発生事例については文献 3.4) を参照されたい。

#### 11) 横リブ（または横げた）下フランジと主げたリブプレートの溶接部

直接輪荷重を受ける箇所ではないが、損傷事例もあり調査を行った。特に拘束が大きい箇所や荷重を受ける箇所はあわせて調査するのがよい。写真 3.5-18 では塗膜割れは確認されたが、き裂は確認されなかった。

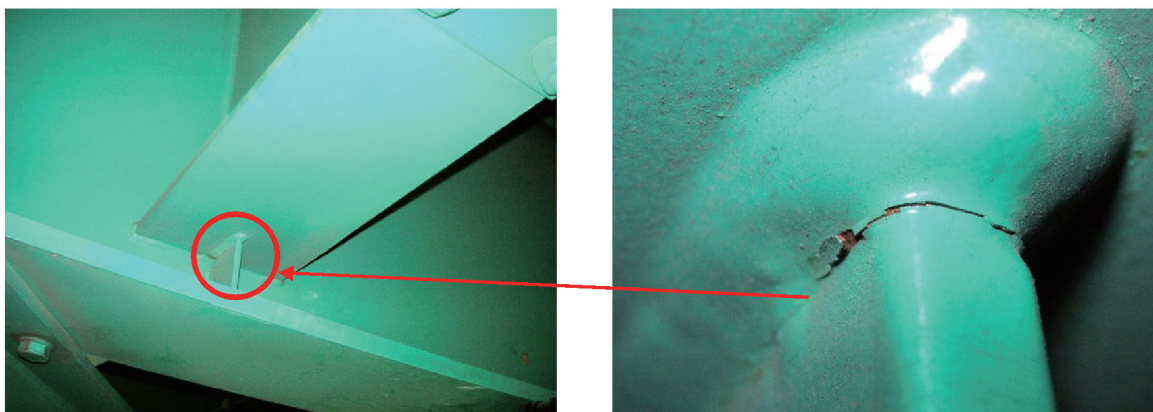


写真 3.5-18 横げた下フランジ・主げたリブプレート溶接部の塗膜割れ

#### 12) その他の付属物・架設治具の溶接部

現地調査によって、デッキプレート下面には様々な付属物が溶接によって設置されているものや溶接施工された架設治具がそのまま残置されている場合があることがわかった。（写真 3.5-19）

これらの多くは、設計や施工において疲労耐久性に対する検討や配慮が行われていないものであると考えられ、溶接品質の点からも疲労耐久性が著しく劣る可能性もあり調査においては慎重に状況の把握が行われる必要があるものと考えられた。



写真 3.5-19 デッキプレート下面に溶接施工された付属物および架設治具の例

### 13) その他の機能劣化等

鋼床版のき裂損傷には直接関係がないものの、けた内や鋼床版下面からの詳細な調査において様々な損傷や変状が確認された。

これらの中には橋梁全体の健全性に深刻な悪影響を及ぼしている可能性があるものもあり、本研究で主たる対象としているデッキプレート貫通き裂を始め鋼床版のき裂損傷に対する補修・補強等の対応策の検討にあたってはこれらもあわせて考慮した検討を行うことが必要となる。

また、鳥害による劣悪なけた内環境などは、詳細な鋼床版のき裂調査にも悪影響を及ぼすことにもなる。

ここでは、鋼床版のき裂調査の過程で把握された様々な損傷や変状についてまとめた。

#### ①箱げた内の滞水や腐食

鋼箱げた内に滞水している事例を写真 3.5-20 に示す。箱げた内に滞水すると (a) や (b) に示すように下フランジやボルトの断面が欠損し、橋全体の耐荷力が損なわれるおそれがある。ここでの原因は、(c)、(d) に示すように箱げた内に引き込まれた排水管の排水機能の不全や排水管のはずれにより生じたものであった。また、(e) のように湿気で箱げた内に滞水した場合にも、(f) に示すように水抜き孔の不設置によりうまく排水されなかった例もあった。



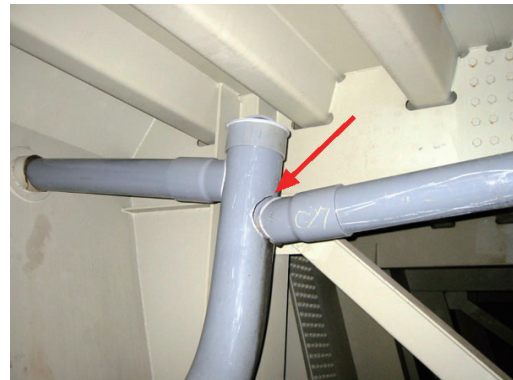
(a) 箱げた内の滞水



(b) 箱げた内の腐食



(c) 箱げた内に引き込まれた排水管の不全



(d) 排水管のはずれ



(e) 湿気による水痕



(f) 水抜き孔の不設置

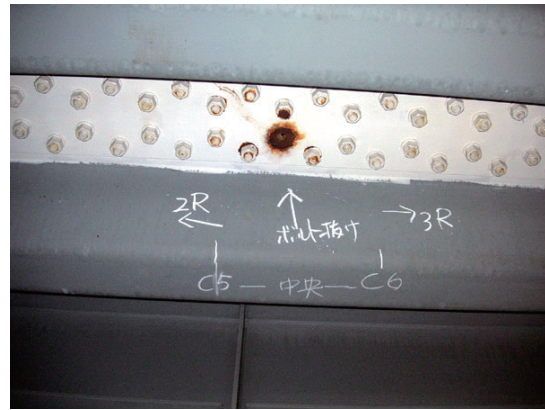
写真 3.5-20 箱げた内の滞水や腐食の事例

## ②高力ボルトの不具合

高力ボルト連結部の不具合の事例を写真 3.5-21 に示す。(a)は遅れ破壊により破断していたことが見つかった例である。このような高力ボルトは軸力が期待できないため、同様のボルトが使用されている箇所について調査が必要である。また、(b)はデッキプレートの連結部のボルトが腐食して破断していた例である。このような箇所で腐食が生じた場合、路面の排水機能の不全により、デッキプレート上面も腐食している可能性がある。



(a) 遅れ破壊

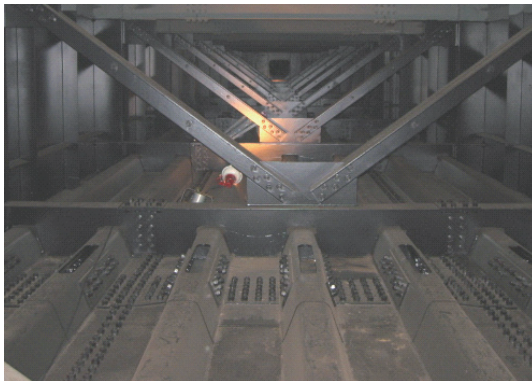


(b) デッキプレート連結部の  
高力ボルトの脱落

写真 3.5-21 高力ボルトの不具合の事例

③鳥の糞等による被害・損傷

写真 3.5-22 は、開いた状態で放置された箱げたのマンホールの扉から鳥が侵入して、鳥の糞が堆積している状況である。このような状態におかれると、安全な調査ができただけでなく、塗装が化学的に反応し劣化することもあることから、橋梁全体の健全性にも影響がある。



(a) 健全な状態



(b) 鳥の糞が著しく堆積した状態

写真 3.5-22 鳥の糞害

### 3.5.3 目視調査（鋼床版上面）

#### (1) 概要

相対的に疲労き裂が生じる可能性が高い重交通路線で鋼床版上面側から直接デッキプレート表面のき裂の調査を行うには舗装の撤去が必要になるため、一般的に交通規制を伴うことから時間的制約も大きい。

そのため、舗装の劣化状態や交通状況調査、鋼床版下面からの調査などの結果も考慮してできるだけ調査すべき箇所の絞り込みを行う。

また舗装の打替えや補修工事が予定されている場合には、それらと時期を調整することで比較的容易に調査できる場合もあるため、それらの情報も考慮することで調査全体が合理的なものになるよう配慮することが重要である。

ここでは舗装の全面撤去や全線通行止めなどの特殊な条件ではなく、一部車線規制を行って短時間で一部舗装撤去とき裂の確認を行う方法について、実際の工事の状況や既往の施工事例等を調査して鋼床版上面側からの目視調査までの手順について検討を行った。

#### (2) 調査方法についての検討

本研究にて行った鋼床版上面側からの調査の対象箇所は、以下の条件から選定した。

- ・ 重交通路線であり、累積大型車交通量が多いこと
- ・ 舗装劣化が著しく、蜘蛛の巣状の損傷や陥没が発生していること
- ・ 鋼床版下面からの調査より、デッキプレート貫通き裂が生じている可能性があること
- ・ 鋼床版下面の着目部位へのアプローチ手段がなく、十分な近接による調査が困難であること
- ・ 調査のための交通規制が可能であること

##### 【手順1】 舗装撤去範囲の設定

本研究にて調査した一例の橋では、鋼床版舗装に著しいひび割れが生じており、その一部は蜘蛛の巣状に損傷していた（写真 3.5-23）。

設計図面から舗装の損傷箇所がトラフリブと横リブとの交差部付近であることが確認できたが、けた下からのアプローチ手段が検査路のみであったため、調査可能な範囲が限定されてしまい、鋼床版下面から損傷箇所の非破壊検査や近接した目視調査はできなかった。そのため、舗装の損傷が著しいトラフリブと横リブとの交差部付近を中心に撤去範囲を設定して、鋼床版上面側からの調査を行った。

撤去範囲の特定にあたっては、舗装の損傷箇所と鋼床版や主げた構造との位置関係の把握が重要であり、架設時に溶接にて設置された部材など設計図面に記録されていないものをけた下からの目視調査により把握することも有効である。また、部分供用しながら舗装撤去および鋼床版上面側からの調査を行う場合は、供用する車線の舗装に損傷を生じさせてはならないため、撤去範囲の設定には十分な注意が必要である。



写真 3.5-23 舗装撤去前

### 【手順2】舗装の撤去

舗装の撤去は、まず撤去範囲の境界となる位置のアスファルトにカッターで切り込みをいれる。

このときデッキプレートをカッターで傷付けないようにする必要があるが、実際の舗装厚さは轍掘れ等もあり図面とは異なることが多く、施工前に現地で確認を行う必要がある。(写真 3.5-24)。

つぎに、撤去範囲の舗装の破碎を行うが、削岩機を用いる場合にもデッキプレートを傷付けないように注意が必要である(写真 3.5-25)。また鋼床版上面にはボルト継手や施工時のマンホール開口に伴うダブリングプレートの突出など必ずしも平滑でなく様々な凹凸があり施工時に障害となりうる。(写真 3.5-26, 写真 3.5-27)

これまで舗装の撤去を行って鋼床版上面を確認した事例では、削岩機等のパワーツールによる舗装および接着層の撤去に伴って鋼床版上面に多数の打撃跡等の傷を生じさせたものがあるが、これらが新たに鋼床版の疲労耐久性低下要因となることも否定できないため施工にあたっては舗装構成なども考慮して事前に手順や施工管理基準を十分検討し周知徹底することも重要である。



写真 3.5-24 アスファルト切断状況



写真 3.5-25 アスファルト破碎状況



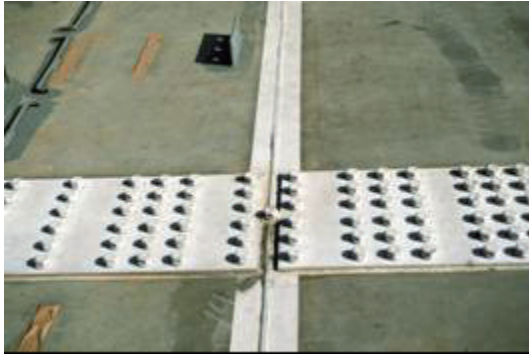


写真 3.5-26 鋼床版上面のボルト継手部



写真 3.5-27 マンホールダブリングの突出

### 【手順3】デッキプレート表面の清掃と目視観察

デッキプレートに傷を付けない範囲で慎重にアスファルトを撤去しつつ、舗装構成や基層・表層の厚さ計測、接着層や防水層の状況の確認を行う（写真 3.5-28, 29）。

接着層や防水層（グースアスファルト以外の場合）が残存する場合、無理にパワーツールで除去するとデッキプレートに傷を付けることが懸念されるため、最終段階では手工具による慎重な施工が必要になるが、調査した事例では灯油等を浸透させてスクレーパーを用いて除去すると、比較的容易に除去できることがわかった。

ガスバーナーを用いて加熱することも考えられるが、デッキプレートおよび塗装への影響を考慮すると表面温度で 200°C 程度を上限に管理することが適当と考えられる。

ディスクサンダーによる仕上げ段階の施工は、効率的であるが慎重に施工しないとデッキプレート表面に傷を付ける場合があり、ワイヤブラシなども併用し個々の施工箇所の状態に応じて適切な施工方法を使い分けるなどの配慮が必要である。



写真 3.5-28 アスファルト撤去



写真 3.5-29 防水層除去



写真 3.5-30 表面清掃



写真 3.5-31 目視調査状況

#### 3.5.4 まとめ

デッキプレート貫通き裂は、デッキプレート下面からは直接視認できないが、下面からの調査によって舗装の変状と鋼床版や主げた構造との位置関係の対応が正確に把握できるだけでなく、様々なデッキプレート貫通き裂以外の損傷や変状を把握することで、デッキプレート貫通き裂検出のための非破壊検査位置の設定や舗装を撤去しての上面からの調査位置の範囲の絞り込みが合理的に行えることがわかった。

車線と構造物との関係については事前に設計図面等を準備しておき、現地の車両走行状況や舗装の損傷位置との照らし合わせを行うが、架設治具の残置、架設時の補強、付属物の設置など必ずしも図面に詳細が記録されていない溶接がデッキプレートにあることも多く、それらを把握するためにも非破壊検査や舗装の撤去を行う前に鋼床版下面からの詳細な目視調査を行うことは有効である。(図 3.5-2, 図 3.5-3, 写真 3.5-32)

デッキプレート上面からの調査は、対象位置が大型車の車輪通過位置近傍となるため一般的には交通制限を伴うこととなる。また夜間のみ作業となるなど時間的制約も厳しい。さらに部分供用しながらの調査や舗装撤去となる場合には供用する車線の舗装に損傷を生じさせることができないため、舗装撤去範囲を事前に特定しておくことが重要である。

撤去工事にあたって、デッキプレート表面に傷等の損傷を生じさせないためには、舗装厚さやデッキプレート上面の突起物の存在など不明な点が多くあるため事前に書類等で十分な確認をとるだけでなく、施工段階でその都度確認を行いながら施工することが必要であった。接着層や防水層（グースアスファルト以外の場合）が残存する場合、灯油等を浸透させてスクレーパーを用いると、除去しやすいことなどがわかった。

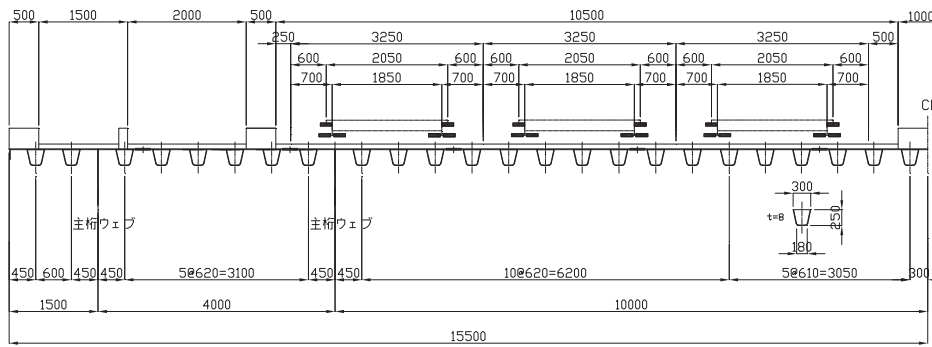


図 3.5-2 幅員構成から推定される大型車走行位置

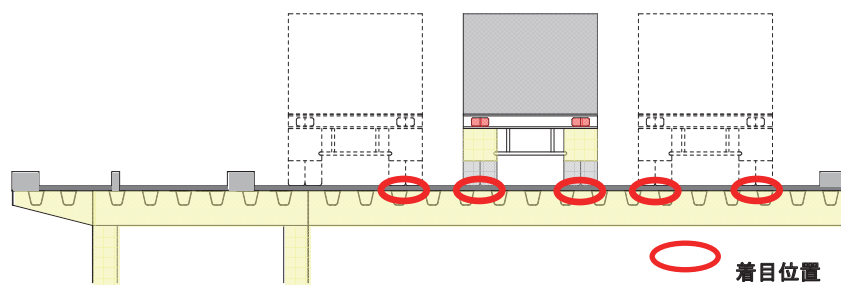


図 3.5-3 トラフリブとデッキプレートとの溶接部における疲労損傷の調査着目位置の例

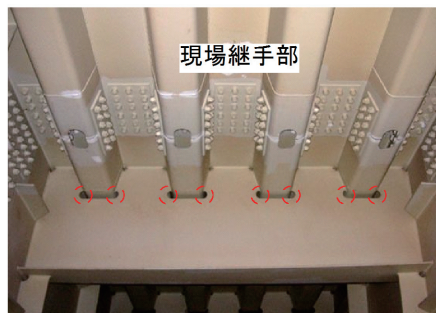


写真 3.5-32 トラフリブと横リブ交差部の調査重点部



### 3.6 詳細調査（磁粉探傷試験（MT））（Step4）

#### 3.6.1 概要

鋼材の疲労き裂の検出では、塗膜の有無にかかわらず、目視点検により開口しているき裂の発見を試みるのが基本である。しかし、塗膜上からの目視のみでき裂か単なる塗膜割れかの判断が難しい場合も多く、また、き裂が発見された場合にはその進展性の監視や補修・補強のためには正確にき裂の先端位置を把握しなければならない。よって、表面に開口しているき裂に対しては、いずれかの段階で磁粉探傷試験（MT）を適用することが一般的である。

磁粉探傷試験は、き裂を含む鋼材母材を磁化し、き裂部に形成される局所的な磁界に磁粉を付着させ、その性状から視覚的にき裂の有無、長さなどを把握するものである。

鋼橋のき裂の検出には通常、湿式の磁粉探傷試験が用いられる。この手法はき裂検出性がよく、鋼道路橋のき裂の様に正確な先端位置の捕捉が必要な場合には優れる方法である。しかし、検査部位の著しい凹凸など表面性状によってはき裂かどうかの判断が難しくなる場合もあるなど、良好な検出性が保証されるためには良好な検査条件が満足されることも重要である。

以上のことから、本研究ではデッキプレート上面からデッキプレート貫通き裂を直接検査する場合、及び、デッキプレート下面から、その他の鋼床版のき裂に対して磁粉探傷試験をする場合のそれぞれについて、実際に検査を行ってその特徴と適用条件等について検討を行った。

調査は図 3.6-1 に示す手順で実施した。

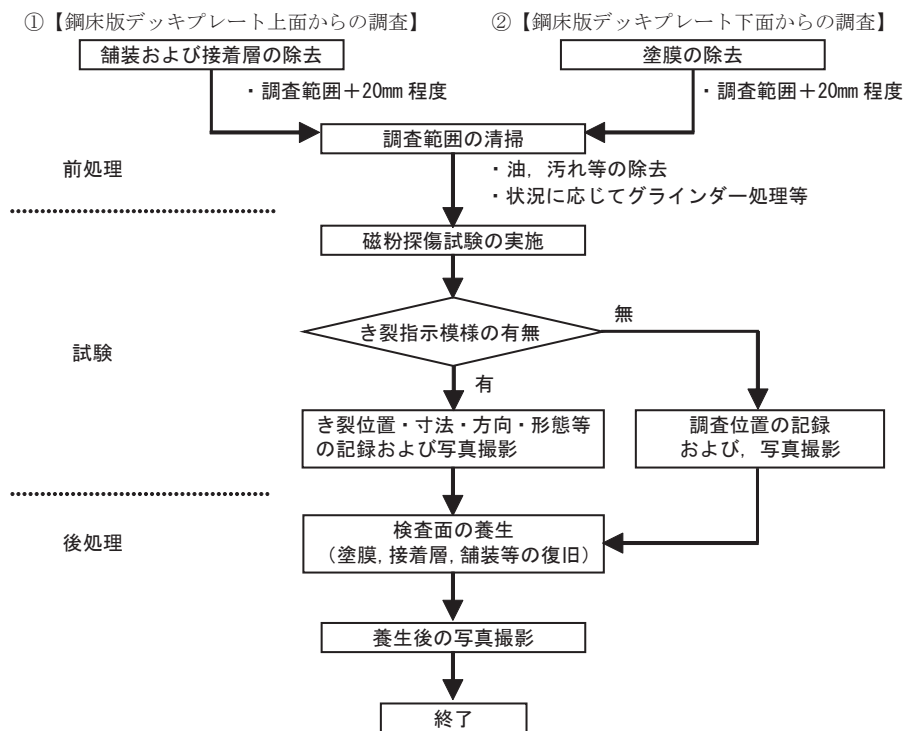


図 3.6-1 磁粉探傷試験による調査の手順

### 3.6.2 デッキプレート上面からの調査とその結果

デッキプレート貫通き裂は、舗装を剥離して路面から目視点検する方法が直接的に確認することのできる唯一の方法である。しかしながら、舗装撤去後の鋼床版表面の様には様々な傷等がある条件では、目視のみで鋼材表面の傷とき裂を確実に判別することは難しい。

実際にデッキプレート上面からデッキプレート貫通き裂を含む鋼床版表面を目視した状況の例を写真 3.6-1 に示す。この例ではデッキプレート上面に長さ 250mm 程度のき裂と考えられる 2本の線が確認出来る。図 3.6-2 に示す範囲で磁粉探傷試験を行った結果を写真 3.6-2 に示す。他のきず等に対してき裂のみが明確な指示模様として確認することができ、舗装撤去後のデッキプレート上面の条件ではき裂検出性に特に問題がないことがわかった。また、この例は夜間に舗装撤去を行った事例であるが、蛍光磁粉によってき裂位置が明瞭に確認でき、短時間での正確なき裂の把握に特に有効であることがわかった。

なお日中に検査を行う場合、鋼床版表面は直射日光にさらされる特に明るい環境となるためそのままでは蛍光磁粉模様の観察がし難く検出性の低下が考えられたため、簡易な天蓋を用いた調査を行った(写真 3.6-3)。その結果、この程度の簡易な装備で僅かな陰を検査部につくることができき裂は十分確認できることがわかった。

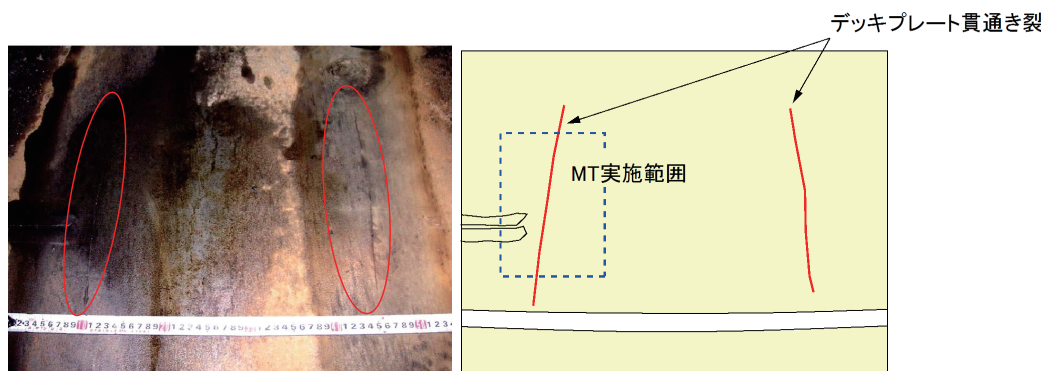


写真 3.6-1 デッキプレート上面 舗装剥離後

図 3.6-2 損傷位置と磁粉探傷位置

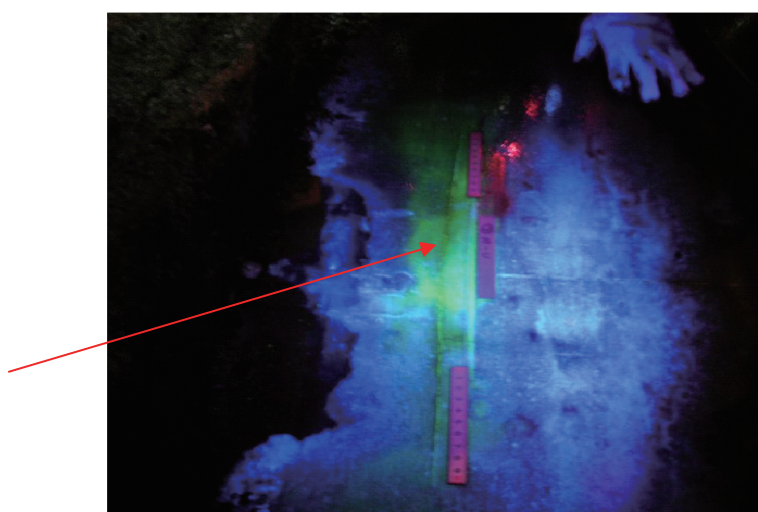


写真 3.6-2 き裂指示模様の例



写真 3.6-3 磁粉探傷試験実施状況(日中の場合)

### 3.6.3 デッキプレート下面からの調査とその結果

磁粉探傷試験では塗膜の除去が必要になるため、鋼床版のデッキプレート下面側で図 3.6-3 に示す様な位置で塗膜割れが多数検出された場合にその全てに対して一律塗膜を除去して磁粉探傷試験をすることは合理的でない。これまで報告されている事例や本研究で調査した橋梁においても、デッキプレート下面の溶接部で見つかる塗膜割れの多くがき裂を伴わないものである。これはスカーラップ部をはじめ鋼床版下面の溶接線では、表面のビードの凹凸の存在や塗装条件から塗膜が厚く施工されやすいことも原因の一つと考えられる。

したがって本研究では、デッキプレート下面に見つかるどの様な塗膜割れ等の変状が、き裂を伴う可能性が高く、塗膜を除去しての磁粉探傷試験の優先度が高いかを判断するための知見を得るために、実橋で塗膜除去前の性状を確認するとともに磁粉探傷試験を実際に行い実施して指示模様が検出されたケースと検出されなかったケースについて整理した。

#### (1) デッキプレートとトラフリブの縦方向継手（溶接ビード貫通き裂）

図 3.6-3 に示す輪荷重直下のトラフリブの縦方向溶接継手部において発見した、溶接ビードに沿って約 650mm の長さの塗膜割れ（写真 3.6-4）の例を示す。

磁粉探傷試験を行った結果、写真 3.6-5 に示すき裂指示模様を確認した。

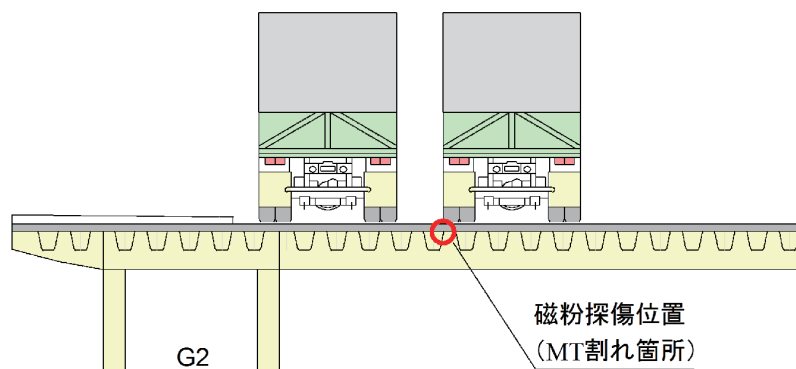


図 3.6-3 橋梁断面図（磁粉探傷位置）

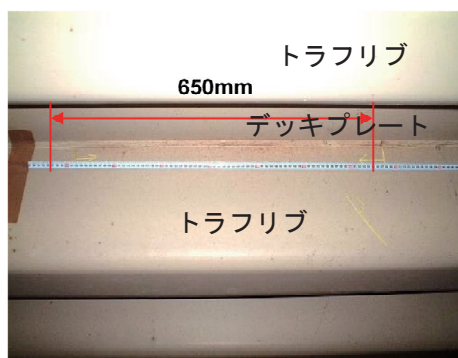


写真 3.6-4 目視による塗膜割れ範囲

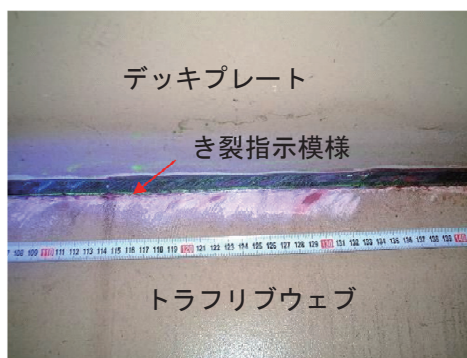
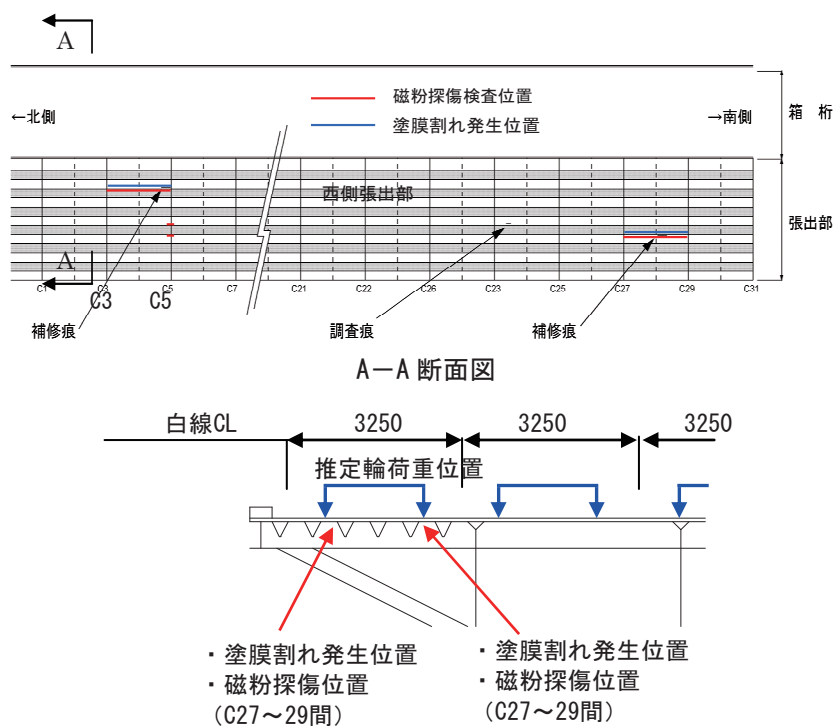


写真 3.6-5 き裂指示模様



図 3.6-4 の例は、図に示す輪荷重直下のデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接継手部において、目視調査においてき裂の疑いのある塗膜割れを確認し、磁粉探傷試験を行った結果である。試験の結果、写真 3.6-6 に示すき裂指示模様を確認した。



これらの例の様に、この溶接線ではビード中央に直線状に長く延びる塗膜割れが見つかることがあるが、止端部の様な塗膜の不連続部や屈曲部でないことからこの様な塗膜割れではその下に開口したき裂の存在が疑われる。

一方、写真 3.6-7 にデッキプレートとトラフリブの縦方向継手部の近接写真を示す例では、同じ様に溶接ビードの中央に塗膜割れが確認できるが磁粉探傷試験の結果からき裂指示模様は確認されなかった。

この例は塗装塗り重ね部のマスキングテープ跡の可能性が疑われたが詳細は不明である。しかし、この部位の塗装では施工上マスキングが行われることがあり、き裂によるものとこの区別が困難な場合があるので注意が必要と考えられる。

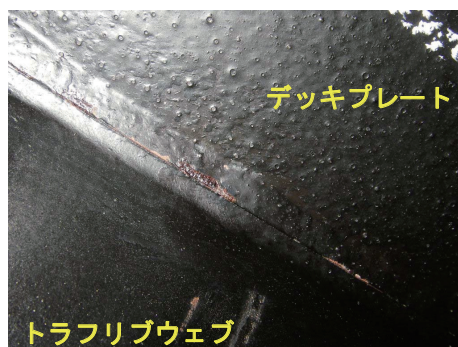


写真 3.6-7 目視による塗膜割れ状況

図 3.6-5 および図 3.6-6 に示したデッキプレートとトラフリブ溶接部の塗膜の剥がれ状況を写真 3.6-8、および写真 3.6-9 に示す。いずれも磁粉探傷試験ではき裂指示模様は確認されなかった。細い筋状に塗膜割れが確認されるケースに比べ、本ケースの様に塗膜が広い範囲ではがれているケースでは、き裂指示模様が確認されない場合も多い。

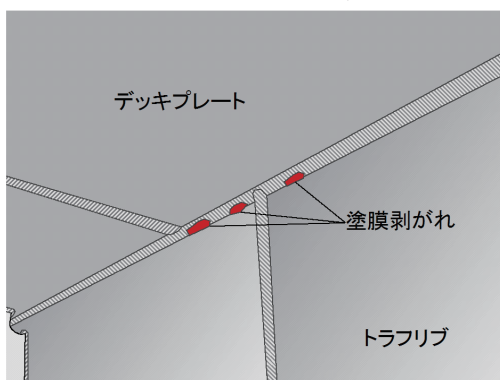


図 3.6-5 磁粉探傷位置

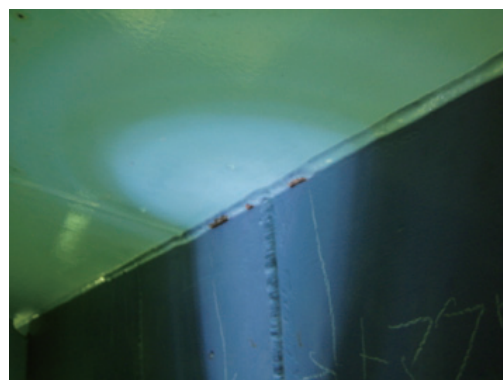


写真 3.6-8 左図位置の塗膜剥がれ状況

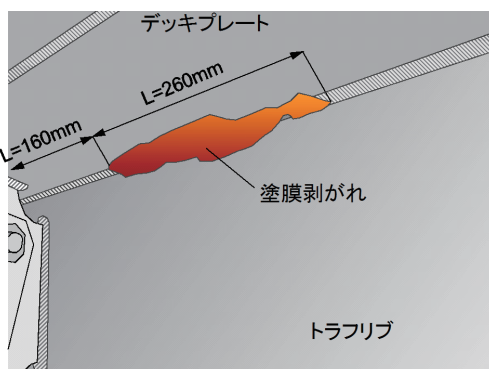


図 3.6-6 磁粉探傷位置



写真 3.6-9 左図位置の塗膜はがれ状況

(2) デッキプレートと垂直補剛材のまわし溶接部

図 3.6-7 に示すデッキプレートと垂直補剛材のまわし溶接部の磁粉探傷試験結果を写真 3.6-10 および写真 3.6-11 に示す。き裂指示模様はデッキプレート側止端のみ、垂直補剛材側止端のみ、あるいはその両方に確認される場合があった。

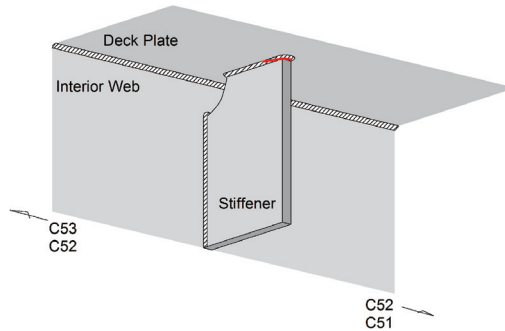


図 3.6-7 磁粉探傷位置

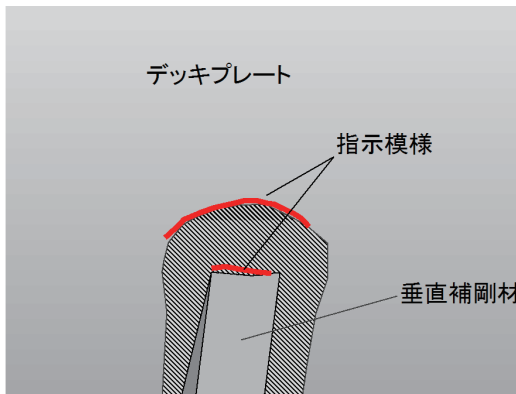


図 3.6-8 C51～C52 間の磁粉探傷位置

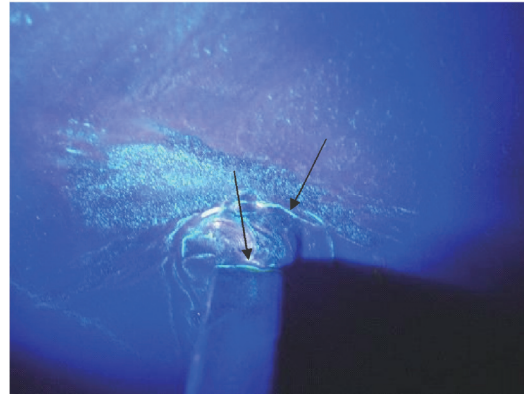


写真 3.6-10 左図位置のき裂指示模様

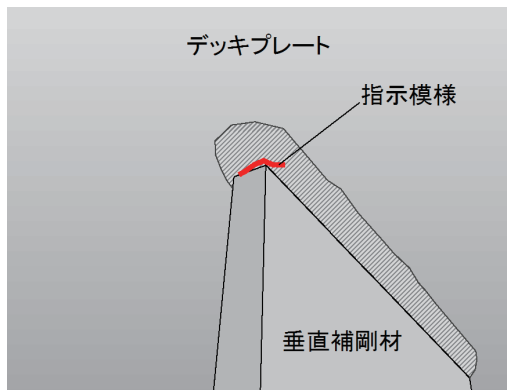


図 3.6-9 C52～C53 間の磁粉探傷位置

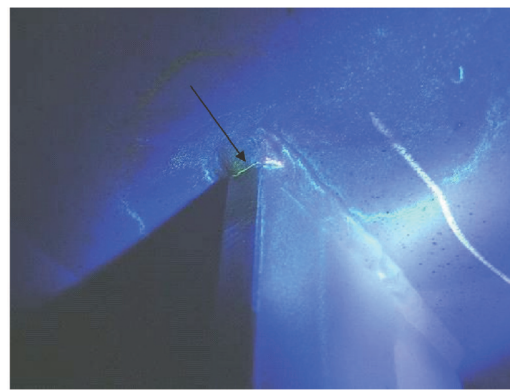


写真 3.6-11 左図位置のき裂指示模様

この部位の塗装は形状からも比較的厚い塗膜が形成されていることが多く、き裂を伴わない小さな塗膜割れも多く見られる。そのため単純に塗膜割れの性状だけからはき裂の有無を判断することが困難である。

一方、一般にこの溶接継手は同じ橋梁の中に同条件で同じ構造が車線方向に多数あることから、それらを調査して多発している場合には特に顕著なものや疲労環境がより厳しいと考えられるものから優先的に調査を行うことが有効であると考えられる。

具体的には、輪荷重直下に位置する部位、舗装の劣化がより顕著な部位など、これまでの調査において損傷事例が多く発見された部位に着目するとともに、主桁ブロック単位など構造の違いや製作ロットの違いなどに着目して区分し、各区分の中から代表的な箇所を抽出して調査する方法などがある。

逆に数が少ない場合には、この位置のき裂は進行方向によってはデッキプレート貫通き裂となる可能性もあることから、それらの全てを磁粉探傷調査の対象として当該部位および全橋の疲労状態の推定を行うことが予防保全の観点からも合理的であると考えられる。

### (3) トラフリブと横リブ交差部

図 3.6-10 に示すトラフリブと横リブ交差部の上側スカーラップ部において、デッキプレートとトラフリブ溶接部の塗膜割れは、磁粉探傷試験の結果、写真 3.6-12 に示すようき裂指示模様を確認した。

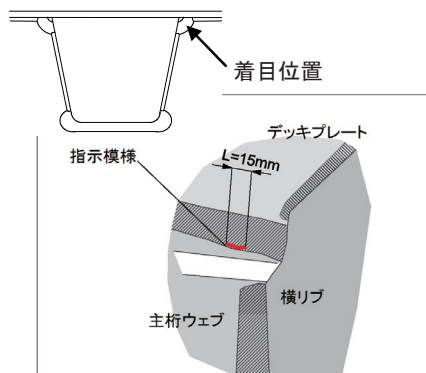


図 3.6-10 磁粉探傷位置

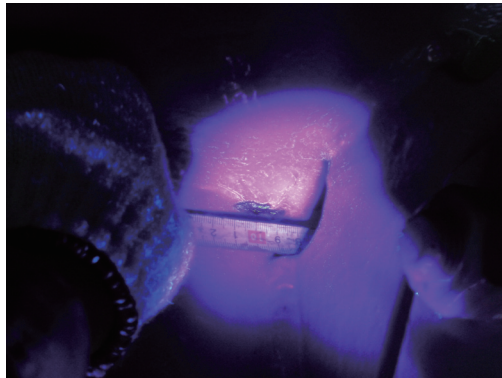


写真 3.6-12 左図位置でのき裂指示模様

図 3.6-11 に示すトラフリブと横リブ交差部の下側スカーラップ部の塗膜割れ部において、磁粉探傷試験の結果、写真 3.6-13 に示すき裂指示模様が確認されなかった。写真 3.6-14 に示す塗膜割れにおいても、磁粉探傷試験の結果き裂指示模様は確認されなかった。

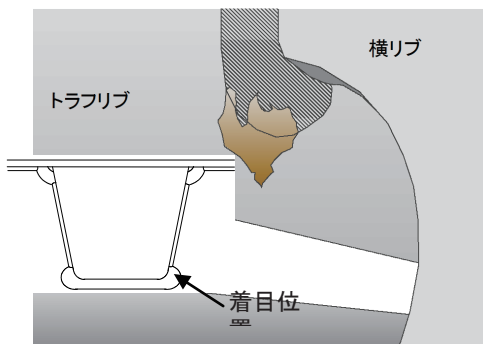


図 3.6-11 磁粉探傷位置

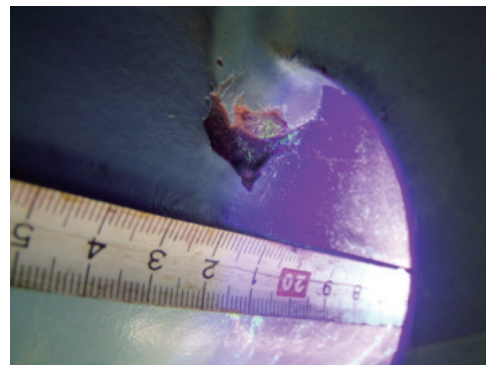


写真 3.6-13 左図位置での磁粉探傷結果

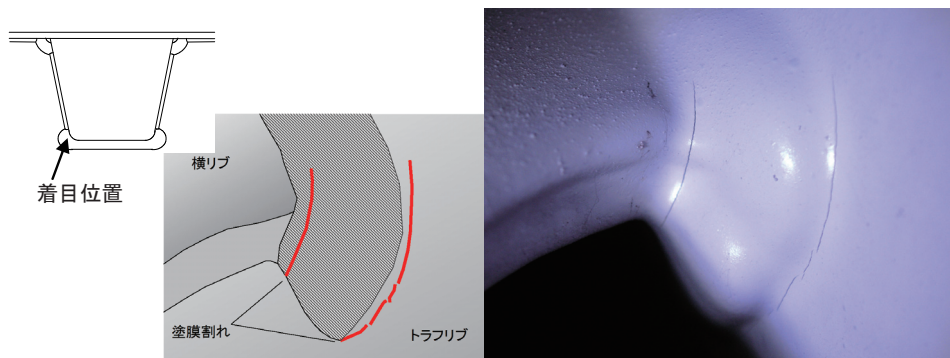


図 3.6-12 磁粉探傷位置

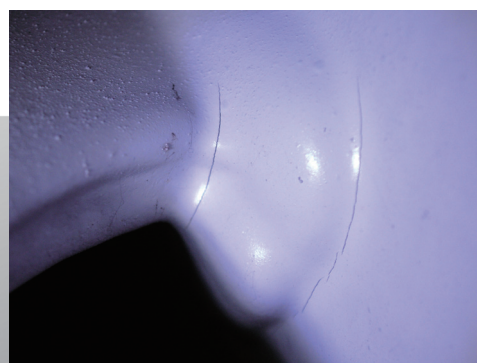


写真 3.6-14 左図位置の目視による塗膜割れ状況

デッキプレートと垂直補剛材のまわし溶接部と同様，一般にこの溶接継手は同じ橋梁の中に同条件で同じ構造が多数ある。よって，これらを調査して多発している場合には，特に顕著なものや疲労環境がより厳しいと考えられるものから優先的に調査を行うことが有効であると考えられる。

例えば，上側スカーラップの場合，デッキプレートとトラフリブの縦方向継手の疲労き裂が横リブ交差部に発生したケースと考えられる。よって，輪荷重直下を優先するとともに，デッキプレートとトラフリブ縦方向継手の塗膜割れ，あるいは疲労き裂が確認された溶接ラインや，その付近の部位を優先するなどが考えられる。

一方，下側スカーラップは，一般部に比べてトラフリブ現場添接部付近の損傷が多く見つかっていることから，トラフリブ現場添接部付近の塗膜割れを優先することなどが考えられる。

#### (4)主桁ウェブコーナープレート継手部

写真 3. 6-15 に示す主桁ウェブのコーナープレート継手部において、塗膜割れを確認した。塗膜割れ部の磁粉探傷試験の結果、写真 3. 6-16 に示すき裂指示模様を確認した。



写真 3. 6-15 主桁ウェブコーナープレート継手部  
(目視点検後の塗膜除去状況)

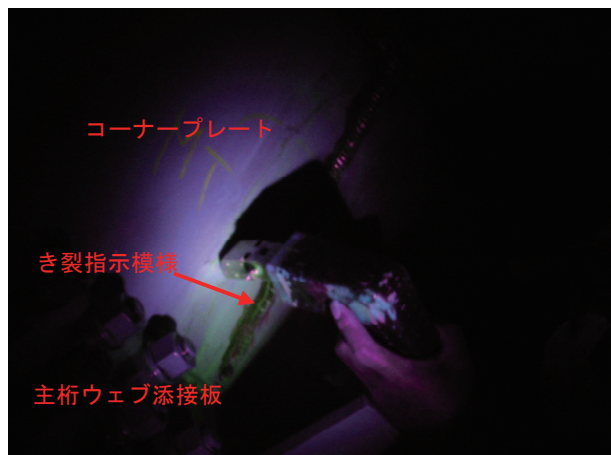


写真 3. 6-16 磁粉指示模様

コーナープレートにおいて、デッキプレートとの縦方向溶接にビード中央に直線状に長く伸びる塗膜割れがある場合には、デッキプレートとトラフリブの縦方向溶接と同様に、止端部の様な塗膜の不連続部や屈曲部でないことから塗膜割れの下に開口したき裂の存在が疑われる。またコーナープレート構造の様に溶接品質や溶接継手の疲労強度の観点から疲労耐久性に劣ると考えられている部位では、特に交通量が少ないなどの特段の条件がない限り早期に疲労き裂を生じる可能性があるため塗膜割れが確認された場合にはその下のき裂の有無を確実に調査しておくことが必要と考えられる。

本損傷の場合でも、コーナープレートのデッキプレートとの溶接継手ではき裂は確認されなかったものの、疲労強度が劣ると考えられるコーナープレートどうしの継手でき裂が確認された。本損傷例以外にも疲労強度に劣る裏当て金を用いた片面からの突き合わせ溶接や主げたウェブに重ね継ぎ手で取り付けられたダブリングプレート部からき裂が生じた事例が報告されている。

### 3.6.4 まとめ

実橋での磁粉探傷試験によるき裂検出の結果、次のことが明らかになった。

#### (1) デッキプレート上面からの調査

目視調査では発見し難いデッキプレート貫通き裂でも確実に検出できることがわかった。

#### (2) デッキプレート下面からの調査

##### ① デッキプレートとトラフリブの縦方向継手（溶接ビード貫通き裂）

止端部の様な塗膜の不連続部や屈曲部でなく、溶接ビード中央に直線状に伸びている塗膜割れでは、その下に開口したき裂の存在が疑われるため、優先的に磁粉探傷試験を行う必要がある。ただし、塗装塗り重ねのためのマスキング跡が残っているケースなど塗膜割れのみでは疲労き裂によるものとの区分が困難な場合があるため、注意する必要がある。

##### ② デッキプレートと垂直補剛材のまわし溶接部

き裂を伴わない小さな塗膜割れも見られ、かつ、同条件で同じ構造が多数あるため、塗膜割れが多発している場合には、特に顕著なものや、輪荷重直下、あるいは舗装の劣化が顕著なものなど疲労環境がより厳しい場所を優先的に調査することが有効である。また、桁端・支間中央・支点部などの主桁応力特性、あるいは主桁ブロック単位などの製作ロットに区分し、各区分の中から代表的な箇所を抽出して調査する方法なども考えられる。

##### ③ トラフリブと横リブの交差部

同一橋梁の中に同条件で同じ構造が多数あるため、塗膜割れが多発している場合には、特に顕著なものや疲労環境がより厳しいと考えられるものから優先的に調査を行うことが有効であると考えられる。

上側スカーラップ部は、上述①の損傷が横リブ交差部に発生したケースと考えられるため、①の塗膜割れ部位と同じ溶接線や、その付近の調査を優先するなどが考えられる。一方、下側スカーラップ部は、トラフリブ現場添接部付近で損傷が多いことから、トラフリブ現場添接部付近の塗膜割れを優先することなどが考えられる。

##### ④ コーナープレート継手部

溶接ビード中央に直線状に長く延びる塗膜割れがある場合には、塗膜割れの下に開口したき裂の存在が疑われる。本構造は他の構造に比べて疲労耐久性に劣ると考えられるため、特に交通量が少ないなどの条件がない限り早期に疲労き裂を生じる可能性があるため塗膜割れが確認された場合には、き裂の有無を確実に調査しておくことが必要と考えられる。

調査事例においても、コーナープレートのデッキプレートとの溶接継手ではき裂は確認されなかったものの、コーナープレートどうしの継手でき裂が確認された場合があった。また、本損傷例以外にも疲労強度に劣る裏当て金を用いた片面からの突き合わせ溶接や主げたウェブに重ね継ぎ手で取り付けられたダブリングプレート部からき裂が生じた事例などもあるため、注意する必要がある。

### (3) その他適用上の留意点

磁粉探傷試験を、実橋に適用するに当たって留意すべき点を以下に示す。

- 磁粉探傷試験は磁化や紫外線照査のための機器を使用するため、事前に調査位置への搬入経路や電源について確認しておく必要がある。なお、最近では**写真 3.6-17**、**写真 3.6-18**に示すバッテリー型磁化装置や懐中電灯型紫外線照査装置など小型化・軽量化された機器を選定して持参することが有効であった。
- 疲労き裂の発生状態を正確に把握するためには、舗装や接着層、あるいは塗膜をき裂先端が十分確認できる範囲まで除去しなければならないが、その際、検査箇所表面に付着している汚れや油などを除去するなど、適切な方法による前処理を行なう必要があった。
- 蛍光磁粉模様を撮影する場合、適切な光学フィルターを用いて適切な色調の磁粉模様を得られる様にする必要があった。
- 磁粉探傷試験によってき裂が認められた場合は、以後のき裂進展調査のためき裂両端に印をつけ、検査日を明記しておくことで、き裂の進展など、後の検証をしやすいくことがわかった。

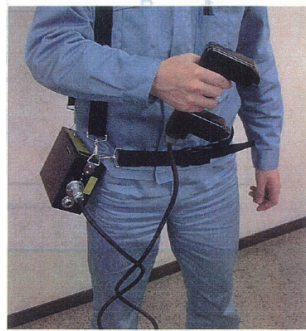


写真 3.6-17 バッテリータイプ  
小型磁化装置の例



写真 3.6-18 懐中電灯型紫外線  
照査装置の例

### (4) まとめ

磁粉探傷試験を用いた鋼床版の疲労き裂検出方法に関して、実際に検査を行い構造着目部位ごとの特徴や適用条件、留意点を具体的に示した。

磁粉探傷試験は、表面き裂の有無、き裂長さ等の検出性に優れているが、一方で塗膜を除去しないと精度の高い検査が出来ない試験方法である。よって、一般的な点検業務では、まず、上述した構造着目部位ごと特徴を踏まえ、塗膜の損傷が鋭利で長いものなどを優先して検査を行い、橋梁全体の損傷状況を把握した上で、詳細な点検計画（点検範囲、部位、設備等）を作成することが合理的と考えられる。



### 3.7 詳細調査（超音波探傷試験）(Step4)

#### 3.7.1 目的

デッキプレート貫通き裂は、3.5、3.6 で検討した舗装を除去しデッキプレート上面からの直接視認および磁粉探傷試験で確認することが最も確実な方法である。しかしこれらの方法の実施には、供用中道路の舗装除去のための交通規制、舗装除去範囲の厳密な絞り込みが不可欠であるなどの課題がある。そこで、本研究では、一般的な超音波探傷試験による場合の、デッキプレート下面側からのき裂を検出性について検討した。

#### 3.7.2 調査に用いる機器と評価法の検討

##### (1) 超音波探傷試験の種類

超音波探傷試験は、周波数 1~10MHz 程度の超音波を用いて、超音波が異質の材料の境界で反射、散乱することを利用して板厚の測定や材料中のきず等を検出する非破壊検査方法である。超音波のモードには、縦波（疎密波）、横波（せん断波）、表面波、板波があり、横波に関しては、振動方向によって SV 波、SH 波がある。超音波探傷試験は、超音波の進行方向や超音波のモードにより垂直法、斜角法、表面波、板波法に分類される。

表 3.7.1 に、超音波探傷試験の分類を示し、図 3.7-1 に、垂直法と斜角法によるき裂の検出要領を示す。

表 3.7-1 超音波探傷試験の分類

| 探傷法  | 超音波の進行方向          | 主な用途  |
|------|-------------------|---|
| 垂直法  | 探傷面に垂直方向          | ・ 厚さ測定<br>・ 横波音速測定  |
| 斜角法  | 探傷面に斜め方向          | ・ SV 波、SH 波の 2 種類があり、通常は SV 波を用いることが多い<br>・ 鋼溶接部の探傷には、45° ~70° 程度の屈折角で用いられることが多い<br>・ 縦波を用いた斜角法は、SUS 溶接部などの探傷   |
| 表面波法 | 表面に沿ってあるいは表面近傍を直進 | ・ 表面近傍のきずの探傷<br>・ SV 表面波：SV 波斜角探触子の横波臨界角で発生する波<br>（JISZ2350 では、上記のみ表面波として分類される）<br>・ SH 表面波：SH 波斜角探触子の横波臨界角で発生する波<br>・ クリーピング波：SV 波斜角探触子の縦波臨界角で発生する波<br>（縦波表面波もしくは 90° 縦波斜角探触子と呼称する場合もある）<br>（JIS Z 2350 では L(縦波)/A(斜角)/90(角度) と表記） |
| 板波法  | 板に沿って直進           | ・ 薄板の探傷   |

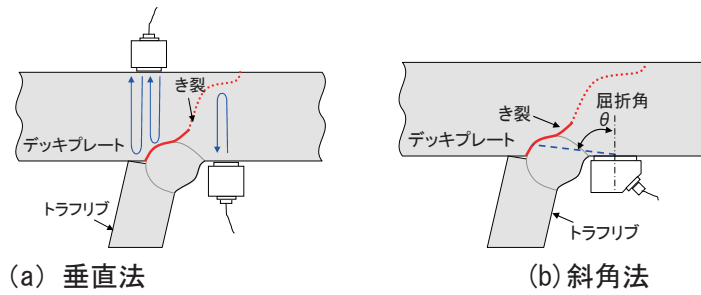


図 3.7-1 垂直法と斜角法

(2) 探傷法の選定

トラフリブの溶接ルート部からデッキプレートを通る方向に発生するき裂を発生初期に近い段階から検出するためには、表面波法、または、屈折角の大きな斜角探傷法の適用が効果的である。しかしながら、表 3.7-1 に分類したように、SV 表面波 (SV 波斜角探触子の横波臨界角で発生する波) は表面状態の影響を受け易く、また、SH 表面波 (SH 波斜角探触子の横波臨界角で発生する波) は粘性の高い接触媒質が必要で、探触子の滑らかな走査が難しく接触の安定性を得るまでに時間を要するため、実際の橋梁での探傷は不向きである。また、横波斜角法では屈折角が 75 度前後を超えると急激に強度が低下するという問題がある。そこで、屈折角ができるだけ 90 度に近い物としてクリーニング波を適用することとした。クリーニング波は斜角法で縦波臨界角 (縦波の屈折角が理論上 90 度になる入射角) で超音波を入射した場合に発生する波であり、距離による減衰は比較的大きいが、表面近傍の欠陥の探傷には有利といわれている。

クリーニング波は、表面を伝搬する波であるため、ある程度進展したき裂に対しては深さを評価することが困難であるため、70 度斜角探触子 (図 3.7-2) を併用することとした。

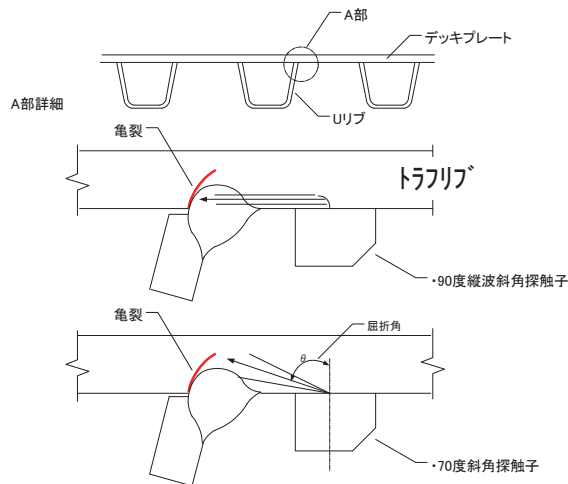


図 3.7-2 超音波探傷調査

クリーニング波：縦波臨界角で入射した場合に発生し、試験体の表面に沿って直進する縦波 (JIS Z 2300 番号 2038)

JIS Z 2350 による探触子の表示記号は、LA90 L(縦波)/A(斜角)/90(角度)

### 3.7.3 試験条件

本検討では、クリーピング探触子（以降、JIS Z 2350 の表記に基づき 90 度縦波斜角探触子と称する）と 70 度斜角探触子を用いた超音波探傷試験の適用性について確認試験を行った。

#### (1) 試験機材

試験に用いた機材を以下に示す

##### ①超音波探傷器

JIZ Z 3060-2002 附属書 1 (規定) 「超音波探傷装置の機能及び性能」 に示す性能を満足するもので、90 度縦波斜角探傷及び 70 度斜角探傷に適した超音波探傷器とする。

##### ②探触子

90 度縦波斜角探触子 : 5 C 1 0 × 5 L A D 9 0 (二振動子形)

70 度斜角探触子 : 5 C 1 0 × 1 0 A 7 0 (接近限界距離 : 8mm 以下)

##### ③接触媒質 CMC ペーストもしくはグリセリンペースト

#### (2) 感度の調整

鋼床版デッキプレートき裂を調査する場合の基準感度調整には、図 3.7-3 に示す深さが異なるスリット (0.5/1.0/1.5/2.0/4.0/6.0mm) を加工した特別な対比試験片を使用した。

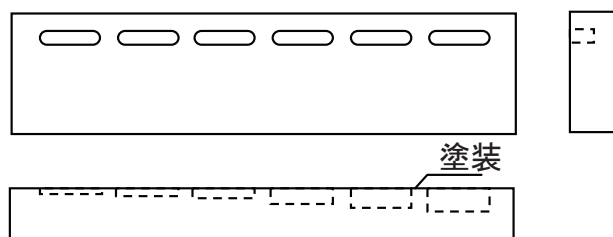


図 3.7-3 対比試験片

90 度縦波斜角探触子は、STB-N1 (もしくは STB-A1) 標準試験片 (25mm 板厚)、70 度斜角探触子は STB-A3 (もしくは STB-A1) 標準試験片を用いて、それぞれ時間軸を 50mm に調整した。

#### 90度縦波斜角探触子

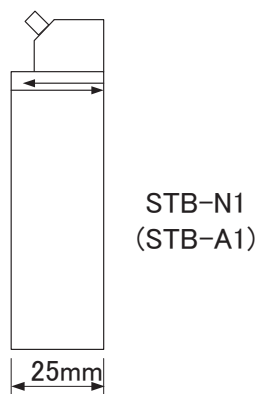


図 3.7-4 標準試験片

90 度縦波斜角探触子の基準感度は、対比試験片の塗装面側に探触子を置き、対比試験片 1.5mm のスリットから探触子前面までの距離が 15mm となる探触子位置において、エコー高さが 50% になるように調整した。スリットと探触子前面距離の 15mm は、溶接線止端と溶接部ルートまでの距離と同等になるように選定した。

70 度斜角探触子の基準感度は、対比試験片の塗装面側に探触子を置き、直射法でエコー高さが 100% になるように調整した。

探傷感度の調整はスリットを加工した対比試験片を使用しているが、塗装の仕様や塗膜厚によってエコー高さが大きく異なる場合があることに配慮し、対比試験片は対象部位の塗装仕様、塗膜厚に準じた塗装を施した。さらに、検査対象部位の塗膜厚さを測定し、探傷感度に差異がある場合には、V 透過法によって探傷感度を補正した。

### (3) 試験の方法

#### ① 走査方法

走査方法には、図 3.7-5 に示すように様々な手法がある。ここでは首振り走査、ジグザグ走査および横方向走査法とした。

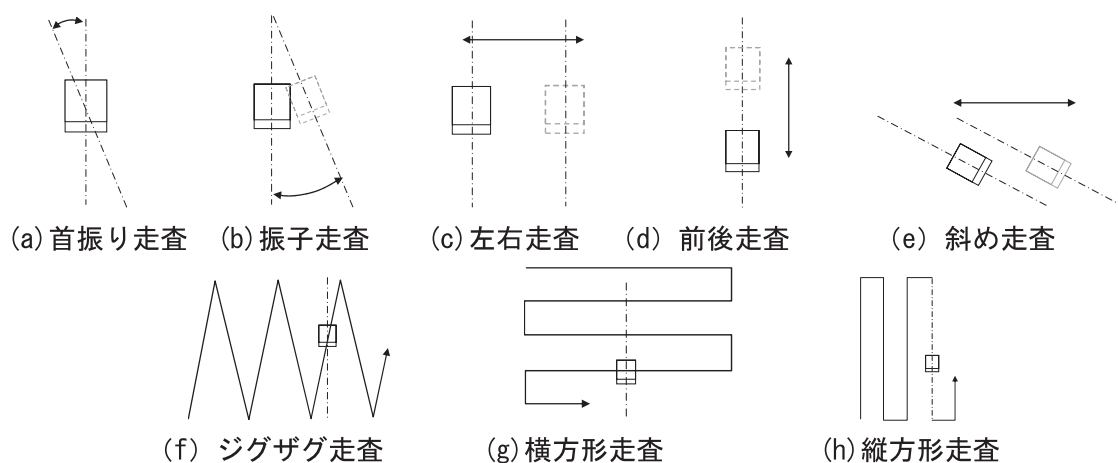


図 3.7-5 探触子の走査方法

#### ② 走査位置 (90 度縦波斜角探触子)

探触子走査位置は、探触子前面が溶接線止端に沿うようにして溶接線方向へ走査した。(図 3.7-6)

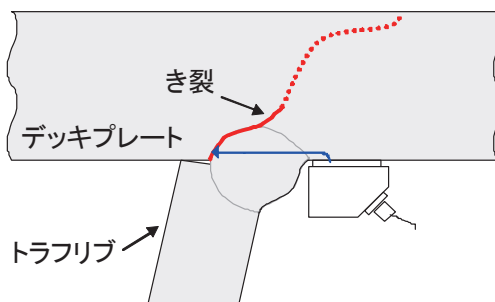


図 3.7-6 走査位置

③検出レベル（90度縦波斜角探触子）

エコー高さが50%を越え、指示長さが10mm以上のものをき裂評価の対象とした。  
なお、エコー高さはビーム路程が15mmとなる探触子位置において測定する。

④指示長さの測定（90度縦波斜角探触子）

ビーム路程が15mmとなる探触子位置において探触子を左右走査し、50%を越えるエコー高さの探触子の移動距離を1mm単位で測定した。

(4) 評価の方法

①デッキプレート下面より90度縦波斜角探触子を用いて探傷し、検出したエコー高さに応じて、表3.7-2によりき裂深さを評価した（き裂の有無を評価）。

表 3.7-2 90度縦波斜角探傷結果の評価

| エコー高さ  | き裂深さ  |
|--------|-------|
| 50%未満  | き裂なし  |
| 50～80% | 2mm未満 |
| 80%以上  | 2mm以上 |

②90度縦波斜角探触子のエコー高さが80%以上の場合は、70度斜角探触子を用いて探傷した（き裂の深さを評価, 表3.7-3）。

表 3.7-3 70度縦波斜角探傷結果の評価

| エコー高さ  | き裂深さ        |
|--------|-------------|
| 20%未満  | 2mm以上～6mm未満 |
| 20～50% | 6mm以上～8mm未満 |
| 50%以上  | 8mm以上       |

3.7.4 デッキプレートき裂への適用結果

実橋のデッキプレートき裂に対して、超音波探傷を実施した後、鋼床版リブ溶接部をコア抜きし、断面マクロ及び破面観察によりき裂深さを測定し、超音波探傷によつてき裂があると判断した9箇所について、実際のき裂深さと超音波探傷による測定値を比較した結果を、表3.7-4に示す。実際のき裂の破面観察例を図3.7-7に示す。

表 3.7-4 実際のき裂深さと超音波探傷（UT）による測定値の対応及び評価まとめ

| 番号 | 実際のきずの種類と深さ |         | UTによる測定結果 |
|----|-------------|---------|-----------|
|    | 種類          | 深さ (mm) | 深さ (mm)   |
| 1  | き裂          | 2.1     | 2未満       |
| 2  | き裂          | 2.1     | 2未満       |
| 3  | き裂          | 2.2     | 2～6       |
| 4  | き裂          | 2.2     | 2～6       |
| 5  | き裂          | 2.2     | 2～6       |
| 6  | き裂          | 4.2     | 2～6       |
| 7  | き裂          | 5.4以上   | 2～6       |
| 8  | き裂          | 4.6     | 2～6       |
| 9  | き裂          | 5.3     | 6～8       |

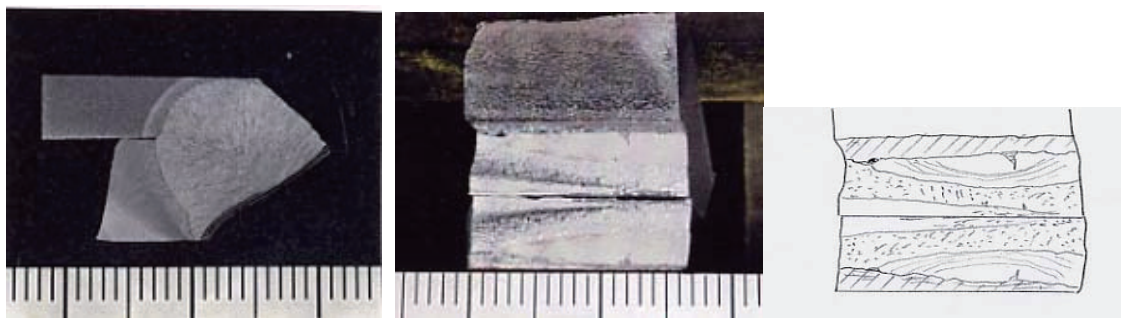


図 3.7-7 き裂深さの確認（試験体 3）

### 3.7.5 まとめ

表面から確認できない鋼床版のデッキプレートき裂について、デッキプレート下面から、超音波探傷試験を用いた調査方法の検討を行った。その結果得られた知見は以下の通りである。

- ① 一般的な超音波探傷装置による試験によって、デッキプレート下面からある程度進展したデッキプレート上面に向かう（デッキプレート貫通き裂となる可能性の高い）き裂について、少なくとも 2mm 程度以上の深さの大きく進展したき裂について検出が可能であることが実橋調査からわかった。
  
- ② デッキプレート内部を進展するき裂の方向や深さが不明な状態での検査を行うこととなるため、以下のようにき裂の有無の確認、深さの推定の 2 段階での調査を行うことが有効であると考えられる。
  - ・ 第一段階（有無の推定）：90 度縦波斜角探触子による超音波探傷試験
  - ・ 第二段階（深さ、進展方向の推定）：70 度斜角探触子による超音波探傷試験

### 3.8 詳細調査（打音調査）（Step4）

#### 3.8.1 目的

鋼床版にデッキプレートを通すき裂が存在し、舗装にもひび割れを生じるなどによって雨水がきれつのあるデッキプレート上面まで到達すると図 3.8-1 に示すように、き裂部から雨水やアスファルト成分が浸入し、トラフリブ内に堆積する場合がある。

トラフリブ内へ滞水や堆積物が大量に存在すると、トラフリブの振動特性に影響が生じハンマーによる打音によっても健全なものとの差によって検出可能であることが知られている。

そこで本研究では、デッキプレート貫通きれつを生じトラフリブ内部に滞水やアスファルトや土砂等の堆積物が生じた場合を想定して、打音調査によりどの程度の滞水や堆積に対してこれらの手法が有効な検出手法となりうるのかについて調査を行った。

ここでは試験体を用いて、トラフリブ内部に水、粘土などを入れ、超音波を用いた計測、可聴音を用いた計測を適用した。

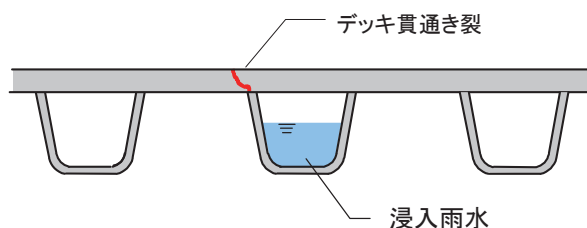


図 3.8-1 雨水やアスファルト成分の浸入

#### 3.8.2 試験体

図 3.8-2 および写真 3.8-1 に、試験体形状と外観写真を示す。トラフリブは R1～R4 の 4 本あり、R1 と R2 は板厚 8mm，R3 と R4 は板厚 6mm である。

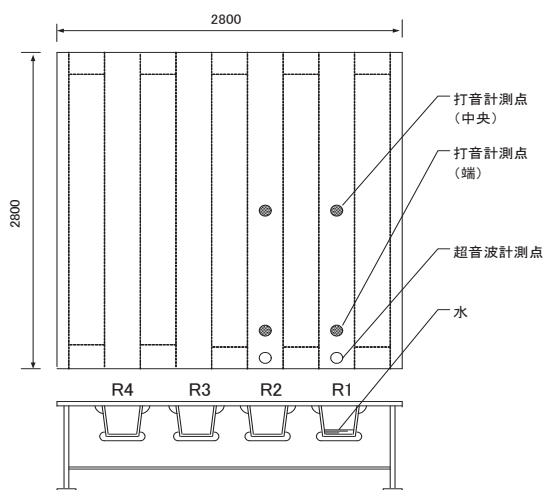


図 3.8-2 試験体形状



写真 3.8-1 試験体外観

トラフリブ内には、写真 3.8-2 および写真 3.8-3 に示すように、水および堆積物を想定した粘土を入れた。滞水させた水の量は深さ 5mm 程度であるが、この程度の滞水量では、



ハンマーを用いた打音で音の違いを認識することはできなかった。

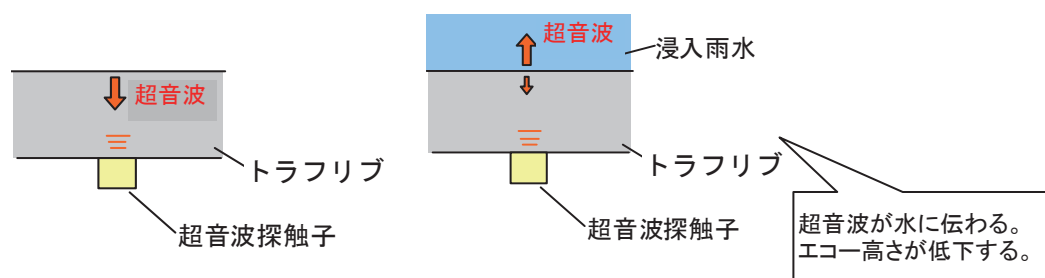


写真 3.8-2 トラフリブ内に水あり 写真 3.8-3 トラフリブ内に堆積物（粘土）あり

### 3.8.3 超音波を用いた計測

#### (1) 超音波による測定原理

検査対象箇所に超音波探触子をあて、底面エコーの減衰によって水溜まりの有無を評価する。図 3.8-3(a) に示すようにトラフ内部に水が存在しない場合、鋼材内部での超音波の反射率は 100% であるが、図 3.8-3(b) に示すように水が存在すると反射率が低下し、底面エコーの高さが低下する。



(a) トラフ内部に水が存在しない場合

(b) トラフリブ内部に水が存在する場合

図 3.8-3 超音波による測定原理

#### (2) 超音波による計測・評価

図 3.8-4 に示すように、超音波探触子をトラフリブ中央に設置して底面多重エコーを観察する。水がある場合、図 3.8-5 に示すように、超音波は水中にも通過し、鋼中および水中で反射を繰り返す。図 3.8-6 に示すように、鋼が水に接しているとき、音響インピーダンスの関係から、水への音圧通過率は約 6% であり、音圧反射率は約 94% となり、水に接している鋼中で反射を繰り返す度に、水が無い場合に比較して底面エコー高さが低下する。図 3.8-7 に、鋼中および水中での A スコープ波形の模式図を示す。実際に観察される A スコープ波形は、これらのエコーが重畳した波形となる<sup>3.9)</sup>。

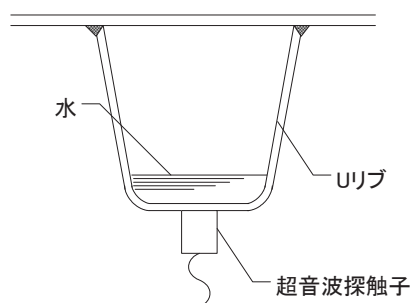


図 3.8-4 超音波探触子の設置

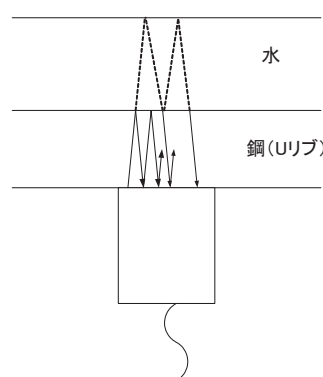


図 3.8-5 鋼中および水中での多重エコー

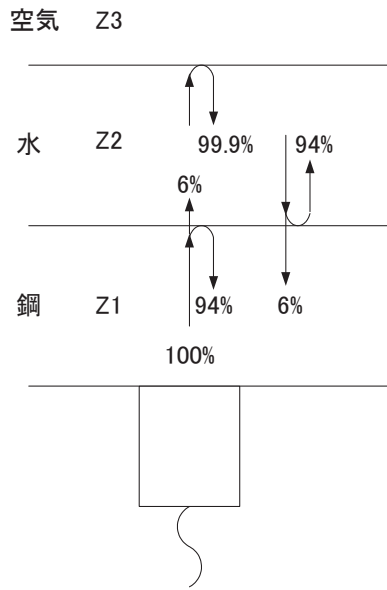


図 3.8-6 音圧通過率および反射率

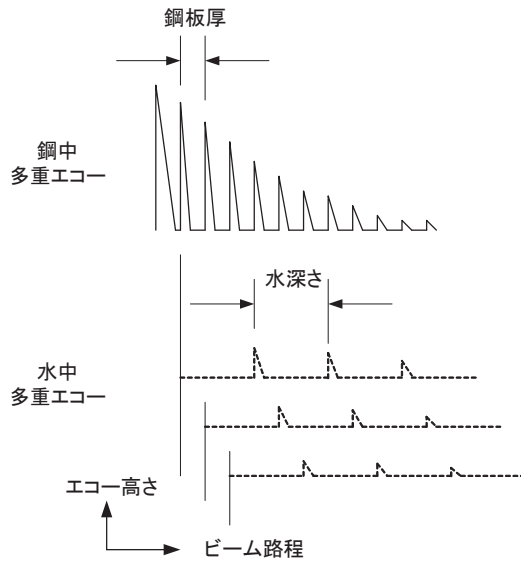


図 3.8-7 A スコープ波形

超音波による計測には、下記の装置を用いた。

- 超音波探傷器：パナメトリクス EPOCH 4
- 超音波探触子：
  - ① 10C10N KGK
  - ② 5C10N KGK
  - ③ 2.25C12N パナメトリクス A534S 1/2in.
- 接触媒質：ソニコート
- 時間軸設定：100mm（鋼音速 5900m/s で校正）

写真 3.8-4 に、超音波法の適用状況を示す。

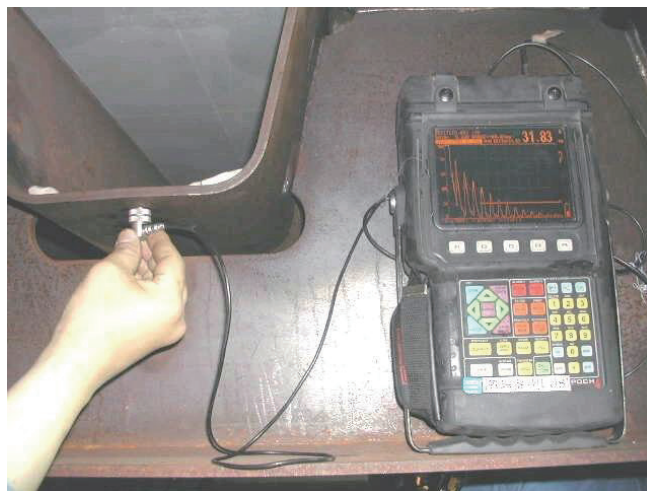


図 3.8-4 超音波の適用状況

(3) 超音波による計測結果

表 3.8-1 に、第 1 回底面エコーを 80% になるように感度を調整して測定した超音波探傷波形を示す。横軸はビーム路程を示し、フルスケールを 100mm (鋼音速 5900m/s) に設定した。縦軸はエコー高さ (%) を示す。また、表 3.7.2 に、水による超音波の減衰を評価する一つの手法として、第 4 番目の底面エコー (B4) 高さを示す。鋼が水に接している場合の音圧反射率を 94% とすると、4 回の反射によってエコー高さは、水の無い場合に比較して、約 78% 低下すると想定される。

表 3.8-1 および表 3.8-2 の試験結果から、水のある場合、底面エコーの減衰が大きくなることが分かる。超音波探触子の周波数が高い方が、板厚の分解能が高く、減衰の評価が容易である。この現象は、水の深さが浅いほど水中での多重エコーの間隔が短くなり、鋼中での多重エコーと重畳するために生じるものと考えられる。

なお、トラフリブ内に堆積物を想定して紙粘土を入れた場合には、超音波の減衰に差異が生じなかった。

表 3.8-1 超音波探傷波形

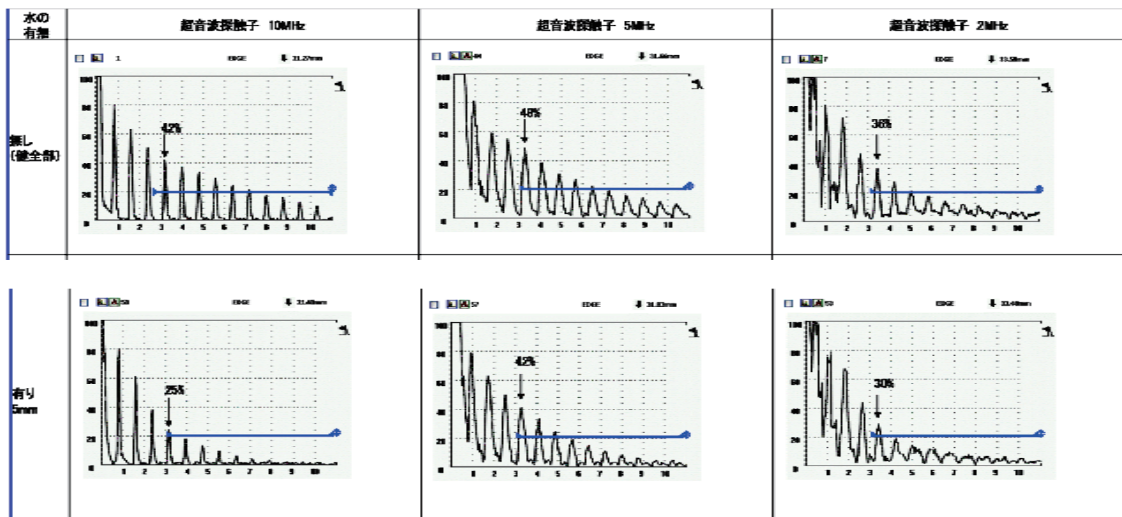


表 3.8-2 第 4 番目の底面エコー (B4) 高さ

| 水の有無     | 超音波探触子<br>10MHz | 超音波探触子<br>5MHz | 超音波探触子<br>2MHz |
|----------|-----------------|----------------|----------------|
| 無し (健全部) | 42%             | 48%            | 36%            |
| 有り (5mm) | 25%             | 42%            | 30%            |

### 3.8.4 可聴音を用いた計測

#### (1) 打音による測定原理

検査対象箇所をインパルスハンマで叩き、発生する音波の減衰や共振周波数の違いによって水溜まりの有無を評価する。(図 3.8-8)

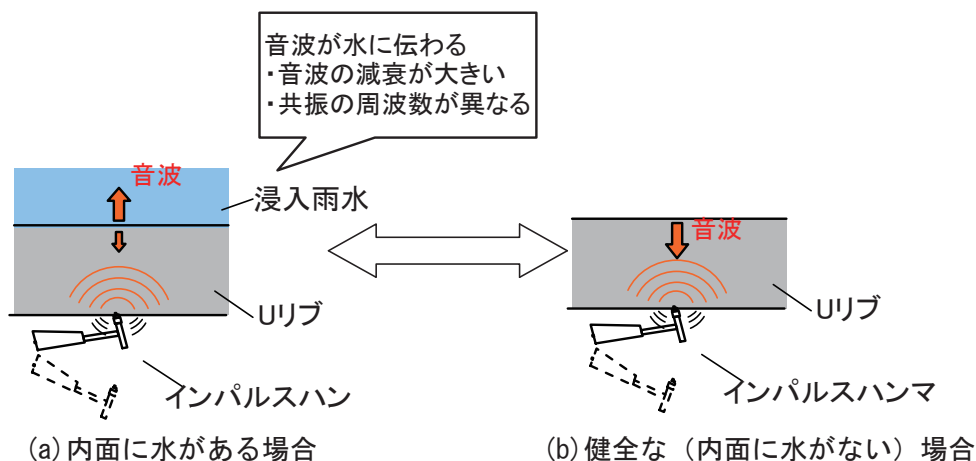


図 3.8-8 打音による測定原理

#### (2) 打音による計測・評価要領

今回は客観的な計測を行うために、図 3.8-9 に示すように、受信センサを検査対象箇所に固定した上で、試験体の表面をインパルスハンマで叩き、その振動をセンサで受信した。センサが受信した音波を周波数解析（ウェブレット解析）し、解析結果からトラフリップ内面側の状況を評価した。

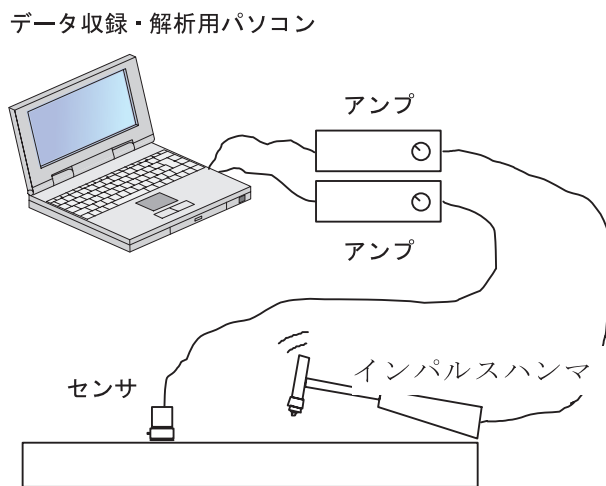


図 3.8-9 計測要領

写真 3.8-5 および写真 3.8-6 に、インパルスハンマ、センサおよび解析用パソコン等の打音試験装置を示す。



写真 3.8-5 打音計測装置

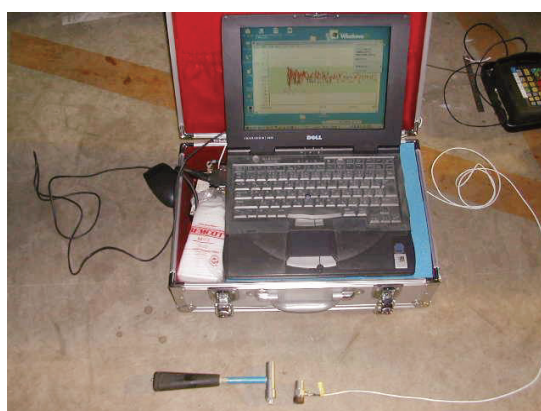


写真 3.8-6 解析用パソコン

### (3) 打音による計測結果

表 3.8-3～表 3.8-4 にセンサの受信波を周波数解析（ウェブレット解析）した試験結果を示す。表中のグラフは 3 次元グラフであり、X 軸（横軸）に時間（フルスケール：1000msec.）、Y 軸に周波数、Z 軸に振幅を示す。

表 3.8-3 は、リブ No.1 の中央部での試験結果を示し、表 3.8-4 は、周辺拘束条件の異なる端部の横リブ近傍での試験結果を示している。水深は 5mm とした。また、打音試験では、インパルスハンマでの打撃の強さが一定でないため、ばらつきを考慮して 3 回の試験データを収集した。

水の有無の評価は、1) 音波の減衰と 2) 共振周波数に着目して評価した。表 3.8-3 より、水の無い場合、板厚方向で 18msec（55Hz）で共振が得られる。水深 5mm の場合、この共振が、30msec（30Hz）に変化するため、水の有無を評価することができる。

表 3.8-3 と表 3.8-4 を比較すると、端部の横リブ近傍（表 3.8-4）では、音波の減衰や共振の周波数に明瞭な差異は見られない。このことから、横リブの拘束によって水の有無の評価が難しくなると考えられる。したがって、打音計測は縦リブ支間中央付近のようなトラフリブ以外の部材や継手部が近くにない条件において、明らかに滞水を生じていない部位での結果との相対比較によることで、滞水を検出できる可能性があることがわかった。

表 3.8-3 打音試験結果 (リブ No.1 中央部)

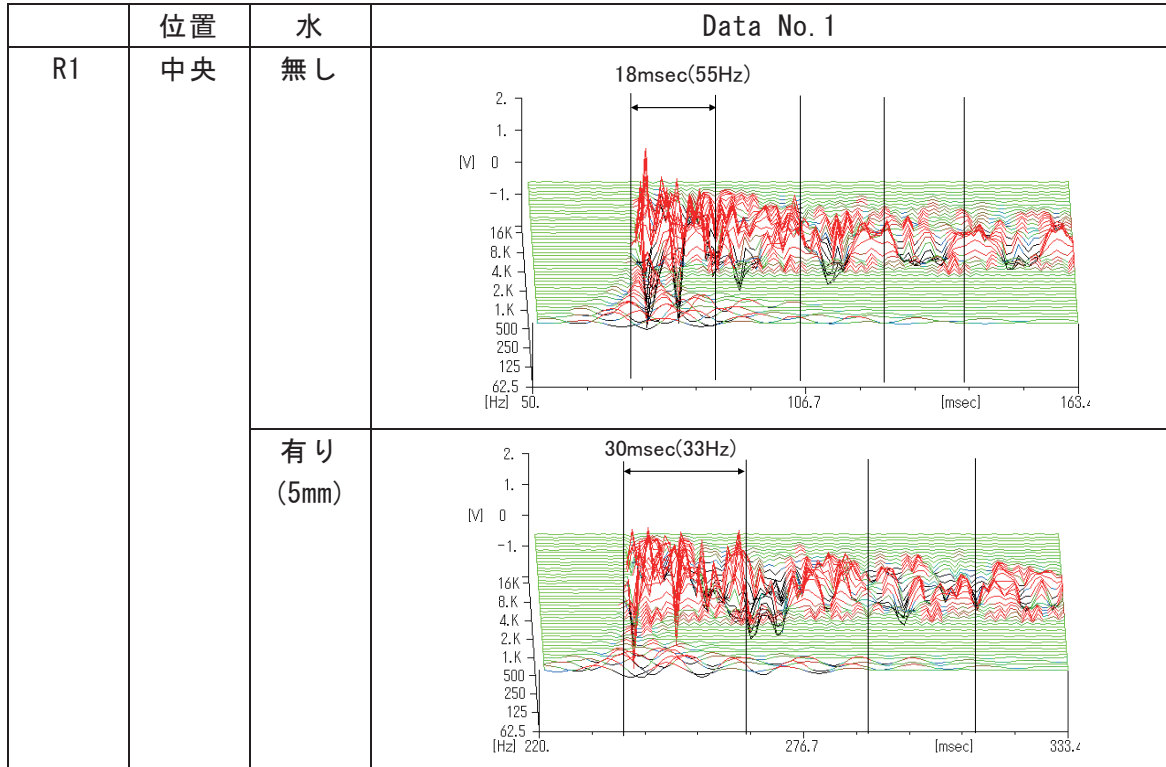
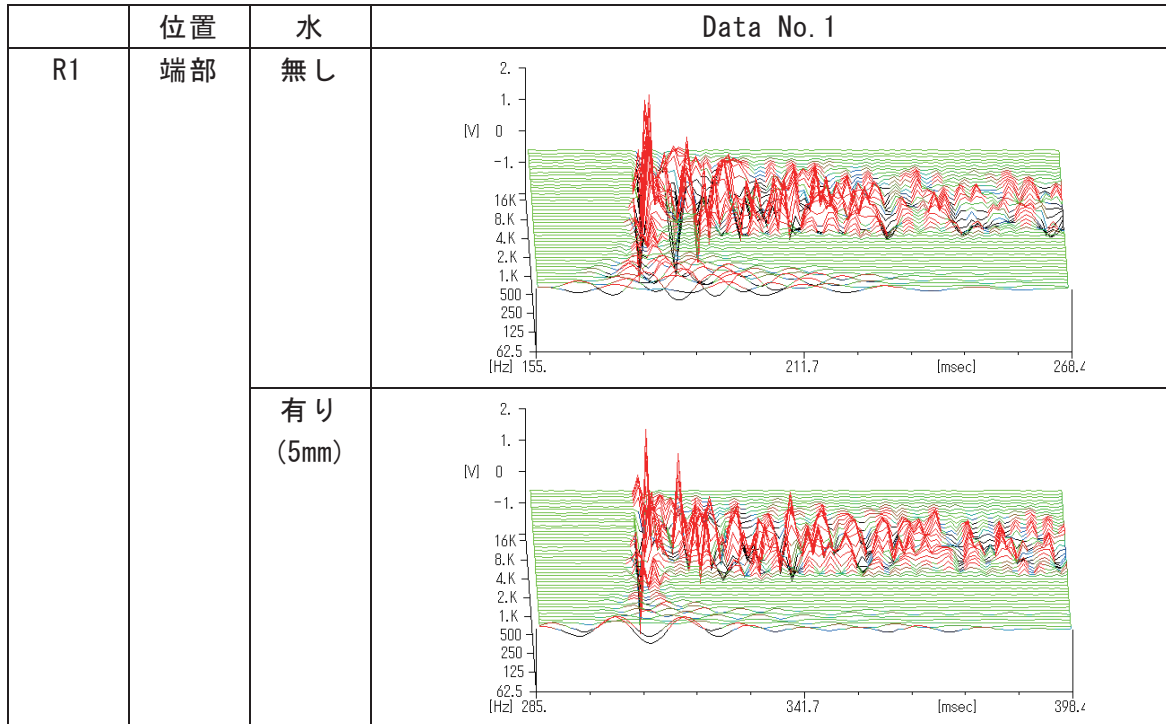


表 3.8-4 打音試験結果 (リブ No.1 横リブ近傍)



### 3.8.5 まとめ

#### ①超音波による評価

- i) 水に接している鋼中で反射を繰り返す度に、水が無い場合に比較して底面エコー高さが低下する現象を利用することで、滞水の有無を評価できることがわかった。
- ii) 超音波探触子の周波数が高い方が、板厚の分解能が高く、検出性はよい。

#### ②打音による評価

- i) 音波の減衰と共振周波数に着目して、水溜りの有無を評価することが可能である。
- ii) 滞水による共振周波数が低下するため、明らかに水のない部位との比較やあらかじめ共振周波数が計測されている場合にはそれとの対比によって、水の有無を評価できる可能性がある。
- iii) 横リブの拘束によって水の有無の評価が難しくなる傾向にあるため、横リブから数100mm程度離れた位置など他の部材や継手による影響のない位置で打音試験を実施することが望ましい。

#### ③超音波探傷検査と打音検査の比較

少量の水溜まりの有無を定量的に評価する場合には、打音によるよりも超音波探傷による方が精度良く評価することができ、また評価に要する時間も短い。ただし、堆積物の量が多い場合には、打音試験でも調査員が判断できる程度の音の違いが生じるため、特別の器具等が必要でなく簡便に実施可能な打音による調査は適宜組みあわせて実施することが有効であると考えられる。なお、超音波探傷では探触子を接地する表面の塗膜厚さの影響を受けやすい場合があるため適用に際しては注意が必要である。



### 3. 9 詳細調査（赤外線サーモグラフィ）（Step4）

#### 3.9.1 目的

赤外線サーモグラフィは、対象物から出ている赤外線放射エネルギーを検出し、相対的な温度分布を画像表示する方法であり、その特徴としては以下の点があげられる。

- ①面の温度分布として捉え、可視化情報として表示できる。
- ②対象物から離れたところから、非接触で温度測定ができる。
- ③リアルタイムで温度計測ができる。
- ④画像をデジタルファイルとしてメモリーカードに保存し、パソコンでの処理ができる。

赤外線サーモグラフィは、検出器の赤外線検出波長が長波長であるため屋外での計測においても太陽光の反射の影響を受けにくいことや、小型・軽量化、及び低価格化が進んだことによりコンクリート構造物の剥離の分野においては広く適用されつつある。

例えば、鋼床版のデッキプレート貫通き裂の事例においても、き裂から雨水等が進入しトラフに溜まる例があった。雨水等が溜まった鋼床版とその他の鋼床版との相対的な温度変化を捉えることができれば、全てのデッキプレート貫通き裂を検知することは出来ないが、現地調査時においてデッキプレート貫通き裂の有無を効率的に判断することができる。また、き裂を境としたときの熱の伝わり方を捉えることによって、直接探傷できる可能性もある。

以上のことから、本項では、雨水等が進入したトラフと進入していないトラフとの温度差を用いて検知する方法、及びき裂発生による温度の伝わり方を直接探傷する方法について、輪荷重走行試験によりデッキプレート貫通き裂を発生させた試験体及び実橋について検討した。

#### 3.9.2 使用機材

検討に用いた赤外線サーモグラフィの仕様は以下のとおりである。なおき裂部での熱の伝導状況による探傷では、加熱ヒータ（ハロゲンランプ）による加熱も行った。

表 3.9-1 赤外線サーモグラフィ

| 赤外線サーモグラフィ | A社               | B社               |
|------------|------------------|------------------|
| 最小温度分解能    | 0.05°C以下(S/N改善時) | 0.02°C(S/N改善時)   |
| 測定温度範囲     | -40°C~120°C      | -20~100°C(第一レンジ) |
| フレームタイム    | 1/60秒            | 1/60秒            |
| 画素数        | 320×240          | 320×240          |
| 空間分解能      | 1.68mrad         | 1.2mrad          |



(a) 赤外線サーモグラフィ



(b) 加熱ヒータ（ハロゲンランプ）

写真 3.9-1 計測機器と試験状況（加熱の状況）の例

### 3.9.3 き裂から進入した雨水等の検知

#### (1) 概要

鋼床版のデッキプレート貫通き裂の事例においても、き裂から雨水等が進入しトラフリブに溜まる例があった。雨水等が溜まった鋼床版とその他の鋼床版との相対的な温度変化を捉えられることによって、デッキプレート貫通き裂を非接触で検知し、効率的な調査を行うことが可能である。

そこで、輪荷重走行試験によりデッキプレート貫通き裂を発生させた試験体及び実橋において検討した。

貫通き裂あり → 雨水が浸入 → 雨水の水溜り存在

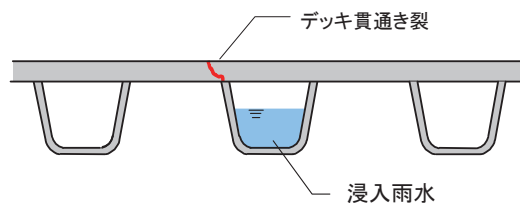


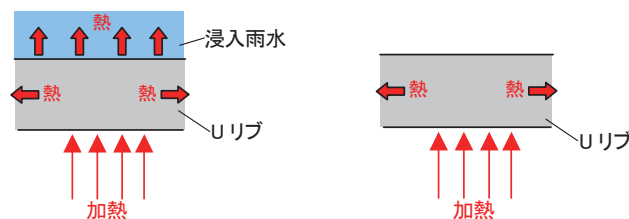
図 3.9-1 トラフリブ内部のイメージ

#### (2) 検討方法

##### ① 雨水の水溜り

トラフリブ内に雨水が溜まっている場合、比熱の大きい水の熱交換によって温度が上がりづらく、温度低下も早いことから、鋼床版を下面から加熱し、下記の 2 項目について確認する。

- a. 加熱後の周辺トラフリブとの温度差（加熱後の温度が低いと水がある）
- b. 加熱後の温度低下速度（加熱後の温度低下が速いと水がある）



(a) 内面に水がある場合

(b) 健全な（内面に水がない）場合

図 3.9-2 雨水の水溜り検証方法イメージ

## ② 雨水と共に流入する堆積物

デッキプレート貫通き裂が発生した鋼床版では、縦リブ内面に滞水や汚泥の堆積が確認されている(写真 3.9-2 参照)。熱容量が大きな水や泥などが堆積している場合、健全な縦リブに比べて熱容量が大きくなり、「熱しにくく、冷めにくい」構造となることが考えられる。この場合、周辺の健全な縦リブとは加熱や除熱によって温度差が生じることが考えられることから、次の2つの観点で確認を行った。

- a.加熱後の周辺トラフリブとの温度差 (加熱後の温度が低いと堆積物がある)
- b.加熱後の温度低下速度 (加熱後の温度低下が遅いと堆積物がある)



写真 3.9-2 縦リブ内部の堆積物

## (3) 試験体による検討

### ① 雨水の水溜り

輪荷重載荷試験によりデッキプレート貫通き裂を発生させた試験体に、深さ 1cm の水を貯め、3 時間経過した後に撮影した結果を写真 3.9-3 に示す。健全なトラフリブと水を溜めたトラフリブを比較したところ差があることがわかる。

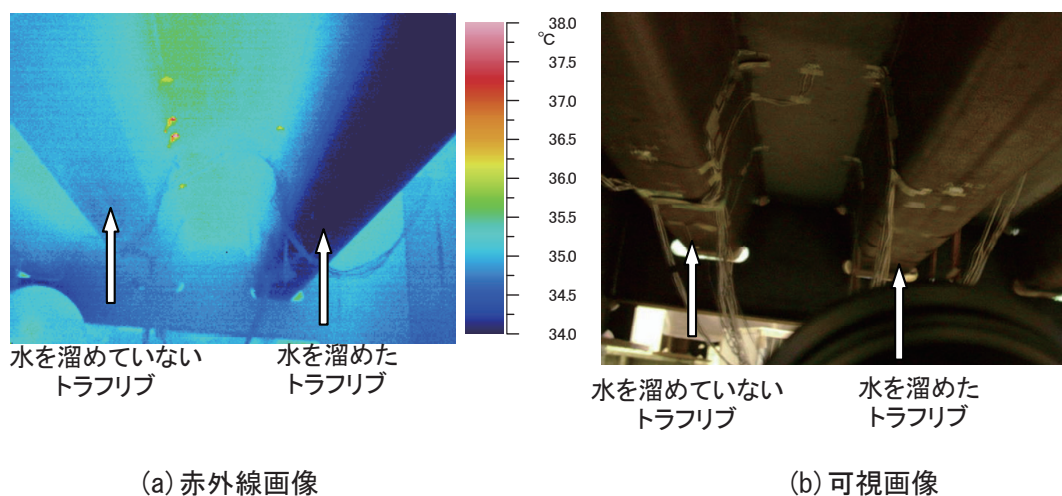


写真 3.9-3 赤外線撮影結果の例

## ② 雨水と共に流入する堆積物

トラフリップ内に粘土を置き、送風してリブを冷却した結果を写真 3.9-4 に示す。粘土が置いてある部分が他に比べ冷却されにくくなっている為、何も置いていない部分よりも高温になっている。このようにトラフリップ内にトラフリップに密着してしめった土砂等が堆積している状態は、赤外線サーモグラフィで検知できる可能性が高いことが分かった。ただし、堆積物の物性やトラフリップとの密着の状況、堆積量などとの関係によって検出可能性は左右されるものと考えられることから今後検出精度についてはさらに検討を行い適用性を見極めた上で活用することが必要である。

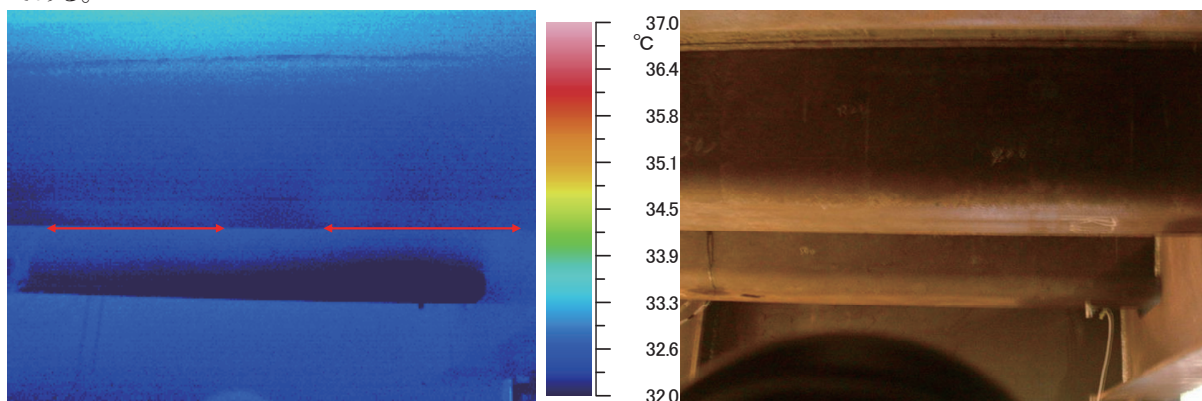
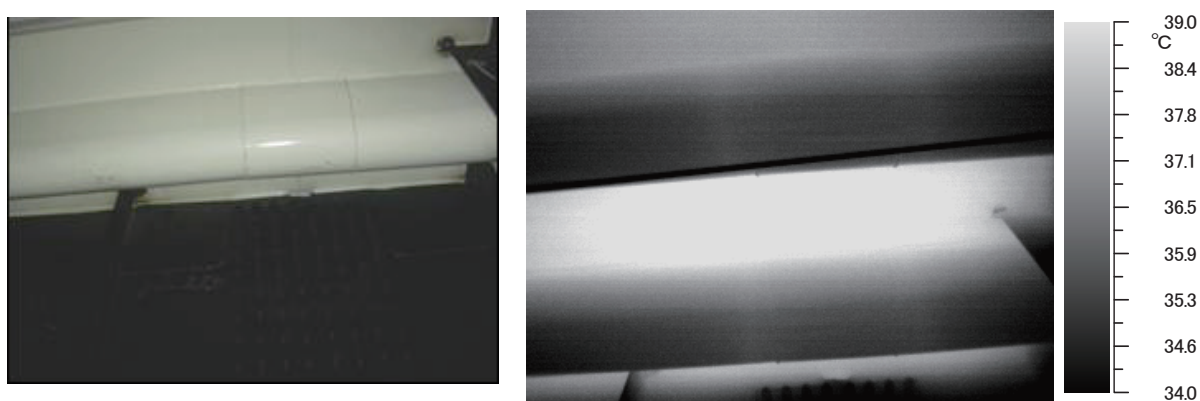


写真 3.9-4 赤外線撮影結果

## (3) 実橋における適用性

トラフリップ内に滞水した場合、密閉ダイヤを挟んで隣接する空間の温度差が分かるように撮影した(写真 3.8-5)。ここでは、滞水が確認できなかったものの、密閉ダイヤの位置がわかる。

雨水等の進入によるトラフリップ内の状況が変化を捉える場合、狭い箱桁内であっても、隣接するトラフリップや密閉ダイヤを挟んで調査することにより、相対的な温度比較の可能性があると考えられる。



(a) 赤外線画像

(b) 可視画像

写真 3.8-5 赤外線撮影結果

鋼床版の箱桁間及び張出床版などの、足場が必要な箇所における遠方からの調査の可能性について検討した。

写真3.9-6に示した鋼床版について、デッキプレートの温度が著しく異なることが分かる。これは、版厚が厚い歩道部や、高欄によって陰になる部分は、周りの床版と比較して温度が低く、一般部との温度差は気温の上昇する午後の方が大きいことがわかった。また、縦リブ表面の温度がほぼ一様であることがわかった。

写真3.8-7は、周辺のトラフリブの温度と著しく異なっており、雨水等の滞留が疑われた。後の調査により、同じ箇所でデッキプレート貫通き裂によりトラフリブ内の滞水が確認された。

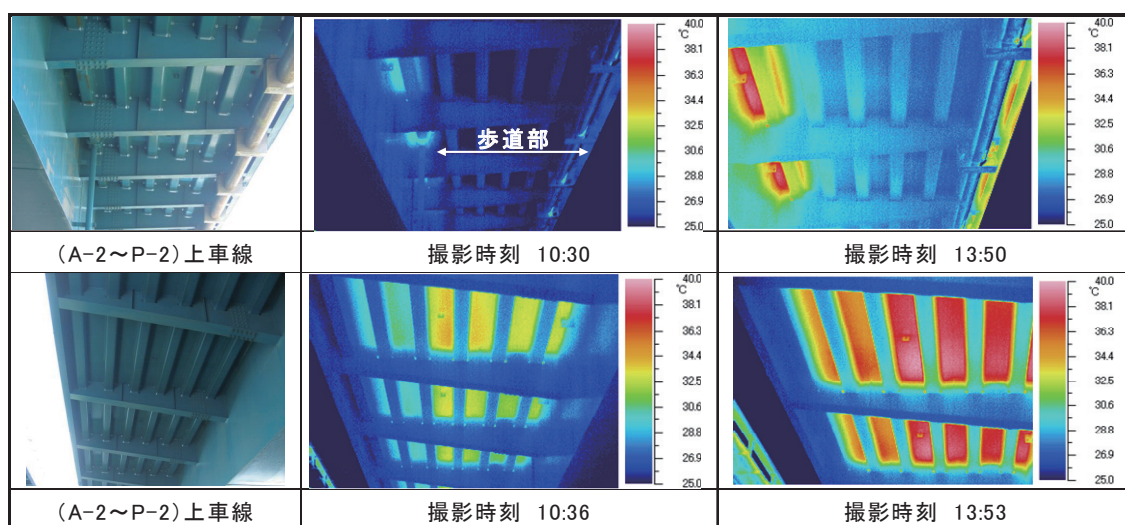


写真-3.9-6 異なる時間帯での測定結果

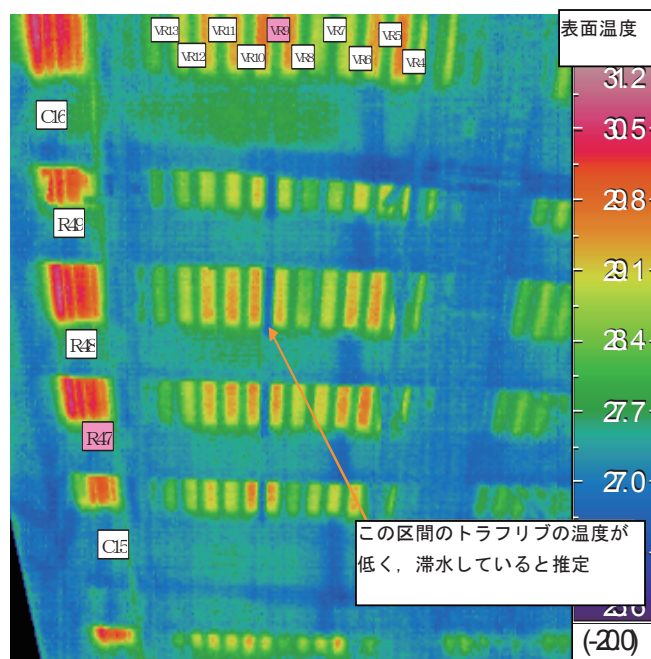


写真3.9-7 滞水している橋梁の場合（写真提供：阪神高速道路株）

### 3.9.5 き裂の探傷

き裂を境としたときの熱の伝わり方を捉えることにより、塗装を除去することなくき裂を検知し、効率的な調査を行うための検討を行う。ここでは、加熱方式を用いてアクティブに検知する手法についてもその可能性について検討した。

想定した現象は以下のとおりである。

- 1) 基準とするデータと加熱直後温度, または, 加熱終了後の温度変化が同じ (健全)
- 2) 基準データと加熱直後温度, または, 加熱終了後の温度変化が異なる (貫通き裂あり)

#### (1) 加熱方法を用いない探傷

輪荷重載荷試験によりデッキプレート貫通き裂を発生させた試験体の、損傷箇所を高解像度レンズで加熱せずに撮影した例を写真 3.9-8 に示す。この例ではデッキプレート貫通き裂について検出することは出来なかった。

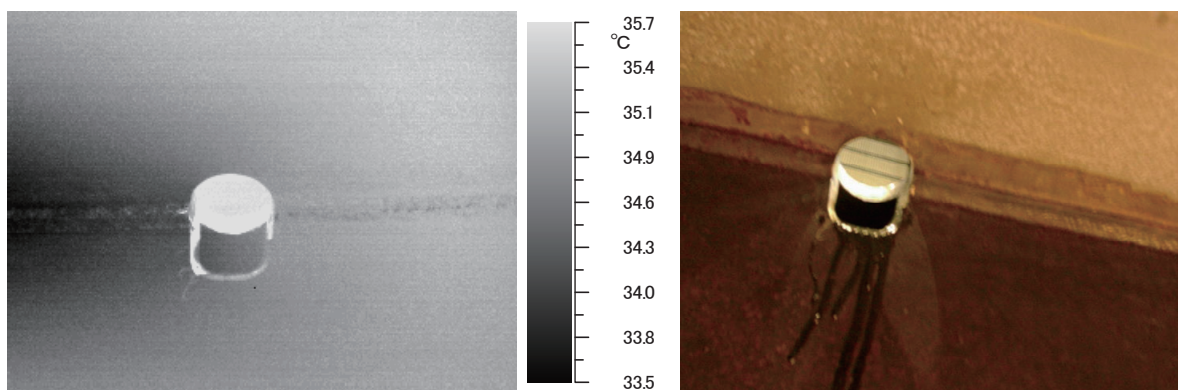


写真 3.9-8 リブ溶接部 (約  $5 \mu\text{m}$  幅のき裂あり) を加熱せずに撮影

#### (2) 加熱方法を用いた探傷に関する検討

輪荷重載荷試験によりデッキプレート貫通き裂を発生させた試験体を、上記手順で加熱し、加熱終了後 45 秒後, 90 秒後の温度変化を比較した。その結果、健全な鋼床版のデッキプレート厚の温度変化と比較して、画像からはその違いについて明確な差はなく、グラフからもその違いが読み取りにくいことが分かった。結果の例を表 3.9-2, 3 に示す。また、加熱方法を用いた調査方法については、下記のような誤差が含まれていると考えられる。

- ① 構造が均一でないと温度分布が乱れる (検査対象面のある程度の均一性が必要)
- ② 加熱方法の問題 (加熱時間, 加熱量の均一性の確保)
- ③ 検査機器の配置の均一化 (赤外線サーモグラフィと検査面の距離, 角度などの条件を常に一定にする)

表-3.9-2 健全部の加熱撮影（トラフリブを加熱）結果の例

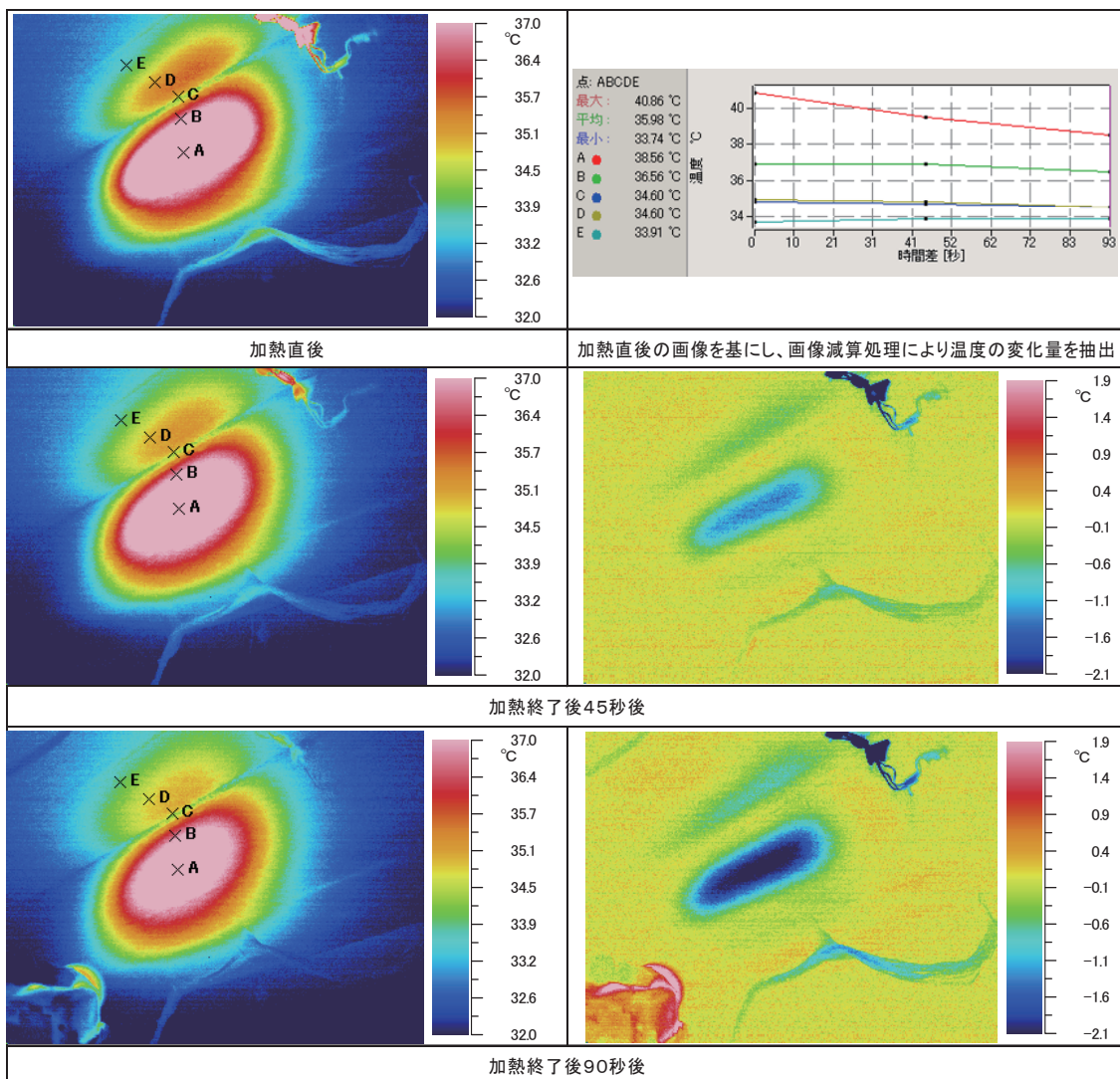
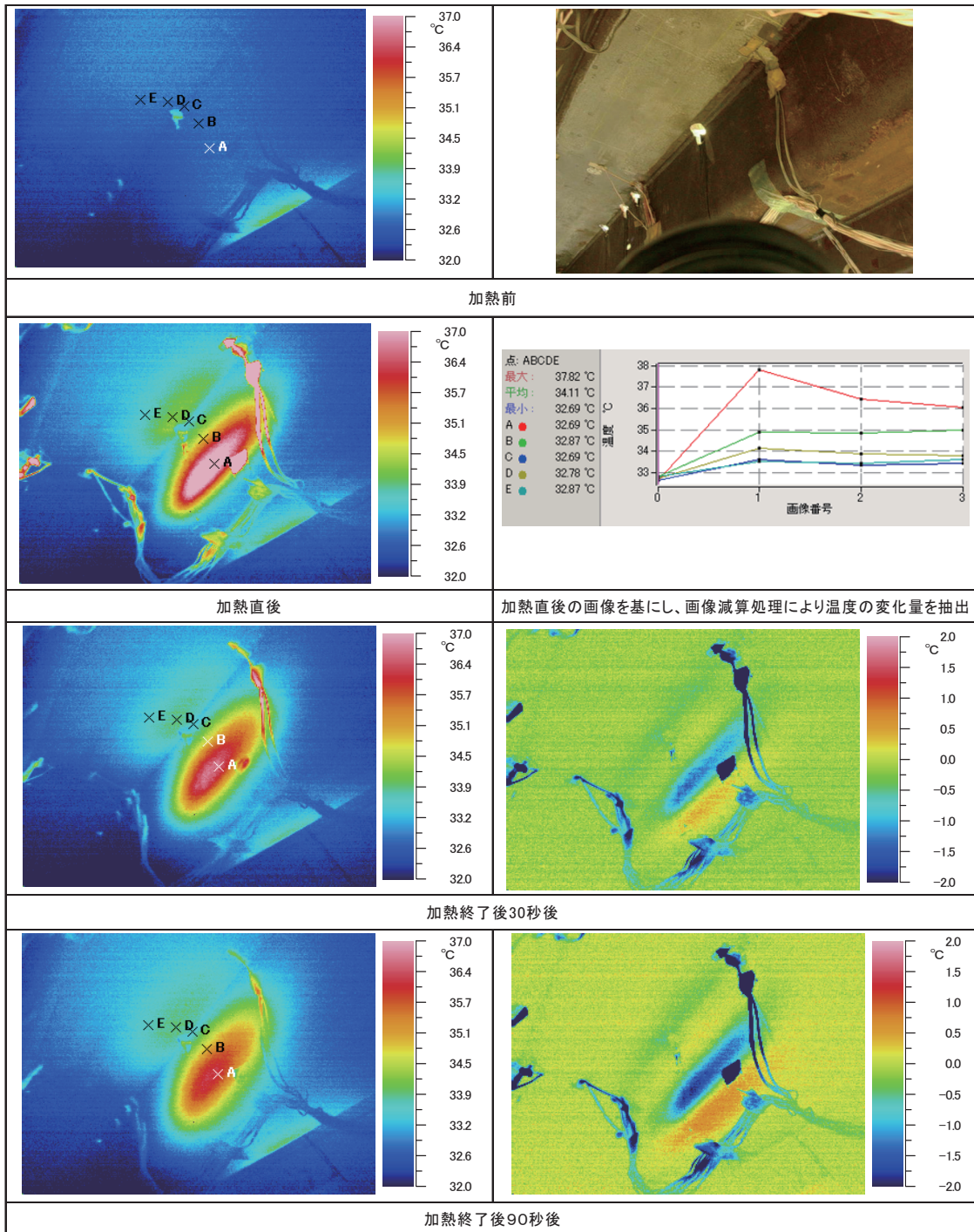


表-3.9-3 デッキプレート貫通き裂発生部（トラフリブを加熱時）結果の例





### 3.9.6 まとめ

隣接するトラフリップまたは密閉ダイヤフラムの前後を比較対象部として測定することで、トラフリップ内の異物を検知することが可能であることがわかった。必ずしも足場を設置する必要がないため、桁間部、桁高のある箱桁内部の調査において有効である。

なお、比較対象とする箇所と赤外線サーモグラフィの距離は可能な限り、一定にする必要がある。また、歩道部や路面に日陰を作る高欄の近くなどを調査するなどの場合には、下面においても温度が低くなるので注意が必要である。

### 3.10 その他の調査

#### 3.10.1 概要

デッキプレート貫通きれつの検出を行う場合、補修補強方法や今後の維持管理方法の検討が並行して行われることとなるが、その場合に対象となる鋼床版の健全度についてきれつの有無や長さ以外にも様々な鋼床版の状態について評価することが必要となる。

ここでは、デッキプレート貫通きれつが疑われる鋼床版に対して、その健全性等の評価のために必要となる主な項目に対する調査方法について整理した。

#### 3.10.2 板厚計測

舗装の防水が機能していない場合、鋼床版のデッキプレートの腐食による減肉により応力が増加し、損傷要因のひとつとなる可能性がある。鋼床版を構性する鋼材の腐食が懸念される場合には、超音波板厚計等により板厚を確認し、腐食損傷の有無を確認する方法が適用できる（図 3.10-1、写真 3.10-1）。この方法は、鋼板や形鋼の製作時に実施される検査と同一のものであり一般的な方法である。計測の際には校正履歴を確認する必要がある。



写真 3.10-1 超音波板厚計測状況

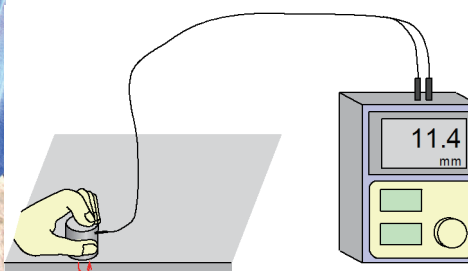


図 3.10-1 超音波板厚計測

#### 3.10.3 溶接形状の採取

溶接ビード部に損傷が確認された場合、溶接部のど厚は、疲労耐久性に影響すると考えられる。

採取方法は、印象材を用いて溶接部の形状を採取する。印象材は 2 材料を混合することで硬化し、溶接ビード形状を写し取ることが可能である（図 3.10-2）。採取した印象材は、スライスし溶接ビード形状やビード止端部の形状を計測することができる。また、採取した印象材を型材として、写真 3.10-2 に示すように溶接ビード形状を再現して相互に比較することも可能である。

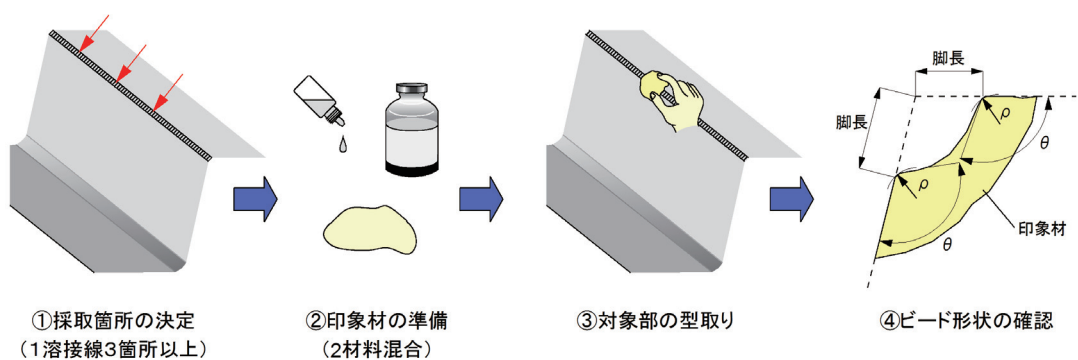


図 3.10-2 印象材採取要領



a) ビード貫通き裂が発生した溶接部

b) 疲労損傷が見られない溶接部

写真 3.10-2 印象材によるビード形状の比較

### 3.10.4 溶接脚長の実測

溶接脚長は、継手強度に影響すると考えられるため、写真 3.10-3 に示すように、き裂発生箇所の溶接サイズ等を現地にて計測し、設計図書と比較することで、脚長不足等の溶接ビード異状の有無を確認する。

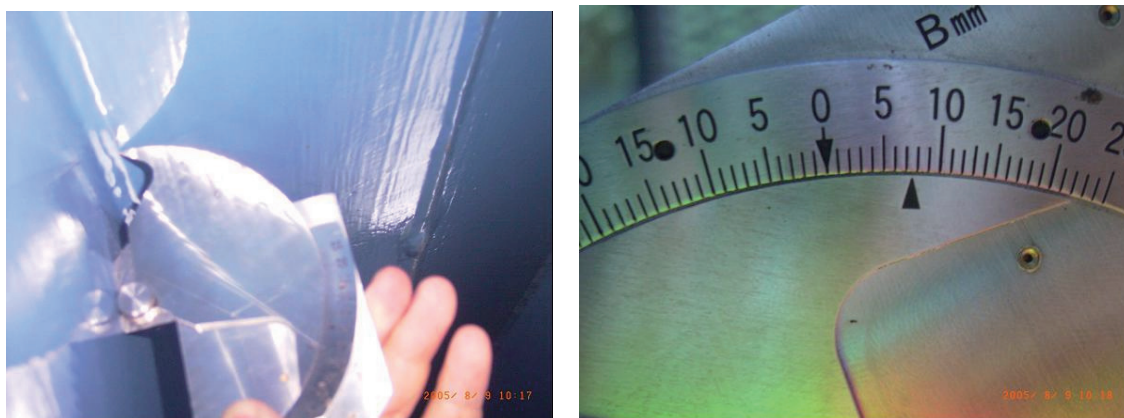


写真 3.10-3 溶接ゲージによる形状計測

### 3.10.5 応力測定

鋼床版の疲労損傷は、従来の設計では考慮されていない輪荷重による局部的な変形挙動に起因する。そして、この局部的な挙動は路線の交通事情のほか、当該橋梁の幅員構成や前後の道路事情等の影響を受けるため、路線の交通量や図面のみから鋼床版の局部応力を予測するには限りがある。よって、当該橋梁の疲労損傷が発見された場合の原因推定や、疲労損傷が発見されていない場合でこれまでに受けた、あるいは今後受ける疲労被害を予測する際の精度を上げるためには応力測定の実施が有効な手段の一つとなる。

応力測定は軸重が既知な荷重車による荷重車載荷試験（動的載荷試験）、および日常交通下での応力頻度測定の種類が一般的である。それぞれの試験の目的は次のとおりである。

#### ①荷重車載荷試験

- ・実橋における輪荷重載荷位置や走行速度と鋼床版の発生応力度の関係を把握する。
- ・応力頻度測定から得られる発生応力度と、荷重条件の関係を把握するためのキャリブレーション資料とする。

#### ②応力頻度測定

- ・着目橋梁の鋼床版の発生応力度の実態・特徴を把握し、疲労被害予測のための基礎資料を蓄積する。

以下にトラフリブとデッキプレート近傍に発生する疲労損傷に着目した場合の応力測定方法について示す。

#### (1)計測項目

計測項目は、トラフリブとデッキプレート溶接部近傍とトラフリブ下フランジのひずみ、舗装の温度である。トラフリブとデッキプレート溶接部近傍のひずみは局部応力を把握するために必要である。

トラフリブの下フランジについては、その橋軸方向応力が、従来の設計においても考慮されているものであり、鋼床版の床組としての応力として、鋼床版に関する種々の検討でも計測されていることが多い。また、①荷重車による応力状態と頻度計測結果を比較することで、走行車両の重量をある程度推測ができる、②舗装の剛性について考察できる、③設計応力と実応力との比率（構造解析係数）について考察できる、など、得られるデータは非常に有効である。なお、トラフリブの下フランジの応力は、鋼床版の構造諸元に影響されるため、変状を確認できる可能性もある。トラフリブ支間や板厚、トラフリブの配置などをあらかじめ把握しておく必要がある。

舗装の温度は舗装（特にアスファルト舗装）の剛性を把握するために計測する。舗装の剛性は温度によって変化するが、この剛性の変化は輪荷重による鋼床版の発生応力に大きな影響を与えることが指摘されており、夏期と冬季に同一の条件で実施された載荷試験でも、発生応力に大きな差が認められている。そこで、詳細調査における応力測定では、熱電対を用いて経時的に舗装温度を測定することとする。しかしながら、車両走行時に舗装温度を直接測定するのは困難な場合が多いため、デッキプレート下面の温度で代用するのがよいと考えられる。

## (2) 計測方法

鋼床版の実橋応力測定は、これまでも数多く実施されているが、各々の試験目的や載荷方法、載荷時期等が異なっており相互の成果を直接比較することが困難である。また、トラフリブとデッキプレート溶接部の疲労損傷を対象とした実橋における応力測定事例は少ない。相互に比較することで異常の有無などを推定することができる場合も多いことから、できるだけ統一的な方法に寄ることが望ましい。

### 1) 調査の種類

応力測定は、荷重車による動的載荷試験と一般車両による応力頻度測定を行うことを標準とする。

### 2) 測定位置

測定点数は多いほど望ましいが、現場計測の制約を最大限考慮して決定する。各着目部の測定箇所は、以下に示すものを標準とする（図 3.10-3、写真 3.10-4 参照）。輪荷重により発生するひずみは局所的であるため、車の走行位置とゲージを貼付する位置の対応を間違えないよう注意が必要である。間違いを防ぐためには、ひずみゲージの貼付位置図面にレーンマークの位置を落としこんでおくことも有効である。なお、ひずみゲージ長は、3mm を基本とする。

#### i) トラフリブとデッキプレート溶接部

輪荷重直下の溶接部を対象に、トラフリブ側とデッキプレート側の溶接止端から 5mm 位置における横断方向応力を測定する。

#### ii) トラフリブ下フランジ

輪荷重直下および隣接するトラフリブを対象に、下フランジ中央位置での橋軸方向応力を測定する。

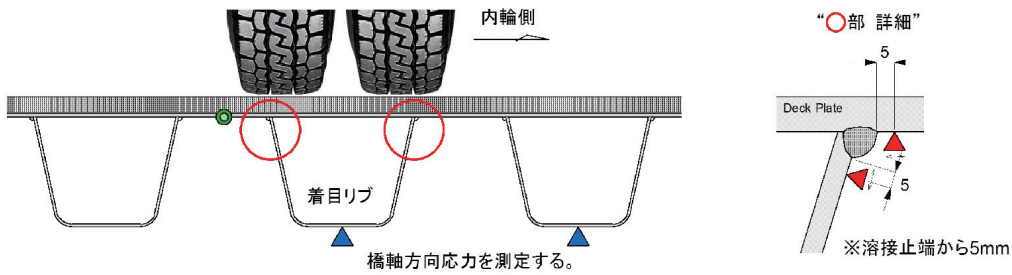
#### iii) その他

i) および ii) に示した以外の着目部については、既往の研究成果などを参考にしてひずみゲージを貼付する。

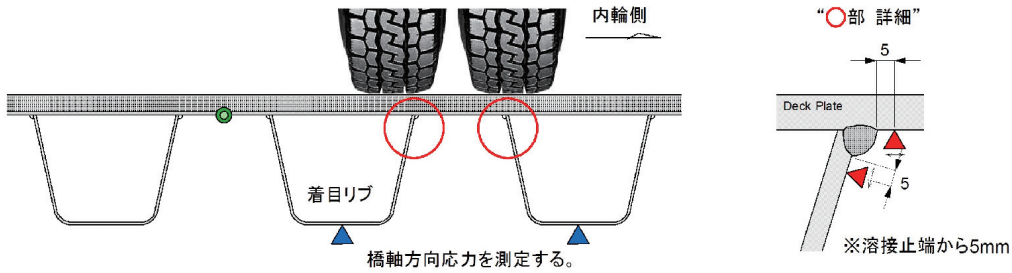
#### iv) 舗装またはデッキプレート下面の温度

舗装またはデッキプレート下面に熱電対を貼付し、温度計測を行う。

- 【凡例】
- ▲ : ひずみゲージ(ゲージ長3mm, 橋軸方向ひずみ計測)
  - ▲ : ひずみゲージ(ゲージ長3mm, 横断方向ひずみ計測)
  - : 熱電対



a) 着目する縦リブ直上に輪荷重が配置される場合



b) 着目する縦リブと隣接縦リブ間に輪荷重が配置される場合

図 3.10-3 ひずみゲージと熱電対の設置位置



写真 3.10-4 ひずみゲージ設置位置の例

### 3) 測定方法

応力測定は、動的波形を計測することを基本とする。サンプリング周波数は、着目する応力の影響線長さや荷重車の速度などを十分に考慮して設定する必要がある。例えば、トラフリップとデッキプレート溶接部の応力については、1kHz以上のサンプリング周波数が必要であると考えられる。また、応力頻度測定は、各々レンジ毎に求められて記録されるため、レンジオーバーとならないよう十分注意しなければならない。図 3.10-4 に計測システムの一例を示す。計測を実施するためには電源を確保する必要がある。

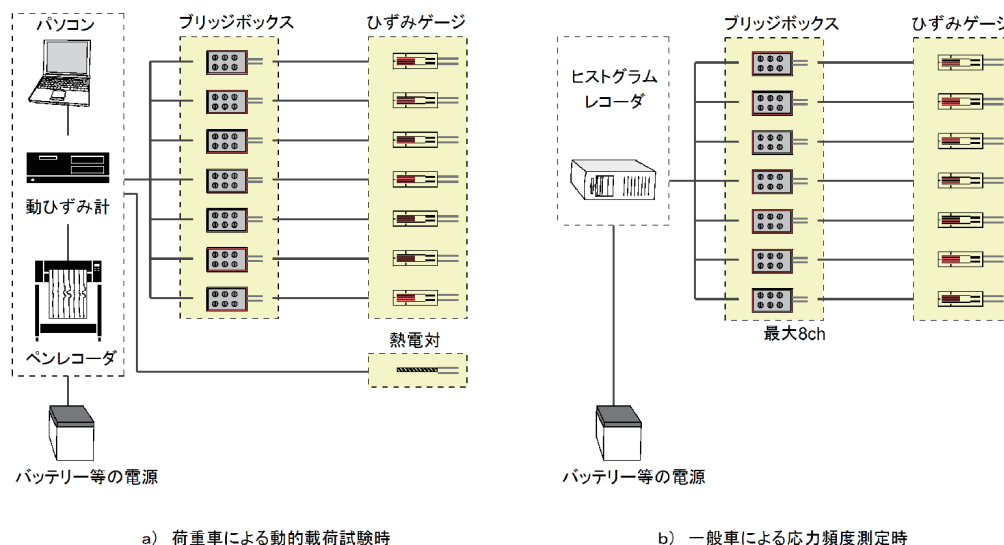


図 3.10-4 応力測定における計測システムの一例

### 4) 荷重車載荷試験について

荷重車計測では、荷重車の走行位置（横断方向載荷位置）、走行速度、載荷試験時の路面温度などに着目し、これらのパラメータと着目部の発生応力度の相関を検討する。また、応力頻度測定のレンジを決めるためのデータともなる。

荷重車は、載荷試験に際して軸重を計測しておかなければならない。荷重車の重量は発生応力が最大限となるよう、カウンターウェイト等を積載させて法定荷重近くまでに調整したダンプトラック、あるいは大型トラックを用いる。荷重車はトラックスケール、あるいは現地においてマット式軸重計などで軸重を計測する。また、同一橋梁で異なる時期に載荷試験を行う場合は、同一車両を使用することを原則とする。

図 3.10-5 に荷重車載荷試験時の測定体制図を示す。計測手順は以下のとおりである。  
1) 荷重車の接近にともない助手席①から路上の②に連絡し、③が写真撮影の準備を行う。  
2) ②は、箱桁内部の④に連絡し、④は⑤に計測開始の指示を行う。3) ③は、荷重車の通過時の写真撮影を行う。②は、荷重車が計測地点を通過したことを④に伝え、⑤は計測を終了する。

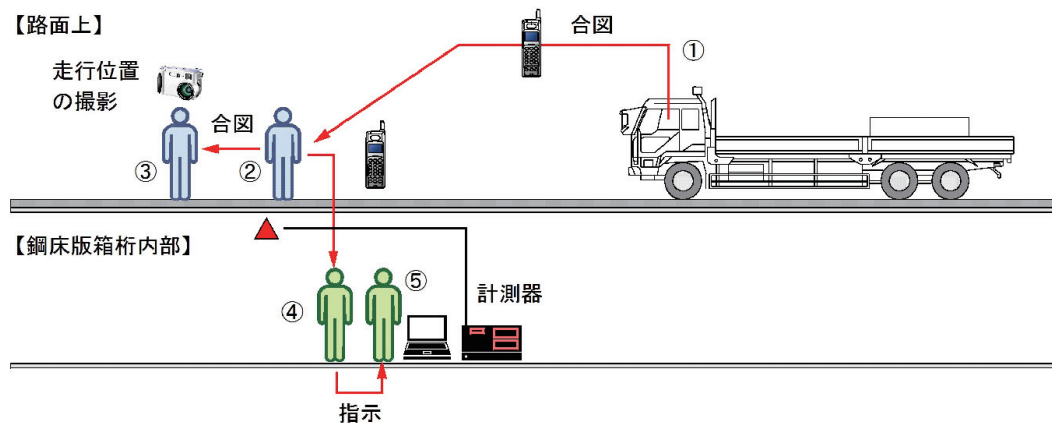


図 3.10-5 荷重車載荷試験時の測定体制図

### (3) 応力頻度測定について

応力頻度測定は、交通量の日変動が大きいため、計測機関については十分に検討しなければならないが、一般には1週間の連続計測を行うのが望ましい。これが不可能な場合は、平日に24, 48, 72時間のいずれかで連続計測を行うのがよい。応力頻度測定のレンジは荷重車計測で得られた最大値を参考として上限値を決定し、50分割程度とする。

応力頻度測定より得られる生データは複雑な変動波形であり、検討に使用できるよう、データを解析する必要がある。ここではレインフロー法とピークバレー法による解析を行うことを基本とする。前者からは応力範囲頻度分布とその頻度分布より算出される等価応力範囲、後者からは応力変動波形の極大値と極小値の計数の分布が得られ、これらを分析することより対象橋梁毎の荷重実態（特に軸重の実態）を考察し、鋼床版疲労損傷の発生要因の解明に役立たせることができる。

以上、荷重車載荷試験と応力頻度測定について示したが現場計測には様々な制約がある。そのため、応力測定の要否や、ここに示した測定方法、測定内容については、現場の測定条件を事前に十分に確認しておく必要がある。

本研究では上記の方法で5種類の橋梁を対象として応力測定を実施して発生応力を把握するとともに、各橋梁での測定結果を比較することにより発生応力度と疲労損傷の関係について考察を行った。これらの詳細については5章で述べる。



### 3.11 まとめ

本章では、デッキプレート貫通き裂に着目した鋼床版橋梁の段階的調査方について検討した。段階的調査法は、デッキプレート貫通き裂の検出を目的とした鋼床版橋梁の点検調査手法について、ある程度の信頼性を維持しつつ効率的に行うことを目標とした。その結果、一般に道路橋で行われる定期点検から詳細調査に至る手順を参考にしつつも、鋼床版のデッキプレート貫通型き裂を生じている可能性の高い径間や部位を段階的スクリーニングで絞り込んでゆく手法が合理的な調査方法となりうることがわかった。また同じ段階的調査の過程でデッキプレート貫通き裂以外の鋼床版に発生する疲労き裂の多くが検出できる。調査の適用条件について表 3.11-1 に整理した。

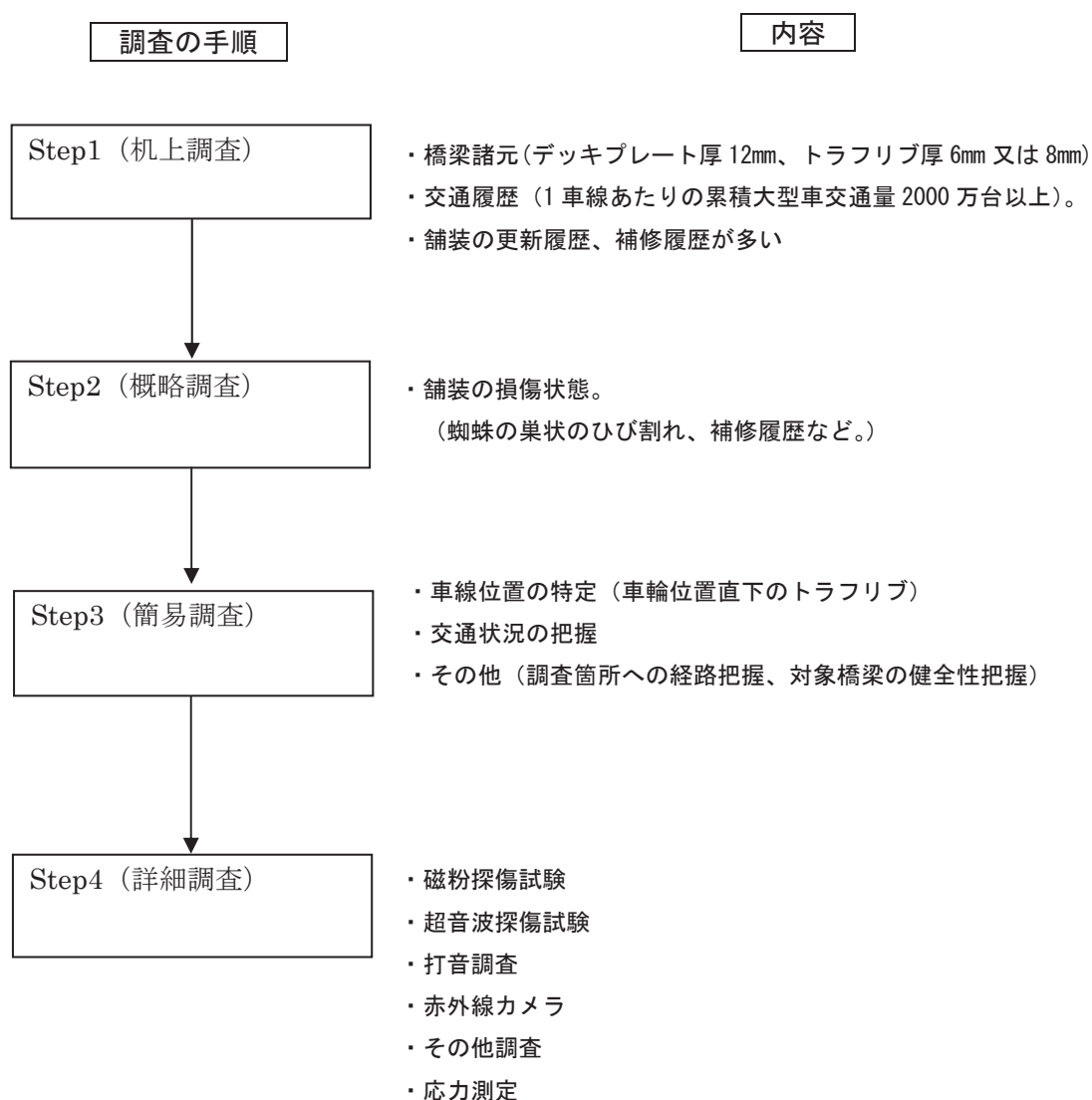


図 3.11-1 段階的調査のフロー

表 3.11-1 鋼床版検査手法と適用

| 検査手法      | 対象き裂                 |                        |                       |              | 適用条件         |                         |                    |
|-----------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------------|
|           | デッキプレートとトラフリップ溶接部    |                        | 縦リブ横リブの交差部            | 垂直補剛材上端部     | 足場           | 橋面検査時<br>舗装除去           | 検査時<br>塗膜除去        |
|           | デッキプレート<br>貫通き裂      | 溶接ビード<br>貫通き裂          |                       |              |              |                         |                    |
| 舗装状況観察    | 蜘蛛の巣(格子)状<br>の舗装ひび割れ | トラフリップウェブ上の<br>舗装縦ひび割れ | 主桁ウェブ上の<br>わだちと舗装ひび割れ | —            | 不要           | 不要                      | 不要                 |
| 交通状況観察    | 大型車荷重混入率・大型車高頻度通行車線  |                        |                       |              | 不要           |                         |                    |
| 損傷部<br>観察 | 目視                   | き裂有無                   | 塗膜割れ有無                | 塗膜割れ有無       |              |                         | 必要                 |
|           | 計測                   | 位置・長さ                  | ビード形状・長さ              | ビード形状・長さ     | 長さ           |                         |                    |
| MT (PT)   |                      | き裂有無・長さ                | き裂有無・長さ               | き裂有無・長さ      | き裂有無・長さ      |                         |                    |
|           | クリーピング               | き裂有無                   | 溶接溶込み深さ               | —            | —            | 必要(箱桁<br>内部は桁高<br>さによる) | 必要                 |
| UT        | 直射                   | —                      | き裂有無                  | —            | —            |                         | 望ましい               |
|           | 斜角                   | き裂深さ                   | —                     | き裂深さ         | き裂深さ         |                         |                    |
|           | 表面SH                 | き裂有無                   | 溶接溶込み深さ               | —            | —            |                         |                    |
| (渦流探傷)    | き裂有無                 | —                      | —                     | —            | —            |                         |                    |
| 打音試験      | リブ内滞水有無              | —                      | —                     | —            | —            |                         | 不要                 |
| 赤外線カメラ    | リブ内滞水有無              | —                      | —                     | —            | —            |                         | 不要                 |
| 荷重車載荷試験   | デッキ下面ひずみ             | トラフリップ側面ひずみ            | 溶接止端部<br>ひずみ          | 溶接止端部<br>ひずみ | 溶接止端部<br>ひずみ | 必要(箱桁<br>内部は桁高<br>さによる) | 不要だが<br>温度計測<br>必要 |
|           | 応力頻度測定               | 応力頻度                   | 応力頻度                  | 応力頻度         | 応力頻度         | 必要(箱桁<br>内部は桁高<br>さによる) | 必要                 |

PT : Liquid Penetrant Testing  
 MT : Magnetic Particle Testing  
 UT : Ultrasonic Testing]

## 【参考文献】

- 3.1) 貝沼重信, 山田健太郎, 上仙靖, 岩崎雅紀, 西川武宏: 縦リブの疲労き裂が鋼床版に及ぼす影響の実測と解析, 構造工学論文集 Vol.42A, pp.927-936, 1996.3
- 3.2) T. Gurney: Fatigue of Steel Bridge Decks, Transport Research Laboratory, State-of-the-art review8, 1992
- 3.3) 岩崎雅紀, 永田考, 西川武宏, 小塩達也, 山田健太郎: アスファルト舗装が鋼床版の疲労に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.563/I-39, pp.161-171, 1997.4
- 3.4) 例えば, 日本道路協会: 鋼橋の疲労, 1997.5
- 3.5) 国総研資料第188号 道路橋の交通特性評価手法に関する研究 平成16年7月
- 3.6) 国総研資料第295号 道路橋の設計荷重に関する試験調査報告書 平成18年1月
- 3.7) 国総研資料第180号 大型車の振動特性が橋梁に及ぼす影響に関する研究(Ⅱ) 平成16年5月
- 3.8) 例えば, 平林, 牛越, 木ノ本: 首都高速道路における鋼床版疲労損傷, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 Vol.10, 2007.8
- 3.9) 日本非破壊検査協会 超音波探傷試験Ⅰ, 1999