

5. 鋼床版橋梁のデッキプレート増厚による疲労耐久性の向上

技術委員会 鋼床版小委員会 川畑篤敬 井口 進 内田大介
齊藤史朗 中西 崇 平山繁幸
藤井基史 松下裕明 宮下 敏

1. はじめに

近年、主に重交通路線の都市高速道路や湾岸幹線道路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が報告されている¹⁾。鋼床版の疲労損傷の種類を、図-1に示す。これらのうち、デッキプレート（以下、デッキ）と閉断面の縦リブ（以下、Uリブ）の溶接ルート部に起点に発生するき裂は、車両の走行性に影響を及ぼす可能性があるため早急な対策が必要である。当該き裂は溶接ビード内に進展するビード貫通き裂とデッキの板厚方向に進展するデッキ貫通き裂に大別されるが、特に後者は、舗装割れに加えて路面の陥没を起こす危険がある。

デッキ貫通き裂は、我が国では1999年に神奈川県で初めて確認されて以降、幾つかの事例が報告されている¹⁾。当協会では、このような疲労損傷の発生を受け、鋼床版検討特別委員会（現・鋼床版小委員会）を設置し、主にデッキ貫通き裂の発生メカニズムの解明や対策法について検討を進めてきた。

このき裂は、当該溶接線上における発生位置によりUリブ支間部（以下、一般部）とUリブと横リブ交差部（以下、交差部）に分類されるが、デッキの支持条件などから、両者の発生メカニズムは異なるものと考えられる。

えられる。両者を比較すると、発生起点となる溶接ルート部に生じる応力は交差部の方が高く、疲労損傷の発生する可能性が高いともいわれているが²⁾、一般部におけるデッキ貫通き裂が特に少ないということはない³⁾。

デッキ貫通き裂への対策については、デッキの剛性を向上させる方法が効果的であると考えられている^{4),5)}。そして、新設の鋼床版橋梁に対しては、デッキを増厚させる方法が選択肢の一つとして挙げられる。こうした背景の下、平成21年12月には、国土交通省より「新設橋への鋼床版の適用に関するデッキプレート最小板厚の見直しについて」の事務連絡⁶⁾（以下、事務連絡）が通知された。事務連絡では、今般の既設橋の鋼床版においてデッキ貫通き裂が報告されている状況等を鑑み、今後、設計・製作する鋼床版に対する当面の対策として、「閉断面リブ（Uリブ）を使用する場合、大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下においては、デッキプレートの板厚は16mm以上とすることを標準とする。」と示されている。

当協会では、平成18年より国土交通省国土技術政策総合研究所と（独）土木研究所の3者による「損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する共同研究」⁷⁾も含め、デッキの増厚によりデッキ貫通き裂を始めとする鋼床版の疲労損傷の抑制を図る検討を実施してきた。

本報告では、これまでに当協会で実施してきた検討結果や、上述の3者共同研究において得られた知見のうち、デッキ増厚による疲労強度向上効果に関する結果を報告する。さらに、デッキを増厚する際の留意点や経済性等についてとりまとめた。

2. デッキ貫通き裂の発生メカニズム

2.1 デッキとUリブ溶接部の応力性状

デッキとUリブ溶接部における応力性状を把握することを目的に、実橋における応力測定を実施した³⁾。

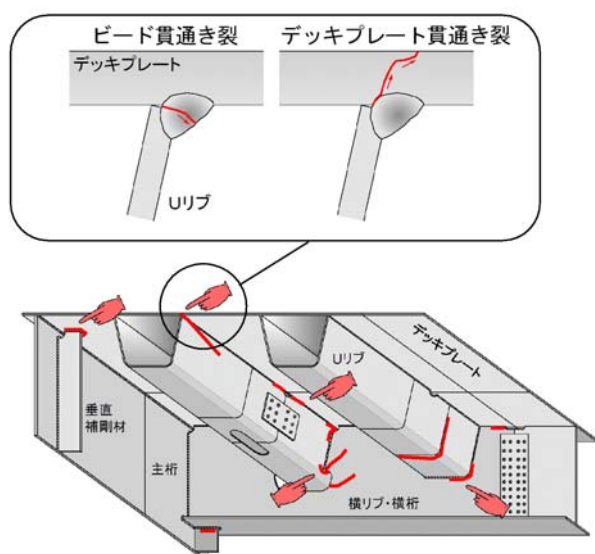


図-1 主な鋼床版の疲労損傷

応力測定の対象としたI橋は、実際にデッキ貫通き裂が発生した橋梁であり、一般部を中心に損傷が確認されている。

応力測定は、荷重車による動的载荷試験と一般交通下における応力頻度測定で構成し、アスファルト舗装の剛性による影響が少ない夏季（8月上旬）に実施した。応力測定では、デッキとUリブ溶接部における応力性状を示す指標として、図-2 に示す溶接止端部から5mm 位置におけるデッキ下面の橋軸直角方向のひずみに着目した。

荷重車の動的载荷試験で得られた応力波形の例を図-3 に示す。これは、荷重車の後輪（ダブルタイヤ）が着目する溶接線を跨ぐ位置となる走行位置で得られたものである。なお、ここでいう応力とは計測されたひずみに鋼材のヤング係数を乗じた値である。図に示すように、応力波形は大きな圧縮応力の3つのピークが確認できる。いずれも荷重車の各車軸が着目部を通過した際に、デッキの局所的な負曲げによって発生する応力である。一方、各車軸の通過前後で圧縮応力の10%程度の引張応力が発生しており、各車軸が通過する際に着目部の応力が交番することが分かる。この引張応力は、輪荷重によりUリブが押し下げられた際、それに伴って発生するデッキの膜作用に起因するものと考えられる。引張応力の圧縮応力に対する割合は小

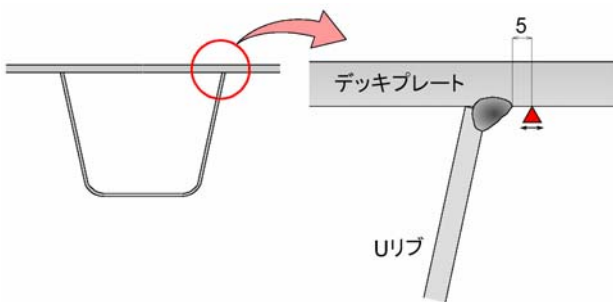


図-2 着目するひずみ参照位置

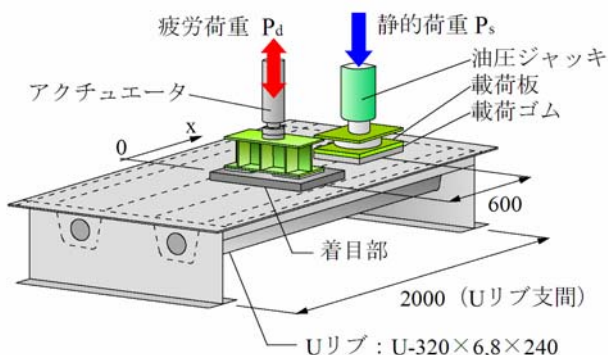


図-4 疲労試験システム

さいものの、溶接ルート部の開閉口を引き起こし、溶接ルート部からのき裂の発生や進展に影響を与えていると想定される。実際、当協会が実施した次章に示す移動輪荷重試験⁵⁾では、デッキとUリブ溶接部の応力の交番によって、溶接ルート部のき裂が開閉口することを超音波探傷試験によって確認している。

2. 2 発生メカニズム検討のための疲労試験⁸⁾

前述のとおり、デッキとUリブ溶接部における応力の交番は、ルート部のき裂の発生や進展に影響を与えると考えられるが、通常実施される定点载荷の疲労試験では圧縮応力のみが作用し、応力の交番を再現することはできない。このことを解決するためには、多連のジャッキを用いた疲労試験⁹⁾、あるいは輪荷重走行試験の実施が考えられるが、両者とも大掛かりな設備を揃える必要があり、試験に要するコストが高く、特に後者は、比較的大規模な試験体が必要となり、試験期間も長期化する等の課題があった。

こうした中、当協会では、一般部におけるデッキ貫通き裂を対象とし、疲労き裂発生メカニズムに関する各種要因を考慮したパラメトリックな疲労試験を行うために、デッキとUリブ溶接部における交番応力を再現できる疲労試験システムを構築した（図-4）。疲労試験システムは、デッキとUリブ溶接部に引張応力を

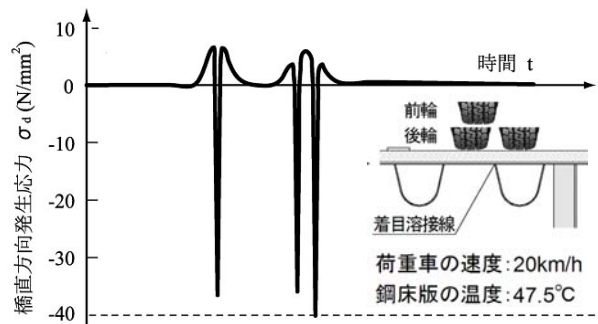


図-3 応力波形の一例（I橋）

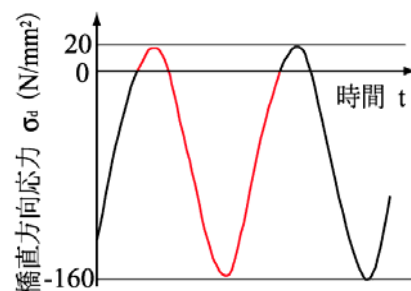


図-5 試験システムにおける応力波形の一例

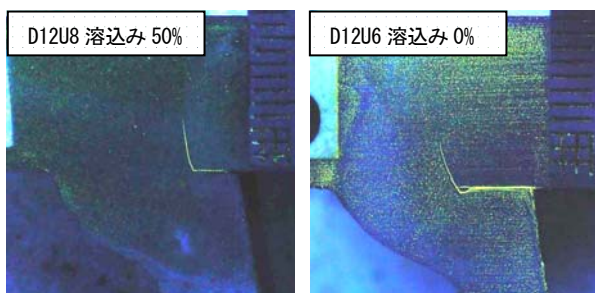


写真-1 再現されたデッキプレート貫通き裂の例

導入する静的ジャッキと、繰り返し荷重を与える油圧サーボジャッキで構成される。静的ジャッキと油圧サーボジャッキの荷重値をそれぞれ変更することで、着目部の発生応力を任意に制御できるため、局所的には交番応力を含めた実働応力の再現が可能である(図-5)。また、鋼床版の構造諸元による影響も、事前にFEM解析や実橋計測を実施して着目部の発生応力を把握し、試験条件として反映することができる。さらに、局所的な応力にのみ着目しているため、試験体寸法を小規模にすることができる。

疲労試験の実施にあたり、まずは先述のI橋の応力頻度測定結果に基づいて、応力振幅や圧縮応力と引張応力の比率などの荷重条件を決定した。本試験システムにより再現されたデッキ貫通き裂の例を写真-1に示す。

当協会では、この疲労試験システムを用いて、溶接条件(溶接方法や溶込み量等)や鋼床版の構造諸元をパラメータにした疲労試験を実施しており、疲労耐久性に優れた鋼床版構造の検討を進めている。

3. 一般部のデッキ貫通き裂に対するデッキ増厚効果

本章では、一般部のデッキ貫通き裂に対するデッキ増厚効果を検証する目的で実施した輪荷重走行試験結果と、デッキ貫通き裂が確認された実橋を対象とし、デッキの増厚の効果解析的に検証した結果について報告する。なお、輪荷重走行試験はデッキ厚12mm、Uリブ板厚8mm(D12U8)、D14U6、D16U6の3体を対象としたが、このうち、D16U6の試験については、先述の3者共同研究の成果の一部である。

3.1 輪荷重走行試験^{5),7)}

(1) 試験体

試験体は、主桁および横リブに囲まれ、Uリブ4本

を有する1パネル(Uリブ単径間)モデルとした(図-6)。Uリブの支間長は2.5mであり、標準規格のU形鋼の断面である。供試鋼材は、すべてSM490材とした。これらの試験体にはアスファルト舗装は敷設されていない。試験体の構造パラメータとして、デッキとUリブの板厚構成を変化させた。具体的には、デッキの板厚が12mm、14mm、16mmの試験体をそれぞれ1体ずつ製作した。そして、それぞれの試験体に板厚6mmと8mmのUリブを2本ずつ配置した。したがって、デッキとUリブの板厚の組み合わせは、全6ケースとなるが、輪荷重走行試験はデッキ貫通き裂の報告がされ始めた当初、事例の多かったD12U8と、今後の新設橋梁に対するデッキ増厚効果を確認することを目的とした、D14U6、D16U6の2ケース、合計3ケースを対象として実施した。デッキとUリブの溶接は、自走式の溶接機を用いた炭酸ガスアーク溶接とし、Uリブ板厚の75%以上の溶込み量を確保するために、開先を設け2パスで溶接した。

(2) 試験条件

輪荷重走行試験には、写真-2に示すクランク式輪荷重走行試験機を使用した。荷重は走行試験の安定性が確保できる最小の荷重、118kNとした。輪荷重走行試験に先立ち、着目する溶接部近傍の応力性状を確認するために、静的載荷試験も実施した。なお、試験荷重により、溶接部近傍の鋼材が降伏していないことは、ひずみ計測値から確認している。

(3) 静的載荷試験

着目する溶接部近傍のひずみについて、橋軸方向の影響線を得ることを目的として、静的載荷試験を実施した。静的載荷試験は、輪荷重走行試験機を用い、載荷版に鉛直荷重を定点載荷することで行なった。載荷位置は、デッキとUリブの溶接部に最も高い応力が発生する位置、すなわち着目溶接線を中心に左右に載荷版を設置し、ダブルタイヤが溶接線を跨ぐ載荷を模擬した。着目したひずみは、溶接止端部から5mm位置におけるデッキ下面の橋軸直角方向のひずみである。

図-7は、各試験体Uリブ支間中央断面における着目応力の橋軸方向の影響線である。前章に示した実橋計測結果と同様、輪荷重の通過による着目部における

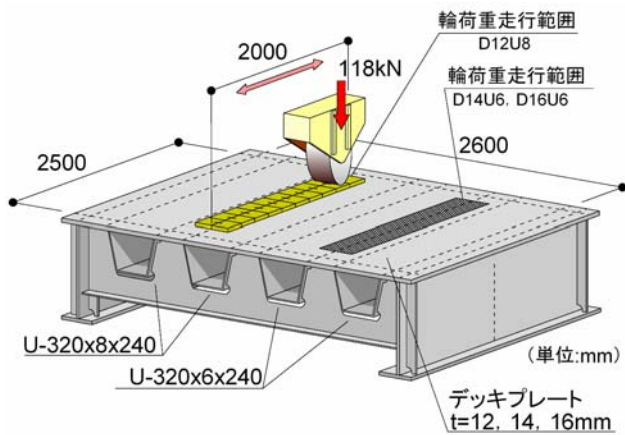


図-6 輪荷重走行試験体

応力の交番が確認できる。3つのケースを比較すると、着目部の最大圧縮応力はデッキが厚いほど小さくなっていることがわかる。具体的には、デッキ厚を16mmとすることで、最大圧縮応力度は12mmに対して50%、14mmに対して10%低減されることがわかる。一方で引張応力の大きさは、デッキの板厚によらず30~40N/mm²程度である。このような応力比の違いについては、今後、2.2に示した疲労試験システムで検討を進めていく予定である。

(4) 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験は、実橋により近い状態を再現し、デッキ貫通き裂を発生・進展させるとともに、デッキの増厚によるクラック発生抑制効果を確認することを目的に実施した。載荷荷重の大きさ、載荷位置は、静的載荷試験と同じである。載荷速度は片道40回(往復20回)/分で、走行回数は片道300万回(往復150万回)まで実施した。走行範囲は橋軸方向に2.0mとした。

図-8に、着目溶接線のデッキ側溶接止端部から5mm位置の疲労試験時のひずみの推移を示す。図中には10万回と200万回のプロットとのひずみ変化を直線とみなした場合のひずみ変化量と変化率も示している。ひずみの変化は走行試験初期から始まっており、デッキ厚によらず、初期から微小なき裂が発生・進展している可能性がある。着目ひずみとデッキ貫通き裂形状の関係に対するデッキ厚による違いについては、別途検討が必要であるが、ひずみ変化量はD12U8 > D14U6 > D16U6と、デッキの増厚により小さくなっており、き裂の進展が遅くなっているとも推察できる。

図-9は、輪荷重走行試験時に適宜実施した超音波

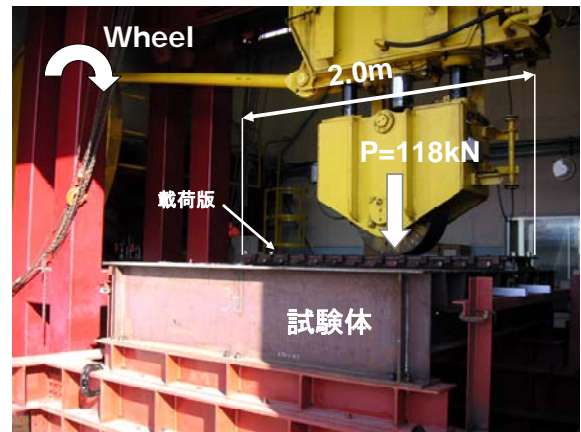


写真-2 輪荷重走行試験機

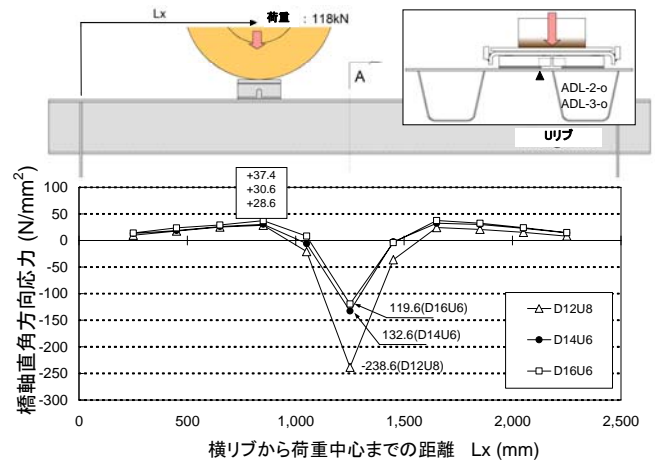


図-7 静的載荷試験結果

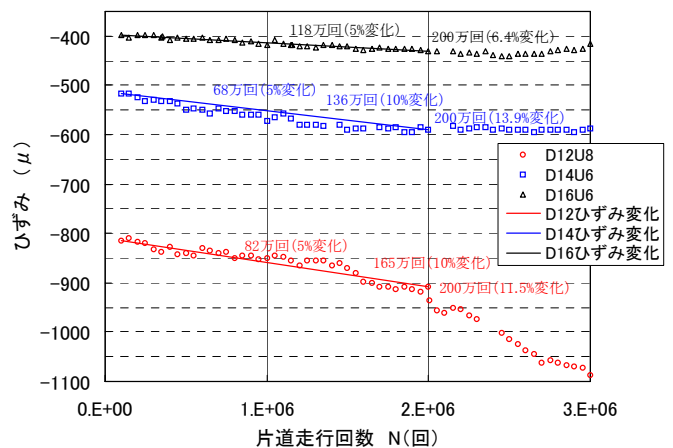


図-8 着目部のひずみと走行回数との関係

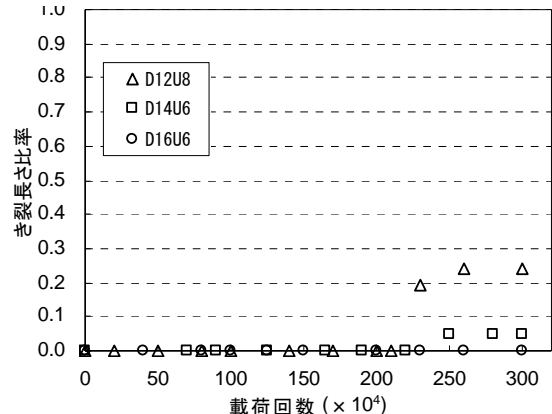


図-9 き裂長さ比率と載荷回数との関係

探傷試験の結果から推定されたき裂と载荷回数との関係を示している。き裂長が小さい場合は、超音波探傷試験の誤差が懸念されるため、6mm以上の深さのき裂に着目した。図の横軸は载荷回数、縦軸は荷重直下の溶接線の輪荷重走行範囲2.0mに対して、6mm以上のき裂が確認された溶接線長の割合を示している。デッキ厚の増加とともに、6mm以上の深いき裂が生じる割合が低下しているのがわかる。また、デッキ厚を16mmとすると、载荷回数300万回まで深さ6mm以上のき裂は発生していない。

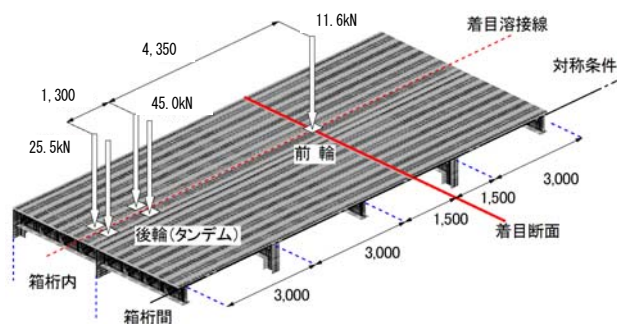


図-10 I橋解析モデル

3.2 実橋FEM解析¹⁰⁾

(1) 解析モデル

解析対象は2.1に示したI橋で、3径間連続鋼床版箱桁橋と単純箱桁橋2連からなる橋長405.8mの橋梁である。鋼床版のデッキ厚は12mm、Uリブは板厚8mmのU形リブで、Uリブ支間は3.0mである。この橋梁は、1980年に供用を開始し、2005年（供用開始から25年経過）にUリブ支間部を中心にデッキ貫通き裂が発見されている。

解析モデルを、図-10に示す。モデル化の基本的な思想は文献11)と同じである。また、解析手法の妥当性は実測値と比較することにより別途確認している。

解析ではデッキ厚12mmの場合に加え、デッキ厚を16mmとした場合の応力低減効果について検討した。着目するひずみは、疲労き裂の発生起点となる溶接ルート部の応力を参照できることを確認した¹²⁾デッキ側の止端から5mmの位置の橋軸直角方向ひずみである。アスファルト舗装のヤング率は、その温度依存性を考慮して、夏季を500N/mm²、春秋を1,500N/mm²、冬季を5,000N/mm²と想定した。荷重は、鋼道路橋の疲労設計指針¹³⁾（以下、疲労設計指針）に記載されている大型トラック（図-11）の強度を与えた。そして、橋軸方向に125～750mm間隔でシングルタイヤとダブルタイヤを別々に連行载荷し、それらの結果を重ね合わせることで車両通過時における着目部の応力波形と応力範囲を得た。橋軸直角方向は実際の走行位置のばらつき（標準偏差±150mm）を考慮できるよう9種類の走行位置とした（図-12）。

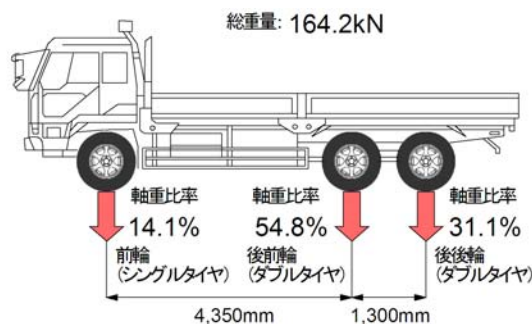


図-11 想定する大型トラックの諸元

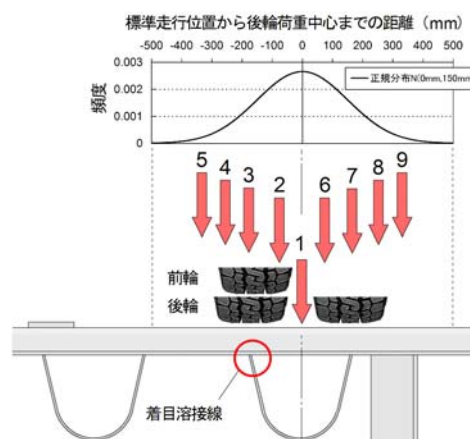


図-12 橋軸直角方向の载荷位置

(2) 解析結果

各季節での解析結果に対し、疲労設計曲線の傾きを表す係数 $m=3$ と仮定し、走行位置のばらつきを考慮した等価ひずみ範囲を算出した。デッキ厚を12mmから16mmへ増厚した場合のひずみ低減率（デッキ厚16mmの等価ひずみ範囲/デッキ厚12mmの等価ひずみ範囲）は夏季で0.652、春秋で0.739、冬季で0.828であった。次に、橋梁位置付近での月平均気温より夏季を3ヶ月、春秋を5ヶ月、冬季を4ヶ月と仮定して計算した通年でひずみ低減率は0.680となった。このことから、デッキ厚を16mmとすれば溶接ルート部の応力範囲は通年で32%低減され、3.2倍程度の長寿命化が期待できたと考えられる。

なお、この応力低減は、き裂発生に対する影響が大きいと考えられ、実際にはデッキの増厚により、前節に示したようなき裂進展の遅延効果も考慮できる可能性がある。

4. 交差部のデッキ貫通き裂に対するデッキ増厚効果

3章までは、一般部を対象としたデッキ貫通き裂に対する検討結果を示した。4章では、交差部を対象として、デッキの増厚効果を定量的に評価するとともに、交差部の疲労設計を実施するための基礎データの取得を目的として実施した疲労試験結果について報告する。

4. 1 試験体および試験方法¹⁴⁾

試験体の形状と寸法を図-13に示す。試験体は交差部を抽出したものであり、Uリブ2本（Uリブ間隔320mm）と横リブ1本で構成されている。着目する溶接線は、U1L, U1R, U2L, U2Rの4箇所である。溶接はUリブの板厚の75%程度溶け込ませている。試験では、Uリブの板厚を6mmで一定として、デッキの板厚を12mmおよび16mmとした2体を使用した。以後、これらの試験体をD12U6, D16U6と呼ぶ。供試鋼材はSM490YAである。

疲労試験は動的能力±300kNの電気油圧式サーボ試験機を用いて行った。荷重は200mm×200mmの範囲に、荷重範囲100kN（下限荷重：10kN）を与えた。なお、本試験条件の妥当性は、試験体モデルと実大の鋼床版モデルを用いたFEM解析の結果を比較することで別途確認している。試験状況を写真-3に示す。

ルート部からのき裂の発生・進展は、デッキ-Uリブ溶接線近傍（デッキ下面のUリブ内側から5mm位置）の橋軸直角方向に貼付したひずみゲージ（ゲージ長3mm）の値の変化から判断した。

4. 3 試験結果

疲労試験時の橋軸直角方向のひずみ範囲と荷重繰返し数の関係を、図-14に示す。デッキ厚を12mmから16mmに増厚することで、Uリブ内側5mm位置のひずみ範囲は約40%低下している。また、いずれの試験体も荷重繰返し数が5万回あたりからひずみ値が低下しており、このあたりからき裂が発生していると推測で

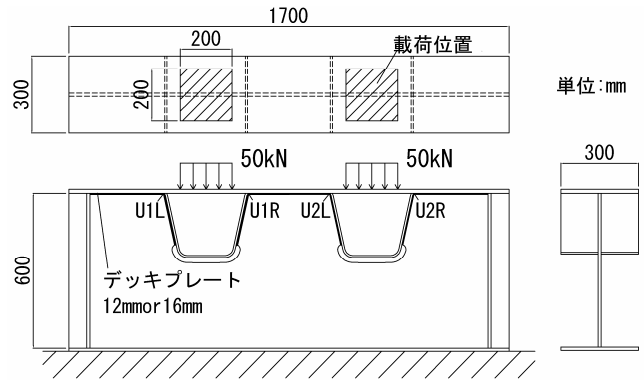


図-13 交差部試験



写真-3 交差部疲労試験状況

きる。さらに、荷重載荷を繰り返すとひずみ値はある値に収束しはじめることから、D12U6は20万回前後で、D16U6は50万回前後でき裂が停留していると推察できる。

D12U6では184万回載荷時にU1Lにおいてき裂がデッキを貫通したが、この時のU1Lのひずみ値は約10%低下している。反対にU1Rではひずみが増加している。D16U6は2,000万回載荷したが、き裂がデッキを貫通することはなかった。D12U6およびD16U6からき裂が発生した部分を切り出し、露出した破面を写真-4に示す。き裂の板厚方向の勾配はデッキが厚い場合に緩やかになり、進展経路が長くなる傾向にあった。

ひずみが初期値から50%低下した時点を経済寿命と仮定し、疲労試験開始前のひずみ範囲と疲労寿命の関係を図-15に示す。図中には3者共同研究で実施した同様の疲労試験で、デッキ厚を12mm, 14mm, 16mm, 19mmの4ケースの試験結果⁷⁾も再整理して示している。Uリブ内側5mm位置での橋軸直角方向のひずみ範囲を用いることにより、デッキの増厚効果を評価できる可能性があることがわかる。図中の直線は、疲労設計

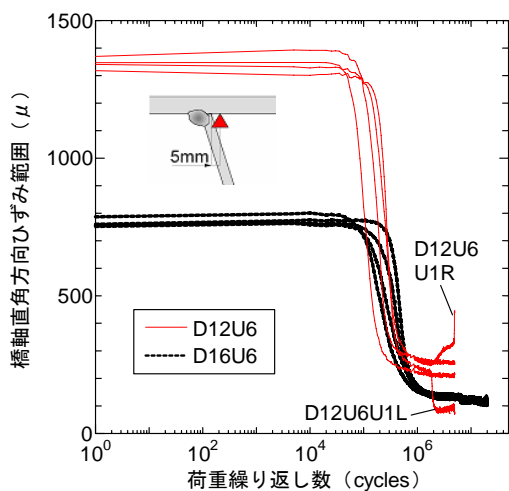


図-14 ひずみの経時変化

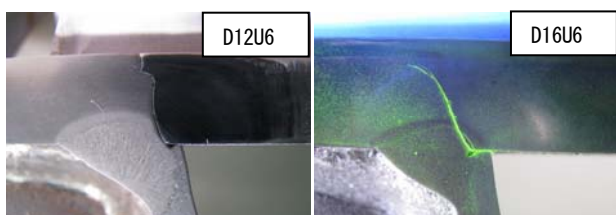


写真-4 デッキプレート貫通き裂

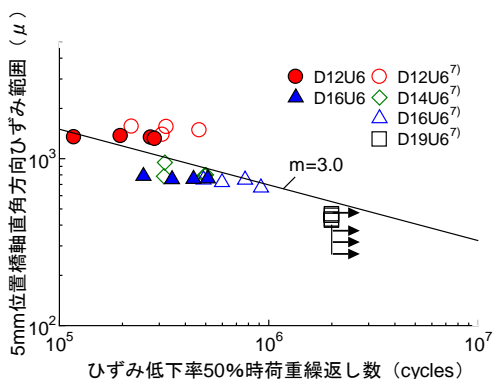


図-15 疲労試験結果

曲線の傾きを表す係数 $m=3$ と仮定して、試験結果に最小自乗法を適用して求めた近似直線である。図-14でも示した通り、デッキ厚が12mmから16mmになることでひずみは40%低下している。疲労限を無視し、この低下率を疲労寿命に換算した場合、寿命が約4.6倍延びることに相当する。

5. 高耐久性鋼床版実現のための留意点

5.1 鋼床版の疲労耐久性を考慮した当面の対策

事務連絡⁶⁾では、前述の通り、今後設計・製作する鋼床版橋梁の疲労耐久性向上のための当面の対策として、「閉断面リブ（Uリブ）を使用する場合、大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下においては、デッキプレートの板厚は16mm以上とすることを標準と

する。」ことが示されている。さらに、その内容を補足する説明として、主に以下の点が資料と共に示されている。

- ① 損傷橋梁の現状（き裂発見までの供用年数と大型車交通量の関係）
- ② デッキ貫通き裂の大半が最小板厚 12 mmのデッキで報告されていること。
- ③ き裂の発生要因や進展挙動に関しては必ずしも明確ではない点があるが、デッキの板厚を増加させることにより疲労耐久性の向上が図れることが確認されていること。
- ④ 大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下でない部位では、デッキの板厚は疲労設計指針のとおりとしてよいこと。
- ⑤ 大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下では、デッキの板厚は 16 mm以上とすることを標準とするが、デッキの板厚以外の構造細目については、疲労設計指針の通りとすること。

以降、これらの補足説明を含む事務連絡の内容を踏まえた設計上の留意点について示す。

5.2 き裂発生までの供用年数と

大型車交通量の関係

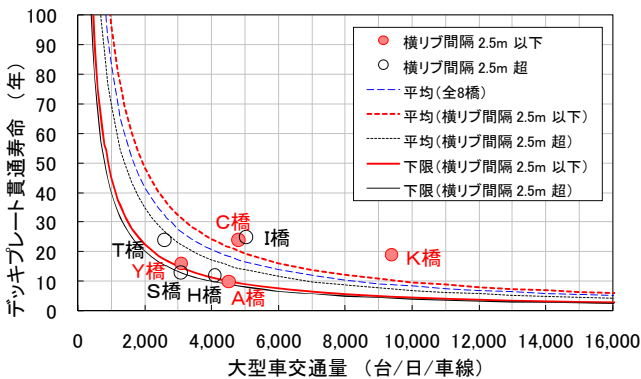
図-16に、事務連絡で示された参図-1.3を参考に、供用後に実施された全ての道路交通センサデータを用いて再整理した結果を示す。図の縦軸は、デッキ貫通き裂が発見されるまでの供用年数、横軸は当該橋梁の交通センサデータから算出した大型車交通量（台/日/車線）を示す。例えば、A橋は平成9年度、平成11年度、平成17年度の交通センサデータで計測が実施されていない期間のデータを代表させて累積大型車交通量を算出し、これを供用年数で除して大型車交通量（台/日/車線）を算出した。また、図中の白抜きの黒丸で表した橋梁は疲労設計指針¹³⁾の適用範囲外に該当する横リブ間隔が2.5m超の橋梁を示している。

横リブ間隔が2.5m以下の橋梁に着目した場合、最小の累積大型車交通量でデッキ貫通き裂が発見された橋梁はA橋である。A橋のき裂発見までの累積大型車交通量は約 1.65×10^7 台/車線であった。この結果、例

表－1 代表的な損傷発生橋梁の構造緒元

| 橋梁名 | | A橋 | C橋 | K橋 | S橋 | H橋 |
|------|-----------|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|
| 構造概要 | 供用年 | 1996年 | 1978年 | 1987年 | 1986年 | 1993年 |
| | 大型車交通量※1) | 5,489台/日/車線 | 5,668台/日/車線 | 11,921台/日/車線 | 2,617台/日/車線 | 5,234台/日/車線 |
| | 片側車線数 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 |
| | 舗装厚 | 75mm | 75mm | 80mm | 70mm | 65mm |
| | トラフ型式 | U-320×240×6 | 310×274×8(円形) | U-320×260×6 | U-320×250×8 | U-320×240×6 |
| | 横リブ間隔 | 2.0m | 端部1.2m、一般2.5m | 2.1m | 2.75m | 3.0m |
| 損傷状況 | 舗装の損傷等 | 損傷少 | 舗装補修痕が多い | 舗装補修が頻発 | 舗装補修痕が多い | 損傷あり |
| | 損傷部 | 横リブ交差部 | 一般部 | 一般部、横リブ交差部 | 貫通き裂は一般部 | 横リブ交差部 |
| | その他 | 損傷発生部のデッキプレート厚は12mm | 損傷発生部のデッキプレート厚は12mm 損傷発生部は、端横リブと横リブ間(縦リブ支間1.25m) | 損傷発生部のデッキプレート厚は12mm | 超音波によるき裂推定結果 損傷率(損傷長さ/溶接長) デッキ厚12mm:1.3% デッキ厚13mm:0.4% 14mm以上:損傷無 | 損傷発生部のデッキプレート厚は12mm |

※1)H17交通センサ結果から算出したもの



図－16 き裂発見までの供用年数と大型車交通量

えば供用期間中の大型車交通量が一定と考えた場合、供用期間100年でこの累積大型車交通量に達する日大型車交通量は以下の通りと試算される。

$$1.65 \times 10^7 / 100 / 365 \approx 450 \text{台/日/車線}$$

実際には、図-16に示した各橋梁では、車線毎に車種、軸重構成の特色があり、日大型車交通量のみでの整理ではなく、新設橋梁を計画する際は精度の高い交通量予測とFEM解析、既設の橋梁の余寿命を評価する場合には応力頻度計測やFEM解析が必要となる。しかし、詳細な検討が困難な場合は、日大型車交通量450台/日/車線を参考とすることも考えられる。

5.3 デッキ貫通き裂発生橋梁の諸元

表-1に代表的なデッキ貫通き裂発生橋梁の構造諸元を示す。デッキ厚が12mm以上に変化する個所があるにもかかわらず、大半の橋梁において、最小板厚12mmの部位においてき裂が発見されていることが分かる。また、これらの橋梁では、アスファルト舗装の損傷やその補修痕などが多く確認されている。なお、既設橋

におけるアスファルト舗装の損傷と鋼床版の損傷の関係については、事務連絡にも記載されている文献3)などが参考となる。

5.4 デッキの増厚効果

一般部のデッキ貫通き裂については、3章に示したように、輪荷重走行試験による検討では、デッキを16mmとすることで、き裂の進展を抑制できる可能性を確認した。また、実橋を対象としたFEM解析ではデッキ厚を12mmから16mmとすることにより、3.2倍以上の長寿命化が期待できる可能性を示した。

交差部のデッキ貫通き裂については、4章に示したように、疲労試験により、デッキ厚を12mmから16mmにすることにより、デッキを貫通するまでの寿命が10倍以上となることを確認した。さらに、疲労設計曲線を構築し、デッキ増厚効果を定量的に評価できる可能性を示した。

5.5 大型車輪荷重が常時載荷される範囲について

大型車輪荷重が常時載荷される位置としては、例えば、文献3)において、車線位置と大型車の走行位置の関係が図示されている。図では、大型車のタイヤ中心間隔は1,850mm程度で、走行車両の中心と車線の中心がほぼ一致している。

一方、大型車走行時の橋軸直角方向のずれに関しては、例えば文献15)ではトラックおよびトレーラー類の走行位置の偏差が200mm程度(それぞれ179mmと165mm)との結果が示されている。これらの文献と、大型

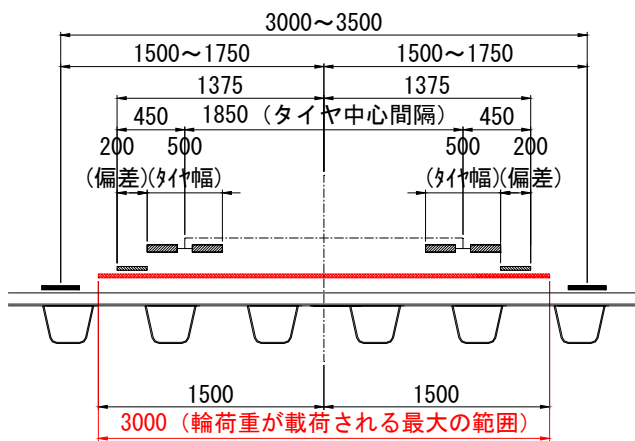


図-17 大型車輪荷重の載荷範囲

車のダブルタイヤの幅500mmを考慮すると、大型車の輪荷重が載荷される最大の範囲としては、

$$1,850\text{mm} + 2 \times 200\text{mm} + 500\text{mm} = 2,750\text{mm}$$

となる。したがって、安全側として、概ね各車線の中心から±1.5mの範囲を輪荷重直下とみなせばよいと考えられる。図-17に、大型車輪荷重の載荷範囲の概念図を示す。

5. 6 デッキ増厚時の留意点

事務連絡およびその補足説明から、デッキの増厚時には以下の点に留意する必要がある。

①適用にあたっては、疲労設計指針の適用範囲に従う。
⇒ 補足説明において、「大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下では、デッキプレートの板厚は16mm以上とすることを標準とするが、デッキプレート板厚以外の構造細目については、指針の通りとする。」とある様に、デッキ厚以外の構造細目は疲労設計指針に従う必要がある。

②Uリブウェブ間隔については、現行のUリブウェブ間隔（最大324mm）以下にする必要がある。

⇒ 事務連絡の主旨が鋼床版の疲労損傷防止という観点であることから、道路橋示方書¹⁶⁾ II 8. 4. 5の規定に関わらず、デッキ厚を16mmに増厚した際も、縦リブ間隔は従来のデッキ厚12mmの場合の縦リブウェブ間隔である、324mm以下にする必要があると考えられる。

③アスファルト舗装のひび割れなどの観点での規定は、増厚後のデッキ厚を考慮できると考えられる。

⇒ アスファルト舗装のひび割れなどの観点からの規定（例えば主桁腹板近傍のUリブの離れ量など）につ

いては、デッキ厚を16mmにした場合にはその増厚効果を考慮できるもと考えられる。ただし、鋼床版上のアスファルト舗装のひび割れ発生メカニズムは複雑であり、明確になっているとはいえないため、特別な場合を除き、主桁腹板近傍のUリブ間隔などをむやみ大きくすることは避けるべきだと考えられる。

④その他の留意点

⇒ デッキの板厚変化は、縦リブウェブや横リブウェブとデッキの溶接線の段差などを考慮した場合、上逃げが望ましい。しかし、この場合、アスファルト舗装厚（基層厚）との関係に留意しなければならない。鋼床版上面のボルト頭部は基層厚の内に収める必要がある。なお、舗装施工便覧¹⁷⁾では、「ボルト等突起物がある場合は、10mm以上のかぶりを確保することが望ましい」という記述があり、設計の際には留意する必要がある。

6. デッキ増厚時の鋼床版の経済性比較

デッキ増厚時の鋼床版の経済性に関しては、事務連絡⁶⁾にある参考資料-3「デッキプレートを増厚させた場合の経済比較」にも試算結果が示されているが、算出の過程は示されていない。また、この試算は車線位置等によらず、デッキ全面の最小板厚を16mmとした試算結果と考えられる。

6章では、デッキ増厚時の鋼床版の経済性比較を目的として、デッキ増厚が主桁の断面決定に与える影響を明らかにし、全体鋼重の増加量を試算する。次に、鋼床版デッキの増厚区間を幅員の特定の区間に限定した場合について、全体鋼重の増加量や工数の増加量を試算し、その結果に対する考察を行う。

6. 1 デッキ増厚が主桁断面に与える影響

鋼床版のデッキが全幅員に渡って増厚された場合に主桁断面形状が受ける影響を試算し、全体鋼重がどの程度増加するか考察する。具体的な検討方法は以下のとおりである。

①デッキ厚として12, 14, 16, 19mmの4ケースについて検討する。デッキ厚は橋梁全体において一定とする。

②Uリブのサイズは320×240×6とする。

③縦リブ支間は、疲労設計指針¹³⁾に従い2.5mとする。

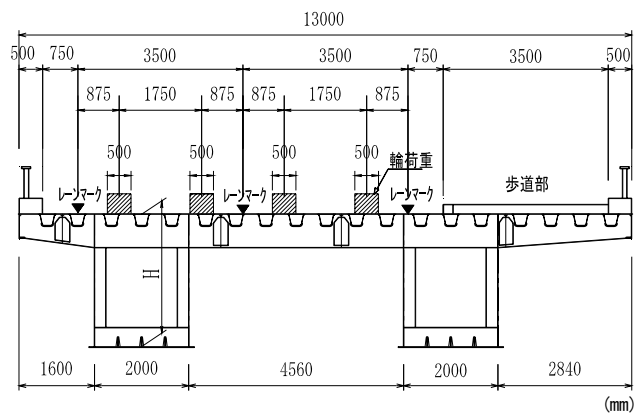


図-18 検討モデルの標準断面図

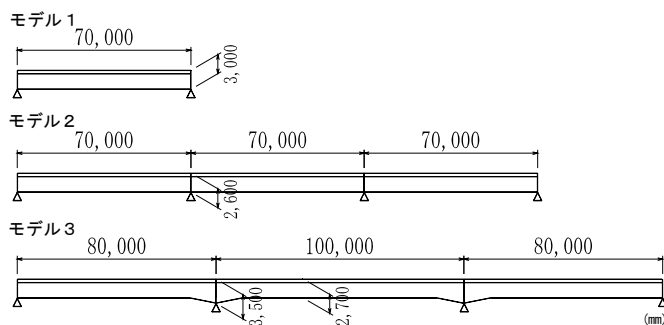


図-19 検討モデルの支間割

④橋梁形式は単純箱桁および3径間連続箱桁橋とし、幅員構成は2車線および歩道部を有するものとする。

図-18、図-19に標準断面図と支間割を示す。なお、支間長は70mを基本とするが、連続箱桁では側径間と中央径間のバランスを考慮して80+100+80mについても検討を行い、支間割が与える影響の有無についても確認する。

以上の条件のもとで試設計した結果を、表-2と表-3に示す。表-2は、主桁作用を考慮した試設計により得られた結果である。デッキと主桁下フランジに発生する応力を示しているが、いずれのモデルにおいてもデッキの増厚による応力の変動はほとんどないことがわかる。これは鋼重が増加する一方で、デッキ増厚により部材剛性が増加するためである。表-3は、床組作用を考慮して得られた試設計の結果であるが、主桁作用と同様、デッキの増厚に伴う応力変動は僅かである。

以上の結果から、デッキの増厚がウリブや主桁下フランジなどの断面決定に与える影響は小さいといえる。

表-2 主桁作用による発生応力の比較

| デッキプレート厚(mm) | | 12 | 14 | 16 | 19 | |
|--------------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| モデル1 | 支間中央 | t_f | 28 | 28 | 28 | 28 |
| | σ_d | σ_d | -132.1 | -126.5 | -115.0 | -105.4 |
| | | σ_f | 206.5 | 207.5 | 207.3 | 208.7 |
| モデル2 | 支間中央 | t_f | 23 | 23 | 23 | 24 |
| | σ_d | σ_d | -125.1 | -115.9 | -107.3 | -98.1 |
| | | σ_f | 207.5 | 208.3 | 207.8 | 205.5 |
| | 支点部 | t_f | 16 | 16 | 16 | 16 |
| | | σ_d | 133.4 | 128.2 | 119.5 | 109.1 |
| | | σ_f | -204.6 | -204.6 | -205.1 | -206.9 |
| モデル3 | 支間中央 | t_f | 23 | 23 | 23 | 24 |
| | σ_d | σ_d | -121.9 | -112.5 | -104.1 | -95.6 |
| | | σ_f | 206.1 | 206.7 | 206.5 | 205.7 |
| | 支点部 | t_f | 18 | 18 | 19 | 19 |
| | | σ_d | 159.5 | 145.6 | 137.6 | 126.0 |
| | | σ_f | -208.7 | -208.7 | -204.8 | -207.1 |

注1：表中の記号は以下の通り。

t_f ：主桁下フランジ板厚 (mm)

σ_d ：デッキプレート応力 (N/mm^2)

σ_f ：主桁下フランジ応力 (N/mm^2)

注2：デッキプレートと下フランジの許容応力は全モデルで以下の通り

下フランジ：140N/mm²(SM400)

デッキプレート：210N/mm²(SM490Y)

表-3 床組作用による発生応力の比較

(単位: N/mm^2)

| 鋼床版板厚(mm) | | 12 | 14 | 16 | 19 |
|-----------|------------|-----|-----|-----|-----|
| 支間部 | σ_d | -42 | -37 | -34 | -30 |
| | σ_f | 110 | 107 | 105 | 103 |
| 支点部 | σ_d | 22 | 19 | 18 | 16 |
| | σ_f | -57 | -56 | -55 | -54 |

σ_d ：デッキプレートの応力度 σ_f ：ウリブ下端の応力度

6. 2 デッキ増厚が経済性に与える影響

6. 1で実施した試設計により得られた各モデルの鋼重を図-20に示す。先述のように、デッキの増厚が主桁断面に与える影響は小さいため、鋼重の増加はデッキに限定されていることがわかる。これらは、デッキ厚が全幅員にわたり一律に増厚された場合についての検討であるが、ここでは、デッキの増厚の範囲を輪荷重走行位置やレーンマーク位置を考慮し、特定の範囲に限定したケースについても検討した。検討したケースは、以下の5ケースで、具体的な増厚範囲は図-21のとおりである (以下、デッキ厚を t_d とする)。

ケース1：全幅員において $t_d=12mm$

ケース2：全幅員において $t_d=16mm$

ケース3：車道部を含むブロックは $t_d=16mm$

それ以外のブロックは $t_d=12mm$

ケース4：レーンマーク内の車道部のみ $t_d=16mm$

それ以外のブロックは $t_d=12mm$

ケース5：輪荷重走行位置のみ $t_d=16mm$

それ以外のブロックは $t_d=12mm$

各ケースに対する経済比較として概略工数を算出

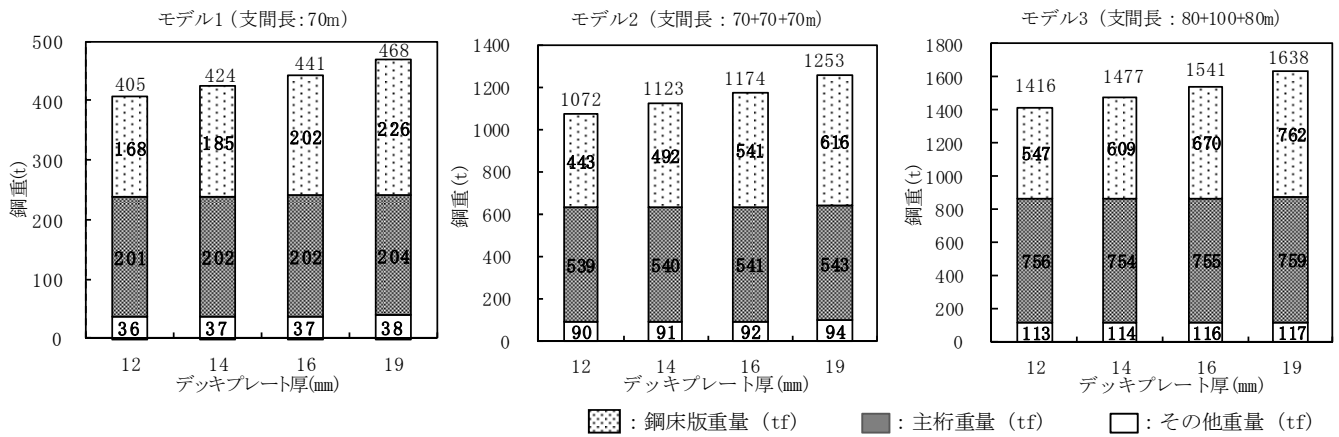


図-20 各モデルの全体鋼重

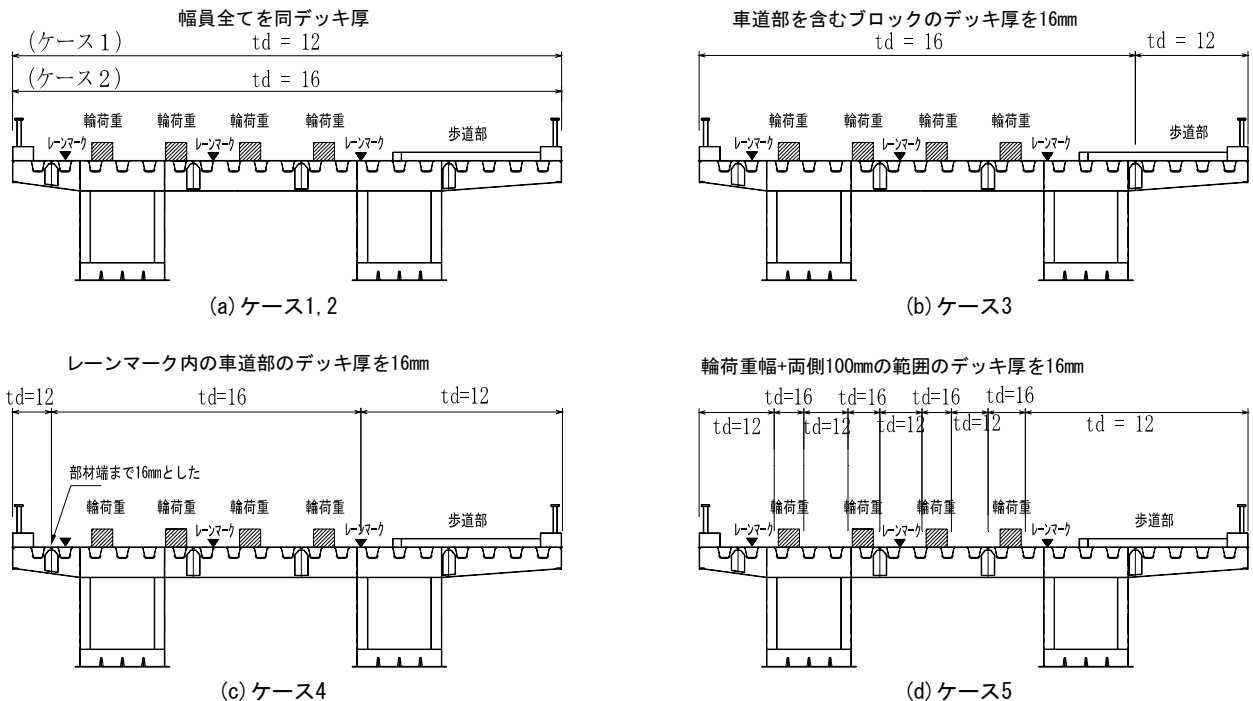


図-21 デッキプレート増厚範囲

した結果を表-4に示す。なお、6. 1の検討結果から、デッキ増厚の影響はデッキに限定されるため、ケース3～ケース5については試設計を実施せず、ケース1の結果を用いて、デッキ厚を16mmとした部分の鋼重の増加量を加算することで全体鋼重を算出した。

表-4の結果をまとめると以下の通りとなる。

- ・ケース5は、デッキ厚 $td=16\text{mm}$ 区間を輪荷重走行位置に限定することで、全体鋼重の増加を抑えることができるが、大型材片数と工場板継溶接延長が大きく増加するため、製作工数が最も大きくなる。加えて輪荷重走行位置にあわせて追加したデッキの板継溶接線上を輪荷重が走行する確率が高く、鋼床版の疲労耐久性上も好ましくないと考えられる。
- ・ケース3とケース4を比較すると、ケース1からの

鋼重増加率はケース4の方が1%程度小さいが、大型材片数と工場板継溶接延長が増加し、結果的に製作工数が増加し、ケース3に比べ不経済となる。

- ・ケース2とケース3を比較すると、ケース1からの鋼重増加率はケース3の方が4%小さい。材片数及び工場板継溶接延長に差異がないことから、ケース3の方が、製作工数が少なくなり経済的である。

以上より、ケース3のように車道部と歩道部でデッキ厚を使い分け、かつ工場板継溶接が生じない様に部材継手を設けることが、最も経済的である。なお、将来的に幅員構成が変わる場合、すなわち、歩道を車道に転用する可能性や車線位置を変更する可能性がある場合は、ケース2を適用することも考えられる。

表-4 各ケースの工数算定要素

| | | ケース1 | ケース2 | ケース3 | ケース4 | ケース5 |
|--------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 大型材片 | 材片数(個) | 339 | 339 | 339 | 362 | 477 |
| | 材片重量(t) | 622.539 | 709.948 | 680.382 | 663.623 | 642.352 |
| 小型材片 | 材片数(個) | 9531 | 9531 | 9531 | 9531 | 9531 |
| | 材片重量(t) | 428.999 | 441.976 | 438.816 | 435.858 | 432.104 |
| 総加工重量(t) | | 1051.538 (1.00) | 1151.924 (1.10) | 1119.197 (1.06) | 1099.481 (1.05) | 1074.457 (1.02) |
| 内570材加工重量(t) | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 板継溶接延長(m) | | 0 | 0 | 0 | 1896 | 11378 |
| T継手溶接延長(m) | | 3685 | 3685 | 3685 | 3685 | 3685 |
| 部材数(個) | | 135 | 135 | 135 | 135 | 135 |
| 製作工数(人工) | | 6225 (1.00) | 6514 (1.05) | 6427 (1.03) | 6591 (1.06) | 7636 (1.23) |

加工鋼重と製作工数における () 内の値はケース1に対する比率を表す。

7. まとめ

以上、鋼床版のデッキと縦リブ溶接部におけるデッキ貫通き裂について、その発生メカニズムに関する検討について説明した。そして、き裂発生位置を一般部と交差部に分け、デッキを増厚することによる疲労強度向上効果を定量的に評価することを試みた結果を示した。さらに、国土交通省からの事務連絡について、補足説明に対する当協会としての解釈を示した。

今後は、デッキ貫通き裂に対する疲労設計手法を確立するための検討を進めるとともに、当協会としての「高耐久性鋼床版設計・施工の手引き」策定に取り組んでいく予定である。

[参考文献]

- 例えば、村越潤，有馬敬育：鋼床版における最近の疲労損傷事例と対策に関する検討ーデッキプレート内進展き裂を対象としてー，土木学会第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.13-24，2006.7.
- 例えば、三木千壽，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.57-69，2005.1.
- 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ー実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討ー，国総研資料No.471，2008.8.
- 川畑篤敬，江崎正浩，加藤靖，杉村誠，鈴木大也，原直人，矢ヶ部彰，横山薫：デッキプレート厚・Uリブ厚・溶接溶け込み量が鋼床版の応力性状に与える影響，第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.17-22，2004.11.
- 川畑篤敬，井口進，廣中修，鈴木統，齊藤史朗：鋼床版のデッキプレートと縦リブ溶接部を対象とした移動輪荷重試験，土木学会第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.247-252，2006.7.

- 国土交通省 都市・地域整備局，道路局：事務連絡「新設橋への鋼床版の適用に関するデッキプレート最小板厚の見直しについて」，2009.12.
- 国土交通省・国土技術政策総合研究所，(独)土木研究所，(社)日本橋梁建設協会：損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究，国総研資料，(発刊予定)
- 貝沼重信，尾上聡史，三浦健一，井口進，川畑篤敬，内田大介：鋼床版のデッキプレートとUリブの溶接ルート部の疲労き裂に対する試験システムの構築，土木学会論文集A，Vol.64，No.2，pp.297-302，2008.4.
- 例えば、三木千壽，館石和雄，奥川淳志，藤井裕司：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度，土木学会論文集，No.519/I-32，pp.127-137，1995.7.
- 川畑篤敬，井口進，内田大介，平山繁幸，宮下敏，松下裕明：デッキ貫通き裂の疲労寿命に対するデッキプレート増厚の効果，第65回土木学会年次学術講演会概要集(2010.9)
- 井口進，内田大介，川畑篤敬，玉越隆史：アスファルト舗装の損傷が鋼床版の局部応力性状に与える影響，鋼構造論文集，Vol.15 No.59，pp.75-86，2008.9.
- 井口進，内田大介，川畑篤敬：鋼床版のデッキとUリブの溶接部の局部応力の評価位置に関する解析的検討，第65回土木学会年次学術講演会概要集，I-085，2010.9.
- (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.
- 川崎靖子，原田英明，森 猛，内田大介，川畑篤敬，井口進，宮下敏：デッキプレート貫通型疲労き裂の発生・進展性状に対するスカーラップと板厚の影響，第65回土木学会年次学術講演会概要集，I-092，2010.9.
- 高田佳彦，木代穰，中島隆，薄井王尚：BWIMを応用した実働荷重と走行位置が鋼床版の疲労損傷に与える影響検討，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1456-1467，2009.3.
- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2002.3.
- (社)日本道路協会：舗装施工便覧，2006.2.