

疲労に強い鋼床版と取替え鋼床版

～近年の橋建協の取り組み～

技術委員会 床版小委員会 鋼床版部会

齊藤史朗, 林 暢彦, 石川 誠, 井口 進
奥村 学, 片野俊一, 宮山浩太郎, 山内誉史

1. はじめに

鋼床版は、軽量および架設期間短縮などの長所を活かし、軟弱地盤上に建設される橋梁や長大橋の床組み構造や都市内高架橋において多く採用されてきた。しかしながら、1990年頃より一部の路線で疲労損傷の報告が増加しており、特に大型車交通量が多い路線であって、供用経過年数が20年程度以上の橋梁において多く発生している状況である。これを受け、平成14年改定の道路橋示方書では耐久性向上のための製作・施工に関する規定が盛り込まれ、平成14年発刊の「鋼道路橋の疲労設計指針」とあわせて、構造詳細による鋼床版の疲労設計の考え方・方法が示された。さらには、平成24年改定の道路橋示方書では、疲労耐久性の向上を図るため、閉断面縦リブを有する鋼床版デッキプレート(以下、デッキ)の最小板厚が12mmから16mmに見直された。このように鋼床版は、都度、疲労耐久性の向上が図られているものの、過去の知見に基づく疲労耐久性の高い構造詳細の採用による疲労設計に留まっており、全ての疲労損傷における原因が究明され、対策が確立されたわけではない。このような状況を踏まえ、(一社)日本橋梁建設協会(以下、橋建協)では、鋼床版を制限なく安心して使用できるように高耐久化への取り組みを官学と協力して行っているところである。

ところで、わが国では特に供用期間が50年を超える道路橋の劣化損傷が顕在化しており、各高速道路会社ではRC床版の取替え工事を含む中期的な更新・修繕が実施されている。また、国土交通省や地方公共団体が管理する一般国道・都道府県道・市町村道においてもRC床版の更新需要が高まっているところである。取替えによる更新工事にあたり、耐久性の高いPC床版や鋼コンクリート合成床版などの採用が考えられるが、取替え対象となる建設後50年以上が経過した橋梁は、現行基準よりも小さな活荷重、地震荷重にて

設計されており、現行基準を満足するコンクリート系床版を採用する場合、死荷重の増加により下部構造を含めた大がかりな補強が必要となるケースがある。このようなケースに対し、死荷重軽減が可能で、施工期間も短縮できる取替え鋼床版のニーズが高まっている状況にある。

以上を踏まえ、本稿では橋建協での鋼床版の高耐久化への取り組み状況についての報告に加え、ニーズが高まりつつある取替え鋼床版の接合方法に関する事例調査および橋建協の取り組み状況について報告する。

2. 疲労に強い鋼床版

2.1 鋼床版の疲労損傷と現行の構造詳細

橋建協が取り組んでいる鋼床版の高耐久化では、図-1に示す疲労損傷を対象としている。具体的には、閉断面リブを有する鋼床版については、縦リブと横リブの交差部のスリット下端部における疲労損傷、閉断面リブを有する鋼床版については、デッキと縦リブ溶接部のデッキ進展き裂、縦リブと横リブ交差部のスリット端部で縦リブ側に生じる疲労損傷である。また、主桁ウェブに取り付けられる垂直補剛材上端部の疲労損傷も対象としている。

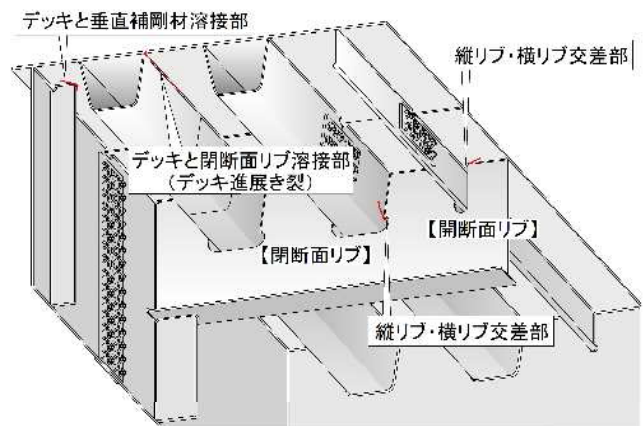


図-1 本文で対象とする疲労損傷



写真-1 主桁ウェブ上の舗装ひび割れ

開断面リブを有する鋼床版では、縦リブと横リブの交差部のスリット下端部における疲労損傷が報告されているが、スリット下端部のスカラップ半径を、損傷が報告されている鋼床版（25～30mm）よりも大きい40mmとすることで高耐久化が可能である²⁾。また、開断面リブを有する鋼床版のデッキと縦リブ溶接部では、溶接ルート部から溶接ビード方向に進展するビード進展き裂の報告が多いが、このき裂に対して現行基準では、溶接部の溶込み量を縦リブの板厚の75%以上確保するとともに必要なのど厚を確保することで疲労耐久性が確保できるとみなしている²⁾。

開断面および閉断面リブを有する鋼床版のいずれも、縦リブと横リブ交差部の上端における3線交差部にスカラップが設けられていたが、スカラップ部における疲労損傷に対する対策として、スカラップを設けない構造として疲労対策を施している²⁾。

主桁の垂直補剛材上端部のき裂については、主桁位置を大型車両の輪荷重走行が常時载荷される位置直下としないことで疲労対策となると考えられるが、やむを得ず主桁位置と輪荷重走行位置が近くなることを避けられない場合も多いと考えられることから、鋼床版の高耐久化の対象としている。また主桁ウェブ位置と輪荷重走行位置が近くなる場合、輪荷重の载荷によりデッキが局部的に負曲げ変形することで、橋面舗装にひび割れが発生しやすくなる³⁾（写真-1）。鋼床版の高耐久化にあたっては、この主桁位置における舗装のひび割れ対策についても検討を行っている。

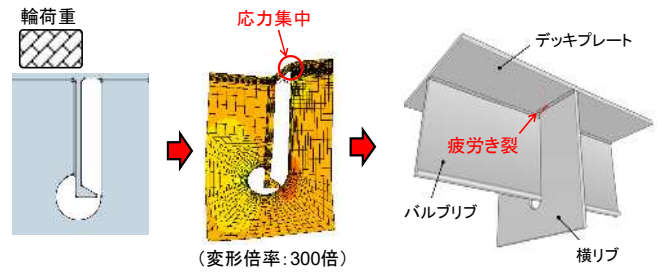


図-2 横リブスリット部における疲労損傷

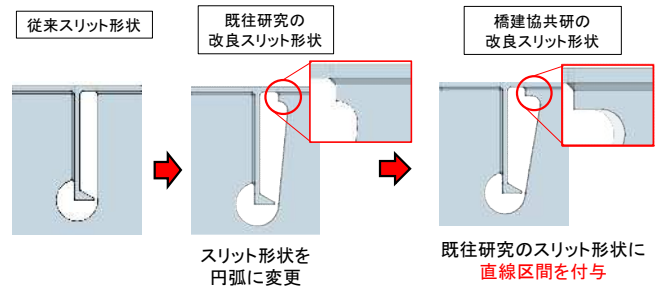


図-3 スリット形状の改良

2.2 開断面リブを用いた鋼床版の対策

2.2.1 縦リブ・横リブ交差部

開断面リブを用いた鋼床版では、縦リブと横リブの交差部にスリットを設ける構造が標準になっている²⁾。このスリット近傍に大型車輪が位置したとき、スリット上端部においてデッキに局所的な変形が生じ、デッキと横リブの溶接部に応力集中が生じる（図-2）。当該箇所での損傷事例は、開断面リブを用いた鋼床版全体の約1割を占める²⁾。スリット上端部は狭隘であるため、特にまわし溶接の品質確保が難しいことも損傷が生じる原因の一つと考えられる。

応力集中の低減対策として、デッキや横リブの増厚や横リブ高の拡大により剛性を高めることが考えられるが、鋼重が増加するため経済性に劣る。一方、既往の研究⁴⁾では、スリット上端部を円弧形状（R40）とすることで、着目部の応力集中が低減することが解析的に確認されている。スリット形状の変更のみであるため経済性に優れ、かつ施工スペースの拡大による溶接品質の向上も見込まれる対策となる。

橋建協ではさらなる疲労耐久性の向上を図るため、スリット上端部の円弧部分に直線区間を設け(図-3)、その直線区間の長さをパラメトリックに変化させ、応力集中の低減にどの程度寄与するかを解析的に検討した⁵⁾。検討したスリット形状を図-4に示す。従来形状、R40円弧形状に加え、R40円弧部分に直線区間を15mmおよび25mm設けたスリット形状について検討した。FEM解析モデルを図-5に示す。着目位置はパネル中央部の縦リブ・横リブ交差部のスリット上端部とし、ダブルタイヤ1輪に相当する輪荷重を、着目部から橋軸方向・橋軸直角方向とも±500mm範囲に100mm間隔で載荷し、着目スリット部における移動載荷を模擬した。

デッキ側、横リブ側それぞれの溶接止端部に発生するホットスポット応力の最大・最小値の算出結果を図-6に示す。ホットスポット応力は、横リブ側止端部については3点外挿法を用いて溶接止端位置から4mm, 8mm, 12mm離れた3点の最大または最小主応力を溶接止端部まで外挿することで算出し、デッキ側止端部については2点外挿法を用いて溶接止端位置から、4.8mm, 12mm離れた2点の最大または最小主応力を溶接止端部まで外挿することで算出した。従来形状の①では横リブ側止端部において -287.7 N/mm^2 と大きな応力が発生していたのに対し、R40円弧形状とした②では応力が -169.5 N/mm^2 と半分程度まで低減することが確認できた。また、円弧に直線区間を設けた③および④では、さらに応力低減効果があることを確認した。疲労寿命に換算すると、従来形状に対して、R40円弧形状では約5倍、円弧+直線区間15mmおよび25mm形状ではそれぞれ約19倍、約36倍の延命効果に相当する。

なお、最も応力低減効果が大きいのは円弧に直線区間を25mm設けたケース④であったが、このケースではデッキ側止端部の応力が -92.6 N/mm^2 で横リブ側の応力 -86.8 N/mm^2 より大きくなっている。デッキに疲労損傷が発生すると補修の際に通行止め等の規制が必要になるため、デッキ側止端部の応力が横リブ側より大きくならないよう直線区間は15mmが推奨される。

今後、部分模型を用いた疲労試験を実施し、解析的

検討で得られたスリット形状改良による効果を実際に有しているか、実験的に検証を行う予定である。

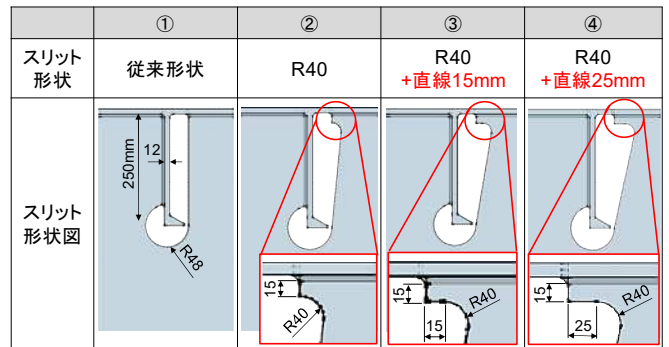
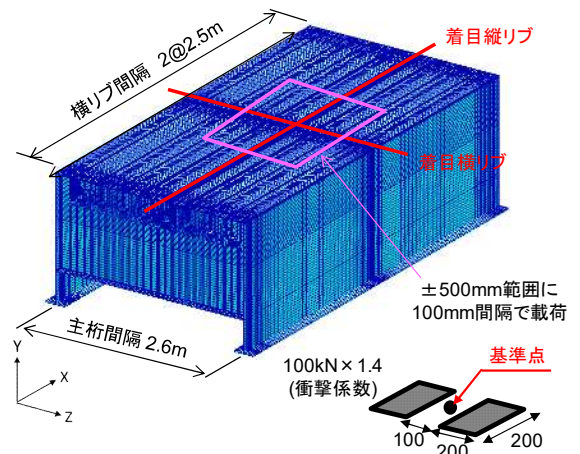


図-4 検討ケース



使用要素：ソリッド要素
境界条件：主桁下フランジ端部を単純支持

デッキPL厚	12mm
横リブWEB厚	9mm
縦リブサイズ	250mm × 12mm (Bulb Rib)
隅肉溶接脚長	6mm

図-5 解析モデル

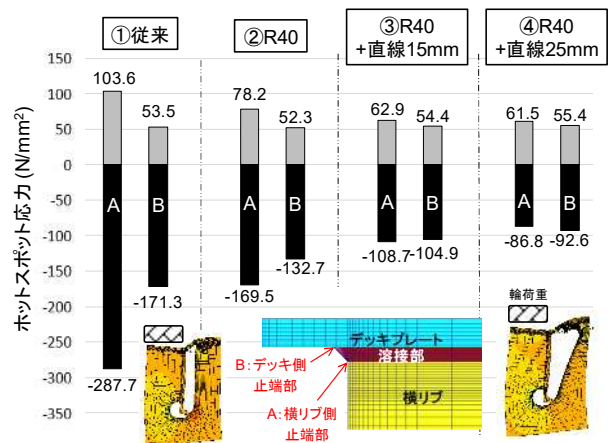


図-6 解析結果

2.2.2 舗装のひび割れ対策

鋼床版の舗装は、基本的にアスファルト舗装が適用されているが、コンクリート系床版に比べて、舗装の損傷が発生し易いことが指摘されている(図-7)。特に、主桁や縦桁のウェブ直上の橋軸方向ひび割れが数多く報告されている^{1),6)}。舗装のひび割れを抑制するためには、輪荷重の常時走行位置がウェブ直上と一致しないよう設計時に配慮することが求められているが、設計上困難な場合も考えられる。

舗装破壊(ひび割れ)の照査方法としては、本州四国連絡橋の橋面舗装基準⁷⁾において、繰返し曲げ試験の結果に基づき、デッキと舗装とが合成された状態に対して舗装面の最小曲率半径20m、リブ間の許容たわみが0.4mmと規定されている。

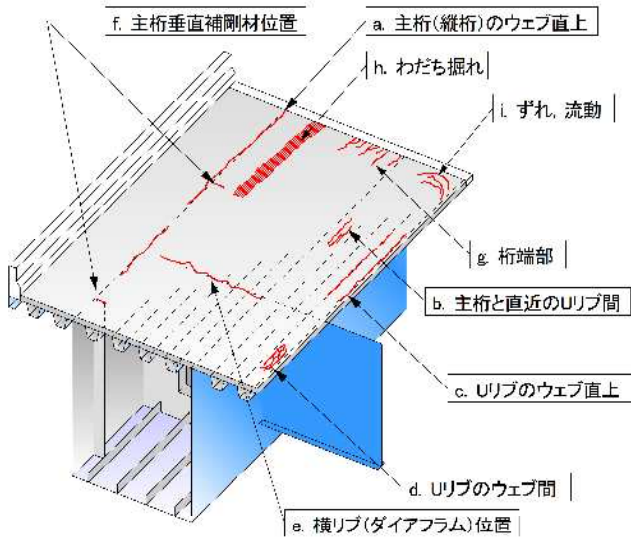


図-7 鋼床版舗装の代表的な損傷事例³⁾

そこで、主桁ウェブを跨ぐようなダブルタイヤ載荷に対しても、舗装ひび割れの抑制効果が得られるような開リブ鋼床版構造を提案し、舗装とデッキの合成効果と荷重分配効果を考慮したFEM解析より舗装ひび割れの抑制効果を検討した⁸⁾。

対象橋梁は、図-8に示すような開断面リブ鋼床版とし、デッキ厚、主桁のウェブ近傍の縦リブ剛性、縦リブ支間長をパラメータとした。鋼床版の構造タイプを表-1に示す。従来構造(タイプ1)はデッキ厚12mm、縦リブ Bulb PL200×10(通常バルブ)とし、提案構造(タイプ2~5)はデッキ厚12~16mm、一般部の縦リブを通常バルブでウェブ近傍のみ Bulb PL250×12(大型バルブ)とした。横桁間隔を11m程度として、縦リブ支間長 l_g はタイプ1,2ではその1/7となる1.563m、タイプ3~5ではその1/5となる2.3mとした。各構造タイプで鋼重比較した結果、従来構造(1.00)に対して、提案構造が0.96~1.02であり、デッキ厚を増厚しても経済性が低下していない。

表-1 鋼床版の構造タイプ

構造タイプ	デッキ厚 t (mm)	縦リブ支間長 l_g (m)	縦リブ断面		縦リブ間隔		鋼重比較 (kg/m ²)
			一般部	ウェブ隣接部	一般部 b (mm)	ウェブ隣接部 \bar{b} (mm)	
タイプ1 (従来構造)	12	1.563	Bulb PL 200 x 10		309	250	435 [1.00]
タイプ2 (提案構造)			Bulb PL 200 x 10				437 [1.01]
タイプ3 (提案構造)	14	2.300	Bulb PL 200 x 10	Bulb PL 250 x 12	371	250	417 [0.96]
タイプ4 (提案構造)							427 [0.98]
タイプ5 (提案構造)							442 [1.02]

※鋼重比較の[]内は比率を示す。

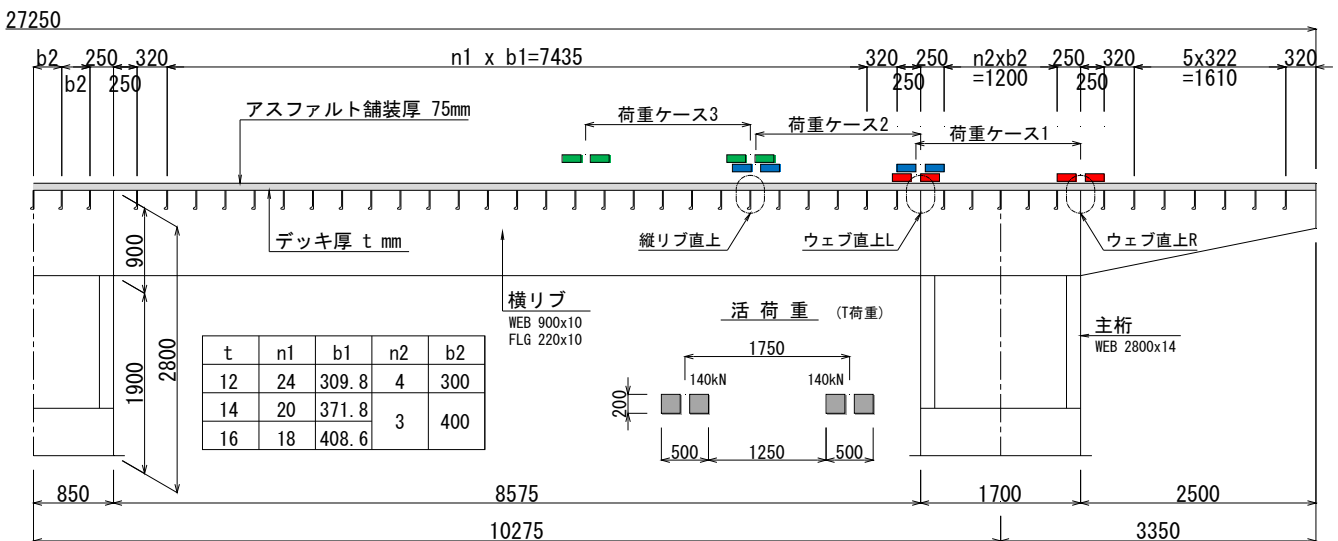


図-8 対象橋梁と荷重ケース

図-9に解析モデルを示す。解析モデルは、舗装と着目部近傍のデッキ、主桁ウェブ、着目縦リブをソリッド要素、それ以外の鋼部材をシェル要素でモデル化した。荷重はT荷重の1輪をダブルタイヤとし、衝撃($i=0.4$)を考慮した値とした。舗装とデッキは完全合成とした。舗装は弾性体(ポアソン比0.35)とし、弾性係数 $2,000\text{N/mm}^2$ とした。この舗装剛性は、鋼床版の舗装を設計する際の推奨値として、道示II²⁾に示されている値である。舗装ひび割れの抑制効果は、活荷重によって生じるデッキ上面の節点の鉛直方向と橋軸直角方向の変位(要素幅 0.5mm 、着目点から $\pm 100\text{mm}$ を抽出)から最小二乗法で近似円の半径を求め、曲率半径として評価した⁹⁾。

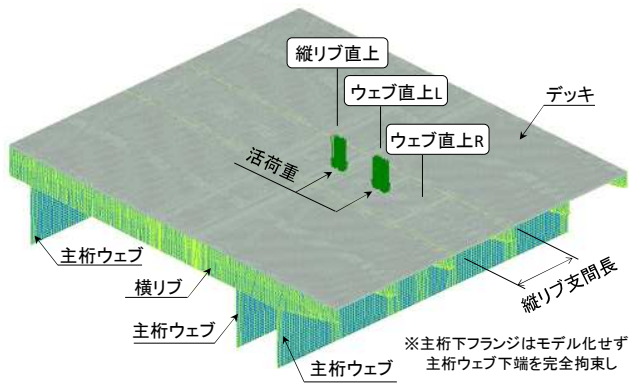
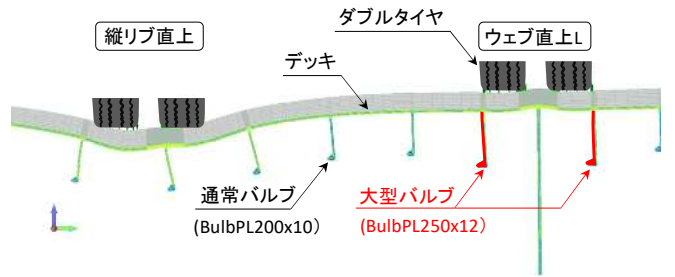


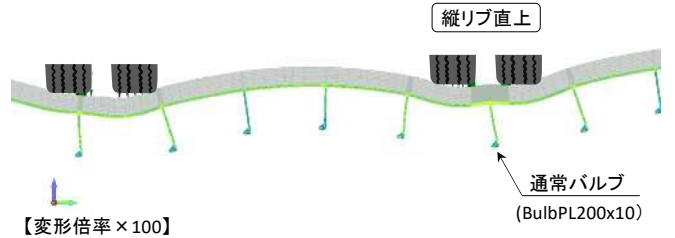
図-9 解析モデル

図-10に構造タイプ3の変形図を示す。輪荷重が主桁ウェブを挟み込む載荷時では、デッキの局所的な板曲げのみが発生しており、デッキの曲率半径は 20m を若干下回った。一方、輪荷重が縦リブを挟み込む載荷時では、デッキの局所的な板曲げに加えて、床版作用による鉛直たわみも発生するため、デッキ上面の引張ひずみが低減し、舗装のひび割れがウェブ直上載荷に比べて緩和され、デッキの曲率半径が 20m 以上となった。

表-2に着目部のデッキの曲率半径を示す。縦リブ支間長 $l_g=1.563\text{m}$ の従来構造(タイプ1)では、ウェブ直上載荷でデッキの曲率半径 20m を若干下回ったが、提案構造(タイプ2,4,5)では、縦リブ支間長 $l_g=2.3\text{m}$ でもデッキの曲率半径 20m 以上を確保できた。また、デッキ厚 14mm の提案構造(タイプ4)では、従来構造に比べてデッキの曲率半径が1.2倍となり、舗装のひび割れ抑制効果が期待できる。



(a) 荷重ケース 2



(b) 荷重ケース 3

図-10 構造タイプ3の変形図

表-2 解析結果一覧

構造タイプ	デッキ厚 t (mm)	縦リブ 支間長 l_g (m)	デッキの曲率半径(m)			備考
			荷重ケース1 (ウェブ直上R)	荷重ケース2 (ウェブ直上L)	荷重ケース3 (縦リブ直上)	
タイプ1	12	1.563	19.0 [1.00]	18.6 [1.00]	23.0 [1.00]	従来構造 [基準]
タイプ2			20.4 [1.07]	20.0 [1.08]	23.0 [1.00]	提案構造 [タイプ2/タイプ1]
タイプ3		2.300	19.4 [1.02]	19.1 [1.03]	25.4 [1.10]	提案構造 [タイプ3/タイプ1]
タイプ4			23.8 [1.25]	23.4 [1.26]	29.0 [1.26]	提案構造 [タイプ4/タイプ1]
タイプ5			29.2 [1.54]	28.5 [1.53]	34.6 [1.50]	提案構造 [タイプ5/タイプ1]

※デッキの曲率半径の[]内は比率を示す。

2.3 閉断面リブを用いた鋼床版の対策

2.3.1 最小デッキ厚

閉断面リブとデッキの溶接部から発生してデッキ方向に進展する疲労き裂(以下、デッキ進展き裂)による損傷事例は、その大半がデッキ厚 12mm で発生している。この疲労き裂への対策としてデッキ厚を増加させることが有効である¹⁰⁾ことから、現在では、閉断面リブを使用した鋼床版のデッキ厚は、大型自動車の輪荷重が常時載荷される位置直下においては 16mm 以上とすることが標準となっている²⁾。しかし、疲労き裂の発生と進展は、溶接部に作用する応力の大きさと回数などにより変わるため、大型車交通量が異なる路線の鋼床版の最小デッキ厚を一律に規定することは不合理である。そこで、橋建協では大型車交通量に応じた最小デッキ厚の設定方法を検討している。

図-11 に示す FEM 解析を実施した。デッキ進展き裂の着目位置は、一般部に比べ疲労耐久性が低いと考えられる横リブ交差部¹⁰⁾とし、縦リブ 2 径間分をモデル化した¹¹⁾。縦リブ(Uリブ)間隔は標準的な 640mm と設定した。アスファルト舗装は厚さ 80mm で弾性体としてモデル化し、弾性係数 500N/mm² (夏場)、ポアソン比 0.35 とした。支持条件は主桁と両端の横リブ下フランジ交差部の 4 隅のうち、片方の横リブ下をピン支持、他方の横リブ下をローラー支持とした。自動車交通量と大型車混入率は、表-3 に示す実交通の観測データを用いた。また、車種構成比率は文献 12),13)を参考に、車両モデルは文献 13)に記載されている 8 種類とした(表-4)。小型車と No.1~22 の大型車は頻度補正係数¹³⁾の設定に用いた交通量データであり、No.23~25 の大型車は文献 12)の常時観測データである。荷重載荷点は橋軸方向に 53 ライン、橋直方向に 38 ラインの交点で、対称性を考慮した計 1,026 点とした。このようにして得られた FEM 解析結果から、溶接ルート部に発生する応力の影響面を作成し、応力繰返し数に等価応力範囲の 3 乗を乗じた値を疲労被害と定義して算出した。

図-12 は、100 年間の疲労被害を大型車交通量で整理した結果である。疲労被害は、大型車交通量に概ね比例しており、小型車交通量の影響は小さく、車種構成比率の影響も少ないことが分かる。文献 13)の疲労

設計荷重設定の際に用いられた交通が 100 年間通過した場合の疲労被害を疲労寿命として最小デッキ厚を整理した結果、大型車交通量(台/日/車線)が 2,650 台以下るとき 12mm, 3,790 台以下るとき 14mm, 5,340 台以下るとき 16mm, 9,260 台以下るとき 19mm となった。

今後は、車両走行位置の橋直方向へのばらつき(走行分布)が疲労被害に与える影響の確認、実験等によるデッキ進展き裂の疲労強度の算定など、引き続き検討を進める予定である。

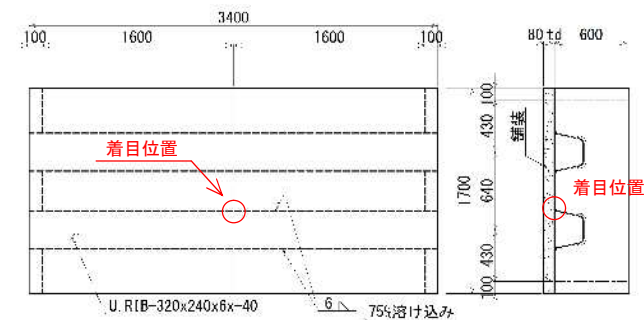
表-3 自動車交通量と大型車混入率

No.	調査路線名	調査地点	対象橋梁	一方向 当たり 車線数	大型車 日交通量 (台/方向)	大型車 混入率 (%)	日交通量 (台/方向/車線)
1	R408	茨城県つくば市	蓮沼橋	2	1,488	9.8	7,592
2	R304	茨城県谷和原村	福岡橋	2	2,625	25.3	5,188
3	R50	栃木県小山市	小山高架橋	2	6,589	29.3	11,244
4	R16	千葉県市原市	甲子橋	2	10,106	38.3	13,193
5	R45	青森県八戸市	河原木跨道橋	2	2,617	16.1	8,127
6	R13	山形県村山市	村山大橋	2	3,431	22.8	7,524
7	R357	東京都江東区新木場	曙橋	2	9,058	45.8	9,889
8	R357	千葉県市川市	美浜大橋	2	17,340	45.2	19,181
9	R4	埼玉県草加市	草加高架橋	2	5,893	21.5	13,705
10	R18	長野県軽井沢町	さかい橋	1	3,422	54.9	6,233
11	R4	茨城県境町	境跨道橋	1	7,389	49.6	14,897
12	R16	千葉県野田市	中里跨道橋	2	8,284	35.1	11,801
13	R6	千葉県松戸市	小山跨道橋	2	5,535	20.2	13,700
14	R4	埼玉県深谷市	備前渠橋	1	5,288	39.6	13,354
15	R1	静岡県島田市	島田第一高架橋	2	7,261	29.8	12,183
16	R22	愛知県一宮市	北方高架橋	3	5,527	18.5	9,959
17	R23	愛知県名古屋南区	港南第二跨道橋	2	14,401	43.0	16,745
18	R19	長野県山口村	地藏橋	2	4,310	39.0	5,526
19	R2	広島県東広島市	八本松高架橋	2	5,037	33.7	7,473
20	R2	広島県尾道市	西藤高架橋	2	6,370	22.0	14,477
21	R2	山口県下松市	未武橋	2	5,793	14.7	19,704
22	R357	東京都江東区有明	—	2	10,808	44.6	12,117
23	R17	埼玉県熊谷市	—	1	5,292	25.2	21,000
24	R4	埼玉県草加市	—	2	5,274	20.0	13,185
25	R45	青森県八戸市	—	1	900	11.0	8,182

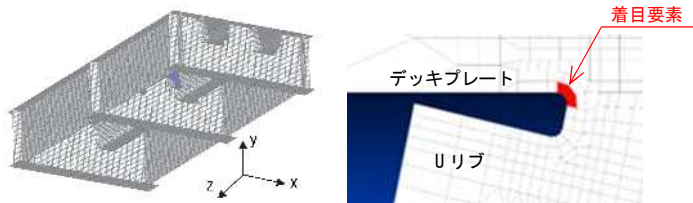
注) 1. No.1~21は、H11交通センサス 2. No.22,23は、文献4)の常観データ
3. No.24,25は、S60交通センサス

表-4 車種構成比率

No.	小型車と大型車それぞれにおける車種ごとの構成比率(%)							
	小型車		大型車					
	乗用車	小型トラック	中型トラック	大型トラック	ダンプ	タンクローリー	セミトレーラー	バス
1~22	82.5	17.5	41.2	30.4	11.6	5.0	9.4	2.4
23			43.8	33.6	5.4	7.5	8.6	1.2
24			45.3	27.5	16.3	4.8	5.1	1.0
25			49.5	23.2	13.5	3.0	3.8	7.0



(a) 鋼床版構造



(b) 要素分割図 (c) 溶接ルート部の注目要素

図-11 解析モデル

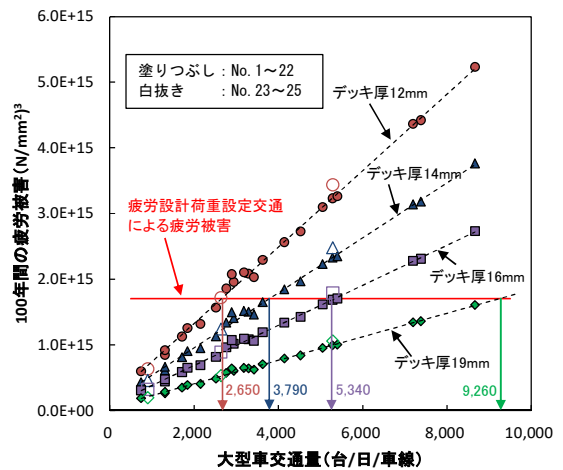


図-12 100 年間の疲労被害

2.3.2 縦リブ・横リブ交差部

閉断面リブと横リブ交差部スリット溶接部の U リブ側止端を起点とする疲労き裂 (図-13) は、輪荷重が U リブに偏心载荷することによる U リブの変形を、横リブウェブ等で拘束することにより発生する U リブウェブの面外曲げが原因の一つとされている。

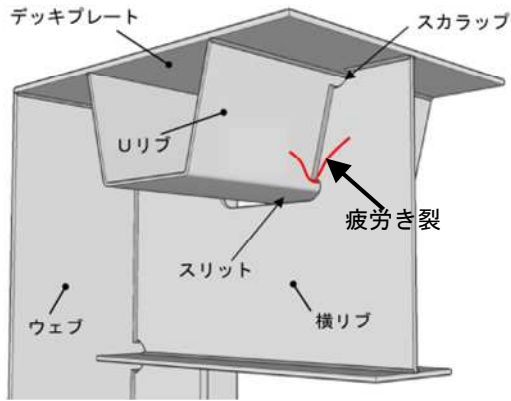


図-13 縦リブ・横リブ交差部の疲労き裂

そこで、スリット溶接部の疲労耐久性向上策として、スリット形状と溶接止端を改良する方法を検討した。

まず、交差部のスリット形状のみを変化させた FEM 解析を実施し、スリットまわりの局部応力挙動とスリット形状の関係を明らかにした (図-14)。タイプ A は、平成 14 年 (2002 年) の道路橋示方書の改定で構造詳細が示される以前のスリット形状である。タイプ B は、現行の道路橋示方書に標準図として示されているものである。タイプ C は、ユーロコード (構造設計基準体系) のものである。タイプ D は縦リブ底面を横リブに接合した構造であり、合理化鋼床版への適用例を参考にしたものである。タイプ E は、北米の実橋のものを参考にしたもので、スリットの開口部を大きくし、内側にリブが溶接されている構造である。タイプ F は、スリット開口部を大きくし、その部分で縦リブの局部変形を抑制できる構造とするとともに、縦リブ側面に接合する横リブスリット部分を下方まで延長し、新たに設けたスリット平行部に内リブと同じような効果を期待した構造である。

各荷重ケースの局部応力の変動挙動からケースごとに横リブ側と縦リブ側の局部応力範囲を算出し、それぞれ最大値を求めた。開口部を大きくしたタイプ E、F のスリット形状では、局部応力を 5~6 割程度に低減することができた 14)。

横リブ近傍に密閉ダイヤフラムが有る場合、スリットまわりの局部応力が増加する。図-14 では、密閉ダイヤフラムによる応力増分を茶色で示している。密閉ダイヤフラムの影響は、タイプ A,B,C において大きく、横リブ側で約 20%、縦リブ側で約 50%の応力増加となり、縦リブ側での影響が顕著であった。タイプ D,E では密閉ダイヤフラムによる応力の変化は小さい。タイプ F では、横リブ側で密閉ダイヤフラムの影響が見られるが、密閉ダイヤフラムを考慮してもタイプ A~C と比べて応力は小さく、疲労に対してより強い構造であると言える。

また、杉山ら 15)により、開口部を大きくしたスリット (以下、改良形状) の応力低減効果を FEM 解析で確認したうえで、従来形状と改良形状のスリットを有する実物大模型で疲労試験が実施されている (図-15)。

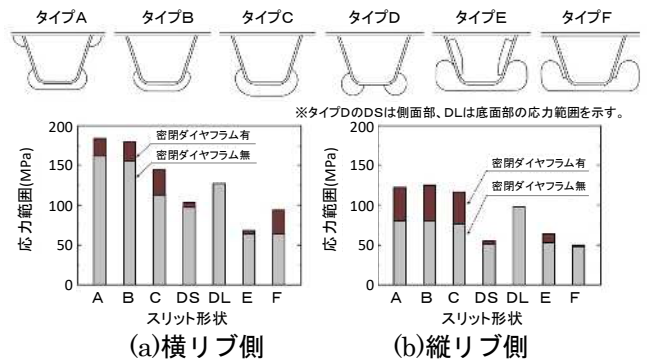


図-14 局部応力挙動とスリット形状の関係



(a) FEM 解析による局部応力の比較



(b) 疲労試験状況

図-15 実物大模型による疲労試験

従来形状は載荷回数 10 万回で疲労き裂が発見されたのに対し、改良形状は 400 万回に達してもどの部位からも疲労き裂が発生せず、疲労寿命が 40 倍以上となったと報告されている。

一方、改良形状は、製作時の切断や溶接の入熱により、擦り付け部の溶け落ちや変形が懸念される。橋建協では、レーザー切断あるいはプラズマ切断による切断性確認試験、および溶接姿勢、開先有無による溶接性確認試験（図-16）を実施した結果、擦り付け幅を 10mm 確保すれば製作施工性に問題ないことを確認した¹⁶⁾。

つぎに、スリット形状の改良のみでは、一部の重交通路線において、疲労寿命が 100 年を確保できない（80 年）との試算結果¹⁵⁾がある。その場合、グラインダー処理やピーニング処理等で溶接止端を改良して、さらなる疲労耐久性の向上を図る必要がある。

そこで、横リブ交差部に対して、溶接止端改良の有効性を検証するため、U リブウェブ ($t=6\text{mm}$) を主板、横リブ ($t=9\text{mm}$) を付加板とした面外ガセット溶接継手に対する曲げ疲労試験を実施した¹⁷⁾。その結果、まわし溶接部を対象にグラインダー処理とピーニング処理を行った場合、溶接ままに比べて疲労強度等級が 1 等級程度向上することを確認した（図-17）。

2.4 垂直補剛材上端部の対策

デッキと垂直補剛材溶接部の疲労き裂の発生要因は、垂直補剛材直上あるいは近傍を輪荷重が通過する際、デッキが鉛直方向に変形することを垂直補剛材が拘束することで溶接部近傍に応力集中が発生することによる¹⁾。

現行の道路橋示方書では、鋼床版の横桁・横リブに配置される垂直補剛材上端部はデッキと溶接しない構造としているが、主桁に配置される垂直補剛材については言及されておらず、一般的に垂直補剛材上端部はデッキと溶接されている。しかし、主桁の垂直補剛材上端部から疲労き裂が発生している事例が多数報告されていることから、新設橋梁を中心に主桁の垂直補剛材上端部をデッキと溶接しない構造（以下、上端カット）が採用されるケースが増えてきている（図-18）¹⁶⁾。上端カットにより疲労強度が向上すること



(a) 試験体 (b) まわし溶接部
図-16 改良スリット形状の溶接性確認試験

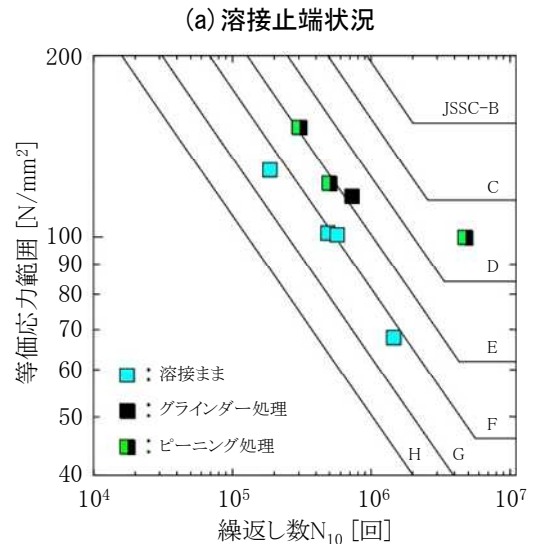
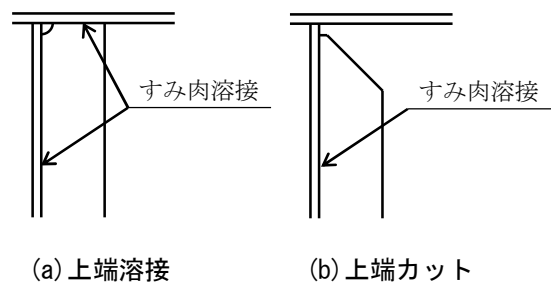


図-17 面外ガセット溶接継手の疲労試験結果



(a) 上端溶接 (b) 上端カット
図-18 垂直補剛材上端部の構造

を示すために、橋建協では、解析的・実験的な研究を進めている。なお、上端カットの適用にあたっては、主桁ウェブのせん断座屈に対する安全性の検証も必要となるが、文献(16),(18),(19)で報告したように、上端カットのギャップ量がせん断座屈の耐荷力特性に与える影響は少ないと考えている。また、文献(18)より、上端カットは曲げ圧縮に対する座屈耐荷力にもほとんど影響しないとされている。

解析的検討を行った結果、車両の走行位置にもよるが、上端カット構造は上端溶接構造より疲労寿命が概ね4~50倍に増大することを確認した²⁰⁾。応力繰り返し数に等価応力範囲の3乗を乗じた値を疲労被害と定義し、大型車の輪荷重が主桁ウェブ直上を通過した際に被る疲労被害の比率を図-19に示す。なお、縦軸は上端溶接のデッキ側止端部の疲労被害を1として無次元化している。

実験的検討では、部分模型を用いた疲労試験を実施している²¹⁾。部分模型(図-20)は、実橋梁における局部応力の解析結果を反映し、同様の応力を再現できるように設計した。荷重条件は、溶接止端部の主応力の大きさとその近傍の応力分布が一致するように設定した。溶接止端から10mm位置のひずみ計測値を用いてき裂が母材に進化した時点の応力範囲と荷重回数の関係をS-N曲線上にプロットすると、上端カットの方が疲労強度等級は概ね1等級以上高い結果であった(図-21)。なお、図中のWは上端溶接、Cは上端カットを示している。

昨年度、実物大試験体を用いた荷重試験と、それを再現したFEM解析を実施し、上端カットにより疲労強度が向上するという結果が得られている。

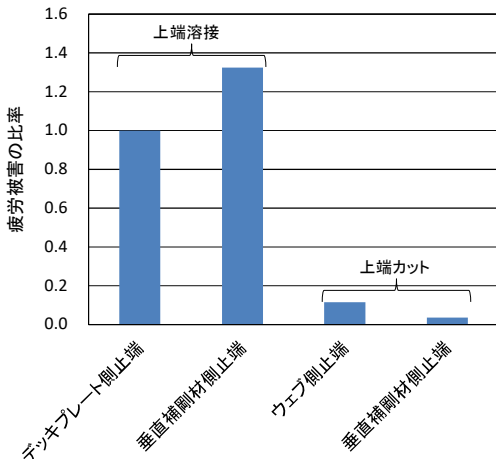


図-19 上端溶接と上端カットの疲労被害

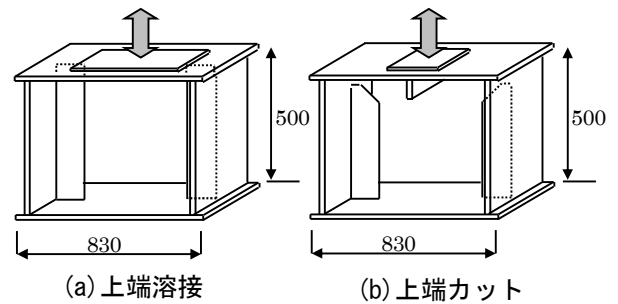


図-20 部分模型疲労試験体

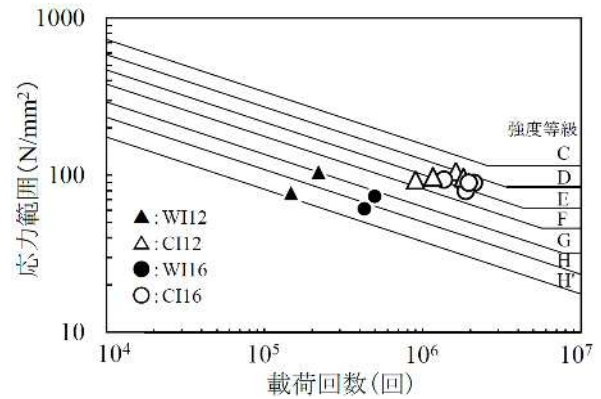


図-21 荷重回数と応力範囲の関係²¹⁾

3. 取替え鋼床版

3.1 取替え鋼床版の特長と留意点

鋼道路橋のRC床版は、設計基準の改定や耐久性向上技術により、現在では100年を超える耐用年数を有するとされている。一方で、旧基準で施工されたRC床版では、材料劣化や車両荷重・交通量の増大、架橋地点の環境などの複合的要因によって劣化損傷が進む場合があり、RC床版の更新工事が増加している。

床版更新工事に用いられる取替え用床版は種々あるが、その中の一つである鋼床版は、軽量で現場工期が短いなどの利点を有した床版形式で、劣化損傷が進行したRC床版の取替え用床版としての実績もあり、今後の適用拡大が期待できる。

実際、取替え鋼床版は、一般国道や都道府県道、市道だけでも60橋を超える施工実績があることを橋建協での実績調査により確認している。

(1) 取替え鋼床版の特長

- まず、取替え鋼床版の特長の一部を以下に示す。
 - ▶ 軽量であるため床版死荷重を低減でき、床版を支持する鋼桁や下部構造の負担を軽減できる。

- ▶ 部材をあらかじめ工場で製作して現場で組み立てるプレファブ形式のため、現場工程の短縮とそれに伴う交通規制を軽減できる。
- ▶ 幅員方向に分割して施工することで、車両通行帯や歩道を工事期間中において常時確保できる。

ここで、床版取替え時に床版死荷重を軽量化することの有益性について追記しておく。建設後 50 年を超えるような RC 床版を有する鋼道路橋は、主構造・支承・下部構造などの設計において現行基準より小さな活荷重、地震力が用いられている。その状態の各既設構造物に、旧基準と比較して床版が厚くなる現行基準で設計したコンクリート系床版を取替え床版に用いると、死荷重が増大し、鋼桁や下部構造などの補強が大がかりになる。そこで、軽量の鋼床版を採用することによって、総合的なコスト削減が可能となる。

(2) 設計・施工上の留意点

施工計画作成時の事前の調査項目として、交通量・迂回路の有無・既設構造物の損傷度・床組みの細部構造などを調査する必要がある。床版取替え工事では、迂回路確保の可否や車線の切り回し、周辺道路への影響などの現場諸条件をまず始めに把握することが重要である。そして、その情報を基にして施工幅員や作業時間帯を決定し、設計・施工を計画する流れになる。現場工事の難易度は、全面通行止めを行った上で全幅員一括取替えが最も施工し易いが、そのような好条件の現場は少なく幅員分割施工になる場合が多いため、緻密な施工計画と施工管理が求められる。また、既設桁の設計図書が現存しない場合は、支間長・桁間隔・そり・現場継手位置・垂直補剛材間隔などを計測し、取替え鋼床版の設計・製作に反映することで、既設桁と取替え鋼床版の取合い精度の向上を図る。加えて、既設 RC 床版撤去時においてコンクリートカッターなどによる既設桁の損傷を防ぐための撤去計画にも計測結果を反映する必要がある。その他にも、既設 RC 床版を撤去する前後で既設桁の高さを計測し、その戻り量を確認することは、計画路面高の規格値を満足させるための有用な情報となる。そして、施工時の安全性を確保するために、既設 RC 床版や既設桁などの耐荷力の確認も重要となる。

次に、橋建協での現地調査で得られた情報を基にし

た留意点を以下に示す。目視による簡易調査ではあるが、橋面上でアスファルト舗装のひび割れが見受けられ、そのひび割れは鋼床版デッキ継手部（橋直方向）に沿って発生していた事例がある（写真-2）。ひび割れの発生位置から、当該鋼床版特有のデッキ継手形式（引張接合など）に起因するものと推定されるため、デッキ継手形式の選定時に注意を要する。また、RC 床版を部分的に取り替えた事例で、新旧床版の接合部に漏水を確認した（写真-3）。そのため、新旧床版の接合部に配慮した防水システム（防水層、舗装、排水設備）の構築が課題として挙げられる。また、大型車混入率の高い重交通路線の取替え鋼床版では、疲労耐久性に配慮した構造詳細や供用後の維持管理（溶接部の点検や塗替え塗装など）を想定した構造とすることが留意すべき事項となる。

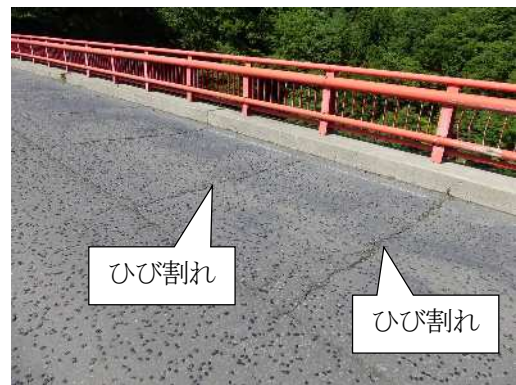


写真-2 舗装のひび割れ事例

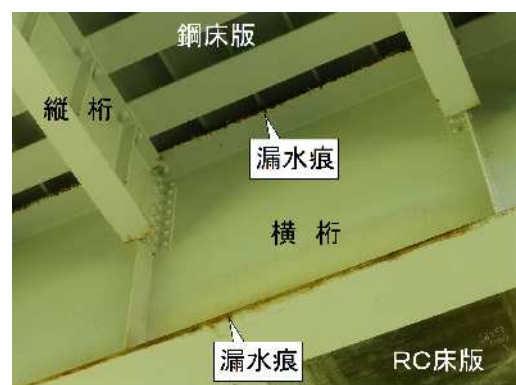


写真-3 既設 RC 床版と鋼床版接合部からの漏水
(横桁上で新旧床版を接合している)

3.2 既設桁との接合方法

既設桁と取替え鋼床版の接合方法には、既設桁と取

替え鋼床版を全長にわたって高力ボルトで接合する「連続接合」と、取替え鋼床版の横リブなどが既設桁と交差する箇所のみを部分的に接合する「断続接合」がある。取替え鋼床版の接合には、現場での施工性を考慮して、ライナープレートを用いた高力ボルトによる断続接合とすることが望ましい(図-22)。高力ボルトによる接合を推奨する理由としては、高力ボルトであれば品質確保が比較的容易で強度的な信頼度は高いためである。溶接接合を採用した場合、供用中での現場施工となるため、振動(常時微動や交通振動)などによる接合部の品質低下が懸念される。また、ライナープレートを使用する利点は、既設桁の現場継手部(添接板)やスラブアンカーなどのずれ止め切断後の残存部との干渉を回避でき、既設桁の板厚差や横断勾配、製作・施工誤差の調整を現場施工時に実施できることなどが挙げられる。断続接合を採用することで、既設桁の孔明け・高力ボルト締付け作業が減り現場作業の省力化が可能となる。ただし、既設桁の構造形式(非合成桁、活荷重合成桁、死活荷重合成桁)によって断続接合の適用性を検討する必要がある。また、ずれ止め残存部(既設桁と取替え鋼床版との隙間部分)の防食方法についても、現場での施工条件を考慮した上で事前に仕様(塗装や樹脂充填など)を決定しておく必要がある。

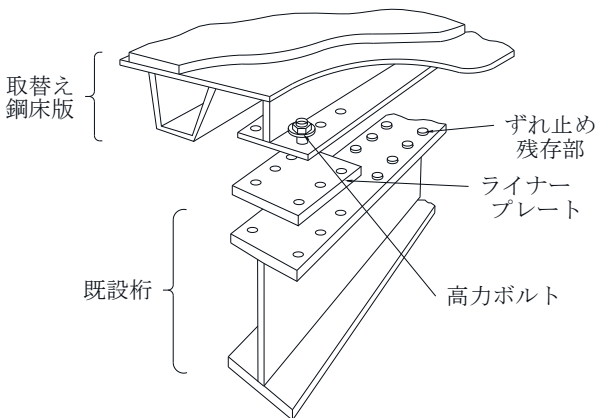


図-22 ライナープレート使用事例(紅楓橋²²⁾)

3.3 接合方法の合理化検討

橋建協では、3.2にも述べた取替え鋼床版と既設桁の接合について、高力ボルトを用いた合理的な接合方

法を検討している。特に、既設橋梁が合成桁橋として設計されている場合は、必然的に高力ボルト本数が多く、より合理的な設計法が重要となる。そこで、「合成桁の設計例と解説」(橋建協発行)²³⁾に例示される単純合成桁橋(図-23)を対象に取替え鋼床版を採用した場合を想定して、主桁上フランジの高力ボルト接合部に対して検討^{24,25)}を実施している。その検討の一つとして、取替え鋼床版実橋モデルの既設主桁と高力ボルト接合部に着目し、活荷重(L荷重)、死荷重(後死荷重)、温度差を考慮した実橋FEM解析と一般的な橋梁の設計に用いられる格子解析を実施し、既設主桁と取替え鋼床版接合部の高力ボルトの合理的な必要本数を検討した。

単純合成桁の解析対象は支間長33mの2車線4本主桁の道路橋である。主桁上フランジは310×22mm、ウェブは1700×9mm、下フランジは550×32mmである。取り替えるべきRC床版の厚さは220mmとした。鋼床版は縦リブに平リブを用いた開断面形状のものとした。鋼床版のデッキ厚は12mm、平リブの高さは200mm、厚さは10mmとした。平リブの設置間隔は324mmである。図-24に床版取替え後の橋梁の断面図を示す。横リブは1250~1700mm間隔で設置して

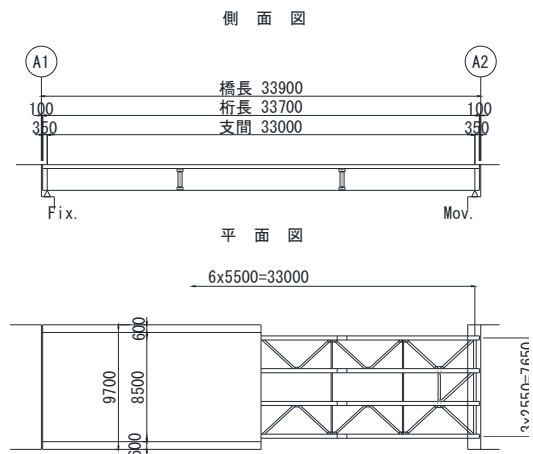


図-23 単純合成桁橋

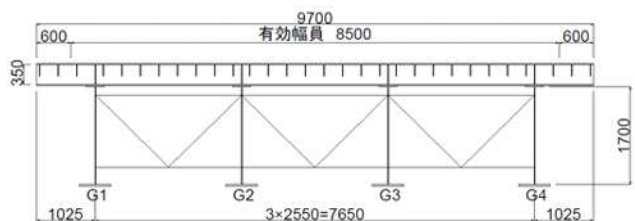


図-24 断面図

いる。横リブの下フランジの厚さと幅は 12mm と 210mm であり、ウェブの厚さと高さは 13mm と 350mm である。この鋼床版の下フランジを主桁の上フランジにボルト接合する。実橋 FEM 解析ではボルトは、1 接合部当たり 4 本と仮定しモデル化した (図-25)。

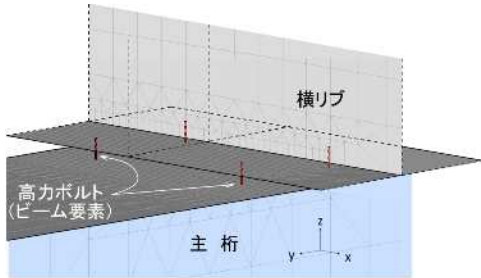


図-25 接合部の高力ボルト(ビーム要素)を模擬したモデル図

実橋 FEM 解析とビーム要素でモデル化した格子解析には、解析コード MSC/MD Nastran2014.1 を使用した。格子解析のビーム要素の剛性に床版有効幅の有無と鋼床版横リブ剛性の有無を考慮した 4 つの格子解析モデルに活荷重 (L 荷重 10 種類) と死荷重 (地覆, 防護柵, 舗装), 温度差を载荷し, 水平せん断力を算出した。高力ボルト 1 本当たりの許容せん断耐力は 48.2kN とした。実橋 FEM 解析で接合部のそれぞれのボルト群の中の最大せん断力を用いて必要ボルト本数を計算したところ, 格子解析から求めた必要ボルト本数より多くなった。そこで, 接合部全体 (ボルト群) でせん断力に抵抗すると考え, ボルト群の平均せん断力で必要ボルト本数を試算したところ, 格子解析から求めた必要ボルト本数とほぼ同じとなった (図-26)。ボルト 1 本ずつに作用するせん断力を考える場合には, 桁端部近傍において格子解析より得られるボルト本数を割り増すことが考えられる。その場合には, 図-26 からは 1.5 倍程度の割り増しが必要と考えられる。なお, 本検討では平面保持の仮定が成立する可能性を確認しながら進めている。

合成単純桁を対象とした FEM 解析結果では既設主桁上フランジと横リブ接合部のボルト群の平均せん断力でボルト本数を算出すれば, 格子解析と同程度の必要ボルト本数となることを示した。

現在は, 連続桁の検討を行い, 単純桁と同様な手法で必要ボルト本数を求めることができる可能性があ

ることを確認している。引き続き, 既設桁と取替え鋼床版横リブとの接合部の応力性状などを対象に検討を行っている。

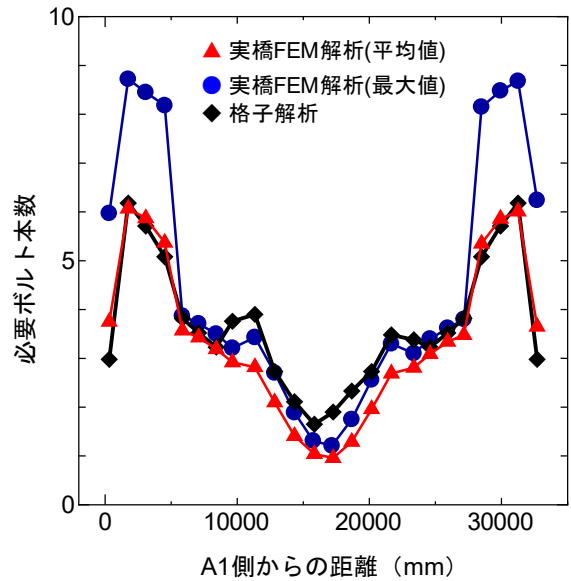


図-26 単純合成桁の必要ボルト本数

4. おわりに

これまでの知見を踏まえた疲労設計の導入により, 鋼床版における疲労問題は大幅に改善されているものの, 一部の重交通路線では, 疲労耐久性が懸念されているのも事実である。また, 疲労設計が構造詳細の規定に留まっており, 橋梁ごとの条件 (交通条件, 構造詳細, 経済性など) を踏まえた最適な疲労設計となっていないのが現状である。このような状況を踏まえ, 橋建協では, この懸念事項を解決すべく, 官学と協力して高耐久化へ向けた研究活動を行っており, 今後は, 橋梁ごとに要求される条件を考慮できる疲労設計の確立を目指していく予定である。

また, ニーズの高まりつつある取替え鋼床版についても高耐久化を図りつつ, 合理的な接合方法について研究を進め, 鋼床版の更なる発展に寄与していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 土木学会: 鋼床版の疲労 2010 年改訂版, 2010.12
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2017.11

- 3) 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
- 4) 田畑晶子, 杉山裕樹, 金治英貞, 石井博典, 山本幸司, 坂野昌弘: バルブリップ鋼床版の横リブ交差部の構造改良, 土木学会第 67 回年次学術講演会, I-290, 2012
- 5) 有馬安倫, 田井政行, 下里哲弘, 片野俊一, 井口進: 長スパン化したバルブリップ鋼床版の疲労強度改善に関する研究, 土木学会西部支部沖縄会, 第 8 回技術研究発表会, 2019
- 6) 土木学会鋼構造委員会: 道路橋床版の要求性能と維持管理技術, 2008.6
- 7) 本州四国連絡橋公団: 本州四国連絡橋 橋面舗装基準 (案), 1983.4
- 8) 奥村学, 小笠原照夫, 齊藤史朗, 井口進, 片野俊一, 内田大介: 閉断面リップ鋼床版の舗装ひび割れ抑制効果に関する解析的研究, 土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集, 2020.9
- 9) 内田大介: 鋼床版の主桁複板上におけるアスファルト舗装のひび割れに関する解析的検討, 土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集, 2020.9
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人土木研究所, (社) 日本橋梁建設協会: 共同研究報告書「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」, 国土技術政策総合研究所資料第 608 号, 2010.9
- 11) 森猛, 金子想, 林暢彦, 内田大介, 小笠原照夫: 鋼床版デッキ進展き裂の起点を対象とした応力影響面とその利用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.21-31, 2017.
- 12) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室: 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討, 土木研究所資料第 2539 号, 1988.
- 13) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3
- 14) 半治剛, 加藤啓都, 館石和雄, 崔誠珉, 平山繁幸: 閉断面リップを有する鋼床版の横リブスリット部の局部応力特性, 構造工学論文集 Vol.59A, pp.781 - 789, 2013.3
- 15) 杉山裕樹, 田畑晶子, 春日井俊博, 石井博典, 井口進, 清川昇悟, 池末和隆: 鋼床版の U リブ横リブ交差部における下側スリット部の疲労耐久性向上構造の検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.1, pp.18 - 30, 2014.
- 16) (独)土木研究所, (一社)日本橋梁建設協会: 鋼床版構造の耐久性向上に関する共同研究, 共同研究報告書 第 504 号, 2019.1
- 17) 半治剛, 伊藤あゆみ, 館石和雄, 清水優: 鋼床版横リブスリット溶接部の疲労強度向上法に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 卷, pp.657 - 662, 2016.11
- 18) 山本泰幹, 齊藤亮, 川畑篤敬, 横山薫, 矢ヶ部彰, 江崎正浩: 鋼床版デッキプレートと垂直補剛材溶接部の改良ディテールの腹板補剛機能の検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演集, CS10-015, pp.329-330, 2005.9
- 19) 齊藤史朗, 松下裕明, 奥村学, 村越潤, 佐藤歩, 原田英明: 鋼床版垂直補剛材上端部のギャップ量が補剛機能に与える影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演集, I-544, pp.1087-1088, 2016.9
- 20) 内田大介, 齊藤史朗, 井口進, 村越潤: 鋼床版垂直補剛材溶接部の局部応力に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.562-575, 2020.3
- 21) 松永涼馬, 内田大介, 村越潤, 井口進, 亀谷倫太郎, 齊藤史朗, 岸祐介: 鋼床版垂直補剛材における上端カットによる疲労強度の向上効果, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演集, I-214, 2019.9
- 22) 杉崎守, 小林久夫: 鋼床版張替工法の実例と改良, IHI 技報, No.31, pp.67-73, 1991.3
- 23) 日本橋梁建設協会: 合成桁の設計例と解説, 2005.1.
- 24) 林暢彦, 内田大介, 井口進, 小笠原照夫, 森猛, 村田直翔: 取替え鋼床版と既設主桁の接合部に関する一検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集, I-372, 2018.8.
- 25) 林暢彦, 井口進, 小笠原照夫, 内田大介, 森猛, 中山汰一: 取替え鋼床版と既設主桁の接合部の高力ボルト本数に関する検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会概要集, I-349, 2019.9.