

## 鋼床版疲労損傷補修補強手法検討

(財) 阪神高速道路管理技術センター 川上 順子  
神戸管理部 調査設計グループ 米谷作記子

### 要 旨

近年、重交通路線を中心に鋼床版の疲労損傷が報告されており、その要因を明確にするとともに疲労耐久性に優れた補修補強方法の確立が求められている。本研究では様々な部位に発生している疲労損傷パターンのうち、デッキプレートとUトラフ縦リブの溶接部き裂、デッキプレートと垂直補剛材溶接部のき裂、バルブ縦リブを有する鋼床版横リブとデッキプレートの溶接部き裂について損傷要因分析及び有効な補修補強手法の検討を行った。

**キーワード:** 鋼床版, 疲労損傷, Uリブ, バルブリブ, 垂直補剛材, 溶接補修, 半円切欠き処理

### はじめに

近年、重交通路線を中心に鋼床版の疲労損傷が報告されており、その要因を明確にするとともに疲労耐久性に優れた補修補強方法の確立が求められている。本稿では様々な部位に発生している疲労損傷パターンのうち、特に交通への影響を与えると考えられるデッキプレートへのき裂進展が懸念される損傷について、損傷パターンごとに損傷要因分析および有効な補修補強手法の検討結果について報告する。具体的にはデッキプレートとUトラフ縦リブ溶接部のき裂、デッキプレートと垂直補剛材溶接部のき裂、バルブ縦リブを有する鋼床版の横リブとデッキプレート溶接部のき裂に対する検討について報告する。

#### 1. デッキプレートとUトラフ縦リブ溶接部のき裂に対する検討

##### 1-1 損傷桁の概要

平成 14 年度に、図-1 に示すようなデッキプレートとUトラフ縦リブ(以下 U リブという)溶接部のき裂損傷が一橋発見された。

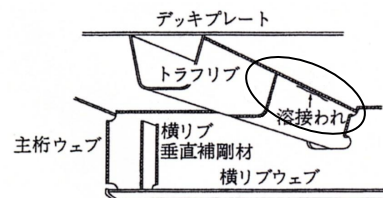
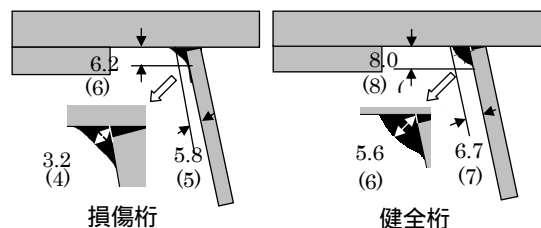


図-1 損傷概要図

損傷桁は平成 8 年道路橋示方書により設計された橋長 34m の単純鋼床版 I 桁橋であり、非常駐車帯を有するため、全幅は 17.6~23.8m である。デッキプレート厚は 12mm、U リブの板厚は 6mm であり、溶接部はサイズ 5mm のすみ肉溶接となっている。兵庫県南部地震後に再構築され平成 9 年度に供用再開したが、平成 14 年度の定期点検において損傷が発見された。き裂損傷はデッキプレートと U リブの縦方向溶接部に 32 箇所発生し、車輪が直接載荷する位置の直下に集中している。損傷は同一工場で同時に施工した同形式の橋梁のうち 1 橋にのみ発見されている。

## 1-2 損傷要因分析

デッキプレートと U リブ溶接部に着目した場合、輪荷重に伴う部材の局所的な板曲げ変形が溶接部に発生し、これにより大きな曲げ応力を与えることが既に報告されており、当該損傷もこの現象によるものと考えられる。しかし、これまでの損傷事例では 20 年以上経過後に発現していることが多く、交通量との関係にもよるが、これまでよりかなり早期に損傷していることから、何らかの促進要因が働いたことが考えられるため、詳細な損傷調査を実施した。損傷調査は、損傷状況の把握（溶接部の形状寸法の把握、磁粉探傷試験によるき裂寸法計測、超音波探傷試験によるデッキへのき裂進展有無の確認）、サンプリング調査（SEM 調査、マクロ、ミクロ試験、ピッカース硬さ測定）、発生応力計測（試験走行による動的測定、24 時間応力頻度測定）を実施した。調査結果からは、損傷桁の U リブ溶接部のサイズは設計値 5mm を満たしているものの、のど厚は 4~6mm 程度で隣接健全桁と比較して 1~2mm 程度小さい（図-2）。また、溶込み深さも最小 0.3mm と小さいことがわかった（図-3）。また、溶接断面観察の結果、低温割れや高温割れ、および疲労き裂を誘発するような溶接欠陥は見られなかった。き裂破断面には、ストライエーション状模様が現れており溶接ルート部を起点とし、のど厚を貫通している疲労き裂の特長を呈している。応力計測の結果からは損傷発生により一部に応力の増加傾向が見られたが、損傷桁と健全桁の各部の応力に顕著な差は見られなかった。しかし、のど厚寸法を考慮してのど厚部応力を推定し、既往の研究<sup>1)</sup>を参考に疲労寿命を予測した場合、損傷桁の U リブ溶接部の疲労寿命は 10 年以内となった。以上より、本橋に生じたき裂は溶接欠陥によるものではなく、溶接ルート部に活荷重による応力が繰り返し作用したことによる疲労き裂と考えられた。しかし供用後このように早期に進展した原因としては、当該溶接部におけるのど断面が相対的に小さかったことにより、高レベルの応力状態となっていたことが考えられた。



単位(mm) 数字は型取り、カッコ内はゲージ測定結果を示す

図-2 溶接寸法計測結果

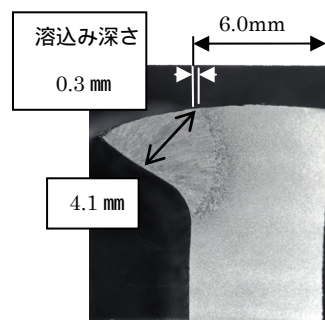


図-3 溶接部断面写真

## 1-3 補修補強検討

今回の損傷が溶接部のど厚の不足に起因していることが推測されることから、補修補強方法については、き裂部の補修はガウジング等により損傷部を除去した後再溶接、未損傷部の予防保全（補強）は溶接に増盛りを施し、必要のど厚を確保する方法を中心に検討を進めることとした。この溶接による補修補強工法は、当該路線が重交通路線であり迂回する代替路線がないことから交通遮断を極力避ける必要があったため、桁下面からの施工が可能な工法として選択された。なお、この工法の課題は、難易度の高い上向き溶接の施工性が挙げられる。このため、実物を模した供試体を用いた施工試験を実施した。また、補修後の疲労強度向上効果の確認のため、小型供試体による疲労試験を行った。

### (1) 疲労試験

今回損傷を受けた溶接部の溶接サイズやのど厚の調査結果を元にこれらに対する疲労試験を行い、「鋼床版の疲労（1990.9 土木学会）」に紹介されている牛尾らによる既往研究<sup>1)</sup>により提唱されている曲げを受ける部材に対する S-N 曲線の適用性を検討した。疲労試験は、損傷桁における溶接のど厚 4mm、健全桁におけるのど厚 6mm、の

ど厚 4mm に対して 2mm の増盛溶接を施したものの 3 タイプの溶接部を再現した小型供試体各 3 体について実施した (図-4)．図-5 に既往の S-N 曲線に実験結果をプロットしたものを示す．実験値は既往の研究の S-N 曲線によく整合しており，本橋においてもこの曲線が適用できることを確認するとともに，増盛溶接の有効性も確認した．現地で測定した応力頻度測定の結果を用いてこの S-N 曲線から損傷桁の疲労寿命を算定すると 1 年程度と実現象と相応の値を示しており，2mm 程度のど厚を増加させることにより疲労寿命は数十倍に延びる結果となった．よって補修補強においてはど厚を 6mm 確保し，疲労寿命を延長させることとした．

### (2) 再溶接施工性試験

現況構造を再現した供試体を用いて溶接施工性試験を工場にて実施し，溶接除去，溶接とも作業性に問題がないことを確認した．また溶接によるデッキ上面の舗装への温度影響も僅かであることを確認した．

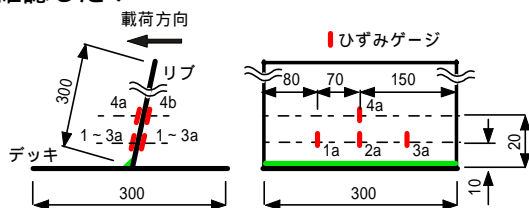
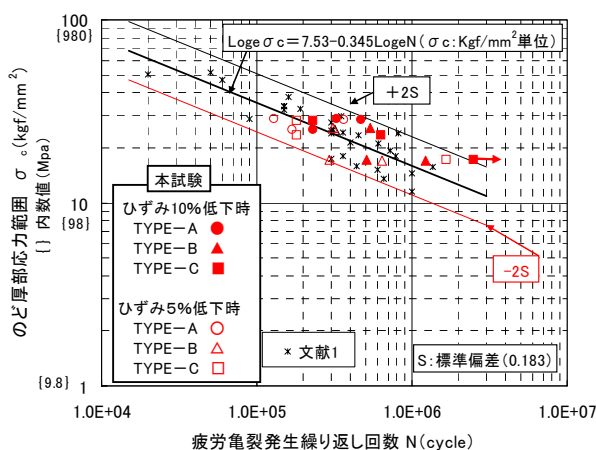


図-4 小型試験体概要図



種類	試験片数	のど厚目標(溶接条件)
TYPE-A	3	4mm(被覆アーク溶接)
TYPE-B	3	6mm(CO2半自動溶接)
TYPE-C	3	TYPE-Aに2mm増盛り(増盛りはCO2半自動溶接)

図-5 疲労試験結果

### 1-3 供用下での溶接施工法検討

溶接補修の効果と作業性については確認を行ったが，現地では供用下における施工が余儀なくされることから，施工中に発生する高温割れや種々の溶接欠陥，施工後に生じる低温割れ等が懸念されるため，適切な施工方法について検討した．また現地において振動等の計測を行ってその実施方法についても検討した．

#### (1) 基本方針

「供用下にある鋼構造物の溶接施工指針(案)」<sup>2)</sup>(以下，指針という)に基づき，現場の溶接に関する仕様(溶接方法，溶接材料，直上交通規制の有無，補修単位)を決定することとした．指針では，振動による溶接欠陥および変動荷重下での高温割れが発生しないよう，供用下の溶接施工条件について規定している．施工に当たっては，現地にて溶接部の振動計測を行いその特性を把握し，溶接条件を決定した後，実際に施工を行う溶接者による溶接施工試験，技量試験を実施することとした．また溶接施工条件を決定する上では，溶接部の振動加速度および開口変位について管理値を設けている．

#### (2) 計測結果と管理値との比較

##### 1) 高温割れ発生限界値とき裂開口変位の比較

実測のき裂開口変位と高温割れ発生限界値を比較して図-6 に示す．横軸は継手拘束度を示しているが，道路橋示方書において橋梁継手の平均的な拘束度として想定されている板厚  $t$  の 200 倍を適用し，Uリブ厚 6mm から算定される値  $R_p=1.2 \text{ kN/mm} \cdot \text{mm}$  を安全側に評価し， $R_p=2 \text{ kN/mm} \cdot \text{mm}$  の際の開口変位で管理することとした．一般的な溶接棒である D-3 (D5816 相当) の管理限界線に対し実測では一部限界値を越えたものの，ほぼ管理値付近以下の値となっている．

##### 2) 振動加速度と溶接作業管理限界値の比較

24 時間の頻度分析結果を用いて，き裂部の振動加速度と溶接作業の管理限界値を比較したものを図-7 に示す．実測値は低周波数域 (3Hz) の振動と，高周波数域 (45Hz) の振動をそれぞれプロットした．実測の最大値の振動加速度値は管理限界を超えていたが，この最大値が発生する頻

度は一日のうちごく僅かであるため、低頻度の値を除外して評価した。2, L5, L10, L20 における発生確率のレンジ上端値はそれぞれ=95.4%, 95%, 90%, 80%である。これにより高周波数域ではほぼ管理限界値内に収まり、低周波数域ではL20で評価した場合、管理限界値に収まることわかる。

### 3) 溶接条件の決定

開口変位については一部管理限界値を超えるものの、直上に車両の通行がない場合ほぼ変位が生じないことから、直上交通規制を実施すれば問題がないと考えられる。しかし、振動については隣接車線を車両が通行すると同様に発生するため、交通規制による抑制は望めない。管理限界値を超える可能性は振動加速度の実測結果から20%程度あることから、この程度の頻度での再補修（溶接中に大きな振動を受けた場合その箇所を記録し、溶接をやり直す等）を前提に溶接補修を実施することとした。

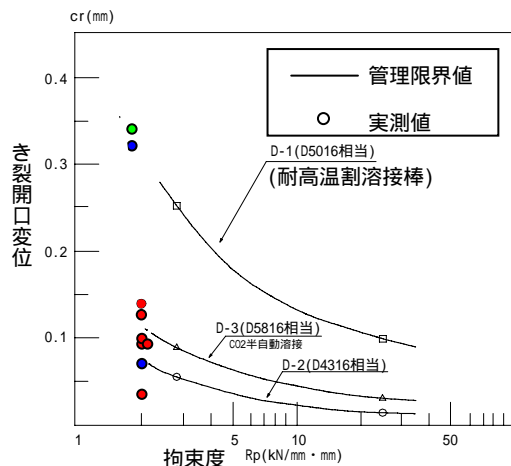


図-6 高温割れ発生限界値と実測結果

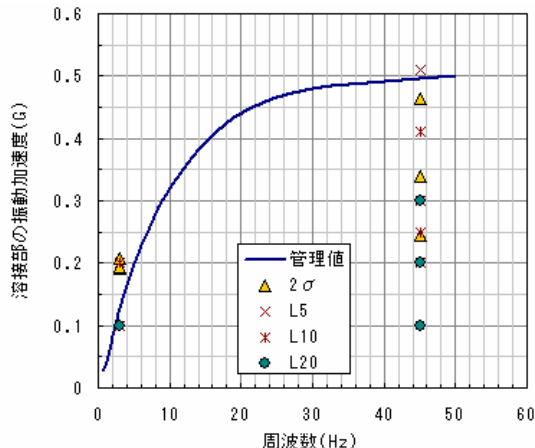


図-7 溶接作業管理限界値と実測結果

## 2. デッキプレートと垂直補剛材溶接部き裂に対する検討

デッキプレートと垂直補剛材溶接部に生じるき裂損傷は、輪荷重載荷によるデッキプレートの局部変形を垂直補剛材が拘束することによる溶接部先端の応力集中によるものと考えられている。既往の研究<sup>3)</sup>において、この部分の応力緩和に効果的な補強案が提案されているが、今回、新たな補修案として、既設垂直補剛材への半円切り欠きが損傷部の応力を緩和するという平成16年度の検討結果<sup>4)</sup>を参考に、静的載荷試験および定点疲労試験により応力性状の確認および、疲労耐久性の確認を行った。

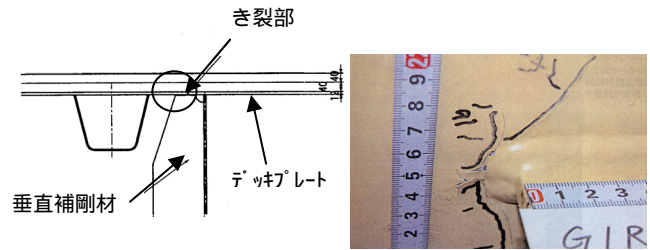


図-8 損傷概要図および損傷写真

### 2-1 試験方法

図-9 に試験体の形状と寸法を示す。試験体は、4ヶ所の試験部を有している。このうち R1-R, R1-L, R2-L 試験部を用いて静的載荷試験により現況構造の応力性状を確認の後、定点疲労試験を実施し、き裂発生後の損傷対策（応力緩和、き裂進展防止）効果の確認を行った<sup>5)</sup>。

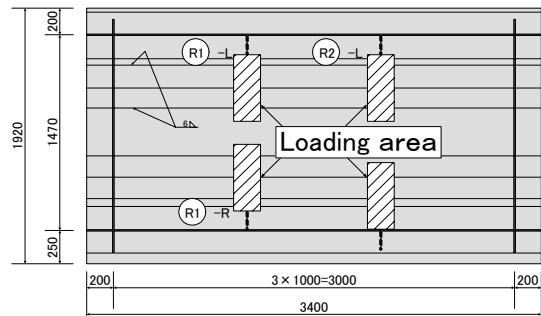


図-9-1 試験体概要図（平面図）



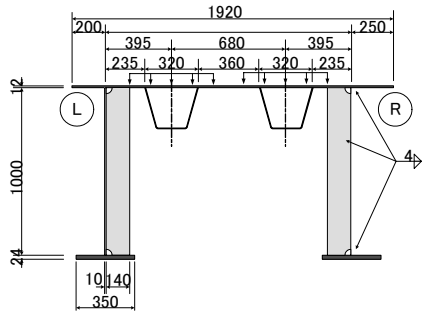


図-9-2 試験体概要図（断面図）

## 2-2 現構造の応力性状・疲労挙動の確認

### (1) 静的荷重試験結果

垂直補剛材溶接部応力は、図-10 に示すように解析では垂直補剛材コバ面の応力がデッキ下面の応力に比べて小さい値を示しているが、実測では垂直補剛材コバ面の応力の方がデッキ下面よりも大きい値を示している場合がある。荷重位置による発生応力の違いについては、図-11 に示すように垂直補剛材を外した位置に荷重した場合（荷重位置②）の方が、より着目部に大きな応力が生じることを確認した。

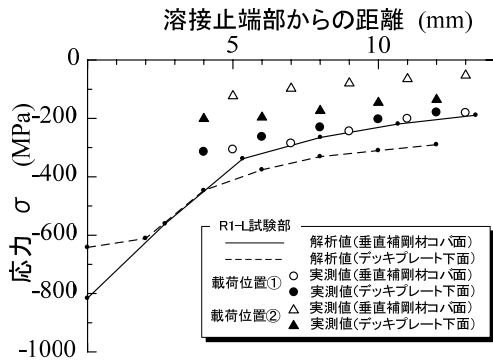


図-10 解析値と実績値の比較（R1-L部、P=100kN）

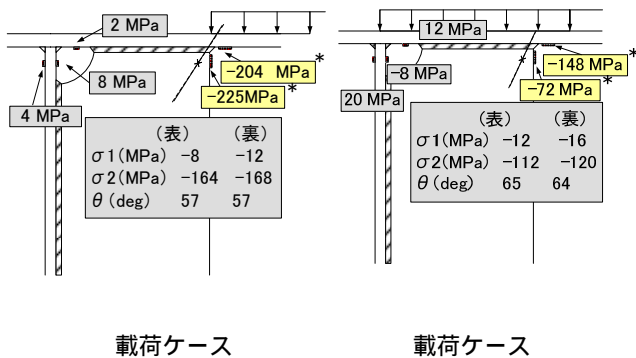


図-11 静的荷重試験結果（R1-L部、P=100kN）

### (2) 疲労試験結果

荷重範囲は  $P=160\text{kN}$ （片側  $P=80\text{kN}$ ，載荷回数  $N=100$  万回）， $P=200\text{kN}$ （片側  $P=100\text{kN}$ ， $N=70$  万回）， $P=280\text{kN}$ （片側  $P=140\text{kN}$ ， $N=7$  万回）にて実施した。き裂検出方法は磁粉探傷，浸透探傷，目視を併用して行った。疲労き裂は開始から載荷回数  $N=16$  万回（ $P=160\text{kN}$ ）で，R1-R 試験部の補剛材側で 10mm，デッキ側溶接止端で 5mm，および R1-L 試験部の補剛材側溶接止端で 3mm 程度のき裂が発生しているのを確認した（図-12）。き裂発生確認後，段階的に載荷荷重を増加させ，進展状況を継続して観測した。垂直補剛材側の疲労き裂はコバ面から側面に回った後，進展が遅くなっている。デッキ側のき裂は止端部に沿って進展した後，母材部に進展し，デッキを貫通した。デッキ側に発生した疲労き裂は徐々に進展しているが，垂直補剛材側に発生したき裂はほとんど進展していない（図-14）。

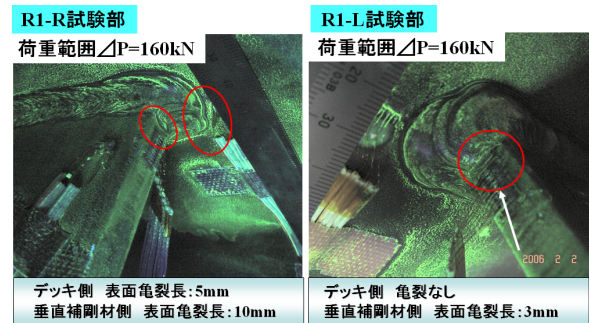


図-12 き裂発生状況

## 2-3 半円切欠き処理による応力低減効果・疲労耐久性確認

### (1) 静的荷重試験結果

き裂発生後，疲労損傷対策として各垂直補剛材に半円切欠き処理を施し，更にデッキ側に発生したき裂がデッキプレートに進展した R1-R 試験部ではそのき裂の先端にストップホールを施した。図-13 に載荷荷重  $P=100\text{kN}$  時の R2-L 試験部の半円切欠き前後の静的荷重試験結果を示す。半円切欠きにより，補剛材上端部の応力が約 2/3 に低減し，補剛材側溶接止端の応力はほぼ 0MPa となった。半円切欠き部では 224MPa の応力が発生している。

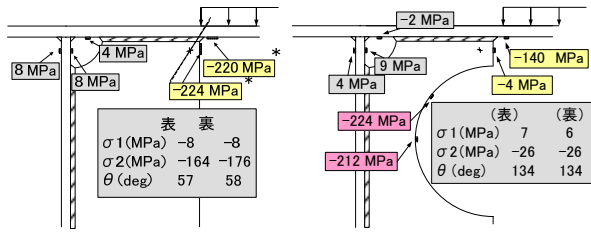


図-13 静的試験結果 (R2-L 部、 P=100kN)

### (2) 疲労試験結果

図-14 に各き裂の進展曲線を示す。損傷対策を実施後は R2 载荷を 100 万回行った後、R1 の再载荷を 165 万回行い、疲労試験を終了した。どちらの場合も荷重範囲は  $P=280\text{kN}$  である。損傷対策前は補剛材側よりもデッキ側溶接止端部より発生したき裂の方が進展していた。しかし損傷対策実施後はデッキ側止端部に生じたき裂は、半円切欠きによりほとんど進展していない。デッキプレートに進展し貫通するような大きなき裂 (R1-R デッキ側き裂) も、半円切欠きとストップホールを併用することにより進展を完全に防止できた。一方、補剛材止端部に発生したき裂は半円切欠き後も成長しデッキプレートに進展するが、その後進展が著しく遅くなっている。

## 3. 横リブとデッキプレート溶接部き裂に対する検討

### 3-1 損傷の概要

平成 14 年度定期点検において供用 35 年を経た 3 径間連続鋼床版箱桁橋において、横リブと

バルブ縦リブ交差部のスカ - ラップ下側の廻し溶接部からき裂が多数発見された。損傷要因は輪荷重载荷に伴うスカ - ラップへの応力集中と考えられたため<sup>6)</sup>、平成 15 年度に山形鋼を縦リブと横リブにボルト添接 (L 型アングルあて板) することにより応力緩和する手法を用いて補修工事を実施したが、その後スカ - ラップ上側の廻し溶接部においてもき裂が発生しているのが確認された (数は少ないが、未補強部分にも発生している)。そこで本検討では、先に行った補強の、新たな疲労損傷 (上側廻し溶接部き裂) に対する影響の有無を検証するとともに、き裂発生要因の推定および、その補強策の効果を解析および現地での補強前後の発生応力計測により検討した。損傷を受けた桁は幅員 9.5m (2 車線)、箱桁幅 4.5m、横リブ高 500mm、横リブ間隔 1950mm、デッキプレート厚 12mm、バルブプレートリブ厚 10mm である。図-15 に損傷状況写真を、図-16 に損傷状況イメージ、図-17 に今回提案補強概要図を示す。

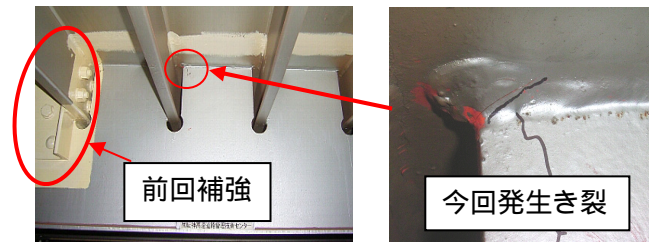


図-15 損傷状況写真

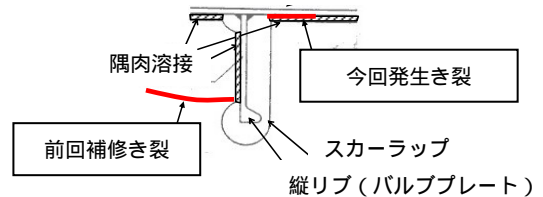


図-16 損傷概要図

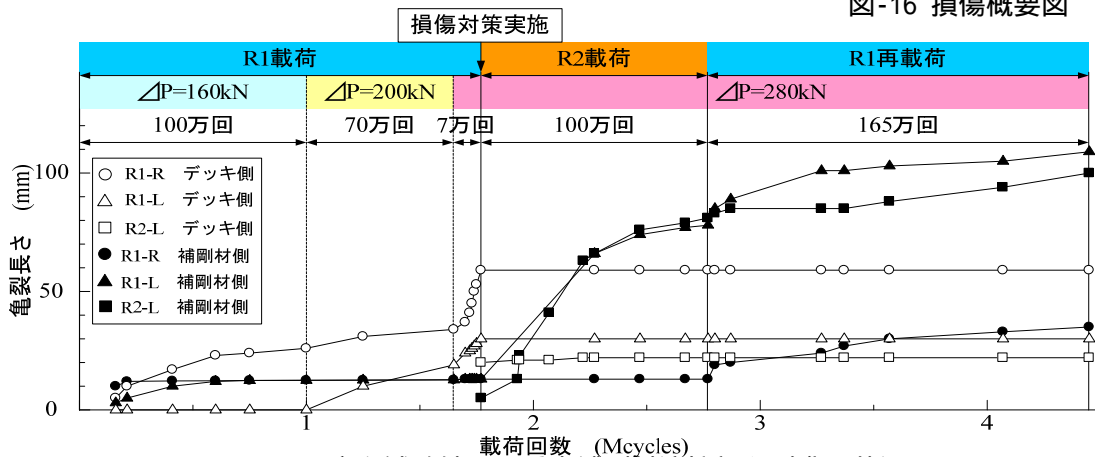


図-14 疲労試験結果 (垂直補剛材溶接部き裂進展状況)

### 3-2 損傷要因分析

本橋は鋼床版箱桁橋の標準図制定前の設計であり、横リブ高が500mmと低く、横リブ剛性が低いことが損傷発生に影響を与えていることが考えられた。FEM解析の結果、横リブは主桁ウェブを支点としてたわみ、図-18に示すような局所変形がバルブリブのスカールアップで生じ、これにより損傷箇所の応力が大きくなることがわかった。さらに後発のデッキと横リブスカールアップ上側廻し溶接部の損傷と先発した下側廻し溶接部の損傷におけるき裂発生順序に関する検討を行った。図-19より、着目部位は共に応力（圧縮）が高いことがわかる。母材の高応力の分布範囲は、スカールアップ上側廻し溶接部付近よりスカールアップ下側廻し溶接付近の方が分布範囲は広いが、両部位の溶接部のホットスポット応力を見ると応力範囲は同等であった。以上より、両部位ではほぼ同時にき裂は発生し得るものと推測される。

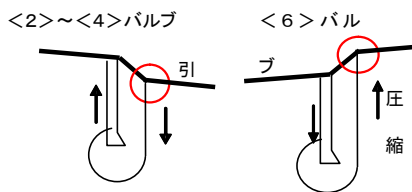


図-18 スカールアップ部変形イメージ

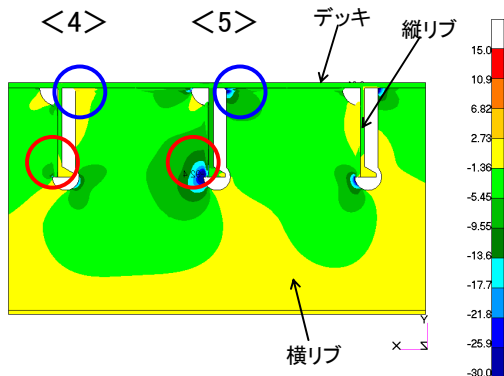


図-19 縦リブ<5>直上载荷時の主応力分布図

### 3-3 既設スカールアップ下側補強に対する検討

先発したスカールアップ下側補強が後発した上側廻し溶接部損傷に及ぼす影響について検討した。縦リブ<5>载荷時における既設（縦リブ<5>下側）補強有り、無しの場合の上側廻し溶接部に着目したホットスポット応力範囲を比較すると、補強有りの場合の応力範囲は、縦リブ<4>を除い

てほぼ同等もしくは若干下回る結果であった。縦リブ<4>では応力が14%増加したが、他の縦リブよりも応力は小さく、疲労評価上大きな影響はないと考えられる。よって、既設下側補強が上側廻し溶接部損傷に与える影響は低いと考えられる。

### 3-4 補修構造の検討

横リブのせん断および曲げ剛性を増すためH鋼を横リブ下面に継足した補強案（以下、H鋼添接案）及びスカールアップをL型アンクルによって閉塞しせん断補強した補強案（以下、スカールアップ閉塞補強案）（図-17）について補強効果を検討した。FEM解析により対策効果を比較すると、H鋼添接案では輪荷重直下の縦リブ<5>では応力低減は見込めないが、それ以外の縦リブでは3~4割程度の応力低減効果が得られた。一方、スカールアップ閉塞案では補強した縦リブ<5>に対して73%とより大きな応力低減効果が得られた。ただしそれ以外の縦リブ溶接部に対しては応力低減効果は期待できなかった。しかし、各縦リブをL型アンクルで補強することにより、同等の効果が期待できると考えられる。以上より、スカールアップ閉塞案を補強方法として採用し、現地での補強前後の応力測定を実施した。測定は試験車を走行させ、その際の発生応力を動的に計測した。計測結果から上側廻し溶接部に対しては解析値より若干補強効果が劣るものの、今回補強案により一定の応力低減効果が確認できた。

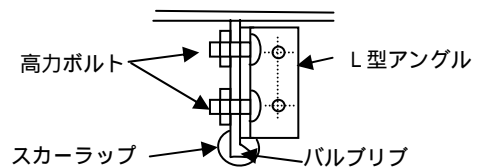


図-17 補強（スカールアップ閉塞）概要図

## 4. 結論

鋼床版橋において発生している疲労損傷に対して、その疲労挙動を把握し、有効な補修補強方法について検討した。それぞれの損傷パターンについて以下のことがわかった。

(1) デッキプレートとUトラフ縦リブ溶接部き裂  
溶接のど厚不足に起因する疲労損傷に対する補修補強方法として、き裂部除去後再溶接による補修および未損傷部の増盛溶接による補強の有効性を確認した。また供用下での溶接施工については現地計測の結果、一定の割合で管理限界を超える可能性があるが、その際には再度溶接を行うことを前提として実施可能であると判断した。

(2) デッキプレートと垂直補剛材溶接部き裂  
垂直補剛材に半円切欠きを施すことにより溶接部の応力集中を緩和するとともに、発生したき裂の進展が抑制されることが確認された。

(3) 横リブとデッキプレート溶接部き裂検討  
L型アングルあて板によりスカーラップを閉塞することにより、当該部の応力が緩和され、補強効果があることを確認した。

#### 参考文献

1) 牛尾, 植田, 村田: トラフリブとデッキプレートとの

接合部の疲労強度特性, 関西道路研究会会報, 1985.11

2) (社)日本鋼構造協会: 供用下にある鋼構造物の溶接施工指針(案), 1992.6

3) 関, 西岡, 乙黒, 佐藤, 鋼床版デッキプレートと垂直補剛材の溶接部に発生した疲労損傷の補修方法, 第5回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集, 平成8年6月, pp37-46

4) 川村, 高田, 流田, 坂野, 嘉指, デッキプレートと垂直補剛材溶接部の予防保全対策, 第60回土木学会年次学術講演概要集, 2005.9

5) 二村, 坂野, 酒井, 高田, 川上, 米谷, 松下, 夏秋: 鋼床版デッキプレートと主桁垂直補剛材上端の溶接部の疲労損傷対策, 第61回土木学会年次講演会論文集, 2006.9

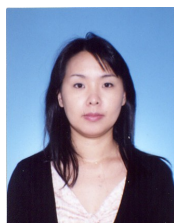
6) 川上, 今田: 3号神戸線鋼床版箱桁橋におけるバルブ形式縦リブと横リブ交差部き裂損傷の原因調査および補修, 阪神高速道路公団技報第22号, 2005

## RETROFITTING METHOD AGAINST FATIGUE CRACKING IN WELDED JOINTS BETWEEN THE STEEL DECK AND RIBS

Yoriko KAWAKAMI and Sakiko KOMETANI

Recently, a number of fatigue cracks have been detected in orthotropic steel decks. Among them, fatigue cracking in the welded joints between the steel deck and ribs or stiffeners is possible to propagate to deck plate, with a risk of affecting the traffic on the deck plate. There is an urgent need for development of an effective retrofit method. In this study, damage investigation, FEM analysis and fatigue tests were carried out to evaluate the fatigue cracking behavior in the welded joints and to verify the effect of proposed retrofitting method.

川上 順子



阪神高速道路管理技術センター  
技術部 開発研究課  
Yoriko Kawakami

米谷 作記子



阪神高速道路株式会社  
神戸管理部 調査設計グループ  
Sakiko Kometani