

鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部のルートき裂に対する維持管理に関する取組み

STUDY ON MAINTENANCE METHOD FOR ROOT CRACKS IN U-RIB TO DECK WELDED JOINTS OF ORTHOTROPIC STEEL DECKS

服部雅史* , 後藤俊吾**

Masafumi HATTORI and Shungo GOTO

ABSTRACT This paper reports overviews of the study to solve the problem of maintenance method for root cracks in U-rib to deck welded joints of orthotropic steel deck, and presents on the maintenance flow developed based on these findings. Specifically, five issues for the maintenance of these cracks are organized and their solutions are discussed through fatigue tests, FEM analysis, and actual bridge measurements, and a maintenance method is proposed by considering above study results and the existing knowledge.

KEYWORDS : 鋼床版, ルートき裂, 維持管理

Orthotropic steel decks, Root cracks, Maintenance method

1. はじめに

鋼床版の U リブとデッキプレートの溶接部において、溶接ルートを起点としてデッキプレートへ進展する疲労き裂（以下、デッキ進展型き裂）や溶接ビードへ進展する疲労き裂（以下、ビード進展型き裂）の報告がある^{1),2)} (図-1)。どちらも路面に近い場所で生じるき裂であり、走行車両の安全な通行を確保するためには対策が急務である。本検討では、デッキ進展型き裂、ビード進展型き裂の双方（以下、ルートき裂）に対する維持管理方法の構築を目的とした。一般に、維持管理とは点検、調査、評価、対策のサイクルにより、構造物の供用期間内においての性能を、要求された水準以上に保持することである。本検討では、ルートき裂に対して、以下の課題の解決を目指した。

- 課題 1 面的な広がりをもつ鋼床版の、輪荷重直下のどの位置でも発生する可能性があり、視認できないルートき裂を効率よく点検する方法が確立されていない。
- 課題 2 ルートき裂の発生寿命や、デッキプレート側と溶接ビード側のどちらに進展していくかの評価方法が確立されていない。
- 課題 3 ルートき裂を十分小さい段階で発見する調査方法や、き裂寸法を精度良く、非破壊で計測することができる調査方法が確立されていない。
- 課題 4 ルートき裂の補修を省略してもき裂の進展を抑制することが可能な、抜本的な対策方法が確立されていない。
- 課題 5 鋼床版の採用される環境を鑑み、交通規制や死荷重増加に関して厳しい制約がある場合にも適用可能な対策方法が確立されていない。

本稿では、5つの課題解決の検討概要を説明するとともに、それらの知見と既往研究成果をもとに構築した維持管理方法の一例を提案する。

*博（工）（株）高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）

**中日本高速道路(株)八王子支社 高速道路事業部（〒192-8648 東京都八王子市宇津木町 231）

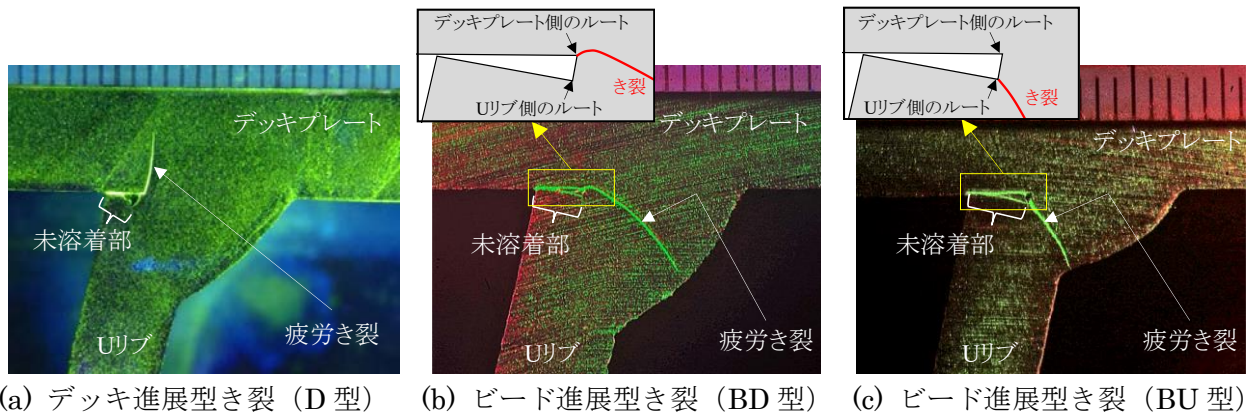


図-1 鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部のルートき裂³⁾

2. ルートき裂の発生寿命と進展方向の推定方法に関する検討³⁾ (課題 1, 2)

課題 1, 2 の解決のため、文献 3) をもとに、参照応力によるき裂発生寿命やき裂進展方向の推定に関する検討を概説する。具体的にはまず、疲労試験および有限要素解析により、ルートき裂の発生や進展挙動を評価することができる応力（以下、評価応力）を定めるとともに、き裂発生寿命との関係を明らかにした。次に、有限要素解析により荷重位置、溶接形状、タイヤ形状、アスファルト舗装の剛性をパラメトリックに変化させることで、溶接部周辺の応力特性を把握し、参照応力から評価応力を推定する方法を提案した。さらに、き裂進展解析により、デッキ進展型き裂とビード進展型き裂の進展挙動を把握し、評価応力からき裂進展方向を判別する方法を検討した。

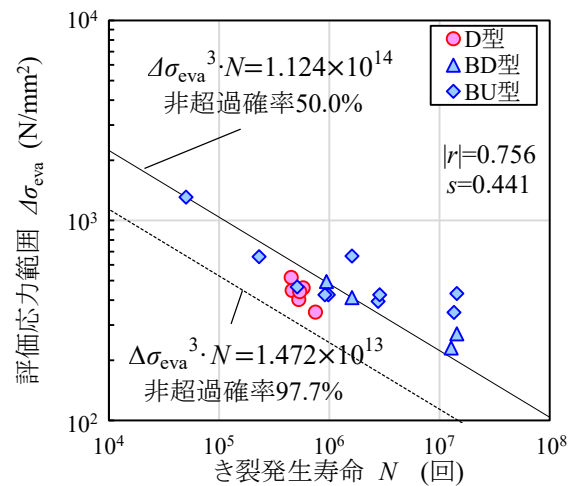


図-2 評価応力範囲とき裂発生寿命との関係 (S-N 曲線)

2.1 評価応力とき裂発生寿命との関係

振動型疲労試験機を用いた疲労試験により、図-1 に示す実橋でも見られる 3 種類のき裂が発生した。評価応力はこれまで多く提案されているが、デッキとビード進展型き裂の双方を 1 つの指標で評価できる可能性があるノッチ応力によることとした。具体的には、有限要素解析において曲率半径 0.2mm のフィレット形のノッチ（要素サイズ：ノッチ接線方向 0.02mm，ノッチ法線方向 0.05mm，橋軸方向 0.1mm）上の絶対値最大の主応力を評価応力とした。

評価応力と、疲労試験により得られたき裂発生寿命の関係を図-2 に示す。実線は平均曲線を、点線は平均曲線に対して $-2s$ (s は標準偏差) の曲線を示しており、いずれも S-N 曲線の傾きを表す指標 $m = 3$ として求めたものである。図中の $|r|$ は相関係数の絶対値である。S-N 曲線のばらつきは小さく、D, BD, BU 型による傾向の違いもなく整理できることがわかった。

2.2 参照応力による評価応力の推定

2.1 で示した評価応力はひずみゲージなどで計測できないため、計測可能な参照応力より評価応力を推定する方法を検討した。既往の研究を参考に、評価応力と相関が高いと思われる図-3 に示す 4 点の参照応力 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$) をもとに、評価応力を推定する重回帰式を得た。

$$\sigma_{\text{est,d}} = 2.95\sigma_1 + 4.29\sigma_2 + 5.28\sigma_3 - 1.05\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \sigma_4, \quad \sigma_{\text{est,u}} = -0.16\sigma_1 + 3.31\sigma_2 + 4.19\sigma_3 - 4.13\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \sigma_4 \quad (1)$$

$$\sigma_{est,d}=2.95\sigma_1+3.73\sigma_2+6.19\sigma_3-1.14\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\sigma_4, \quad \sigma_{est,u}=2.56\sigma_1+5.06\sigma_2+3.74\sigma_3-1.76\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\sigma_4 \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{est,d}$ 、 $\sigma_{est,u}$ ：デッキプレート側，U リブ側の評価応力の推定値， t_1 、 t_2 ：図-3に示す距離である。また，式(1)はU リブスパン中央断面を，式(2)は横リブ断面を対象とした式である。

溶接溶込み量，溶接脚長，余盛，タイヤ形状，アスファルト舗装，対象断面，载荷位置をパラメトリックに変化させた有限要素解析（計 286 ケース）より得た評価応力と，式(1)，(2)からの推定値の関係を図-4に示す。4点での参照応力と溶接脚長の情報から，誤差が概ね 10%以内で評価応力を推定できることがわかった。

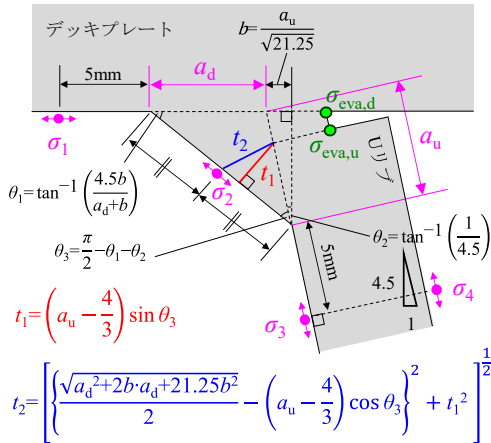


図-3 参照応力や推定に用いるパラメータの位置の説明図

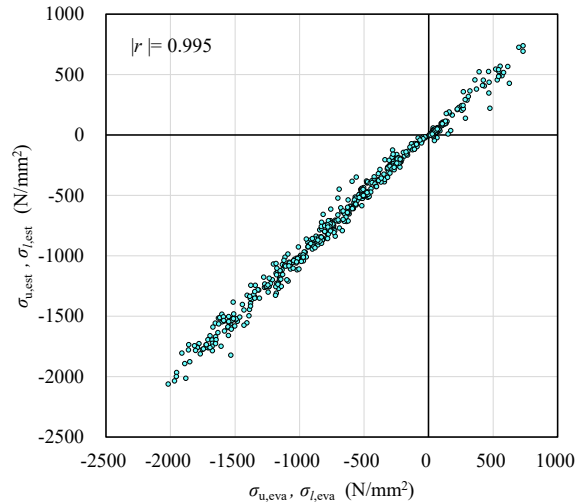


図-4 評価応力と推定値の関係

2.3 評価応力によるき裂進展方向の判別

デッキ進展型き裂とビード進展型き裂のどちらが生じやすいかが予測できれば，点検の効率化につながる。そこでデッキとビード進展型き裂を判別する方法を検討した。き裂は図-1に示す3種類が確認されているため，デッキプレート側，U リブ側の評価応力の大小関係から進展方向の判別を試みた。まず，実験結果の比較より妥当性が確認されたき裂進展解析を，前節の計 286 ケースのうち評価応力が大きな 130 ケースで実施し，デッキプレート側の評価応力の絶対値 $|\sigma_{eva,d}|$ と，U リブ側の絶対値 $|\sigma_{eva,u}|$ とを比較した。その結果を図-5に示す。 $|\sigma_{eva,d}|$ と $|\sigma_{eva,u}|$ の大小関係に応じて D, BD, BU 型が概ね区分されてプロットされていることがわかる。明確な判別は困難と思われるものの，この方法で概ね判別が可能であることがわかった。

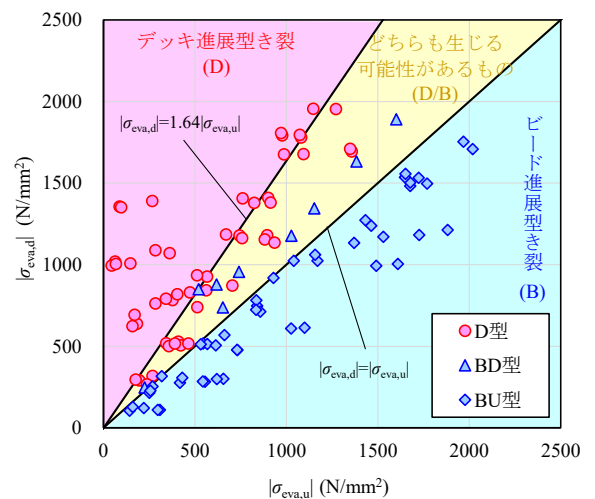


図-5 $|\sigma_{eva,d}|$ 、 $|\sigma_{eva,u}|$ の関係

3. 実橋計測によるルートき裂の発生寿命と進展方向の推定方法の検証⁴⁾ (課題1, 2)

2章でルートき裂に対して参照応力と溶接脚長の計測から，き裂発生寿命やき裂進展方向を推定できる可能性を示した。課題1, 2の解決のため，文献4)をもとに，重点的な点検，調査箇所をスクリーニングする方法に関する検討を概説する。具体的にはまず，フェーズドアレイ超音波探傷法（以下，PAUT）によりデッキ進展型き裂やビード進展型き裂の状況を詳細に把握している鋼床版のうち，き裂発生傾向の異なる2工区を抽出し，アスファルト舗装の剛性に影響を与える気温の異なる冬，春，

夏の計 3 日間において実交通下の応力計測を実施した。次に、その計測結果と気温や交通量などの定常的に得られるデータから累積疲労損傷比を求める方法を考案し、それを用いてき裂発生有無やき裂進展方向の評価の妥当性について、実橋のき裂状況と比較し検証した。最後に、重点的に点検、調査する箇所を抽出するフローを提案した。

3.1 累積疲労損傷比の推定方法

都市間高速道路に存在する 3 径間の鋼斜張橋で 3 日間、16 箇所の応力計測を実施した。その計測データをもとに累積疲労損傷比の推定方法を検討した。

2 章で参照応力と溶接脚長を計測することによりルートの評価応力を推定できること、および実橋の計測データより、評価応力の等価応力範囲は気温と、その繰返し回数は大型車交通量とそれぞれ相関があることがわかった。それらをもとに累積疲労損傷比を以下のように推定することとした。

まず、1 時間あたりの累積疲労損傷度 $\Delta\sigma_{eq,h}^3 \cdot N_h$ を、次式により算出する。

$$\Delta\sigma_{eq,h}^3 \cdot N_h = \sum_{i=1}^j \Delta\sigma_{eva,i}^3 \cdot n_i \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{eq,h}$: 1 時間あたりの等価応力範囲、 N_h : 5N/mm² 以上の評価応力範囲の 1 時間あたりの総繰返し回数、 j : 1 時間あたりの波数、 $\Delta\sigma_{eva,i}$ 、 n_i : それぞれ i 番目の波形の評価応力範囲とその繰返し回数である。

次に、等価応力範囲と気温の関係がネイピア数 e を底とする指数関数に従うこと、繰返し回数と大型車交通量が比例関係にあること、および図-2 に示す S-N 曲線より次式で累積疲労損傷比 D が求まる。

$$D = \frac{C_1 \cdot \Delta\sigma_{eq,T0}^3 \cdot Q \cdot e^{C_2 T}}{1.124 \times 10^{14}} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{eq,T0}$: 気温 $T=0^\circ\text{C}$ のときの等価応力範囲、 C_1 、 C_2 : 計測箇所ごと 1 時間あたりの計測データから最小二乗法により決定される定数、 Q : 大型車交通量、 T : 気温である。

3.2 実橋のき裂状況との比較

対象橋梁ではじめて PAUT を実施したのが 2017 年 11 月であるため、供用開始から 2017 年 10 月までの累積疲労損傷比を式(4)より算出した。累積疲労損傷比が $D \geq 1$ でき裂あり、それ以外でき裂なしと判定することとし、実橋で PAUT により把握しているき裂と照合することで検証した。その結果、全 17 き裂のうち、14 き裂において判定が整合していた。また、逃された 3 き裂は重要度の高いデッキ進展型き裂ではなくビード進展型き裂であり、そのき裂寸法も小さかった。以上より、推定方法は概ね妥当だと考えられる。

また、2 章で $|\sigma_{eva,d}|$ と $|\sigma_{eva,u}|$ の大小関係からき裂進展方向の判別方法を提案した。それをもとに、デッキプレート側と U リブ側それぞれの累積疲労損傷比 D_d 、 D_u の大小関係からき裂進展方向を判別することとした。つまり、「 $D_d \geq (1.64)^3 D_u = 4.41 D_u$ の場合 : デッキ進展型き裂」、「 $D_d < D_u$ の場合 : ビード進展型き裂」、「上記以外の場合 : どちらも生じる可能性がある」と判定することとし、実際のき裂を照合することで検証した。その結果、全 17 き裂のうち、11 き裂においてき裂進展方向を正しく判別した。また、重要度の高いデッキ進展型き裂は全て正しく判定した。精度向上のための検討の余地はあるものの、判定方法も概ね妥当だと考えられる。

3.3 スクリーニングフロー

3.2 の検討結果を踏まえ、重点的に点検、調査する箇所を抽出するフローを図-2 に示すように提案する。

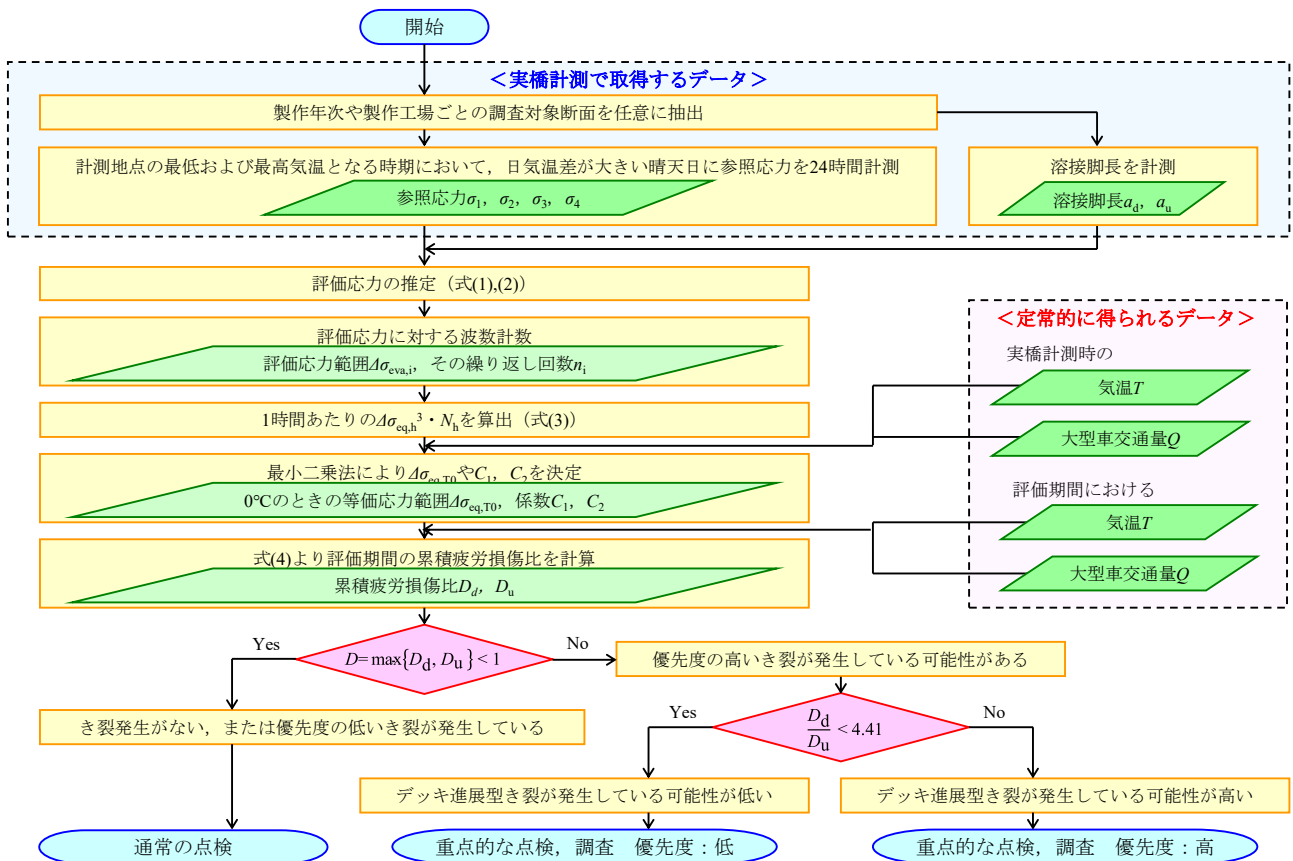


図-6 重点的に点検，調査する箇所を抽出するフロー

4. ルートき裂の調査に対する超音波探傷の適用性に関する検討^{5),6)} (課題3)

課題3の解決のため、文献5), 6)をもとに、ルートき裂をできるだけ小さい段階から検出できる調査方法の検討を概説する。具体的には、横リブ交差部以外を対象としてPAUTによりデッキおよびビード進展型の疲労き裂を同時に探傷する方法を検討し、その測定精度を明らかにした。また、PAUTの探触子が上手く当てられない横リブ交差部の探傷方法を検討した。

4.1 PAUTの概要

デッキおよびビード進展型の疲労き裂を同時に探傷する方法として、図-7に示すようにデッキプレート下面およびUリブウェブ外面に探触子を設置することを考えた。探触子は鋼床版に磁石により取り付く治具により、橋軸方向に移動し、治具に取付けられたロータリーエンコーダが橋軸方向位置(基準点からの移動量)を測定することで、3次元でエコー高さを記録できる。

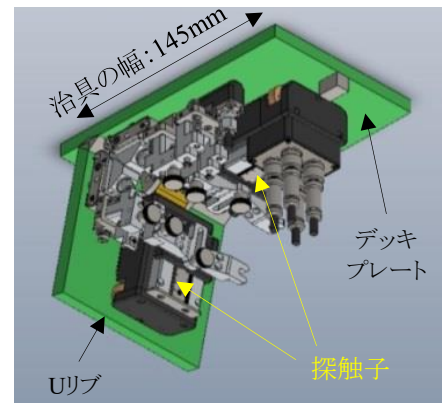


図-7 探傷の概略図

4.2 PAUTによるき裂寸法測定方法とその精度

き裂寸法の測定精度を把握するため、2章の疲労試験で導入した18個のき裂を対象に図-7の装置での探傷を実施し、後に破面開放して精度を検証した。また、精度は探傷経路やき裂先端の読み取り方法により影響を受けると考えられたため、それらを様々な方法で検討した。

探傷経路は、デッキ進展型き裂に対して、き裂長さはデッキプレート上面で反射した後、き裂破面で反射したエコー経路が、き裂深さはき裂先端部で散乱したエコー経路が最も精度がよかった。また、ビード進展型き裂に対して、き裂長さや深さはUリブウェブの内面側で反射した後、き裂破面で反射

するエコー経路が最も精度がよかった。き裂先端の読み取り方法は、デッキ進展型き裂に対して、ルート部周辺以外の位置でのノイズエコー高さの最頻値（ノイズレベル）の3倍以上の信号が得られた点とするのが最も精度がよかった。また、ビード進展型き裂に対して、信号レベルがピークの点とするのが最も精度がよかった。最も精度がよかった条件での精度検証試験の結果を図-8に示す。デッキ進展型き裂に対して、き裂深さが2.2mm以上の範囲では、誤差±1.5mm以内の精度で、ビード進展型き裂に対して、き裂深さが2.8mm以上の場合、概ね±2.0mm以内の誤差で測定できることがわかった。なお、塗膜の有無による比較も別途実施しているが、塗膜の有無により測定精度は変化するものの、PAUTにより塗膜の上からの探傷も可能であることを確認している。

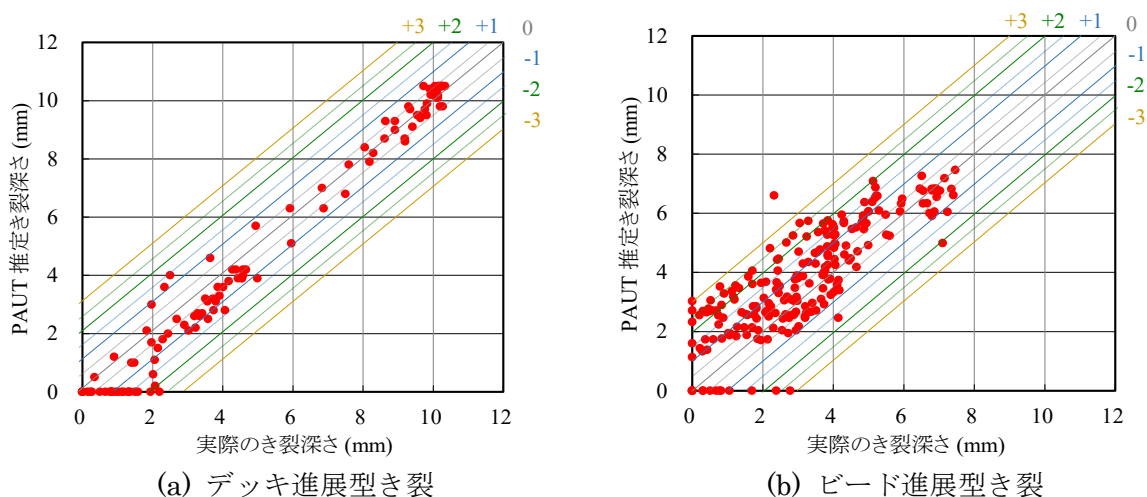


図-8 き裂深さと PAUT の測定結果との比較

4.3 横リブ交差部での探傷方法の検討

横リブ交差部は横リブ自体やそのデッキプレートとの溶接ビードが支障となり探触子が走査できない。一方で、横リブ交差部において、ルートき裂が発生しやすいとした文献も多いことから、この箇所での探傷方法の確立が望まれる。

4.2 までの検討で用いた PAUT と同じ探触子で横リブ交差部も探傷できることが、調査の効率化の観点で望ましいが、超音波を斜めに入射することで、き裂面から乱反射した超音波を受信する「斜め入射法」、探触子2つを、横リブを挟んで溶接線に対して45°でハの字に設置し、1つの探触子から送信されき裂面から反射した超音波を、もう1つの探触子が受信する「ピッチキャッチ法」の2種類を試したがき裂有無の判断ができなかった。そこで、PAUT よりも感度良く探傷可能と考えられるフルマトリクス・キャプチャ（以下、FMC）と、トータル・フォーカシング法（以下、TFM）を組み合わせた検査方法（以下、FMC/TFM）による探傷を検討した。

き裂寸法の測定精度を把握するため、横リブ交差部を模した試験片にき裂を導入したもので精度検証試験を実施した。その結果、デッキ進展型き裂に対しては1.9~4.4mmのき裂深さのき裂に対しては誤差±1mm以内で計測できた。ただし、ビード進展型き裂に対する探傷や、塗膜がある場合の影響検討は今後の課題である。

5. ルートき裂に対する UHPFRC 敷設による対策方法の検討⁷⁾（課題4）

課題4の解決のため、文献7)をもとに、超高性能繊維補強セメント系複合材料（以下、UHPFRC）敷設によるデッキ進展型き裂の進展抑制の検討を概説する。具体的には、輪荷重走行試験および有限要素解析により、対策前後のデッキ進展型き裂の進展状況や応力拡大係数、敷設した材料やデッキプレートとの界面の疲労耐久性を検討した。

5.1 UHPFRC 敷設

本検討では敷設材に表-1に示す基本配合のUHPFRCを40mm厚で敷設することで用いた。輪荷重試験開始時の弾性係数は44.1kN/mm²だった。なお、UHPFRCとデッキプレートとはSFRC敷設で実績がある主剤にエポキシ樹脂、硬化剤に脂肪族ポリアミンを使用した高耐久性のエポキシ系接着剤により合成している。

5.2 UHPFRC 敷設によるデッキ進展型き裂の進展抑制効果

UHPFRC 敷設をする前の無補強の鋼床版試験体の輪荷重走行試験により最大で長さ88mm、深さ8.7mmのデッキ進展型き裂が生じた。その後、そのき裂をそのままにUHPFRC敷設を行い、自然環境状態で100万回、水張状態で100万回の輪荷重走行試験を実施した。用いたタイヤはダブルタイヤで70kNである。左記の疲労負荷は重交通の路線においてUHPFRCの材料自体は約180年、UHPFRCとデッキプレートとの界面は約140年に相当する。全ての試験終了後に破面観察したところ、UHPFRC敷設後にき裂の進展はなかった。

有限要素解析により敷設材の違いによる応力拡大係数範囲とき裂深さの関係を求めた。その結果を図-9に示す。き裂寸法は既往の研究を参考に図中に示した寸法とした。無補強の場合にはき裂深さが7mmをピークとして高い応力拡大係数範囲となるが、UHPFRC敷設やSFRC敷設は接着剤がある場合は1/5以下の応力拡大係数範囲に抑えられている。ただし、接着剤がない場合はある場合の倍以上の応力拡大係数範囲となるため、接着剤が健全であることが重要と考えられる。同じ応力拡大係数範囲となるき裂深さについて、「UHPFRC接着有」と「SFRC接着有」を比較すると3mm程度の差がある。下限界応力拡大係数範囲でき裂の停留が評価できるとすれば、UHPFRC敷設の場合はSFRC敷設より停留できるき裂深さを3mm程度大きくできる可能性があり、き裂処理を省略する維持管理シナリオを考えると、UHPFRC敷設がSFRC敷設より優位になると推論される。

5.3 UHPFRC 敷設の疲労耐久性

輪荷重走行試験中の鋼床版のひずみ、UHPFRCのひび割れを定期的に観察した。その結果、ひずみに変化がなかった。また、試験中に横リブ位置、Uリブスパン中央、主桁垂直補剛材位置に橋軸直角方向のひび割れが確認されたものの、水張状態での試験終了後もひび割れ幅は最大で0.08mmであった。全ての試験が終了した後、UHPFRCとデッキプレートとの残存付着強度を、UHPFRCにひび割れが確認された断面を中心に30箇所、引抜試験を実施したが、平均5.0N/mm²程度の残存付着強度を有していた。以上より、UHPFRC敷設が十分な疲労耐久性を有することが確認できた。

6. ルートき裂に対する床版下面からの対策方法の検討⁸⁾ (課題5)

課題5の解決のため、文献8)をもとに、デッキおよびビード進展型き裂に対して、交通規制が不要であり、かつ死荷重が増加しない対策方法の検討を概説する。具体的には、Uリブの下フランジを切断・撤去し、Uリブ・デッキプレート溶接部をUリブ内側からも溶接する対策方法(図-10)を提案した。まず、構造改変を伴う本対策の実現性の確認として、耐荷性能、溶接の施工性と出来形、ア

表-1 UHPFRCの基本配合

フロー値 (mm)	空気量 (%)	単位使用量(kg/m ³)					
		水	結合材*	細骨材	高性能 減水剤	収縮 低減剤	鋼繊維
225±25	3.0	195	1287	905	29.6	12.9	235.5 (3.0vol.%)

* 結合材はポルトランドセメント、ボラン材およびエトリンガイト生成系混和材で構成されたもの

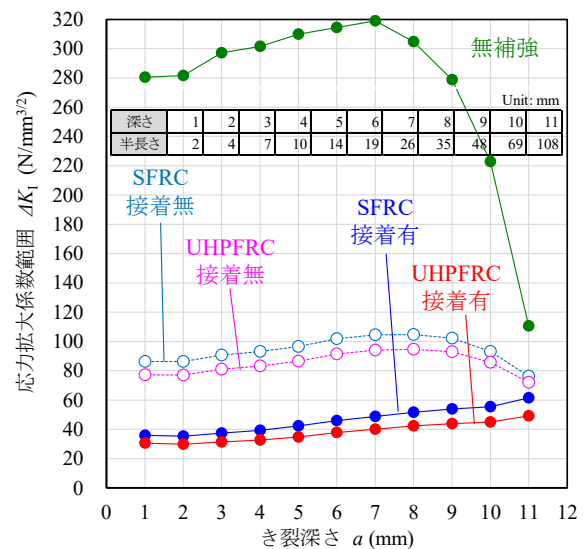


図-9 応力拡大係数範囲とき裂深さの関係

スファルト舗装への影響を検証した。次に、対策前後での着目溶接部周辺の局部応力やき裂先端の応力性状の変化、および他の部位への影響を有限要素解析により確認した。最後に、本対策の疲労耐久性を定点疲労試験により明らかにした。

6.1 構造改変を伴う本対策の実現性の確認

3章で計測対象とした鋼斜張橋を対象に U リブの耐荷性能を確認した。その結果、開断面化による応力の増加は上縁で 1.17 倍、下縁で 1.68 倍となるものの、許容応力度以下となった。また、2 方向面内力を受ける補剛板としての耐荷性能も確認した。その結果、開断面化による圧縮強度の差は 1% 以下であった。

次に、溶接の施工性と出来形を溶接施工試験により確認した。上向き姿勢で CO₂ ガスシールドによる半自動アーク溶接により、トーチを手動で動かす手動溶接とガイドレールを設置した自動溶接を実施したが、目標とした溶接脚長や止端半径を確保する溶接条件を見つけることができた。

最後に、アスファルト舗装への影響として、デッキプレートの変形と、溶接による熱影響を確認した。アスファルト舗装への影響を考慮するとデッキプレートの変形は曲率半径 20m 以上とすることが望ましいとされている。本検討において、鉛直変位は最大 1.3 倍に増大するものの、最小曲率半径は 35m であり、デッキプレートの変形挙動の変化が、舗装に与える影響は小さいと考えられる。また、溶接による熱影響を実験および熱伝導解析で確認した。結果として、溶接による熱でグースアスファルトの舗装温度 (240℃) 以上となる範囲は微小で短期間であることや、溶接後の舗装とデッキプレートの残存付着力も低下はしていなかった。

以上を踏まえ、構造改変を伴う本対策も実現できることを確認した。

6.2 局部応力性状の確認

弾性有限要素解析により、本対策の U リブ・デッキプレート溶接部のルートき裂に対する応力低減効果やき裂進展抑制効果を、一般的な対策方法である SFRC 敷設と比較することで確認した。その結果、追加溶接により応力が高い箇所が、ルートから止端に移行するものの、止端形状を改善することでその応力は低減させることができ、SFRC 敷設と同等以上の応力低減効果があることを確認した。

次に、他の部位への影響を弾性有限要素解析により確認した。対象部位は、疲労き裂が発生、進展すると車両の走行性能や U リブの防食性能に影響を及ぼすと考えられる、横リブ交差部の下側スリットまわし溶接部、U リブ突合せ溶接部、デッキプレート・垂直補剛材溶接部の 3 箇所とした。結果として、構造の見直しや、別途対策を講じる必要があるものの、他の部位への影響により本対策が成立しないといったことがないことは確認できた。

6.3 疲労耐久性の検証

本対策の疲労耐久性を確認するために定点疲労試験を実施した。その結果、横リブ交差部において追加溶接止端部からデッキプレートに進展、貫通するき裂が発生したものの、ピーニング処理によりその発生を抑制することができた。また、疲労試験結果に基づき、本対策が有する耐用年数を試算した結果、重交通の路線において 100 年以上の耐用年数であることが示された。

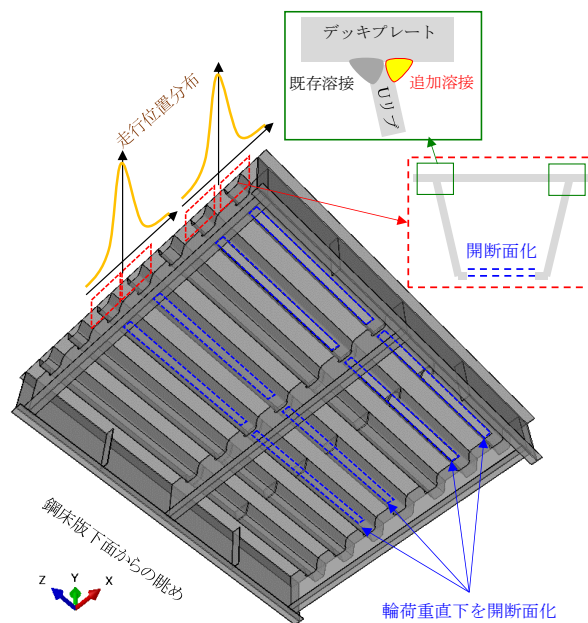


図-10 U リブの開断面化および両側すみ肉溶接化による対策方法の概要図

7. ルートき裂に対する維持管理方法の提案

既往の研究および2章から6章までの検討を踏まえ、ルートき裂に対する維持管理方法の一例を図-11に示すように提案する。

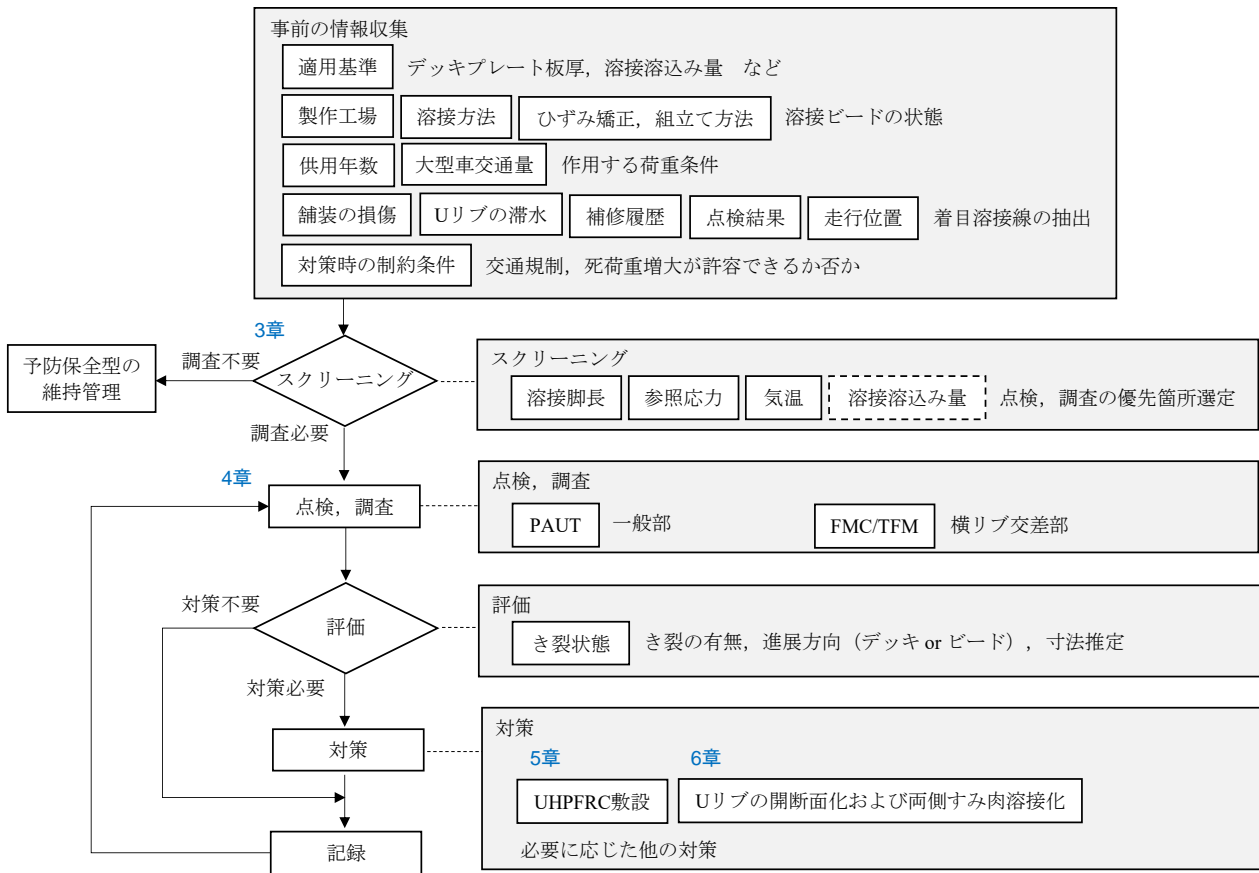


図-11 ルートき裂に対する維持管理方法の一例

事前の情報収集は、図のように12項目とした。「適用基準」は、その違いにより構造詳細が異なり、疲労強度に影響すると考えられるためである。「製作工場」「溶接方法」「ひずみ矯正、組立て方法」は、溶接ビードの状態に違いが生じ、疲労強度に影響すると考えられるためである。3章の対象橋梁でも製作工場によりき裂数の違いがあった。「供用年数」「大型車交通量」は、その時点までの作用した荷重を把握するためである。「舗装の損傷」「Uリブの滞水」「補修履歴」「点検結果」「走行位置」は、着目する溶接線を抽出するため収集項目とした。「対策時の制約条件」は、交通規制や死荷重増大が許容できるか否かが対策選定に重要であるため収集項目とした。

スクリーニングは、図-6のフローに従って「通常の点検」と判断されれば、調査不要として予防保全型の維持管理に移行すればよいと考えた。一方で、「重点的な点検、調査」と判断されれば、調査必要として点検、調査を実施する必要がある。

点検、調査は、目視が基本となるが、4章で精度を検証したPAUTも用いて一般部のき裂寸法を調査するのがよいと考えた。ただし、調査能力の問題からスクリーニングで調査する溶接線の優先度を決めて進めることが肝要と思われる。横リブ交差部において、き裂検知を目的とすればFMC/TFMを用いることもできると考えられる。

評価は対策の要否を決定するために実施するが、ルートき裂を無対策で停留することが難しいと考えられるため、き裂が検出されれば対策必要と判断した方がよい。また、対策が必要と評価した際の対策検討において、き裂の進展方向や、き裂寸法の推定が重要となるため、上記の点検、調査の際に情報を取得しておく必要がある。

抜本的な対策としては、Uリブ・デッキプレート溶接部への効果や他の部位への影響を考えると、舗装改良による対策が適していると考えられる。デッキ進展型き裂を存置することを考えると、舗装改良に用いる材料は一般的に用いられる SFRC よりも 5 章で検討した UHPFRC の方が望ましい。舗装改良による対策が交通規制や死荷重の制約により選定困難な場合は、6 章で検討した下面からの対策が適していると考えられる。また、UHPFRC 敷設よりも優位な点としては、ビード進展型き裂に対して効果が高い点と、部分的な対策が実施できることである。そういった特徴を踏まえ、UHPFRC 敷設よりも適した条件であればこの対策を選定するのが望ましい。

図-6 のフローに従い「通常の点検」と判断されれば予防保全型の維持管理に移行するが、3 章の検討を踏まえ図-6 のフローに残存耐用期間に対応する大型車交通量の予測値を代入することで累積疲労損傷比 D を求め、 $D \geq 1$ となる前に抜本的な対策を講じる方法がよいと考えられる。

8. まとめと今後の展望

鋼床版の U リブとデッキプレートの溶接部のルートき裂に対して、5 つの課題を抽出し、それらの解決のための検討を概説した。また、得られた知見と、既往の研究成果を踏まえてルートき裂に対する維持管理方法の一例を提案した。

本稿で示した検討の範囲では、条件設定やデータ蓄積が不十分な部分があり、信頼性を得るために引き続き検討が必要であると考えられる。提案した方法を基本に維持管理を実践しながら、この方法の検証結果や、新たに得られる課題への検討を踏まえ、柔軟に改良していくことで、効率的で最適な維持管理方法を目指していきたい。

謝辞

本検討は中日本高速道路（株）の鋼床版疲労き裂の対策検討の一部として実施したものである。名古屋大学大学院の舘石和雄教授、判治剛准教授、清水優助教のご指導のもと、実験や計測は（一社）日本建設機械施工協会施工技術総合研究所、超音波探傷試験は三菱重工パワー検査（株）、N-PRO（株）、試験体製作は MK エンジニアリング（株）、川田工業（株）、鹿島建設（株）のご協力のもと実施したものである。関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労 2010 年改訂版，2010.
- 2) 土木学会：鋼構造シリーズ 22 鋼橋の疲労対策技術，2013.
- 3) 服部雅史，舘石和雄，判治剛，清水優：鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部のルートき裂に対する疲労評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.77, No.2, pp.255-270, 2021.
- 4) 服部雅史，舘石和雄，判治剛，清水優：実橋計測に基づいた鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部のルートき裂に対する疲労評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 78, No. 2, pp. 287-300, 2022.
- 5) 服部雅史，牧田通，舘石和雄，判治剛，清水優，八木尚人：鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部の内在き裂に対するフェーズドアレイ超音波探傷の測定精度，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.74, No.3, pp.516-530, 2018.
- 6) 服部雅史，舘石和雄，判治剛，清水優：鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部のルートき裂に対する横リブ交差部での探傷方法の検討，土木学会第 78 回年次学術講演会，I-226, 2023.
- 7) 服部雅史，舘石和雄，判治剛，清水優：鋼床版の U リブ溶接部からデッキプレートに進展した疲労き裂に対する UHPFRC 敷設による対策効果，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 76, No. 3, pp. 542-559, 2020.
- 8) 服部雅史，舘石和雄，判治剛，清水優：既設鋼床版の U リブ・デッキプレート溶接部に対する床版下面からの疲労対策，土木学会論文集，Vol. 79, No. 1, 22-00231, 2023.