

報告番号	甲 第 14242 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 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研究  
(Study on maintenance method for root cracks in U-rib to deck welded joints of orthotropic steel decks)

氏 名 服部 雅史

### 論 文 内 容 の 要 旨

鋼床版とはデッキプレートを縦、横リブで補剛した床版構造であり、コンクリート系の床版と比べて、死荷重、桁高、工期を縮減できることから、長支間の橋梁、支持地盤の悪い地域の橋梁、架設の制約から軽量かつ工期縮減が求められる橋梁、桁高に制約がある橋梁などに用いられている。縦リブには、溶接延長や塗装面積を低減できること、ねじり剛性を高くできることなどの利点より、Uリブを用いられることが多い。一方、Uリブ・デッキプレート溶接部は片側からのすみ肉溶接となることから疲労強度が低く、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。これらのき裂が進展すると走行車両の安全な通行を脅かす恐れが高い。また、これらのき裂は延長の長い溶接線に発生することや、目視できないルートが起点となることから、位置の特定や検出が難しく、維持管理上取り扱いに苦慮するき裂の一つである。

本研究では、疲労強度が比較的低いと考えられる 2002 年の道路橋示方書以前の基準で設計された鋼床版を主な対象として、Uリブ・デッキプレート溶接部のデッキ進展型き裂、ビード進展型き裂の双方（以下、ルートき裂）に対して点検、調査、評価、対策といった維持管理方法を確立することを目的として、実験、現地調査および解析的な検討を行ったものである。

第 1 章「序論」では、研究の背景として鋼床版の歴史、基準の変遷、構造の概要を踏まえ、

鋼床版の疲労損傷のうち代表的なき裂パターンの整理や、特に走行安全性に影響を与える恐れがあるき裂に関して発生メカニズムや進展挙動を概説した。そのうえで、研究対象としてルートき裂に着目した理由や維持管理方法に関する現状の課題を示し、本研究の目的について述べた。

第2章「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」では、ルートき裂に対する、参照応力による疲労強度評価法の確立を目的とし、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して検討した。

疲労試験および弾性有限要素解析の結果から、フィレット形のノッチ応力を評価応力として用いることで、き裂発生寿命との関係を求め、そのS-N曲線を提案した。

弾性有限要素解析により、載荷位置、溶接形状、タイヤ形状、アスファルト舗装の剛性、対象断面の違いによる評価応力の発生挙動の特徴を把握したうえで、4箇所参照応力からルートき裂の評価応力を推定する方法を提案した。提案した推定方法は誤差が概ね10%以内であることを確認するとともに、疲労試験結果をこの推定方法より適切に評価できることを確認した。

デッキプレート側とUリブ側のルートに対する評価応力の大小関係からき裂進展方向を判別する方法を提案した。その方法により疲労試験結果を適切に判別できるとともに、既往の知見とも整合することを確認した。

以上を踏まえ、評価応力とき裂発生寿命のS-N曲線、参照応力から評価応力を推定する方法、評価応力からき裂進展方向を判別する方法の3つを組み合わせることで、実橋から得られる参照応力の情報よりき裂発生寿命やき裂進展方向を推定する方法を構築した。

第3章「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」では、第2章にて構築した評価方法の実橋への適用について検討し、その妥当性を検証した上で、重点的に点検、調査する箇所を抽出する方法を検討した。

参照応力から評価応力を推定する第2章の方法を、実橋へ適用できるように修正した。その推定方法においても誤差が概ね20%以内であることを確認した。そのうえで、き裂発生数が明確に異なる実橋の2つの工区に対して参照応力と溶接脚長の計測を行い、評価応力を推定した。また、この評価応力から算出される等価応力範囲と温度の関係を定式化した。

実橋計測結果より求めた累積疲労損傷比によるき裂発生時期、発生箇所および進展方向の評価について、その妥当性を実橋に生じたき裂と比較することで示した。そのうえで、参照応力と溶接脚長の実橋計測結果、および気温や大型車交通量といった定常的に得られるデータから重点的に点検、調査する箇所を抽出するスクリーニングフローを提案した。

第4章「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」では、ルートき裂を検出できる非破壊検査手法とその測定精度について、実際の疲労き裂を用いて検討した。

一般部に適用することを想定したフェーズドアレイ超音波探傷試験については、デッキ進展型き裂に対して 3 経路のエコーによる測定方法を比較した結果、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を、き裂深さはき裂先端部で散乱したエコーを用いることにより精度よく測定できることを示した。その精度は、き裂深さが 2.2mm 以上の範囲では、誤差 $\pm 1.5$ mm 以内であった。き裂長さの測定値は実測値の 94%程度であった。

ビード進展型き裂に対して、2 経路のエコーおよび 3 種類の判読方法による測定方法について比較した結果、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成分を用いて、先端部近傍で信号レベルがピークの点と、デッキプレート側の探触子でき裂なしと判断した箇所において測定したルート<sup>1</sup>の未溶着部先端位置との間の距離から評価する方法が精度よく測定できることを示した。その精度は、き裂深さが 2.8mm 以上の場合、概ね $\pm 2.0$ mm 以内の誤差であった。き裂長さの測定値は実測値の 100~102%であった。

測定精度に対する塗膜の影響については、塗膜の有無により測定精度は変化するものの、塗膜の上からの探傷も可能であることを示した。

横リブ交差部のデッキ進展型き裂に対して、フルマトリクス・キャプチャと、トータル・フォーカシング法を組み合わせた検査方法が有効な方法であることを示した。

第 5 章「ルートき裂に対する UHPFRC 敷設による対策方法の検討」では、ルートき裂のうち主にデッキ進展型き裂を対象として、超高性能繊維補強セメント系複合材料の敷設（以下、UHPFRC 敷設）による疲労対策の効果とその対策自体の疲労耐久性について、有限要素解析および疲労試験により検討した。加えて、UHPFRC 敷設によるビード進展型き裂に対する対策効果に関しても解析的に考察した。

解析的な検討として、デッキ進展型き裂に対して、道路橋示方書の F 荷重以下の荷重作用であれば、線形弾性破壊力学が適用できることを示した。き裂深さがデッキプレート板厚の 1/6~5/6 の範囲では少なくとも、デッキ進展型き裂の進展にはモード I が支配的であることが明らかとなった。また、モード I の応力拡大係数はき裂深さがデッキプレート板厚の 1/2~2/3 で極値となり、それ以降は進展とともに減少していくことを示した。デッキ進展型き裂の応力拡大係数範囲における UHPFRC 敷設と、一般的な対策方法である SFRC 敷設の差は、敷設材のデッキプレートとの接着の有無による差に比べて小さいことを示した。つまり、敷設材の剛性よりも、デッキプレートとの合成の有無の方が対策効果に影響を与えるため、SFRC 敷設に関する既往の研究と同様に合成機能を担う接着剤の耐久性が重要といえる。

疲労試験により 4 つのデッキ進展型き裂が得られ、うち 3 つに対して、き裂処理を省略しても UHPFRC 敷設により進展が抑制できることを確認した。残り 1 つについては、対策後に進展がみられたが、デッキプレートを貫通するき裂にまでは至らなかった。また、き裂

閉口や溶接残留応力を考慮していない弾性有限要素解析により、進展挙動を評価できる可能性があることを示した。加えて、輪荷重走行試験により UHPFRC の材料自体やそのデッキプレートとの界面に大きな劣化がないことを確認し、UHPFRC 敷設が有する耐用年数を試算した結果、100 年以上の耐用年数であることを示した。

解析的な検討として、ビード進展型き裂に対しても、応力低減効果やき裂進展抑制効果が期待できる可能性があることを示した。

第 6 章「ルートき裂に対する床版下面からの対策方法の検討」では、交通規制が不要であり、かつ死荷重が増加しないルートき裂に対する対策方法を検討した。具体的には既往の対策方法の整理から、U リブの下フランジを撤去し、U リブ・デッキプレート溶接部を U リブ内側から溶接する対策方法を提案した。

本対策による構造改変に対して、耐荷性能は設計制限値の範囲内となることを確認した。また、溶接の施工性や出来形を確認し、上向き姿勢での施工においても想定した溶接ビードや止端処理を形成できることを確認した。加えて、アスファルト舗装への影響を検討した結果、輪荷重によるデッキプレート変形により橋軸方向のひび割れが発生する可能性は小さいこと、溶接の熱影響が小さいことを確認した。

弾性有限要素解析により、本対策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は、一般的な対策方法である SFRC 敷設と同等以上であることを確認した。また、他の部位への影響については、必要に応じて構造の見直しや、別途対策を講じることで対処可能であることを確認した。

本対策の疲労耐久性を確認するため、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、100 年以上の耐用年数であることを示した。

第 7 章「ルートき裂に対する維持管理方法の提案」では、第 2 章から第 6 章まで研究結果を踏まえ、ルートき裂に対する事後保全型と予防保全型の維持管理方法を提案した。

最後に、第 8 章「結論」では、以上の成果を要約して総括するとともに、今後の課題を述べた。