

鋼橋における鋼床版の疲労き裂検出技術と 対策技術の検証について

雄勝 裕一

関東地方整備局 関東道路メンテナンスセンター 技術企画課

(〒330-0843 埼玉県さいたま市大宮区吉敷町1-89-1 タカラビル2階)

道路橋の鋼床版において、デッキプレートとU型のトラフリップ（以下、Uリブ）片面すみ肉溶接部に疲労き裂が発生し、その対応が課題となっている。今回、平成30年度から5年間に渡り、前半では、早期に疲労き裂が検出可能な開口合成フェーズドアレイ超音波探傷（以下、開口合成PA）法の検証、後半では、疲労き裂の補修技術としてレーザークハイブリッド溶接（以下、LAHW）法の検証を行った。より早期に損傷箇所を発見し、早期治療によるコスト低減も含めた新しい鋼床版の維持管理手法の実現に向けて、検証結果と現状における課題等を報告する。

キーワード 鋼橋、鋼床版、疲労き裂、超音波探傷、レーザークハイブリッド溶接

1. 目的とその背景

道路橋に用いられる床版は、橋の通行荷重を直接受け止め支持し、床組もしくは主桁に伝達させる部材である。鋼床版は、コンクリート床版と比較すると軽量かつ短期間で架設することが可能であり、設計の自由度が高く、制約条件の多い都市部や長大橋等で多く採用されている。

近年、大型車交通量の多い重交通路線に架かる鋼床版橋梁で、デッキプレートとUリブ片面すみ肉溶接部に発生する疲労き裂が数多く発見されている。き裂の種類は、デッキプレート方向に進展するき裂（以下、デッキ進展き裂）と、溶接ビード表面に向かって進展するき裂（以下、ビード進展き裂）に分類される（図-1）。これらは、鋼床版下面での目視点検で発見が困難な上、外観での変状が判明した段階では相当な長さのき裂進展を伴っており、舗装があるためにデッキプレートを貫通していても発見が難しく、橋の安全を確保する上で課題が多い。

現状の目視点検では、Uリブの塗膜割れや漏水等に至る段階に経過し初めて発見されるため、事後保全型となっており、き裂が発生・進展した場合、交通規制した上で路面の舗装を剥がし、鋼床版の上下から当て板補強するのが一般的で、多大な労力と費用を要している。（図-2）。このような背景から、早期発見が困難かつ補修時の制約が多くコストも要するため、交通規制を必要としない補修方法等、鋼床版の疲労き裂対策が求められている。

本稿では、疲労き裂が顕在化した後の対処療法から、予防保全型の早期治療へシフトするため、開口合成PA法とLAHW法を組合せ、き裂が進展する前の段階での補修を目指す取り組みであり、5年間の検証と課題等を報告する。

2. 疲労き裂検出技術の選定（開口合成PAの検証）

前半3年間に渡り疲労き裂検出技術の検証を実施した。

(1) 選定調査

非破壊調査技術に関する最新情報を収集・整理し、図-3に示す9技術を抽出した。この中から、鋼床版のデッキ内蔵き裂及びビード内蔵き裂を比較的浅い段階から検出でき、き裂の深さを精度良く調査できることを期待して、超音波探傷法の“フェーズドアレイ法”を選定した。さらに、探傷精度向上が期待でき、作業効率面も有利な“開口合成PA”（図-4、5）を軸に検証を進めた。

(2) 模擬試験片及び実橋での試行

開口合成PAを基本として、き裂模擬試験片及び定期点検でのき裂発生橋梁にて、探傷精度確認を行った。

a) 探傷精度

デッキ進展き裂では誤差0.4mmと高精度であった。ビード進展き裂では誤差2.3mmとなったが、他の技術より精度が高かった。また、き裂深さが増すほど誤差が広がるため、探触子等の小型化等が課題となった。

b) 現場適用性

補強リブの箇所や段差での対応等の改良と、スキャナサイズの小型化が必要であることを確認した。

3. 開口合成PAの実用化に向けた適用性検証

疲労試験によって実き裂を導入した試験体にて、き裂

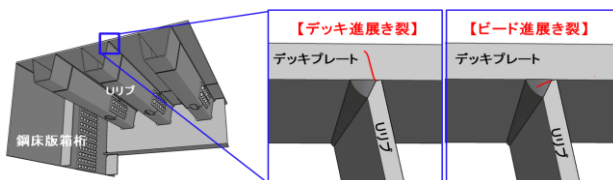


図-1 鋼床版デッキプレート・Uリブ溶接部に発生するき裂

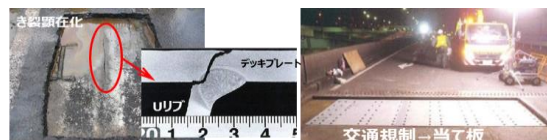


図-2 顕在化したデッキ進展き裂と当て板補強

検出性能の検証を行うと同時に、実橋を用いた適用性検証を行い、開口合成PAの実用化に向けた検証を行った。

(1) 実き裂を導入した試験体によるき裂検出性能の検証

試行で挙げた課題に対して、探触子の素子及び探触子自体の小型化を図り、他の技術との比較を行った。結果は、改良効果と他の探傷法より優れていることが確認でき、ビード進展き裂で深さ1.8mm以上、デッキ進展き裂で深さ2.9mm以上のき裂を確実に検出した。

(2) 実橋を用いた適用性検証

試験体での性能検証での課題に対してさらに改良を加え、き裂検出能力や調査能率等の検証を行った。

a) 調査能力向上に向けた改良

接触媒質供給方式をグリセリンペーストの塗布から水の自動供給へ改良した。また、画像化処理能力を1.5倍向上させ、スキャナ走行速度を3倍向上させた。

b) 調査範囲拡大に向けた改良

スキャナ長さの短縮やセンサ配置変更を行い、横リブ接近限界を小さくして探傷範囲の拡大を実現した。これらの改良を実橋で検証したところ、き裂検出数はビード進展き裂で2.2倍、デッキ進展き裂で1.6倍に向上し、探傷精度向上と調査範囲拡大を実現した。

(3) 実橋でのき裂寸法精度の確認

ビード進展き裂とデッキ進展き裂の両者とも1mm以内の誤差であった。試験体を用いた精度検証結果と実橋検証で得られたき裂をプロットした結果を図-6に示すが、実橋においても試験体と同程度の精度が確認できた。

(4) 性能評価・技術マニュアル及び性能カタログの作成

鋼床版の疲労き裂検出技術の検証結果をまとめ、①き裂検出技術の性能評価マニュアル、②開口合成PA性能カタログ、③開口合成PA技術マニュアルを作成した。

4. 疲労き裂補修技術の選定 (LAHW法の検証)

開口合成PAで検出したき裂の効果的な対策を検討するため、補修技術に関する調査を行い1技術を選定した。

(1) 選定調査

各種論文集等から40件の文献を収集し、既存技術と新技術について調査した結果、①リブ取替え補修、②溶接補修、③LAHW補修、④当て板補修、⑤スタットボルト当て板補修、⑥Uリブモルタル充填補修の6技術を候補とした。この中から、き裂発生要因を除去する抜本的対策であり、補修効果・適用性・作業性に優位で施工能率が高いことから、LAHW補修(図-7)を選定した。

(2) LAHWの概要

LAHWは、その名の通りレーザー溶接とアーク溶接を組み合わせた溶接法である。レーザー溶接は、入熱が低く溶接変形が小さいこと、高出力で溶接することによって深い溶込みが得られるというメリットがある反面、開先精度や狙い位置の裕度が少なく、品質管理が難しいというデメリットがある。ここに通常のアーク溶接を併用することで、開先形状や狙い位置の裕度を大きくすることがで

超音波探傷法 接触調査 ①フェーズドアレイ法 ②開口合成フェーズドアレイ法 ③2次元開口合成フェーズドアレイ法 ④鋼床版AUT、⑤鋼床版SAUT	渦電流探傷法 ⑦高感度磁気センサ法
非接触調査 ⑥レーザー超音波法	赤外線サーモグラフィ法 ⑧温度ギャップ法 ⑨ロックイン処理法

図-3 文献等調査から抽出した9技術

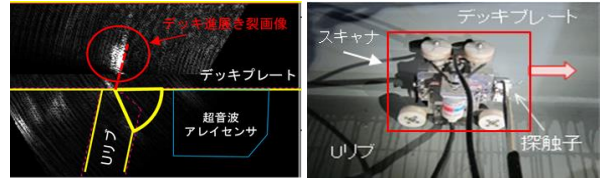


図-4 開口合成PAの探傷画像例(左)とスキャナによる探傷(右)

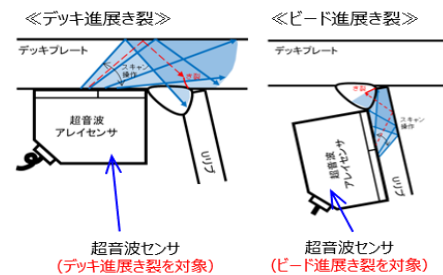


図-5 デッキ進展き裂とビード進展き裂の探傷方法

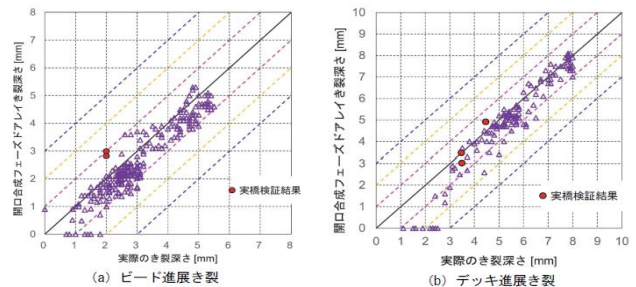


図-6 探傷結果と実き裂寸法(切削調査)の比較

き、長所を活かし短所を補う溶接法である。また、鋼床版き裂の補修に適用する場合には、上向き姿勢での施工となり、レーザー溶接単独では溶接金属が垂れるため、アーク溶接によりのど厚を確保するものである。なお、従来の溶接補修が必要であったき裂切削や開先成形等の前処理を行わずに補修が可能となり、溶け込みによってき裂や未溶着部を溶融し、完全溶込み溶接化(図-8)により疲労強度向上を期待するものである。また、図-9のように1パス目で未溶着部を溶融(完全溶け込み溶接化)、2パス目以降でき裂を溶融する複数回の溶接施工とし、高温割れ防止等のため、レーザーの照射位置を上下にシフトさせる工夫(レーザー揺動)を取り入れている。

5. LAHWの実用化に向けた適用性検証

各種試験体を製作して、補修効果の検証を行った。

(1) 試験体を用いた要素実験

デッキ進展き裂とビード進展き裂を導入した計8体を使用し、LAHW施工後に疲労試験にて疲労強度向上効果(疲労耐久性)を検証した。この試験では、①200万回載荷後に溶接金属内部からき裂が発生しないか、②

200 万回より前に破断した場合、補修前と比較して疲労強度や疲労寿命がどの程度向上しているかを確認した。

a) デッキ進展き裂試験体の疲労試験結果

200万回载荷前に溶接止端からき裂が発生し、破断に至ったが、LAHW施工前より、疲労強度は2等級以上、疲労寿命にして3~5倍程度向上したことを確認した。

b) ビード進展き裂試験体の結果

一部試験体で200万回载荷前に溶接止端からき裂が発生し、破断に至ったが、疲労強度は4等級以上、疲労寿命にして10倍以上向上したことが確認した。

c) 内在き裂の溶融、未溶着部完全溶け込み溶接化

断面マクロ試験にて、完全溶け込み溶接化と、内在き裂が完全に溶融していることが確認できた。

(2) 実物大試験体を用いた輪荷重走行試験

実橋の応力状態を模擬した検証及び横リブ交差部や溶接継ぎ目部における検証が出来ていないという課題から、実物大試験体による輪荷重走行試験を実施した。

a) 試験体製作とLAHW施工 (図-10)

3本のUリブを有する実物大試験体を製作し、LAHWは中央リブの横リブ交差部を含む2,000mmに施工した。

b) 輪荷重走行試験

ダブルタイヤがUリブウェブを跨ぐ位置に輪荷重(118kN)を走行させ、走行回数200万回を計画した。

結果は、80万回走行時に、図-11に示す位置に長さ320~415mmの疲労き裂と思われるエコーを4箇所検出し、いずれも裏波溶接からき裂が発生し、深さは9~11mmであった。また、デッキプレート上面から磁気探傷試験を行い、上記4箇所全てにおいて裏波溶接の直上に位置するき裂指示模様を確認した(図-12)。

c) き裂発生要因の調査検証

疲労き裂の発生寿命は、溶接止端の応力集中に依存し、局部形状(止端半径)に大きく影響を受けるが、裏波止端形状のばらつきが目立ち、止端半径が小さい箇所でき裂が発生していた。また、破面観察では、裏波止端からのき裂が貫通しているのが確認でき、動ひずみ変化の関係から見ると、早い箇所では20万回からひずみ値が徐々に低下し始めており、約20万回からき裂が発生していたことになる。なお、断面マクロ試験では、横リブ交差部で割れが生じ、溶接ビード表面に達していた。以上より、発生要因は裏波止端形状が悪かったと考えられ、品質確保の課題となった。

(3) 舗装に対する溶接熱の影響検証

LAHW施工中にデッキ上面が高温(約1000℃)になることから、模擬試験体を用いて直径100mmのコアを抜き、付着力および透水性試験を行った。

a) 舗装とデッキプレートの付着強度の確認

LAHW線直上の40mmの範囲で目標値(0.6(N/mm²))以上まで達せず、著しく低下した。一方、溶接線から110mm離れた位置では、健全試験体の付着強度の平均と同等以上であり、熱影響の範囲は狭いことを確認した。

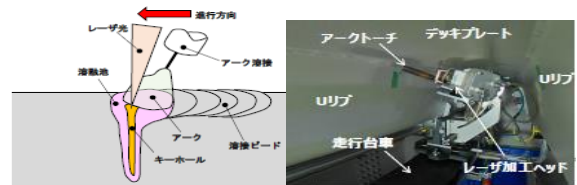


図-7 LAHW法のイメージ

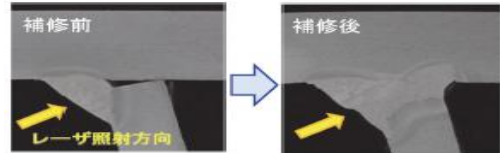


図-8 LAHWの完全溶け込み溶接化

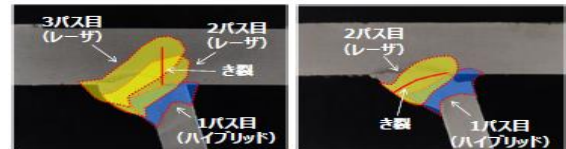


図-9 LAHWの施工手順(1パス~3パス施工)とき裂溶融位置



図-10 輪荷重走行試験体(左)と輪荷重走行試験の様子(右)

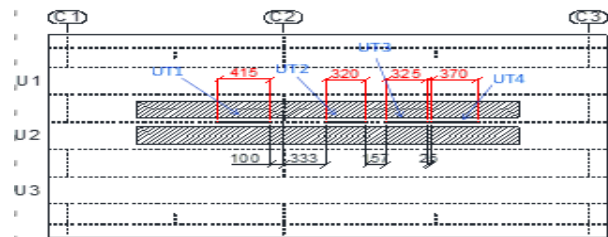


図-11 UT指示位置(単位: mm)

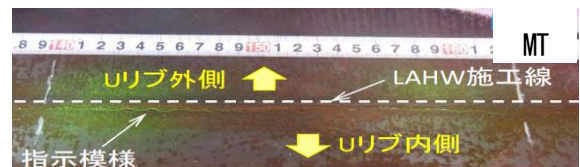


図-12 MT調査結果の一部

b) 防水性能の確認

溶接熱を受けた基層の透水性は「不透水」であり、防水性能は低下しないことが確認された。

(4) 溶接熱を受けた舗装の破壊形態検証

上記より、付着強度が著しく低下した舗装の上を輪荷重が走行することで舗装の破損等が懸念されたため、アスファルト舗装を施工した試験体にLAHWを施工後、載荷荷重50kN、載荷回数500万回で繰返し載荷試験を実施した。検証の結果は、載荷終了時まで目立った損傷は確認されず、断面観察結果も特に異常は認められなかった。

6. 改良したLAHWによる溶接品質の検証

輪荷重走行試験体の裏波溶接止端半径が小さくなった要因として、1パス目のレーザー照射角度およびレーザーの

狙い位置のずれが影響していると推察し、良好な裏波溶接形状を確保できるように改良して、疲労試験による施工品質、疲労耐久性及び安全性の検証を実施した。

(1) 疲労き裂の導入による試験体製作とLAHW施工

2本のUリブを有する横リブ交差部を模擬した試験体(図-13)を製作し、片方のUリブには塗装を施した。この試験体に繰返し荷重(100KN)を与えてき裂を導入(き裂長さ6mm程度)し、図-13に示す4溶接線(横リブ交差部を含む200mm×4溶接線)にLAHWを施工している。

(2) 疲労耐久性検証試験

Uリブ直上に繰返し荷重(載荷荷重100KN)を与え、繰返し回数250万回でき裂が発生しないことを確認する。

結果は、図-13に示すU2Lで42.3万回、UIRで47.8万回載荷時にひずみゲージの変動が確認されたため、磁気探傷試験を実施したところ、この2溶接線に対して裏波溶接にき裂指示模様を確認された。その後、75万回載荷時には、き裂深さが6.5mmまで到達し、120万回載荷時にUIIを除く3溶接線でき裂が進展し貫通した。なお、UIIは貫通に至らなかったものの、き裂深さ8.3mmまで進展している。貫通に至ったため、ここで疲労試験を終了した。

溶接品質の信頼性を確保した上で現場実装予定であったが、この結果より、現在き裂発生の原因と詳細調査及び、今後の対応について調整を進めている。

7. 実橋施工試験による施工性・安全対策の検証

実橋での検証を行うため、千葉国道管内の水郷大橋(一般国道51号)を選定し、実橋施工試験を実施した。

(1) 実橋施工試験用試験体の製作

試験体を橋梁に取り付ける形をとり、実橋での交通振動下で行う試験とした。また、一般部と横リブ交差部の2種類の試験体を製作している。溶接施工延長は、一般部・横リブ交差部共にUリブの両側2溶接線に対して施工し、1溶接線に対して650mmを施工する計画とした。

(2) 実橋施工試験(写真-1)

一般部の試験体で2日間、横リブ交差部の試験体で2日間の計4日間で施工試験を行い、準備やその他現場作業性の検証なども含めて約2週間に渡り現場で検証を行った。確認事項は、①実橋施工における施工能率と作業性、②交通振動下における溶接品質、③塗膜除去による残存塗膜等の影響、④施工時の安全対策とした。なお、検証結果については、現在取りまとめているところである。

(3) 品質確認と施工性・安全対策の評価

断面マクロ試験を行ったが、溶接止端や裏波溶接形状において確認が必要な状態が多く見られたため、実橋施工における品質の確保に向けて引き続き検討が必要な結果となった。詳細については、原因の調査と改善策について取りまとめているところである。

8. 溶接補修技術の導入検討マニュアルの作成

実橋施工試験等から得られた知見を集約し、実橋への

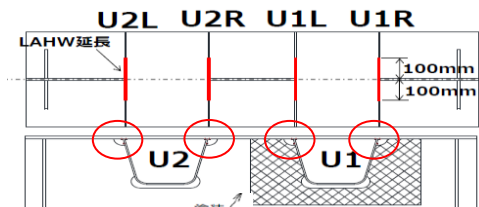


図-13 試験体及びLAHW施工位置



写真-1 実橋施工試験の様子



写真-2 LAHW施工後の詳細調査(超音波探傷試験)の様子

現場実装のための導入検討マニュアルの策定を目指して、マニュアル(骨子)を作成しているところである。

9. 今後の課題と展望

5年間の検証を終え、開口合成PAとLAHWの組合せによる現場実装には至らなかったが、引き続き明らかとなった課題等に対して検証を続ける予定であり、これらの技術の信頼性向上に向けて取り組んでいく。なお、疲労き裂検出技術については、上記3.(4)でマニュアル等の整備を終えたため、現場実装へ先行した取組みが期待できる。

10. 溶接管理技術者(WES)等としての視点

今回は、①検出技術→非破壊試験技術、②対策技術→溶接技術であった。これらの技術について、非破壊試験技術者と溶接管理技術者の両資格を保有していることから、積極的に開発者側とコミュニケーションをとることができ、技術的判断を自ら手を動かして行えることで、受注者に検証等を丸投げすることなく自分事として取り組めた。また、自らも超音波探傷器を走査し(写真-2)、溶接欠陥の有無の確認や今後の改良方針等に意見を反映する等、技術力を生かし一歩踏み込んだ仕事の進め方を実現できた。鋼床版き裂へのLAHW補修は、上向き溶接となるため厳しい環境での検証であったが、今後も総力の結集と進化の追求を大切に、この技術の更なる発展に向けて、熱意を持って取り組むことで貢献していきたい。

11. 謝辞

今回の各種検証にあたり御指導いただいた東京都立大学村越教授、資料収集や実橋施工試験等で御協力いただいた千葉国道事務所及び利根川下流河川事務所の関係者に、この場を借りて改めて御礼を申し上げる。