

プロジェクト・研究成果の概要(1/2)

プロジェクト:「鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究」
プロジェクトリーダー ・氏名(ふりがな): 坂野 昌弘(さかの まさひろ) ・所属、役職: 関西大学、教授
研究期間:平成25年11月～平成28年3月
プロジェクト参加メンバー(所属団体名のみ) [産] 橋梁調査会、日本非破壊検査工業会、建設コンサルタンツ協会、日本橋梁建設協会、 阪神高速道路、本州四国連絡高速道路、西日本高速道路 [官] 国土交通省近畿地方整備局 道路部、姫路河川国道事務所、近畿技術事務所 [学] 関西大学、京都大学、東京大学
プロジェクトの背景・目的(研究開始当初の背景、目標等) 疲労亀裂対策は発見された亀裂の状況に応じて講じられることから、疲労亀裂に対しては全数調査が原則である。しかしながら、調査箇所数が膨大な場合には全数調査に時間がかかることから、現実的には何らかの方法で優先順位付けを行い、効率化をはかる必要がある。 本研究では、荷重条件や各部位の応力の状況、FCM 等の部材の種類、構造詳細、材料特性等に着目して優先順位付けを行い、効率化をはかるとともに、同時に高い信頼性も確保できるような疲労亀裂調査方法を提案し、さらに予防保全も含めた補修方法も提案する。
プロジェクトの研究内容(研究の方法・項目等) (1)疲労亀裂調査手法の現状把握と課題抽出 対象橋梁に対して現地調査を行い、疲労亀裂等に関して現状を把握し課題を抽出する。 (2)疲労亀裂調査のスクリーニング方法の検討 荷重条件や各部位の応力状況、FCM 等の部材の種類や構造詳細、材料特性等に着目し、解析や実験により、調査個所の優先順位付けを行う。また、提案する優先順位付けの妥当性を実橋での亀裂調査や応力計測等によって検証する。 (3)疲労亀裂調査後の補修方法の検討 亀裂発見後の応急対策と恒久対策、亀裂発生が予想される部位に対する予防保全等を含めた補修方法を解析や実験を行って検討する。また、提案する補修方法の妥当性を実橋での応力計測等により検証する。 (4)効率的な疲労亀裂調査方法等の取りまとめ 上記の検討結果を取りまとめ、効率的で信頼性の高い疲労亀裂調査方法と補修方法を提案する。

プロジェクト・研究成果の概要(2/2)

プロジェクトの研究成果の概要

1. 平成 25 年度の成果

1972 年竣工の単純鋼合成鋼桁橋(支間:6@41.2m, 幅員:18.8m)を対象に以下のような検討を行った。なお、この橋梁は、平成 22 年度のセンサスでは 1 日の交通量が約 12 万台(大型車両混入率=21.2%)で、目視点検の結果約 4000 個所の塗膜割れが検出されている。

(1)非破壊検査手法のレビューを行って今回適用可能な可能な非破壊検査手法を絞り込み、現地での疲労亀裂調査方法を渦流探傷法(ET)と磁粉探傷法(MT)の 2 種類に決定した。

(2)現地調査を行い、10 パターンの塗膜割れに対して、優先度の高い⑩(横桁貫通部 877 か所)と①(面外がセット継手部 557 か所)の 2 パターンを選定し、約 4000 か所の塗膜割れを 1/3 の約 1400 か所に絞込んだ。

(3)渦流探傷法(ET)で亀裂調査を行い、後に実施した磁粉探傷法(MT)の結果と比較して、的中率や見逃し率、空振り率について詳細に検討した。また、ET と MT の実際の作業日数から、ET でスクリーニングを行った場合の作業日数の短縮化について検討した(参考文献 1、4、9)。その結果、約 200 か所の調査箇所に対して、ET で亀裂有と判定されたのは 41 か所で約 2 割なので、これらに対して MT を行えば、MT の実施箇所を 1/5 に減らすことができ、作業日数を 24%程度短縮することが可能となる。ただし、MT で亀裂と判定された 13 か所の内の 5 か所(4 割)を見逃してしまうため、適用に当たっては注意が必要である。なお、ET で亀裂有と判定された塗膜割れが全体の半数以上の場合には、それらに対して MT を行っても工程は短縮されず、二度手間となるため、最初から MT を行う方がよい。

(4)実物大の試験体を用いた疲労実験を行い、横桁貫通構造の疲労挙動について詳細に検討し、他の亀裂パターンとの違いを明らかにした(参考文献 2、3)。その結果、上側溶接構造および下側溶接構造ともに、疲労き裂は横桁下フランジ縁端部のウェブ側溶接止端から発生し、その後、上側溶接構造ではウェブを斜め上に進展し中立軸付近で進展速度が低下、一方、下側溶接構造ではウェブを真下に進展して下フランジを破断させた。疲労強度等級は何れも道示で最低の H' であるが、下側溶接構造の方が上側溶接構造に比べて亀裂の進展が早く、危険性が高いことが明らかとなった。

(5)拡張有限要素法(XFEM)による亀裂進展シミュレーションを行い、疲労亀裂の進展挙動や進展寿命が予測可能であることを示した。

2. 平成 26 年度の成果

(1)横桁貫通構造(H' 等級)の実態調査(近畿管内)

直轄では 107 橋、自治体では 624 橋で横桁貫通構造の可能性があることが明らかになった。貫通構造の詳細については図面では判断できず、現地調査中。

(2)非破壊検査による点検の効率化

パターン①⑩以外の分配横桁上部ウェブギャップ部や対傾構取付け垂直補剛材上端部の亀裂パターンを対象に ET と MT を実施し、昨年度と同様に、的中率や見逃し率、空振り率、作業日数の短縮化について詳細に比較検討を行った(参考文献 5、8)。その結果、約 200 か所の調査箇所に対して、ET で亀裂有と判定されたのは 57 か所で約 3 割なので、これらに対して MT を行えば、MT の実施箇所を 1/3 に減らすことができ、作業日数を 15%程度短縮することが可能となる。ただし、MT で亀裂と判定された 36 か所の内の 14 か所(4 割)を見逃してしまうため、適用に当たっては注意が必要である。なお、ET で亀裂有と判定された塗膜割れが全体の半数以上の場合には、それらに対して MT を行っても工程は短縮されず、二度手間となるため、最初から MT を行う方がよい。

また、赤外線による遠隔検査を試行したところ、走行荷重によって応力集中が生じている亀裂先端部については、遠隔から検出可能であることが示された。課題として、直視できない部材の陰や広範囲・多数箇所に対する適用性が指摘された。

(3)疲労試験による事後 & 予防保全対策の検証

事後保全に関して亀裂の削除と整形、ストップホール、予防保全に関して溶接止端仕上げ、当て板について効果の検証を行った(参考文献 6、7)。その結果、比較的長い亀裂に対する事後保全対策として、ストップホールと高力ボルト締め、あるいはストップホールのみでも亀裂の進展を防止できること、またストップホールが明けられないような短い亀裂に対しては、削り込みによる亀裂の削除と削除痕の整形仕上げにより、亀裂の再発が防止できることが明らかとなった。予防保全については、亀裂発生寿命が止端仕上げにより 2~8 倍程度、当て板により 10 倍以上それぞれ向上すること、止端仕上げと当て板を併用すれば亀裂の発生を完全に防止できることが示された。な

お、当て板については、垂直補剛材側のボルト締めは不要で、横桁下フランジ側と主桁ウェブ側の 2 面のみのボルト締めで十分なこと、また、上下両方ではなくスロット側のみの取り付けで十分な効果が得られることが明らかとなった。

(4)XFEMによる疲労破壊シミュレーション

疲労試験体の横桁貫通部に対して、疲労き裂の進展方向や進展寿命等の疲労亀裂進展挙動の予測が可能であることを示した。

3. 平成 27 年度の成果

(1)解析による対策効果の検討

実橋を対象とし、1 径間分の全体モデルを作成して、FEM による応力解析と XFEM による亀裂進展解析を行った。その結果、FEM 解析により、分配横桁下フランジ貫通部では、ビード切削により溶接止端部の応力集中が消滅し、母材部の公称応力程度となること、分配横桁上部のウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部では、当て板やアングル材が主桁の上フランジと密着することにより、ウェブギャップ板上端と垂直補剛材上端の応力集中が、対策前の 6 割～7 割まで低減できると予測できた。また、XFEM 解析により、横桁下フランジ貫通部では、ビード切削後は導入した初期亀裂が進展しないこと、またウェブギャップ部では、当て板対策後は対策前の 100 倍以上の疲労寿命となることを予測できた。

(2)実験による対策効果の検討

前年度までの検討で、横桁貫通部に対して、止端仕上げや大型の当て板により、ある程度の予防保全効果が確認されたが、亀裂の発生を完全に防止することはできず、仕上げ形状の管理や大型当て板取り付けの施工性等に課題があることから、より簡易で効果的なビード切削と小型アングル材による予防保全対策について検討を行った(参考文献 10)。その結果、横桁下フランジと主桁ウェブの間のすみ肉溶接に対して、ビード全長の 1/4 程度以上を切削し、切削端部を仕上げして小型アングル材を取り付けることにより、疲労亀裂の発生が完全に防止できることが検証された。

また、塗膜割れ発生個所 4000 か所の 2/3 を占める分配横桁上部のウェブギャップ部や対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労き裂に対して、ジャッキアップによる当て板補強と、タッピングボルトを用いたアングル材補強の二つの工法の補強効果を検討した。その結果、両方の工法とも、亀裂発生部の局所的な応力集中を 50～60% 程度まで低減できることが明らかとなった。

(3)現地計測による対策効果の検討

実橋の横桁貫通部に対してビード切削と小型アングル材、分配横桁上部のウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部に対してジャッキアップによる当て板とタッピングボルトを用いたアングル材の予防保全対策を試行し、その前後で 72 時間連続の応力計測を行って、予防保全対策による応力低減効果と疲労寿命向上効果を検証した。その結果、横桁貫通部については、ビード切削により溶接部の応力集中が消滅して、疲労寿命が数十倍以上向上し、ウェブギャップ部と垂直補剛材上端部についても、応力集中が最大で 6 割程度低減でき、疲労寿命が数十倍向上する効果が検証できた。

4. 平成 25～27 年度(3 年間)の成果のまとめ

(1)疲労亀裂調査手法の現状把握と課題抽出

1972 年竣工の単純鋼合成鉄桁橋(支間:6@41.2m, 幅員:18.8m)を対象に以下のような検討を行った。なお、この橋梁は、平成 22 年度のセンサスでは 1 日の交通量が約 12 万台(大型車両混入率=21.2%)で、目視点検の結果約 4000 個所の塗膜割れが検出されている。

非破壊検査手法のレビューを行って今回適用可能な非破壊検査手法を絞り込み、現地での疲労亀裂調査方法を渦流探傷法(ET)と磁粉探傷法(MT)の 2 種類に決定した。

また、横桁貫通構造(H' 等級)の実態調査(近畿管内)を実施し、直轄では 107 橋、自治体では 624 橋で横桁貫通構造の可能性があることが明らかになった。貫通構造の詳細については図面では判断できず、別途現地調査中。

(2)疲労亀裂調査のスクリーニング方法の検討

現地調査を行い、10 パターンの塗膜割れに対して、優先度の高いパターン⑩(横桁貫通部 877 か所)と①(面外

がセット継手部 557 か所)の 2 パターンを選定し、約 4000 か所の塗膜割れを 1/3 の約 1400 か所に絞込んだ。

実物大の試験体を用いた疲労実験を行い、横桁貫通構造の疲労挙動について詳細に検討し、他の亀裂パターンとの違いを明らかにした(参考文献 2、3)。その結果、上側溶接構造および下側溶接構造ともに、疲労き裂は横桁下フランジ縁端部のウェブ側溶接止端から発生し、その後、上側溶接構造ではウェブを斜め上に進展し中立軸付近で進展速度が低下、一方、下側溶接構造ではウェブを真下に進展して下フランジを破断させた。疲労強度等級は何れも道示で最低の H' であるが、下側溶接構造の方が上側溶接構造に比べて亀裂の進展が早く、危険性が高いことが明らかとなった。

渦流探傷法(ET)で亀裂調査を行い、後に実施した磁粉探傷法(MT)の結果と比較して、的中率や見逃し率、空振り率について詳細に検討した。また、ET と MT の実際の作業日数から、ET でスクリーニングを行った場合の作業日数の短縮化について検討した(参考文献 1、4、9)。その結果、約 200 か所の調査箇所に対して、ET で亀裂有と判定されたのは 41 か所で約 2 割なので、これらに対して MT を行えば、MT の実施箇所を 1/5 に減らすことができ、作業日数を 24%程度短縮することが可能となる。ただし、MT で亀裂と判定された 13 か所の内の 5 か所(4 割)を見逃してしまうため、適用に当たっては注意が必要である。なお、ET で亀裂有と判定された塗膜割れが全体の半数以上の場合には、それらに対して MT を行っても工程は短縮されず、二度手間となるため、最初から MT を行う方がよい。

パターン①と⑩以外の分配横桁上部ウェブギャップ部や対傾構取付け垂直補剛材上端部の亀裂パターンを対象に ET と MT を実施し、昨年度と同様に、的中率や見逃し率、空振り率、作業日数の短縮化について詳細に比較検討を行った(参考文献 5、8)。その結果、約 200 か所の調査箇所に対して、ET で亀裂有と判定されたのは 57 か所で約 3 割なので、これらに対して MT を行えば、MT の実施箇所を 1/3 に減らすことができ、作業日数を 15%程度短縮することが可能となる。ただし、MT で亀裂と判定された 36 か所の内の 14 か所(4 割)を見逃してしまうため、適用に当たっては注意が必要である。なお、ET で亀裂有と判定された塗膜割れが全体の半数以上の場合には、それらに対して MT を行っても工程は短縮されず、二度手間となるため、最初から MT を行う方がよい。

また、赤外線による遠隔検査を試行したところ、走行荷重によって応力集中が生じている亀裂先端部については、遠隔から検出可能であることが示された。課題として、直視できない部材の陰や広範囲・多数箇所に対する適用性が指摘された。

(3)疲労亀裂調査後の補修方法の検討

疲労試験により、事後保全対策に関して亀裂の削除と整形、ストップホール、予防保全対策に関して溶接止端仕上げ、当て板について効果の検証を行った(参考文献 6、7)。その結果、比較的長い亀裂に対する事後保全対策として、ストップホールと高力ボルト締め、あるいはストップホールのみでも亀裂の進展を防止できること、またストップホールが明けられないような短い亀裂に対しては、削り込みによる亀裂の削除と削除痕の整形仕上げにより、亀裂の再発が防止できることが明らかとなった。予防保全については、亀裂発生寿命が止端仕上げにより 2~8 倍程度、当て板により 10 倍以上それぞれ向上すること、止端仕上げと当て板を併用すれば亀裂の発生を完全に防止できることが示された。なお、当て板については、垂直補剛材側のボルト締めは不要で、横桁下フランジ側と主桁ウェブ側の 2 面のみボルト締めで十分なこと、また、上下両方ではなくスロット側のみ取り付けで十分な効果が得られることが明らかとなった。

前年度までの検討で、横桁貫通部に対して、止端仕上げや大型の当て板により、ある程度の予防保全効果が確認されたが、亀裂の発生を完全に防止することはできず、仕上げ形状の管理や大型当て板取り付けの施工性等に課題があることから、より簡易で効果的なビード切削と小型アングル材による予防保全対策について検討を行った(参考文献 10)。その結果、横桁下フランジと主桁ウェブの間のすみ肉溶接に対して、ビード全長の 1/4 程度以上を切削し、切削端部を仕上げた小型アングル材を取り付けることにより、疲労亀裂の発生が完全に防止できることが検証された。

また、塗膜割れ発生箇所 4000 か所の 2/3 を占める分配横桁上部のウェブギャップ部や対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労き裂に対して、ジャッキアップによる当て板補強と、タッピングボルトを用いたアングル材補強の二つの工法の補強効果を検討した。その結果、両方の工法とも、亀裂発生部の局所的な応力集中を 50~60%程度まで低減できることが明らかとなった。

さらに、実橋を対象とし、1 径間分の全体モデルを作成して、FEMによる応力解析とXFEMによる亀裂進展解析を行った。その結果、FEM 解析により、分配横桁下フランジ貫通部では、ビード切削により溶接止端部の応力集中が消滅し、母材部の公称応力程度となること、分配横桁上部のウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部

では、当て板やアングル材が主桁の上フランジと密着することにより、ウェブギャップ板上端と垂直補剛材上端の応力集中が、対策前の 6 割～7 割まで低減できると予測できた。また、XFEM 解析により、横桁下フランジ貫通部では、ビード切削後は導入した初期亀裂が進展しないこと、またウェブギャップ部では、当て板対策後は対策前の 100 倍以上の疲労寿命となることを予測できた。

最後に、実橋の横桁貫通部に対してビード切削と小型アングル材、分配横桁上部のウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部に対してジャッキアップによる当て板とタッピングボルトを用いたアングル材の予防保全対策を試行し、その前後で 72 時間連続の応力計測を行って、予防保全対策による応力低減効果と疲労寿命向上効果を検証した。その結果、横桁貫通部については、ビード切削により溶接部の応力集中が消滅して、疲労寿命が数十倍以上向上し、ウェブギャップ部と垂直補剛材上端部についても、応力集中が最大で 6 割程度低減でき、疲労寿命が数十倍向上する効果が検証できた。

(4)効率的な疲労亀裂調査方法等の取りまとめ

以上の検討結果より、効率的で信頼性の高い疲労亀裂調査方法と補修方法を提案する。

○疲労き裂調査方法

塗膜割れに対して、まず初めに、部材の重要度や亀裂であった場合の進展性に着目して優先順位をつけることができる。亀裂の進展性は、継手の疲労強度等級や作用応力、材料特性等を配慮してある程度推定可能である。

次に、磁粉探傷の前に渦流探傷法で亀裂調査を行い、亀裂有と判定された箇所について磁粉探傷法を適用することで、作業工程を短縮できる場合がある。ただし、亀裂の半数近くを見逃す可能性があることから、亀裂の重要性、進展性等に十分配慮する必要がある。なお、渦流探傷で亀裂有と判定される塗膜割れの個数が全体の半数以上である場合には、工程は短縮されないため、初めから磁粉探傷を行うほうがよい。

○補修方法

横桁下フランジ貫通部

亀裂発生後の事後保全については、ストップホールがかけられる程度の長さの亀裂に対しては、ストップホールと高力ボルトの締め付けで亀裂の進展を防止することができる。亀裂が長い場合や応力が大きい場合には、更に当て板等の対策が必要になる場合もある。ストップホールがかけられないような短い亀裂に対しては、バーグラインダーによる削り込みで亀裂を削除し、削除痕を滑らかに整形することにより亀裂の再発を防止することができる。応力が大きい場合には更に当て板等の対策が必要になる場合がある。

亀裂が生じていない箇所に対する予防保全対策として、応力条件が厳しくない場合には、溶接部の止端仕上げが可能である。ただし、仕上げ状態に対する施工管理が重要となる。応力条件が厳しい場合には、横桁下フランジと主桁ウェブの間のビードを切削し、切削したビードの分を小型のアングル材で補強しておけばよい。

分配横桁上部ウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部

予防保全対策として、アングル材を主桁の上フランジにタッピングボルトで密着させた後に、ウェブギャップ板あるいは垂直補剛材に高力ボルトで固定する方法がよい。

事後保全の場合には、長い亀裂の場合には亀裂先端にストップホール、亀裂が短い場合には亀裂を削り込みで除去した後で上記のタッピングボルトとアングル材を用いた対策を行えばよい。

参考文献

- 1) Ichinose, L. H., 水江正弘、坂野昌弘：渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討、土木学会第 69 回年次学術講演会、CS5-009, 2014.9.
- 2) 吉田直人、坂野昌弘、小西日出幸、藤井隆：スリット付き横桁下フランジ貫通構造の疲労挙動、土木学会第 69 回年次学術講演会、CS5-010, 2014.9.
- 3) Yoshida, N., Sakano, M., Konishi, H. and Fujii, T.: Fatigue Test of Steel Girder Web Penetration Details with a Slit, Sustainable Solution in Structural Engineering and Construction, pp.95-100, Nov. 2014.
- 4) 一ノ瀬伯子ルイザ、水江正弘、坂野昌弘：渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討、鋼構造年次論文報告集、第 22 巻、pp.825-832, 2014.11.

- 5) Ichinose, L. H., 水江正弘、坂野昌弘:渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討(その2)、土木学会第70回年次学術講演会、CS4, 2015.9.
- 6) 吉田直人、坂野昌弘、小西日出幸、藤井隆:横桁貫通構造に対する当て板による予防保全対策効果の検討,平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会,2015.5.
- 7) 吉田直人、坂野昌弘、小西日出幸、藤井隆:横桁貫通構造の疲労損傷に対する予防保全対策効果の検討、土木学会第70回年次学術講演会、CS4, 2015.9.
- 8) 一ノ瀬伯子ルイザ、水江正弘、坂野昌弘:渦流探傷試験を用いた鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する検討(その2)、鋼構造年次論文報告集、第23巻、pp.356-363, 2015.11.
- 9) L.H. Ichinose, L. H., Mizue, M. and Sakano, M. : Rationalization of fatigue cracks inspections in steel bridges through application of eddy current tests, Proc. of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2016) , Foz do Iguaçu, Brazil, June, 2016. (発表予定)
- 10) 吉田直人、坂野昌弘、小西日出幸、小山雅弘:スロット付き横桁貫通構造のビード切削による予防保全対策,平成28年度土木学会関西支部年次学術講演会,2016.6.(発表予定)