

報告番号	甲 第 14949 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 鋼橋支承部ソールプレート溶接部の疲労き裂に対する予防保全型維持管理手法に関する研究
(A study on preventive maintenance management against fatigue cracks around sole plates welded to steel bridge girders)

氏 名 丹羽 雄一郎

論 文 内 容 の 要 旨

ソールプレートとは、鋼橋の桁と支承間の円滑な荷重伝達を目的として、桁下フランジと支承の間に設置される鋼板である。ソールプレートは、リベットや高力ボルトあるいは溶接で桁下フランジに取り付けられているが、このうち溶接で取り付けられているものでは、その溶接部周辺に疲労き裂が発生する例がある。このき裂は下フランジを貫通しウェブへと進展することが知られており、進展が大きくなれば走行車両の安全に影響する。き裂発生の主たる原因は、支承の可動機能低下と考えられていることから、対策として一般に、支承とソールプレートの取替が行われるが、この対策は対策規模が大きくコスト・工期等の面で維持管理上の負担が大きい。

これらのことから、ソールプレート溶接部の疲労き裂に対しては、予防保全型維持管理により走行車両の安全を確保するとともに、維持管理に要する労力を軽減することが得策と考えられる。

本論文は、ソールプレート溶接部の疲労き裂に対する簡易な予防保全対策を開発し、その予防保全対策をベースとした予防保全型維持管理手法を確立することを目的として、実橋調査、実験、および解析的検討により行った研究の成果をとりまとめたものである。以下に各章の概要を示す。

第 1 章「序論」では、研究の背景として、ソールプレート溶接部周辺に発生する疲労き

裂の概要や、これまでに行われている対策およびその課題について概説するとともに、既往研究におけるき裂発生原因や対策に関する検討状況について整理した。その上で、本研究の目的について述べ、予防保全対策を研究テーマとした理由および本研究における課題を示した。

第2章「実橋調査によるき裂発生傾向の分析および応力性状の評価」では、ソールプレート溶接部周辺の疲労き裂の発生状況および発生傾向を把握するため、実橋を対象として磁気探傷試験を行った。また、ソールプレート溶接部前面近傍の応力性状を評価するため、実橋を対象として列車走行時の応力計測を行った。

磁気探傷試験の結果、山陽新幹線の鋼・合成橋梁の実橋において発生が確認されたき裂は、ソールプレート溶接部前面のフランジ側止端き裂、ソールプレート側止端き裂、ルートき裂、ならびに、ソールプレート前縁直上ウェブ溶接部のウェブ側止端き裂、フランジ側止端き裂、ルートき裂であった。これらのき裂のうち、最も発生数が多かったのは、ソールプレート溶接部前面のフランジ側止端き裂であり、次いで、ソールプレート溶接部前面のソールプレート側止端き裂、同ルートき裂であった。一方、ウェブ溶接部についてはソールプレート溶接部前面に比べ、止端き裂、ルートき裂ともに発生数が大幅に少なく、特に最近の調査においては発生がほぼ確認されなかった。また、これらのき裂発生傾向は、可動支承と固定支承で概ね同様であった。

応力計測の結果、ソールプレート溶接部前面近傍では、支承の可動機能低下により下フランジに圧縮の面内応力が作用するとともに、局所的に上に凸となる面外曲げが発生することで、下フランジ下面に圧縮応力が発生することを確認した。ソールプレート前縁直上のウェブ溶接部近傍では、ウェブ外面・内面ともに面内応力が支配的な圧縮応力が発生することを確認した。これらの圧縮応力は、可動支承、固定支承によらず発生し、その応力の大きさは支間の大小と関係性がないことを示した。また、本研究といくつかの既往研究における応力計測結果を比較し、発生応力の上限值が概ね同等であることを確認した。

第3章「ソールプレート溶接部周辺の疲労き裂の予防保全対策に関する検討」では、ソールプレート溶接部周辺に発生する疲労き裂の予防保全対策の開発を目的として、有限要素解析および桁試験体の疲労試験による検討を行った。止端部に対してはピーニング処理、ルート部に対してはタップボルトによりソールプレートと下フランジの隙間変位を抑制する方法（以下、タップボルト工法という）の効果を評価した。

まず、実橋をモデル化した有限要素解析により、タップボルト工法によりルート部近傍の隙間変位を低減できることを示した。また、タップボルトはウェブに近い位置に本数を多く配置する程隙間変位の低減効果が大きいことを示した。一方、ソールプレート幅方向にタップボルトを増やしても隙間変位の低減に寄与しないことを示した。

次に、疲労試験により、ソールプレート溶接部前面フランジ側止端部の疲労強度は、ピ

ーニング処理によって少なくとも 1 等級程度改善できることを示した。また、ピーニング処理後の疲労強度はホットスポット応力範囲による整理において、JSSC-B 等級を満足することを確認した。

ソールプレート前縁直上のウェブ・下フランジ溶接部止端部の疲労強度は、ピーニング処理によって JSSC-A 等級程度の高い疲労強度となっていることを示した。

ソールプレート溶接部前面ルート部の疲労寿命は、タップボルト工法により隙間変位を低減することによって延伸できることを示した。その疲労寿命は、隙間変位とリガメント長を用いた式により安全側に評価できることを示した。

第 4 章「タップボルト継手の疲労強度および材間相対変位に関する検討」では、ソールプレート溶接部前面のルートき裂の予防保全対策の方法として考案したタップボルト継手の基礎研究として、疲労試験により継手の疲労破壊性状、疲労強度、および主板間の相対変位（以下、材間相対変位という）の特性を評価した。検討の結果、以下のことがわかった。

タップボルトに繰返し引張軸力が作用する条件下においては、タップボルトの疲労破壊は主板同士の隙間付近において発生することがわかった。その疲労強度は JSSC-E 等級であることがわかった。また、この疲労強度にはねじ部の樹脂コーティングの有無は影響しないことがわかった。

タップボルトに繰返し圧縮軸力が作用する条件下におけるタップボルトの疲労強度は、JSSC-A 等級程度であることがわかった。

タップボルトに繰返しせん断力が作用する条件下においては、タップボルトの疲労破壊は主板と添接板の境界面付近において発生することがわかった。その疲労強度曲線の傾きは JSSC-S 等級 ($m=5$) と同等であるが、疲労強度は S 等級より大幅に高く、200 万回疲労強度で 190 N/mm^2 程度であることがわかった。

タップボルト継手における材間相対変位は、ねじ部の嵌合精度が低い場合に増加すると考えられるため、嵌合精度をねじ部の樹脂コーティングにより補完することで、材間相対変位を抑制できると考えられることを示した。

引張軸力疲労試験を再現した有限要素解析により、タップボルト継手に発生する最大主ひずみピーク値は、ねじ嵌合部の摩擦係数に差があっても大きく変わらないことを示した。このことから、ねじ嵌合部の微小なすべりがタップボルトの疲労寿命に与える影響は小さいことがわかった。

タップボルト継手の疲労試験結果と、実橋解析においてタップボルトに作用する応力の比較より、本検討における実橋適用条件下においては、タップボルト継手の疲労破壊が発生する可能性が低いことを示した。

第 5 章「ソールプレート溶接部の発生応力推定に関する検討」では、予防保全型維持管

理の実践においては事後保全型維持管理より対象箇所が増えることから、対策優先順位のスクリーニングの重要性に着目し、有限要素解析によりソールプレート溶接部前面近傍の発生応力に影響する因子を調べ、その因子をパラメータとした発生応力の推定方法を検討した。

検討の結果、ソールプレート溶接部前面近傍の発生応力は、ソールプレート前面近傍の局所的な下フランジとウェブの断面積と、支承部に作用する水平反力との関係性が強いことがわかった。これを踏まえ、水平反力と局所断面積を用いた、ソールプレート溶接部前面フランジ側止端のホットスポット応力範囲 $\Delta\sigma_{HS}$ の簡易推定式を提案した。

また、 $\Delta\sigma_{HS}$ とソールプレート溶接部周辺のその他の疲労き裂発生部位近傍の応力や変位に相関があることを示し、提案した $\Delta\sigma_{HS}$ の簡易推定式によって、ソールプレート溶接部周辺に発生する各種のき裂に対して、予防保全対策の実施優先順位検討等のスクリーニングが可能であることを示した。

第 6 章「ソールプレート溶接部の疲労き裂に対する予防保全型維持管理手法の提案」では、第 2 章から第 5 章の成果を踏まえ、ソールプレート溶接部周辺の疲労き裂に対する予防保全対策の具体的な方法として、ピーニング処理およびタップボルト工法に用いる機器、材料、施工法等の標準仕様を整理して示し、それら対策の実橋における施工例と対策効果を示した。さらに、整理した予防保全対策をベースとした予防保全型維持管理手法を提案した。

最後に、第 7 章「結論」では、以上の成果を要約して総括するとともに、今後の課題と展望を述べた。