

鋼鉄道橋ソールプレート溶接部の疲労対策

COUNTERMEASURES AGAINST FATIGUE CRACKS AT FILLET WELD
OF SOLE PLATE OF STEEL RAILWAY BRIDGE

丹羽雄一郎* , 木村元哉**

Yuuichirou NIWA and Motoya KIMURA

ABSTRACT Fatigue cracks sometimes occur in the vicinity of the front weld of sole plate in steel railway bridges. Although the countermeasures against these fatigue cracks have been studied extensively previously, in this study, a new method of bearing replacement and simple method of reinforcing plate have been developed to achieve more effective and efficient maintenance. In addition, preventive maintenance measures are being studied with the aim of further improving efficiency. This paper reports on a series of these studies.

KEYWORDS : 鋼鉄道橋, ソールプレート溶接部, 疲労き裂, 疲労対策
steel railway bridge, fillet weld of sole plate, fatigue crack,
countermeasure against fatigue crack

1. まえがき

鋼鉄道橋において、ソールプレート溶接部前面およびソールプレート前端直上のウェブと下フランジの溶接部（以下、ウェブ・下フランジという）にき裂（以下、ソールプレート溶接部前面周辺のき裂という）が発生することがある。JR 西日本でも山陽新幹線の合成桁において、図-1に示す事例のようなき裂が発生している。ソールプレート溶接部前面周辺のき裂の発生原因や対策については、過去から多くの研究がなされており、一般に支承の可動機能低下（回転機能および水平移動機能の低下）がき裂発生の主たる原因と考えられている¹⁾。

筆者らはこれまでソールプレート溶接部前面周辺のき裂に対し、発生原因推定を行い、抜本的対策として労力低減を目的とした新たな支承取替方法を考案し、さらに軽微な変状に対する簡便な対策工法を導入するなど、維持管理方法の検討を進めてきた^{2)~7)}。本稿はそれらの一連の検討内容を取りまとめたもので、一部は検討中の内容も含んでいる。

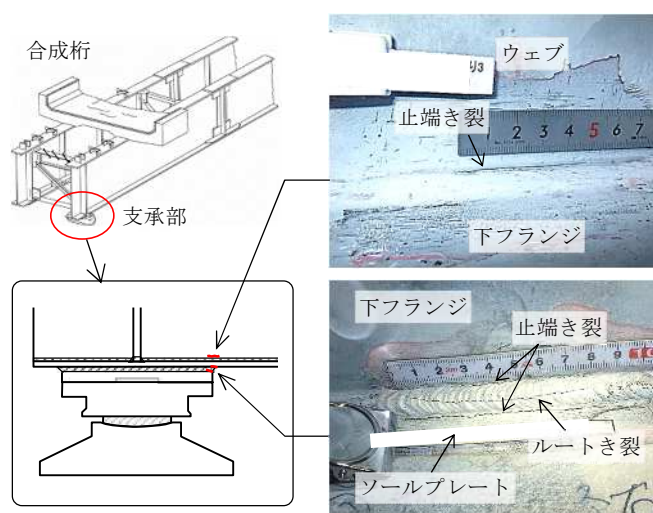


図-1 ソールプレート溶接部前面周辺のき裂

*修(工) 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 構造技術室 (〒530-8341 大阪市北区芝田 2-4-24)

**博(工) 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 構造技術室 課長 (〒530-8341 大阪市北区芝田 2-4-24)

2. き裂発生原因の推定²⁾

2.1 実橋測定

鉄道合成桁の実橋において、新幹線走行時のソールプレート溶接部周辺の応力測定、および、支承変位測定を実施した。測定対象橋梁は、ソールプレート溶接部周辺に疲労き裂がまだ発生していない2橋梁（A橋梁、B橋梁）を選定した。両橋は基本的に同種構造であり、代表としてA橋梁の主桁断面を図-2に示す。また、測定列車の軸重および軸距を図-3に、両橋の支承に用いられている銅合金支承板支承（以下、BP-A支承という）の構造概略を図-4に示す。

(1) 測定方法

測定位置を図-5に示す。ここで図に示すように、ソールプレート溶接部前面近傍の下フランジ下面、上フランジ上面をそれぞれa部、b部といい、ウェブ・下フランジ溶接部をc部、端補剛材下端をd部という。

(2) 測定結果

まず、図-6にa部およびb部の発生応力ピーク値を示す。横軸にソールプレート溶接部前面止端からの橋軸方向距離（支間中央方向を正とする）を示し、縦軸に発生応力を示す。なお、a部とb部の発生応力ピーク値は同一のタイミングで生じていた。この図に示すように、両橋ともにフランジ上下面の応力平均値が負の値となっていること、ならびに、ソールプレート前面に近づくにつれてフランジ上下面の応力差が大きくなっ

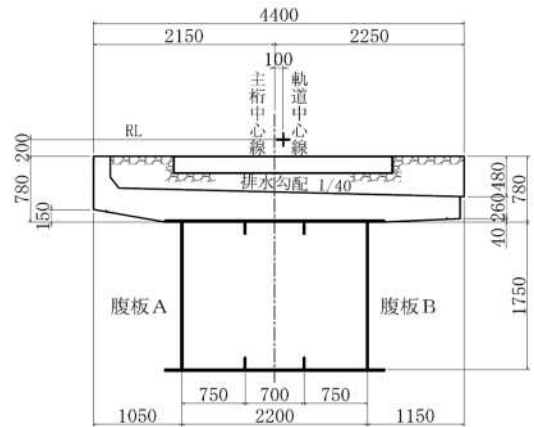
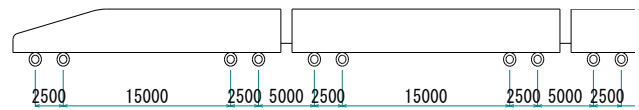


図-2 主桁断面（A橋梁）



軸重：平均約 100kN

図-3 測定列車の軸重・軸距

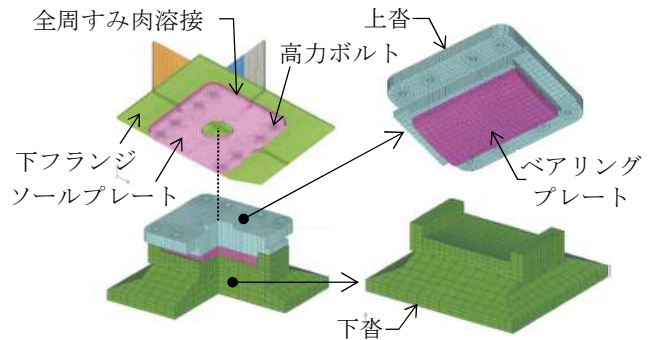


図-4 BP-A 支承の構造概略

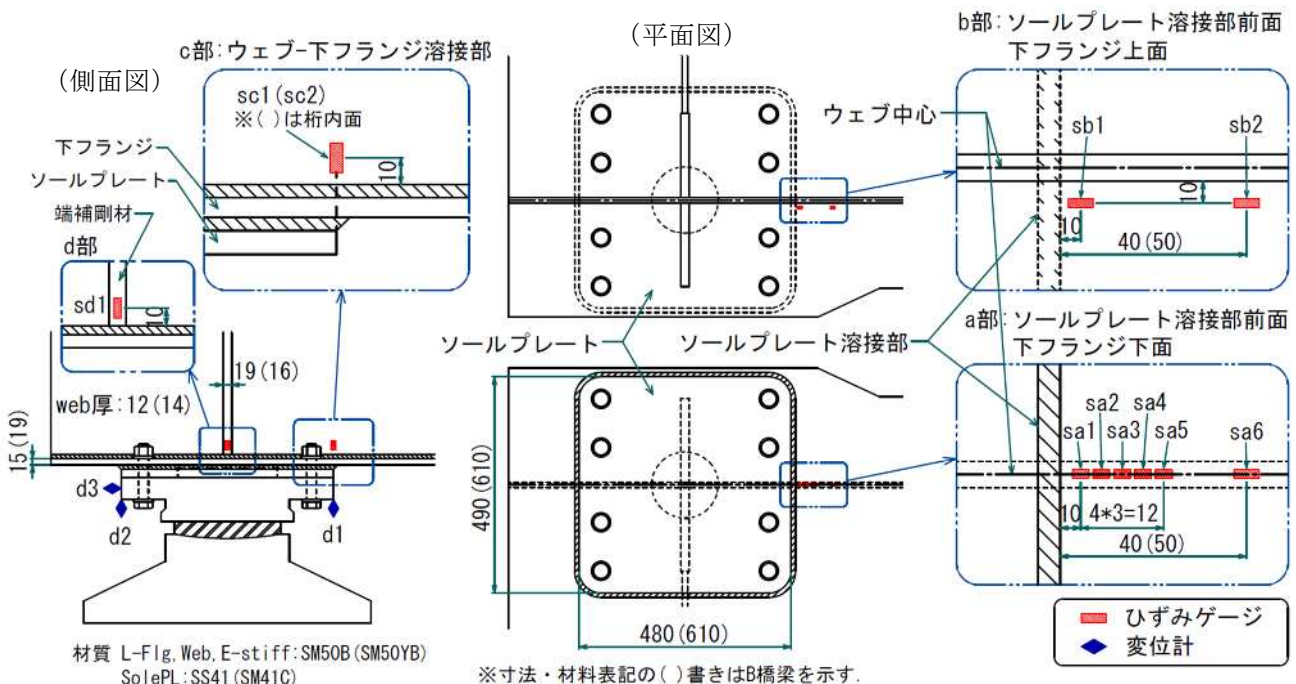
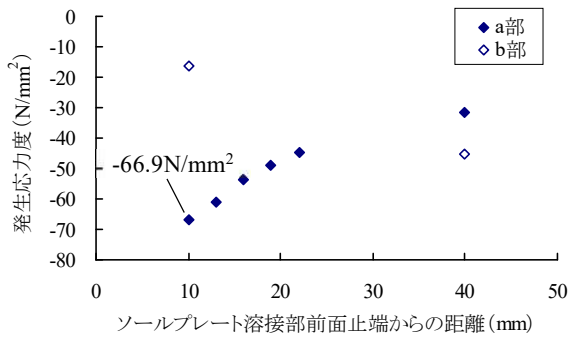
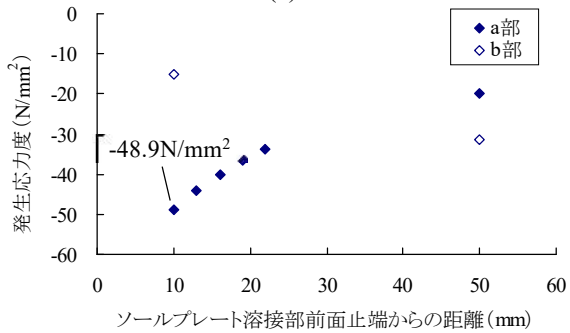


図-5 測定位置



(a) A 橋



(b) B 橋

図-6 a 部および b 部の発生応力ピーク値

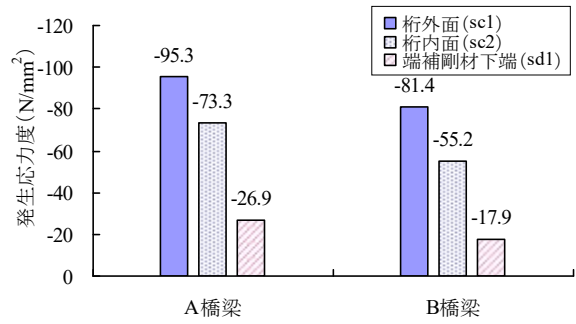


図-7 c 部および d 部の発生応力ピーク値

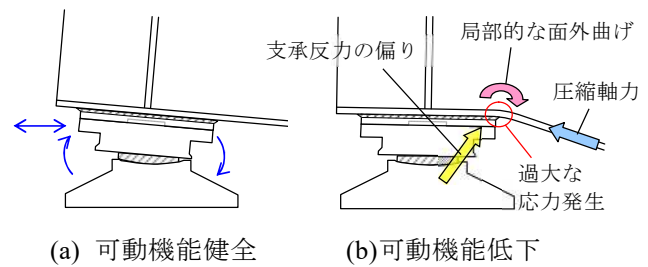


図-8 支承の可動機能低下によるソールプレート前面近傍の応力発生機構

ていることから、ソールプレート前面近傍において圧縮軸力が作用するとともに、下フランジの局部的な面外曲げが発生していると考えられる。

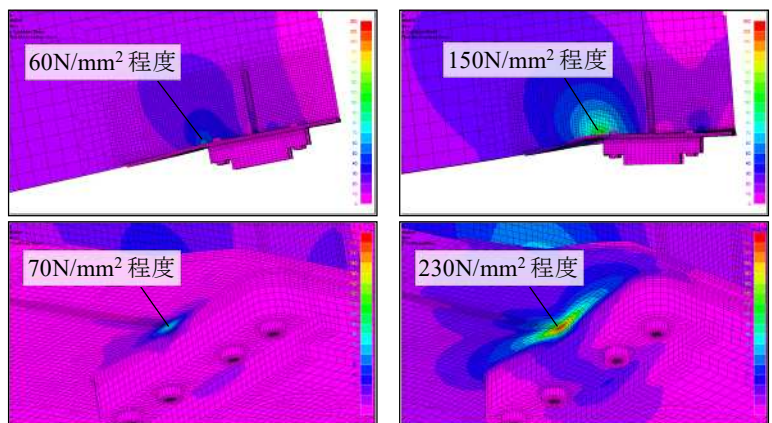
次に、図-7に c 部および d 部の発生応力ピーク値を示す。c 部においては桁内面・外面での応力差が若干認められるものの、基本的には面内応力が支配的と考えられる。また、c 部の発生応力は a 部、b 部、d 部と同一のタイミングでピーク値が生じていた。このことより、a～d 部の発生応力は同一の変形モードによるものと考えられ、d 部の発生応力と関係性が認められることから、この変形モードには支承反力が影響しているものと考えられる。

また、各変位計により測定した支承の水平変位および回転角は、いずれも計算で求まる理論値に比べ著しく小さかった。これより、支承は可動機能が大きく低下した状態にあると考えられた。

以上より、支承の可動機能が低下した橋梁においては、図-8 に示すように、支承の橋軸方向水平変位の拘束により支承近傍の下フランジに圧縮軸力が作用するとともに、支承の回転拘束によりソールプレート前面近傍において下フランジの局部的な面外曲げが生じるものと考えられる。さらに、ソールプレート前面近傍には支承反力が偏って載荷していることが考えられる。その結果、a 部および c 部に過大な応力が発生し疲労き裂が発生するものと考えられる。

2.2 FEM による応力性状検証

代表として A 橋梁をモデルとして FEM 解析を行い、支承可動機能の健全性が異なる場合の列車載荷時の応力性状を検証した。支承部周辺は溶接ビードも含めソリッド要素でモデル化し、それ以外の部位はシェル要素でモ



(a) 可動機能健全ケース (b) 可動機能低下ケース

図-9 支承部周辺の変形性状 (200 倍変形図) および応力性状 (ミーゼス応力コンター)

デル化した。可動機能の健全性の違いは、上沓・ベアリングプレート・下沓間の摩擦係数を変えることで設定した。図-9に支承部周辺の変形性状と応力性状（ミーゼス応力コンター）を示す。図-9(a)は可動機能健全ケース、図-9(b)は可動機能低下ケースを示す。可動機能健全ケースでは支承が良好に可動しているが、可動機能低下ケースでは支承可動が拘束されたことで、ソールプレート前面近傍の下フランジに局部的な面外曲げが生じ、ソールプレート溶接部前面およびウェブ・下フランジ溶接部の応力が増加する様子がわかる。2.1節で推定した支承機能低下がき裂発生のも因であることを裏付ける結果となった。

3. 各種対策方法の開発・適用

1章で述べたとおり、筆者らはソールプレート溶接部前面周辺なき裂が生じる可能性がある鉄道合成桁に対し、合理的な維持管理を行えるようにいくつかの方策を検討し、実用化を進めてきた。

前述のとおり、このき裂は支承の可動機能低下が主たる原因と考えられるため、支承取替により可動機能を回復することが有効である。ただし、同じタイプの支承に取り替えた場合、再び可動機能低下が生じてき裂が再発するおそれがある。そこで、支承取替にあたり、鉄道橋では実績がほとんどないものの、機能回復により有効と考えられる密閉ゴム支承板支承^{8),9)}（以下、BP-B支承という）の適用を検討し実用化した。さらに、施工の効率化を目的に支承取替と同時に構造変更を加える方法を実橋に適用している。また軽微な損傷に対し、支承取替を行わない簡易な疲労対策方法についても検証の上、数多くの実橋で施工している。

一方、ソールプレート溶接部前面周辺なき裂は、今後も新たな橋梁で発生することが予想されるため、現在、予防保全対策についても検討を進めている。

次章以降ではこれら4つの方策について順に述べる。

4. 支承取替におけるBP-B支承の適用（方策①）

ここで述べるのは当該き裂変状への抜本的対策である支承取替である。既設支承の形式は、従来から鉄道橋で一般的に用いられているBP-A支承であった。BP-A支承は一般に、長期の供用下において、ベアリングプレートと下沓間への塵埃等の混入により、可動不良が生じやすいことが知られている⁸⁾。そのため、今回の支承取替えにおける新規支承形式には、可動機能が優れるとされているBP-B支承の適用を試みた。

4.1 BP-B支承適用の検討

対象橋梁の形式は、1軌道を1Box断面の主桁で支持する合成桁である。鉄道橋で一般的に用いられているものである。主要諸元を表-1に示す。

道路橋では、既設のBP-A支承から、可動機能に優れ耐久性も優れるとの判断でBP-B支承への取替が進められているが⁹⁾、鉄道橋においては、既設支承の取替および新設支承ともに、BP-B支承の適用実績がほとんどない。この理由として、ゴムプレート等の可動部材の耐久性に対する懸念や、ゴムプレートが圧縮された際の鉛直変位による列車の走行安全性および乗り心地への影響に対する懸念などが考えられる。これについて、前者の耐久性については道路橋における長期の使用実績から問題は小さいと判断した。一方、後者の鉛直変位については鉄道荷重においてどの程度の影響が出るかを確認する必要があると考え、支承取替に先立ち、室内載荷試験によりBP-B支承の鉛直変位を確認した。試験体

表-1 対象橋梁の主要諸元

| | | |
|--------|---------------------------------|----------------|
| 橋梁形式 | 合成桁 | |
| 既設支承形式 | BP-A 支承 | |
| 支 間 | 35.0m | |
| 主桁断面 | 箱断面 | |
| 設計列車荷重 | NP-19 | |
| 図面番号 | 桁 | WVBN935-1 |
| | 支承 | SA-154 |
| 支承反力 | D | 890 kN / 1 支承 |
| | D+L [*] +I (※NP-19) | 1746 kN / 1 支承 |



写真-1 BP-B 支承試験体（新規製作）

は写真-1 に示す新規に製作した BP-B 支承本体で、ゴムプレートの形状は径 340 mm、厚さ 23 mm、材料はクロロプレンゴムである。図-10 に試験結果を示す。試験結果から、対象橋梁の鉛直変位は設計荷重 NP-19 で 0.56 mm、実車(N700 系)で 0.41 mm となる。文献 10)に示される支承部鉛直変位制限値(列車速度 300 km/h・複数連：走行安全性 2.5 mm、乗り心地 2.0 mm)と比べ問題ないと評価できた。

以上より、新規支承形式に BP-B 支承を採用可能と判断した。なお、本稿では詳細は割愛するが、実橋で BP-A 支承から BP-B 支承に取替を行い、列車通過時の支承変位を測定した結果、鉛直変位は 0.2 mm 程度と問題ないレベルであることを確認した。また併せて、支承の水平変位および回転が大幅に改善され、ソールプレート溶接部前面周辺の応力も十分に低減されることも確認した⁴⁾。

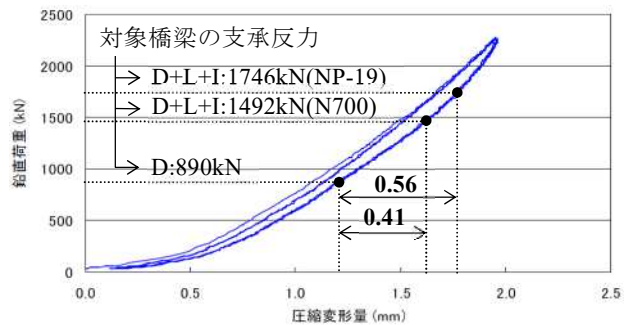


図-10 BP-B 支承の鉛直載荷試験結果

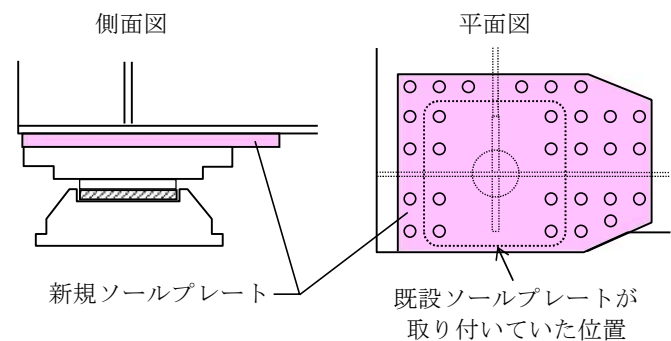


図-11 新規ソールプレートのディテール

4.2 ソールプレートのディテール改良

支承取替により可動機能を改善することで、ソールプレート溶接部前面周辺のき裂の発生原因となる下フランジの局部的な面外曲げを緩和することができる。また、ソールプレートを高力ボルト接合とすることで、疲労上の弱点自体(=溶接部)をなくすることができる。

しかし、既設ソールプレート撤去後の下フランジには溶接ビードの撤去痕が残ることや、き裂が下フランジへ進展していた箇所については、下フランジを削ってき裂を除去するため部分的に板厚が減少することから、これら溶接ビード撤去痕やき裂除去箇所については疲労強度の低下が懸念される。そのため、図-11 に示すように、新規ソールプレートは既設ソールプレートより大きくすることで、溶接ビード撤去痕範囲やき裂除去箇所を覆うようにした。また、文献 1)を参考に、新規ソールプレート前端部を径間側に延長した形状とし、支承前端から下フランジにかけての断面を漸変させることで、ソールプレート前面の応力集中を緩和することとした。

5. 1 線 1 支承形式への構造変更(方策②)

4章で述べた支承取替は、桁仮受け工を設置し反力を受け替えた後、既設支承を撤去し、同位置に新規支承を据え付ける一般的な施工方法(以下、従来工法という)で実施してきた⁷⁾。しかし、従来工法の場合、桁仮受けや既設支承の撤去等にかかる施工労力が大きく、工期・コストが増大するという課題があった。そこで、施工労力を低減すべく、従来工法における桁仮受け方法に着想を得て、図-12 に示すように、左右の既設支承間に 1 つの新規支承を設ける工法を開発することとした。この新工法を 1 線 1 支承形式と称する。

5.1 構造概要

図-13 に 1 線 1 支承形式の構造概略を示す。新たに支点反力を受けることとなる端ダイアフラムに支点上補剛材を設け、また、端ダイアフラムの座屈防止やせん断補強を目的とした補強板を取り付ける構造である。桁内にはブレース材を設け、橋軸方向水平力を支承

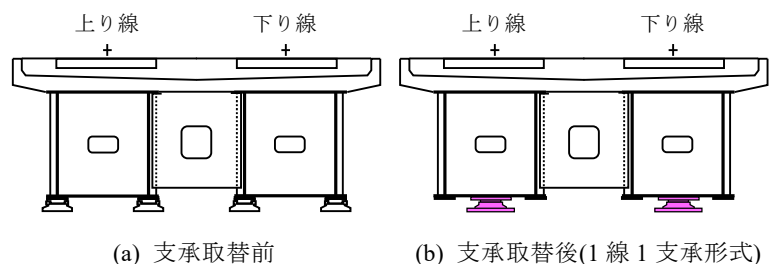


図-12 1 線 1 支承形式による支承取替

にスムーズに伝達させるとともに、端ダイアフラムおよび主桁ウェブの面外変形を抑えることとした。

詳細は文献 5)に記載しているので割愛するが、この構造に対し、力の伝達や局所応力性状等について有限要素解析を行い、耐荷性および耐疲労性の問題がないことを確認している。

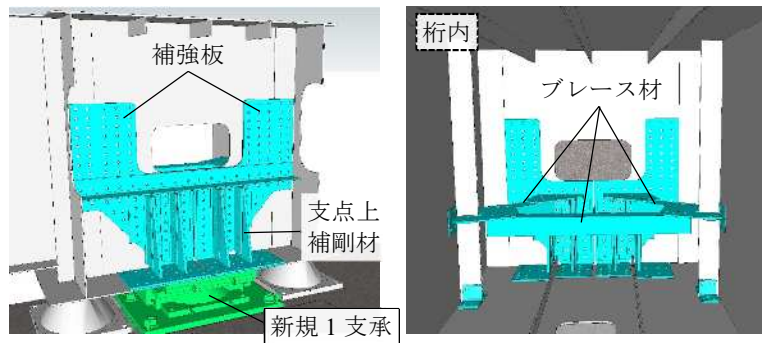


図-13 1線1支承形式の構造概略

5.2 実橋施工

供用中の実橋において、写真-2に示すように1線1支承形式への支承取替を施工した。支承取替完了後に、列車通過時の各部の応力測定を実施した。測定は解析において比較的応力が大きかった部位に着目して行った。主な着目部の発生応力ピーク値を図-14に示す。各着目部について、端ダイアフラム開口部隅近傍で $-20.9 \sim -33.8 \text{ N/mm}^2$ 、新規支点上補剛材下端溶接部近傍で $2.9 \sim 23.6 \text{ N/mm}^2$ 、端ダイアフラム下端溶接部近傍で $7.1 \sim 12.2 \text{ N/mm}^2$ であった。それぞれ死荷重やその他の荷重を加えた場合においても、耐荷性ならびに耐疲労性の問題がないレベルであることが確認できた。



写真-2 1線1支承形式の施工例

以上のとおり、1線1支承形式による支承取替を検討・開発し、実施工を行った。1線1支承形式は、道路橋を中心に近年新設橋での適用は増えているようであるが、1線2支承形式の既設橋から1線1支承形式への構造変更は筆者の知る限りでは他に例がない。施工の詳細については紙面の都合上割愛したが、1線1支承形式支承取替では、桁仮受け、ジャッキアップ、既設支承の杓座はつり等の作業が省略できるため、大幅な工期短縮が可能となる。今回の施工では、同程度の規模の橋梁における従来工法の支承取替事例と比較し、本体工部分で20日間程度の工期短縮(35%短縮)を達成できた。

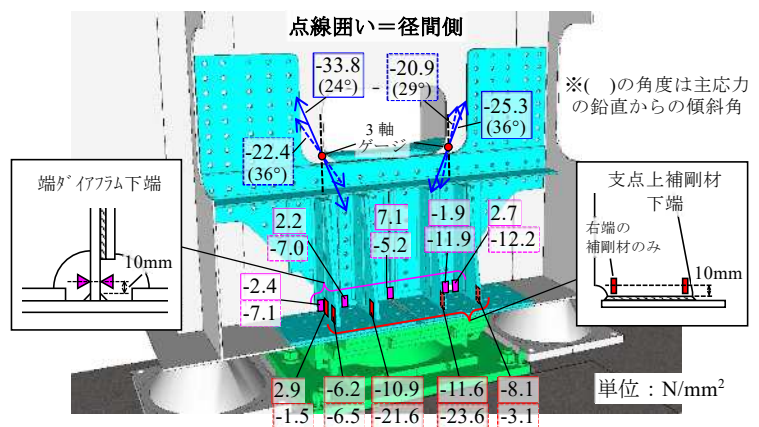


図-14 応力測定結果

6. 当て板による疲労対策(方策③)

6.1 検討の経緯

前章までに述べた支承取替はソールプレート溶接部前面周辺のき裂に対する抜本的対策として位置づけられる。ただし、5章で述べた構造改良により工期短縮したとはいえ、供用しながらの支承取替は時間的・空間的制約が大きく、き裂が発生した全ての支承をタイムリーに取り替えることが難しい。そこで、き裂変状が比較的軽微なものについて、支承取替に代わる簡易な疲労対策工法の検討を行った。検討内容はFEMによる解析的検討および実橋試験施工と応力測定等による検証であり、詳細は文献2)に記しているため、本稿ではそれらの概略を以下に述べる。

6.2 本工法の概要

対策工法の基本方針は、図-8 に示した下フランジの局所的な面外曲げの緩和、支承反力のスムーズな伝達、および、疲労き裂の発生起点となるソールプレート溶接部の削除とした。なお、ソールプレート溶接部を削除した場合、削除した溶接ビード分の水平耐力が低下することとなるが、これについては支承部セットボルト（高力ボルト）で補完する設計思想とした。これらの基本方針を満足する工法として、図-15 に示す 4 タイプの当て板補強案を考えた。図-15(b)~(e)の各当て板ではソールプレート溶接部を削除する。

なお、道路橋において上記の当て板と類似事例もあるが^{9),11)}、それらの事例ではソールプレート溶接部の削除を行っておらず、き裂発生部位の応力集中の緩和を目的としたソールプレート前端部の径間側への延長が基本となっているものと考えられる。今回提案した当て板工法は、ソールプレートの延長を行わずに、当て板による下フランジの局所的な面外曲げの緩和と、ソールプレート溶接部の削除による疲労強度の改善により、より確実にき裂発生可能性を低減することをねらいとしたものである。

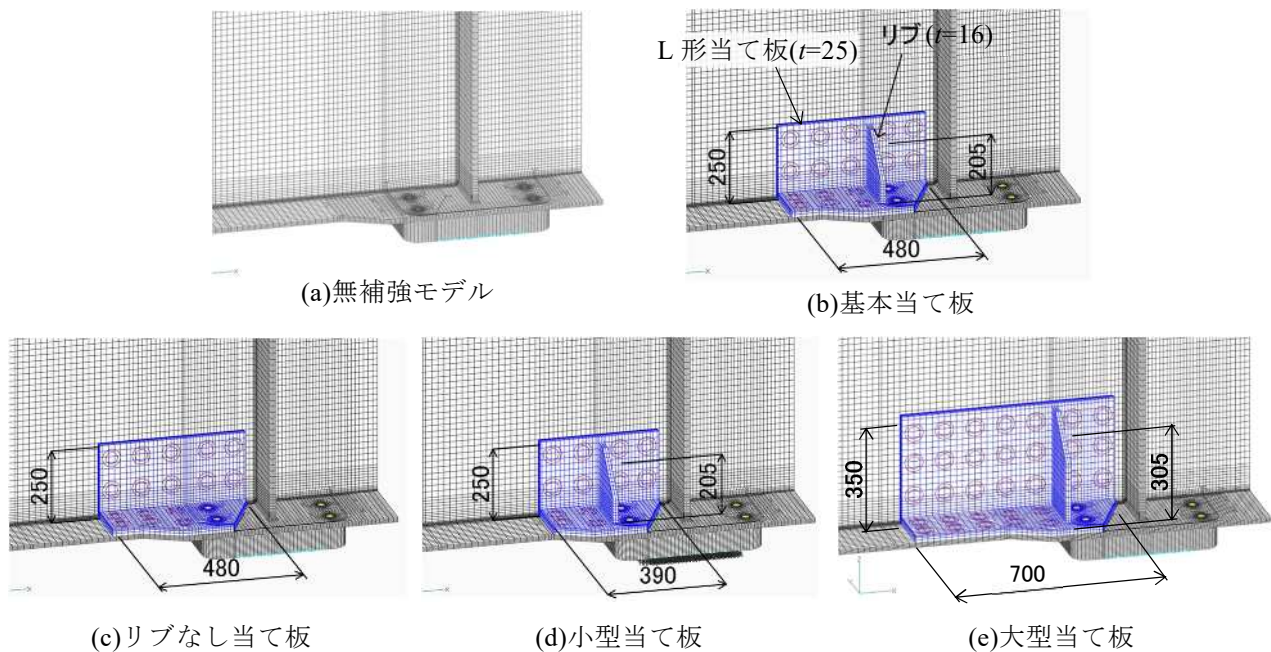


図-15 ソールプレート前面周辺のき裂に対する当て板補強案（単位：mm）

6.3 FEM 解析による検討

(1) 解析モデル

解析モデルは RC 床版や壁高欄を含む桁全体モデルとした。支承部付近の主要部材はソリッド要素とし、局所的な応力および変形状を再現できるようにした。例えば、支承部セットボルトや当て板接合部の高力ボルト摩擦接合については、ワッシャー範囲内の全節点を剛体要素で結合することで考慮した。支承については、ベアリングプレートと上沓・下沓の摺動面を拘束し、最も支承機能が低下した状態を考慮した。荷重は、実際に走行する列車荷重を静的載荷した。

(2) 解析結果

まず、ソールプレート前面近傍の変形状について、図-16 に変形図の一例を示す。当て板により下フランジの局所的な面

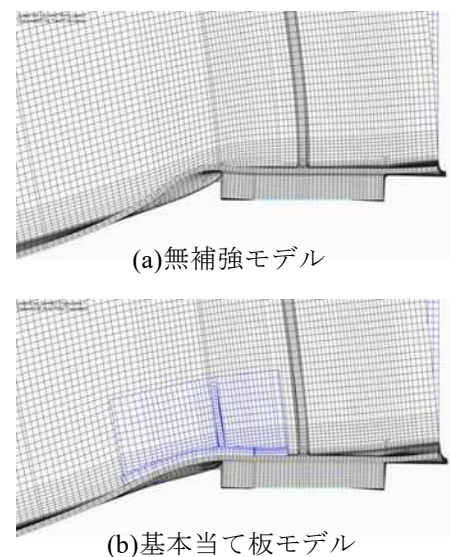


図-16 変形図の例（変形倍率 100 倍）

外曲げが緩和されていることがわかる。この傾向はいずれの当て板でも認められたが、特にソールプレート前端直上に鉛直リブを設けた図-15(b)(d)(e)の当て板で顕著に認められた。

次に、ソールプレート前面近傍の応力性状について、図-17、図-18に主応力コンター図の一例を示す。無補強モデルではソールプレート溶接部前面近傍およびウェブ・下フランジ溶接部近傍において応力が高まっているが、基本当て板モデルでは応力が大幅に低減していることがわかる。この傾向は前述の変形性状の改善と同様に、いずれの当て板でも認められた。

図-19に各当て板モデルのソールプレート溶接部前面近傍およびウェブ・下フランジ溶接部近傍の主応力ピーク値と無補強モデルに対する割合を示す。各当て板の応力低減割合を比較すると、(c)リブなし当て板に比べ、(b)(d)(e)のリブ付きの当て板の応力低減割合が高かった。また、各リブ付き当て板の応力低減割合は概ね同等であることから、今回検討した当て板サイズの範囲内においてはサイズの影響がないことがわかった。したがって、施工性や省材料の観点から、小型当て板が最適と判断した。

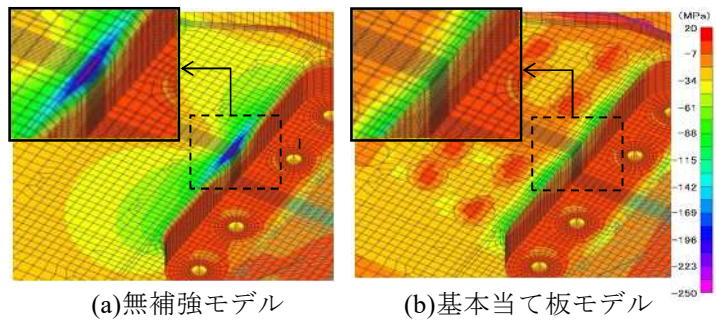


図-17 主応力コンター図の例
(ソールプレート溶接部前面近傍)

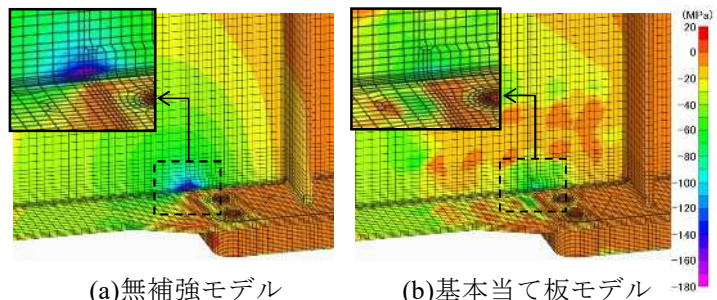


図-18 主応力コンター図の例
(ウェブ・下フランジ溶接部近傍)

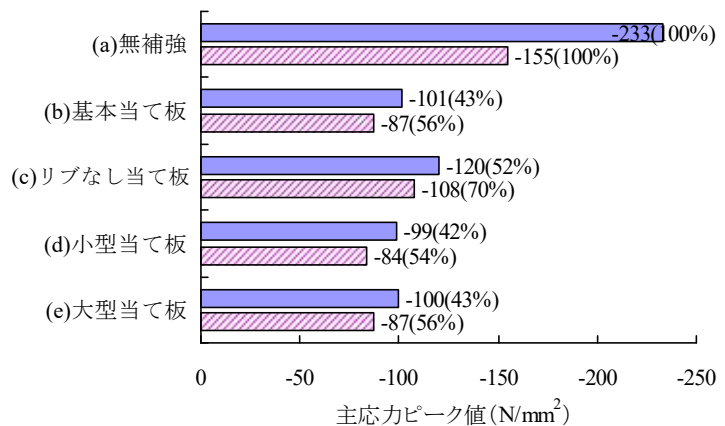


図-19 各当て板モデルの主応力ピーク値の比較評価

6.4 実橋試験施工

(1) 試験施工の概要

前節の解析により検討した当て板の実橋試験施工を行い、応力低減効果を検証した。解析では小型当て板が最適と判断したが、その検証のため、施工する当て板は図-15(b)基本当て板、および(d)小型当て板とした。両当て板の応力低減効果を同一箇所と比較するため、施工は「①小型当て板設置→②小型当て板撤去→③基本当て板設置→④ソールプレート溶接部削除（基本当て板設置のまま）」の手順で行い、各段階で応力測定を行った。

ソールプレート溶接部削除は写真-3に示すように、ディスクグラインダーにより行った。この際、下フランジを傷付けることを避けるため、グラインダーのコントロールガイドを製作して用いた。写真-4に各当て板の設置状況を示す。



写真-3 グラインダーによるソールプレート溶接部の削除

(2) 応力測定

測定位置を図-20に示す。測定結果の代表として、測点 sa1～sa9の発生応力ピーク値を図-21に

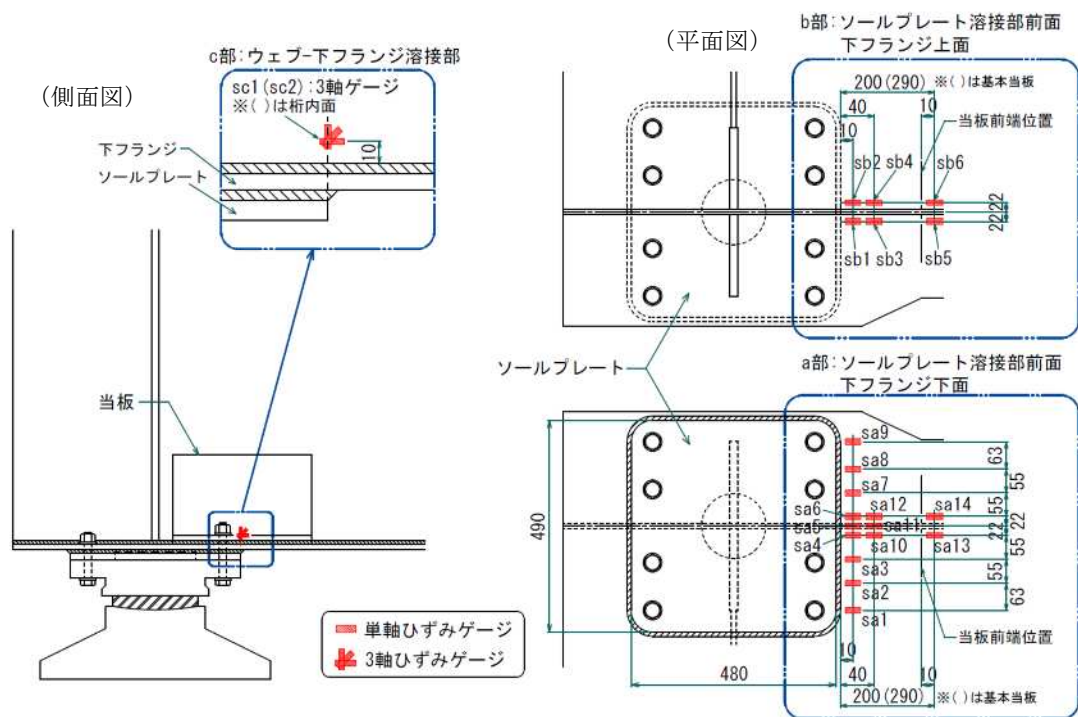
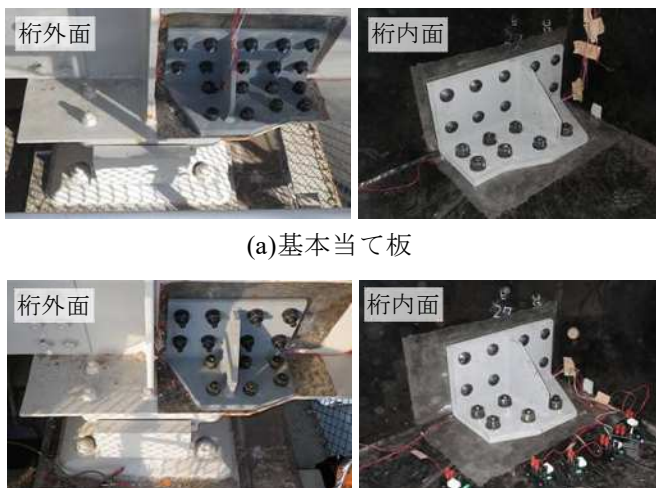


図-20 試験施工における測定位置



(a)基本当て板

(b)小型当て板

写真-4 当て板設置状況

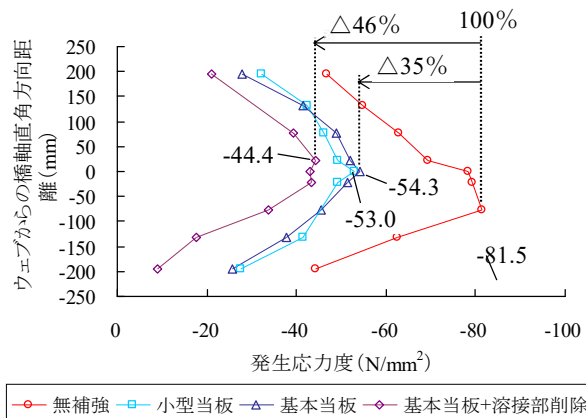


図-21 測点 sa1～sa9 の発生応力

示す。ソールプレート前面近傍下フランジ下面の応力は、ウェブ直下付近でピークとなり、ウェブから離れるにつれて低下する様子がわかる。このウェブ直下付近のピーク値について、各施工手順毎に比較すると、「小型当て板」および「基本当て板」では「無補強」から 35%程度低減し、「基本当て板+溶接部削除」では同 46%低減した。また、ウェブ・下フランジ溶接部近傍の応力についても同様に 5割程度低減されることが確認できた。

以上より、実橋施工においても解析と概ね同等の応力低減効果が得られており、今回検討した当て板によりソールプレート溶接部前面の疲労寿命を延伸することができることがわかった。

7. 予防保全対策の検討（方策④）

ここまでソールプレート溶接部周辺の疲労き裂対策について、き裂発生事後対策を中心に述べてきたが、さらなる維持管理の効率化を目指し、本章では今後の展望も含め予防保全対策について検討を進めている内容について述べる。

7.1 予防保全対策の方法

ソールプレート溶接部前面周辺のき裂は、図-1に示したように、溶接止端部・ルート部のいずれにも発生するため、予防保全対策は溶接止端部・ルート部それぞれに対して検討する必要がある。

溶接止端部に対しては、これまでに面外ガセット溶接継手や荷重非伝達型十字溶接継手を対象として、種々のピーニング処理方法の高い疲労強度改善効果が報告されている¹²⁾ことを踏まえ、本検討においてもピーニング処理を適用することとした。ピーニングツールの選定にあたっては、ソールプレート溶接部前面付近の狭隘な環境での施工を考慮し、極力小型で扱いやすいことを前提条件に市場からいくつかの候補を選定した。最終的にサイズの小ささを優先し、図-22に示す市販のエアーツール（フラックスチッパー）を用いることとした。本ツールのタガネ先端は半径 $r=2\sim 3\text{ mm}$ 程度に研削加工したもので、空気圧 0.6 N/mm^2 、打撃周波数 100 Hz で鋼材の表面を打撃し塑性変形させることができる。

溶接ルート部に対しては、近年、母材間の隙間への樹脂充填によりルート部の疲労寿命を延伸させる方法が提案されている^{13),14)}。これら既往研究においては、疲労試験により樹脂充填の効果が確かめられているが、図-8および図-9に示したような評価対象の溶接部付近に荷重が集中する偏った载荷性状での検討は行われていない。そこで本検討では、ソールプレート溶接部を設けた桁試験体の疲労試験により、図-23に示す樹脂充填によるソールプレート溶接ルート部の疲労寿命延伸効果を評価することとした。用いた樹脂材料の主な物性値を表-3に示す。特徴としては、樹脂材料の中では比較的強度および弾性係数が高く、微小な隙間への充填性を考慮し粘度の低いものを選定した。

7.2 疲労試験

ソールプレート溶接部を有する桁試験体を製作し、ピーニング処理および樹脂充填の予防保全対策効果を評価した。試験体概略を図-24に示す。上フランジの板厚は 12 mm とし、下フランジの板厚はピーニング処理評価用の試験体では 9 mm 、樹脂充填評価用の試験体では 12 mm とした。荷重は支間中央における繰返し载荷とした。支点条件は、支承機能低下を想定し、両端支点とも高力ボルト（M22, F10T）4本により下フランジ・ソールプレート・支点部台座を締め付け固定した。

(1) ピーニング処理

ピーニング処理の疲労試験ケースは表-4に示す P1~P3 の 3 ケースである。表に示すように各

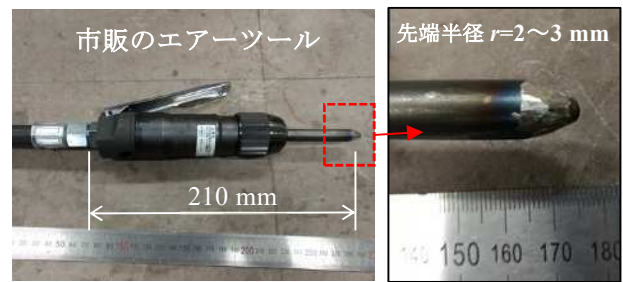


図-22 本検討で使用するピーニングツール

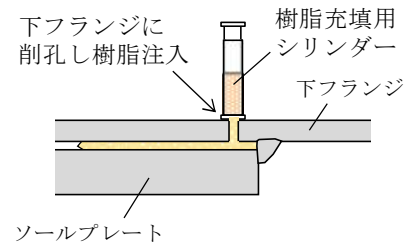


図-23 ソールプレートと下フランジ間の隙間への樹脂充填

表-3 本検討で使用した樹脂の主な物性値

| 項目 | 物性値 |
|-------------|-------------------------------|
| 圧縮降伏強さ | 60 N/mm^2 |
| 引張強さ | 43.4 N/mm^2 |
| 接着強さ（乾燥/湿潤） | $7.1/6.4\text{ N/mm}^2$ |
| 圧縮弾性係数 | 2500 N/mm^2 |
| 粘度 | $300\text{ mPa}\cdot\text{s}$ |

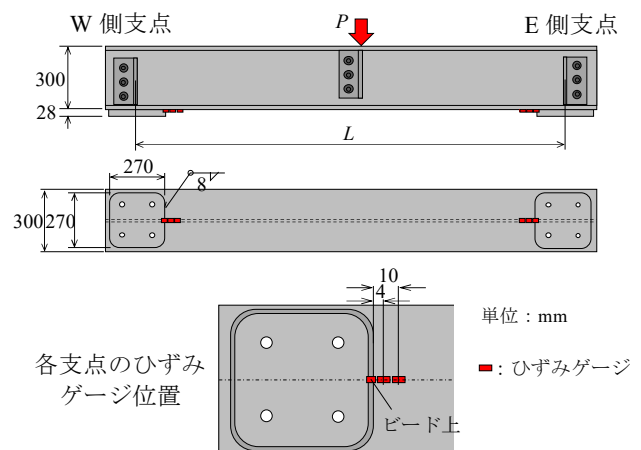


図-24 疲労試験の試験体概略

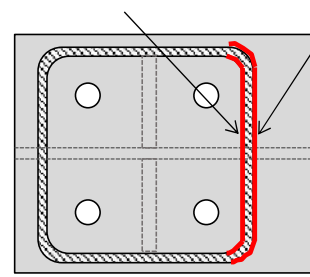
ケース毎にピーニング処理を行った支点を変えている。ピーニング処理の施工範囲は、図-25 に示すようにソールプレート溶接部前面の両端 R 部間の下フランジ側およびソールプレート側の止端部とし、止端の線が目視で確認できなくなるまで行った。

試験結果を表-5 に示す。各ケースとも、ピーニング処理を行わなかったソールプレート溶接部前面の下フランジ側止端にき裂が発生し、ピーニング処理を行った場合はき裂が発生しなかった。ただし、ピーニング処理を行った場合においても、ウェブ・下フランジ溶接部からルートき裂が発生・進展し、ソールプレート溶接部前面周辺の試験中のひずみ値が変化してしまったため、その時点で試験終了とした。したがって、本試験ではピーニング処理を行った場合における十分な繰返し数のデータが得られていない。そのため、ソールプレート溶接部前面に対するピーニング処理の疲労強度向上効果の定量的な評価には至らなかったが、全ての試験ケースでピーニング処理の有無で止端き裂発生寿命に明らかな差が表れていることから、ピーニング処理によりソールプレート溶接部前面止端部の疲労き裂発生寿命を延伸することができると思われる。

(2) 樹脂充填

樹脂充填の疲労試験ケースは表-4 に示す R1~R4 の 4 ケースである。この 4 ケースの試験体には、ソールプレートと下フランジの間に表に示す量の隙間を設けている。ケース R1~R3 では W 側の隙間

ソールプレート側止端 フランジ側止端



— : ピーニング処理範囲

図-25 ピーニング処理範囲

表-4 疲労試験ケース (ピーニング処理, 樹脂充填)

| 評価工法 | 試験ケース | 支間 L [m] | ソールプレートと下フランジの隙間 [mm] | 予防保全対策実施支点 (P シリーズ:ピーニング処理, R シリーズ:樹脂充填) | 荷重範囲 P [kN] |
|---------|-------|----------|-----------------------|--|-------------|
| ピーニング処理 | P1 | 2.5 | 0 | なし | 310 |
| | P2 | 2.5 | 0 | W 側・E 側 | 310 |
| | P3 | 2.5 | 0 | W 側 | 190 |
| 樹脂充填 | R1 | 3.0 | 1 | W 側 | 280 |
| | R2 | 1.5 | 1 | W 側 | 280 |
| | R3 | 1.5 | 2 | W 側 | 170 |
| | R4 | 1.5 | 2 | W 側・E 側 | 285 |

表-5 ピーニング処理の疲労試験結果

| 試験ケース | 支点位置 | σ_{10}^* | 試験結果 (回数は荷重繰返し数) |
|-------|-------------|-----------------------|--|
| P1 | W 側 (溶接まま) | 106 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面下フランジ側止端にき裂発生 (荷重のごく初期段階で発生) |
| | E 側 (溶接まま) | 88 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面下フランジ側止端にき裂発生 (荷重のごく初期段階で発生) |
| P2 | W 側 (ピーニング) | 122 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面止端にき裂発生せず (約 5 万回でウェブ・下フランジ溶接部にルートき裂発生) |
| | E 側 (ピーニング) | 104 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面止端にき裂発生せず (約 20 万回でウェブ・下フランジ溶接部にルートき裂発生) |
| P3 | W 側 (ピーニング) | 80 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面止端にき裂発生せず (約 20 万回でウェブ溶接・下フランジ溶接部にルートき裂発生) |
| | E 側 (溶接まま) | 58 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面下フランジ側止端にき裂発生 (荷重のごく初期段階で発生) |

※ σ_{10} : ソールプレート溶接部前面下フランジ側止端から 10 mm 位置の下フランジ下面の応力範囲

表-6 樹脂充填の疲労試験結果

| 試験ケース | 支点位置 | σ_{10} ※ | 試験結果 (回数は載荷繰返し数) |
|-------|--------------|-----------------------|---|
| R1 | W側 (樹脂充填) | 122 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生 (9.1万回で溶接ビード貫通) |
| | E側 | 122 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生 (5.4万回で溶接ビード貫通) |
| R2 | W側 (樹脂充填) | 31 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生 (26.8万回で溶接ビード貫通) |
| | E側 | 47 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生 (64.6万回で溶接ビード貫通) |
| R3 | W側 (樹脂充填) | 34 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生 (45.3万回で溶接ビード貫通) |
| | E側 | 53 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生せず (248万回で試験終了) |
| R4 | W側 (樹脂充填) | 81 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生 (10.7万回で溶接ビード貫通) |
| | E側 (樹脂充填) | 61 N/mm ² | ソールプレート溶接部前面ルートき裂発生 (40.4万回で溶接ビード貫通) |

※ σ_{10} : ソールプレート溶接部前面下フランジ側止端から 10 mm 位置の下フランジ下面の応力範囲

に樹脂充填を行い、ケース R4 では W 側・E 側の両方の隙間に樹脂充填を行った。なお、本試験では各部から止端き裂が発生しないよう、全てのソールプレート溶接部前面およびウェブ・下フランジ溶接部の止端部にピーニング処理を行った。

試験結果を表-6 に示す。ここでは、ソールプレート溶接部前面ルートき裂が溶接ビードを貫通するまでの繰返し数を疲労寿命として示している。なお、ルート部評価のための適切な応力参照位置は定義できないため、ここではソールプレート溶接部前面下フランジ側止端から 10 mm 位置の応力範囲 σ_{10} は参考として示している。

試験結果を総括すると、ケース R1 のように、樹脂充填を行った支点の方が、樹脂充填を行っていない支点よりも疲労寿命が長くなったケースもあれば、ケース R2 やケース R3 のように、その逆となったケースもあり、本試験では樹脂充填によるソールプレート溶接部前面ルート部の疲労寿命延伸効果が認められなかった。この原因として以下のことが考えられる。

既往研究 (13), (14) では、評価対象の溶接部周辺に局所的に荷重がかかる載荷性状としていないが、本試験ではそのような載荷性状を再現したため樹脂に大きな圧縮力が作用し、特にルート部近傍の隙間の開閉口が抑制されず、ルートき裂の発生予防に樹脂が寄与しなかった可能性が考えられる。また、本試験では支点部高力ボルト締付時に、樹脂が破壊したと思われる大きな音が発生した。そのため、樹脂による隙間変位の抑制効果が低減した可能性も考えられる。

以上の結果および考察を踏まえ、ソールプレート溶接部ルート部の疲労き裂の予防保全対策の検討については、ソールプレートと下フランジの隙間を充填するコンセプトは踏襲するものの、充填材料に大きな圧縮力が作用した場合においても隙間変位の抑制効果が発揮されるよう、樹脂よりも強度および弾性係数が高い材料を用いることや、ソールプレートと支点部を高力ボルト固定した後に施工可能な方法を検討中である。本稿執筆時点において、各種の疲労試験や解析的検討を進めているが、検討途上の内容もあるため、詳細は別の機会に報告を行う予定である。

8. まとめ

本稿では、JR 西日本においてこれまでに取り組んできた、鋼鉄道橋ソールプレート溶接部前面周辺の疲労き裂対策について述べた。鋼鉄道橋ではソールプレートは過去から基本的にリベットあるいは

高力ボルトで取り付けられるものが多いこともあり、ソールプレート溶接部前面周辺の疲労き裂の発生事例は鋼道路橋に比べると少ないが、本稿で紹介した山陽新幹線の合成桁においては、一時期に同種ディテールで設計・製作されたこともあり、ソールプレート溶接部を有するものが多く、疲労き裂の発生数も経年とともに増えている。これらに対し、開発や改良を重ねてきた抜本的対策としての支承取替、き裂変状が軽微な段階における対策選択肢となる簡便な当て板、さらにはより簡易に多くの箇所に対して実施可能な予防保全対策を組み合わせることで、ソールプレート溶接部前面周辺の疲労き裂に対する効果的かつ効率的な維持管理を実現できると考える。

参考文献

- 1) 例えば；舘石和雄，名取暢，三木千壽：プレートガーダー支承部の疲労損傷とそのディテール改良に関する研究，土木学会論文集，No.489，I-27，pp.167-176，1994.
- 2) 丹羽雄一郎，松本健太郎，矢島秀治，小林裕介：鉄道合成桁ソールプレート溶接部の疲労対策，構造工学論文集，Vol.58A，pp.611-621，2012.
- 3) 丹羽雄一郎，西田寿生，木村元哉：山陽新幹線合成桁の支承部改修工の取組み，土木施工，Vol.59，No.7，2018.
- 4) 丹羽雄一郎，木村元哉，矢島秀治：既設鉄道合成桁へのBP-B 支承の適用，土木学会第68回年次学術講演会，VI-463，pp.925-926，2013.
- 5) 丹羽雄一郎，石田悠樹，坂口大生，七村和明：鋼・合成鉄道橋梁における1線1支承形式による支承取替，土木学会第77回年次学術講演会，VI-378，2022.
- 6) 丹羽雄一郎，矢島秀治，高橋良和，公門和樹：経年38年の鉄道合成桁のBP-A 支承の挙動性状と支承部水平力の評価，構造工学論文集，Vol.64A，pp.421-434，2018.
- 7) 和田基弘，願永留美子，丹羽雄一郎：山陽新幹線合成桁の支承取替工事，日本鉄道施設協会誌，Vol.51，No.5，pp.54-56，2013.
- 8) 例えば，徳田浩一，岩崎雅紀：支承の活荷重挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.41A，pp.935-944，1995.
- 9) 土木学会：道路橋支承部の改善と維持管理技術（鋼構造シリーズ17），丸善，2008.
- 10) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 -変位制限，丸善，2006.
- 11) 日本道路協会：鋼橋の疲労，丸善，1997.
- 12) 日本鋼構造協会：鋼橋の強靱化・長寿命化に向けた疲労対策技術資料，JSSCテクニカルレポート，No.120，2020.
- 13) 廣畑幹人，伊藤義人：すみ肉溶接と接着接合を併用したあて板継手の疲労特性，溶接学会論文集，第33巻，第3号，pp.224-232，2015.
- 14) 玉利仁，石川敏之，廣畑幹人，堤成一郎：樹脂充填によるソールプレートの溶接ルート部の疲労強度向上効果，鋼構造論文集，Vol.28，No.110，pp.51-60，2021.