

# リベット桁支承部の疲労き裂進展抑制のための補強工法

吉田 善紀\* 小林 裕介\*

## Reinforcement Method for Inhabiting Fatigue Crack Growth on Rivet Girder Support

Yoshinori YOSHIDA Yusuke KOBAYASHI

Fatigue crack initiates at the lower-flange on the rivet girder support because of the stress caused by bridge member deterioration. There are cases that the fatigue crack is not able to be repaired immediately because there are many fatigue cracks and the repair of the fatigue crack requires much time and cost. In this research, we identified causes of the lower-flange stress by conducting the loading test with rivet girder and FEM analysis. Based on this result, we developed a reinforcement method for inhabiting fatigue crack growth at the lower-flange. Moreover, we verified the effect of the reinforcement method by conducting the loading test.

キーワード：リベット桁，疲労き裂，あおり，補強工法，載荷試験，FEM 解析

### 1. はじめに

明治から昭和中期にかけてリベット接合を用いた鋼桁（以下、リベット桁）が多く架設され、現在も供用されている。このうち、ごく短支間の桁を除く支間 30m くらいまでの上路鋼桁と下路鋼桁は、鋼板と形鋼の組み合わせによって断面が構成され、支承部が図 1 のような構造となっている。

このリベット桁の支承部では、下フランジのコーナー部に図 2 のような疲労き裂が発生する<sup>1)</sup>。これは、沓座破損等の経年劣化により支承部が適正に支持されず、下フランジのコーナー部に応力集中を生じることが原因である。この疲労き裂が進展しても損傷は下フランジの山形鋼にとどまり、即座に桁を破断させるようなことはないが、下フランジを破断する程度に疲労き裂が進展すると、列車通過時の過大な鉛直変位の発生や、応力が再分配される腹板や端補剛材の座屈につながり、列車の走行安全性を脅かす可能性がある。

この疲労き裂の補修として、沓座の修復や下フランジの交換が行われている<sup>2)</sup>。これらの補修では、支承を支える沓座モルタルの打ち替えや、支承に荷重を伝達する下フランジを交換するため、支承部以外で桁を仮受けする必要がある。このような補修は、時間の制約が厳しい列車間合いでの施工となること、仮受けのための補強や仮受け部材の準備などで施工前にも時間を要することなどから、補修規模の割に多くの手間を要する。一方で、支間 30m くらいまでの上路鋼桁や下路鋼桁はリベット桁の大半を占めており、かつ経年も長いため、相当数の疲労き裂が発生している。このように、リベット桁の下

フランジの疲労き裂は、数が多いにもかかわらずその補修に手間を要しており、維持管理の負担となっているだけでなく、線区によっては即座に補修を実施できないといった実状もある。

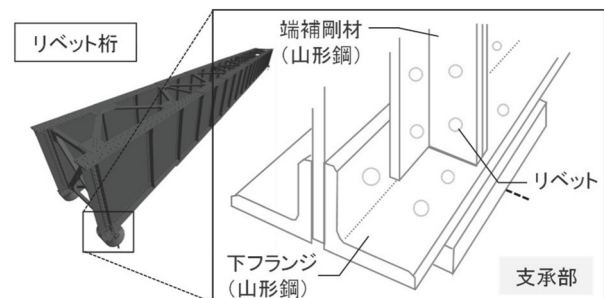


図 1 リベット桁支承部の構造

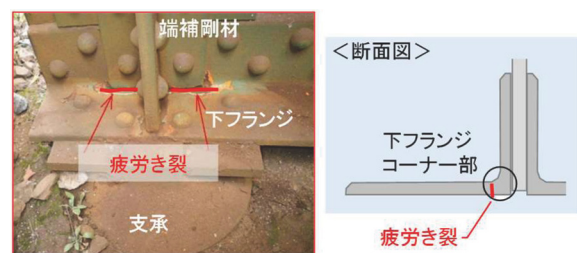


図 2 リベット桁支承部下フランジの疲労き裂

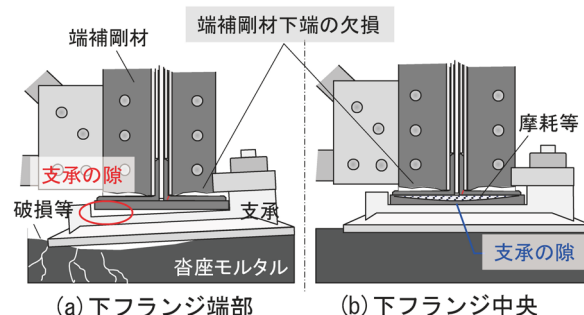


図 3 支承の隙と端補剛材下端の欠損

\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

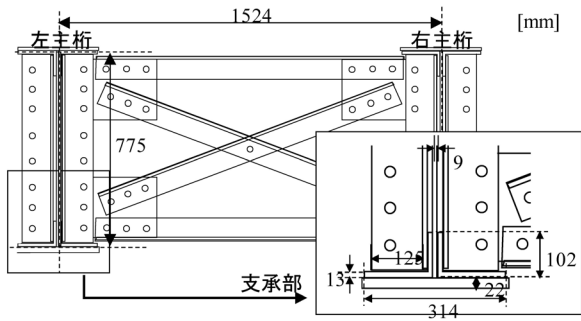


図4 試験体の概形および寸法

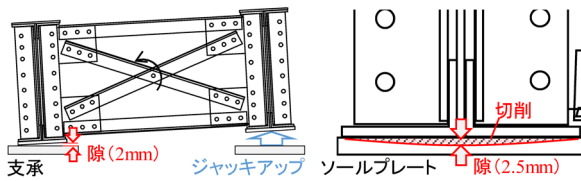


図5 支承の隙の導入方法

本研究では、桁の仮受けを行わずに疲労き裂の進展を抑制する簡易な補強工法を開発した。本工法は、現状で疲労き裂の補修に着手できていないリベット桁を数年から10年程度延命化し、その期間を利用して補修を計画的に行うことで、補修にかかる手間を平準化できるようにすることが狙いである。

本工法の開発に際しては、実物大の荷重試験とFEM解析により、疲労き裂の発生原因となる下フランジコーナー部の応力と支承部の経年劣化との関係を明らかにした。列車荷重や死荷重は、端補剛材から下フランジを介してソールプレートおよび支承に伝達されるよう設計されているが、既設の桁では図3に示すような支承の隙（下フランジ端部と中央）および端補剛材下端の欠損を生じていることが多く、本検討ではこれらの経年劣化に着目した。なお、下フランジ端部と中央の支承の隙は、それぞれ沓座の破損とソールプレート上面の摩耗が原因で、端補剛材下端の欠損は腐食や摩耗が原因であり、いずれもリベット桁の支承部によくみられる経年劣化である。

次に、これらの結果をもとに、施工時に桁の仮受けが不要な2種類の補強工法を考案し、FEM解析によりその部材寸法等のディテールを検討したうえで、荷重試験においてそれぞれの補強効果を検証した。

## 2. 荷重試験およびFEM解析概要

リベット桁の支承の隙と下フランジのコーナー部に発生する応力の関係を明らかにするため、実物大のリベット桁を模擬した荷重試験を行った。また、端補剛材下端の欠損と応力の関係をFEM解析により確認した。さらに、開発した補強工法の効果をこれらの荷重試験、FEM解析を用いて検証した。以下に、荷重試験、FEM

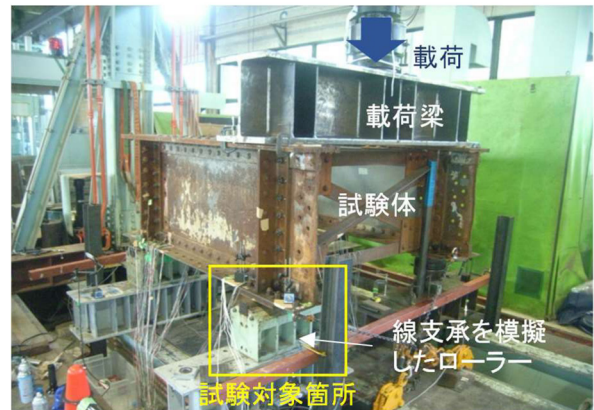


図6 荷重状況

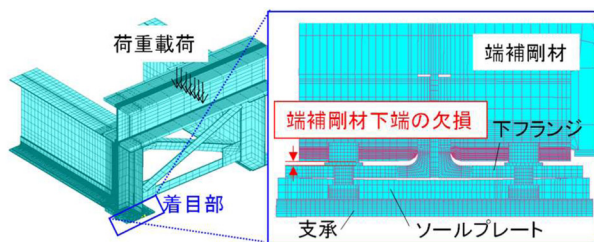


図7 解析モデル

解析の概要を示す。ただし、補強工法の効果の検証については詳細を4章で述べる。

### 2.1 荷重試験

荷重試験に使用した試験体の概形と寸法を図4に示す。試験体は、標準設計のリベット桁（達94号、支間9.8m）の桁端部を模擬し、実物大で製作した。試験体の主桁には、実橋（下路プレートガーダーの横桁）より撤去したI形のリベット部材を使用した。その他の端補剛材、対傾構、ソールプレートは、新規鋼材（SS400）を使用して製作し、主桁に高力ボルトで接合した。なお、端補剛材は下フランジから5mm程度離して設置し、端補剛材下端に欠損がある状態を模擬した。

荷重試験では、図3(a)(b)に示した2種類の支承の隙を試験体に導入して荷重を行った。下フランジ端部の支承の隙（図3(a)）は図5(a)のように支承に対して試験体をわずかに傾けることにより導入し、下フランジ中央の支承の隙（図3(b)）は図5(b)のように試験体のソールプレート上面を円弧状に切削することにより導入した。なお、線支承はローラーで模擬した。

試験体の荷重は、端補剛材直上の上フランジに設置した荷重梁を用いて行った。図6に試験体の荷重状況を示す。荷重は、対象とした標準設計桁の列車通過時の支点反力相当（ $P=420\text{kN}$ ）を最大として、10～20kN刻みで漸増させた。最大荷重は、列車荷重（M荷重：M-13）と衝撃荷重（列車速度130km/hの場合）を考慮したものである。

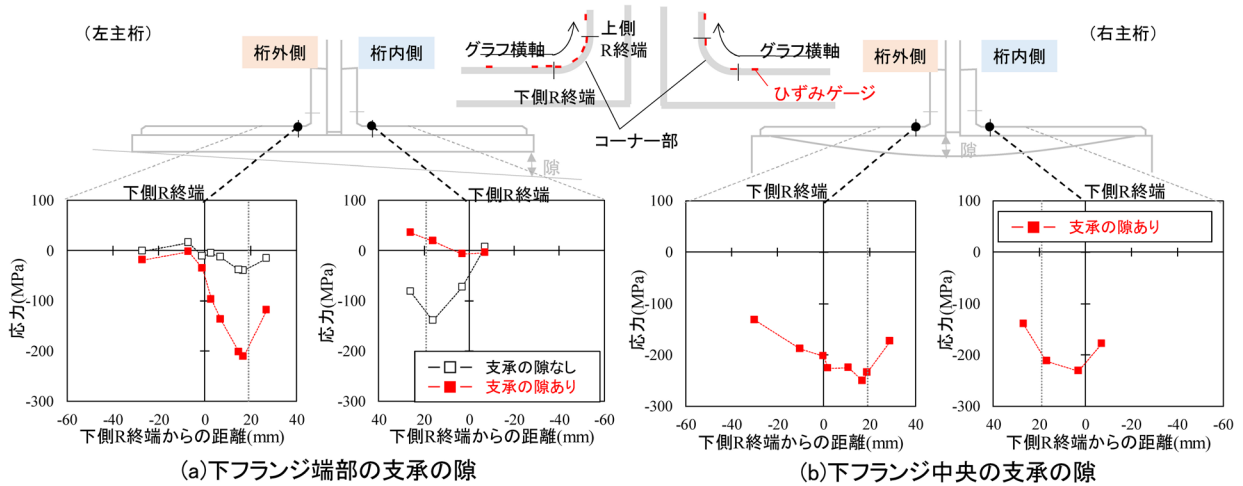


図8 支承の隙のあり／なしによる下フランジの応力分布の違い

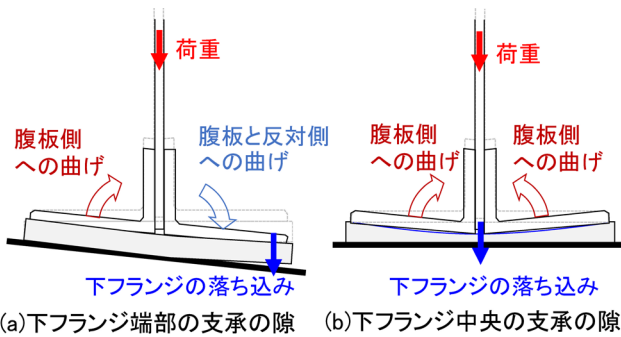


図9 想定される下フランジの変形

## 2.2 FEM解析

FEM解析に用いた解析モデルの概要を図7に示す。解析モデルは、荷重試験の試験体と同じリベット桁を模擬し、8節点ソリッド要素でモデル化した。また、支承とソールプレートの境界面、および下フランジとリベットで接合された部材（端補剛材、腹板、ソールプレート）の境界面の接触条件を考慮した。鋼材の材料定数は、ヤング率 200GPa、ポアソン比 0.3 とした。

## 3. 支承部の経年劣化と下フランジ応力の関係

### 3.1 支承の隙と応力の関係

リベット桁の支承の隙と下フランジのコーナー部の応力の関係を明らかにするため、荷重試験において支承の隙があり／なしの場合の応力を比較した。なお、端補剛材下端は欠損がある状態を模擬した。下フランジコーナー部付近の橋軸方向応力について、支承の隙のあり／なしでその分布を比較した結果を図8に示す。結果は、荷重が 420kN のときのものである。

図8より、下フランジ端部に支承の隙がある場合は、支承の隙がない場合と比べて隙と反対側（桁外側）のコーナー部の圧縮応力が高くなっていることがわかる。また、下フランジ中央に支承の隙がある場合は、桁内外両側の

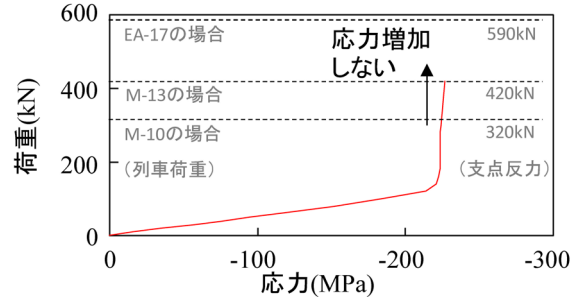


図10 荷重－コーナー部応力

コーナー部の圧縮応力が高くなっている。このような応力が発生したのは、下フランジが支承の隙に落ち込むことで、図9のように下フランジが腹板側へ曲げられるような変形（以下、曲げ変形）を生じたためであると考えられる。

下フランジ中央に支承の隙がある場合について、荷重とコーナー部の応力の関係を図10に示す。荷重に応じてコーナー部の応力は増加しているが、荷重がある程度大きくなると応力は増加しなくなる。これは、下フランジがソールプレートと接触したことにより、上述したような下フランジの曲げ変形が増加しなくなったためであると考えられる。

以上より、下フランジのコーナー部の応力は、支承の隙によって下フランジの腹板側への曲げ変形が生じることで発生しており、荷重がある程度大きくなり、下フランジが落ち込みきった状態になると応力は増加しなくなることがわかった。

### 3.2 端補剛材下端の欠損と応力の関係

本節では、リベット桁の端補剛材下端の欠損と下フランジのコーナー部の応力の関係を明らかにするため、FEM解析において端補剛材下端の欠損のあり／なしの場合の応力を比較した。なお、支承の隙は下フランジ中央に隙がある状態としている。端補剛材下端の欠損をあり／なしとした下フランジコーナー部の応力を図11に

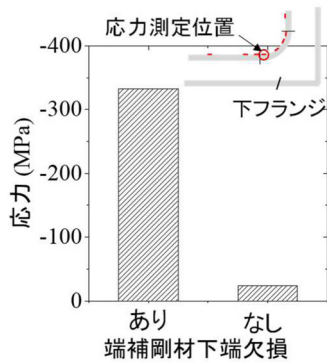


図 11 端補剛材下端欠損あり/なしと応力

示す。結果は、荷重が 420kN のときのものである。

図 11 より、下フランジコーナー部の応力は、端補剛材下端の欠損がある方が高くなっていることがわかる。図 12 に、支承部の Mises 応力コンター図を示す。端補剛材下端の欠損がない場合は、欠損がある場合と比べて端補剛材下端端部の応力が高くなっている。つまり、端補剛材下端が下フランジと接触することで、上述したような下フランジの曲げ変形が拘束され、下フランジのコーナー部に応力が発生しにくくなったものと考えられる。

以上より、端補剛材下端が経年によって腐食もしくは摩耗して欠損すると、支承の隙によって生じる下フランジの曲げ変形を拘束できず、結果として下フランジコーナー部の応力が増大し、疲労き裂が発生しやすくなることがわかった。

#### 4. 疲労き裂進展抑制のための補強工法

前章の検討より、下フランジのコーナー部の応力は、支承の隙によって下フランジの曲げ変形が生じることで発生しており、端補剛材下端の欠損があるとこれが増大することを確認した。このことから、支承の隙や端補剛材下端の欠損を解消することができれば、下フランジの疲労き裂先端に発生する応力は低減され、疲労き裂の進展を抑制できる可能性がある。

本章では、リベット桁の下フランジの疲労き裂進展を抑制するための簡易な補強工法を考案し、FEM 解析により補強部材寸法を検討したうえで、載荷試験においてその効果を検証した。

##### 4.1 補強工法の概要

補強工法は、施工時に桁の仮受けを必要としない 2 種類（以下、TypeA、TypeB）を考案した。以下に、それぞれの補強工法の概要を示す。

##### 4.1.1 TypeA

補強工法（TypeA）は、図 13 に示すように下端が欠損した端補剛材に補強部材を設置し、補強部材により支承の隙による下フランジの曲げ変形を拘束し、下フラ

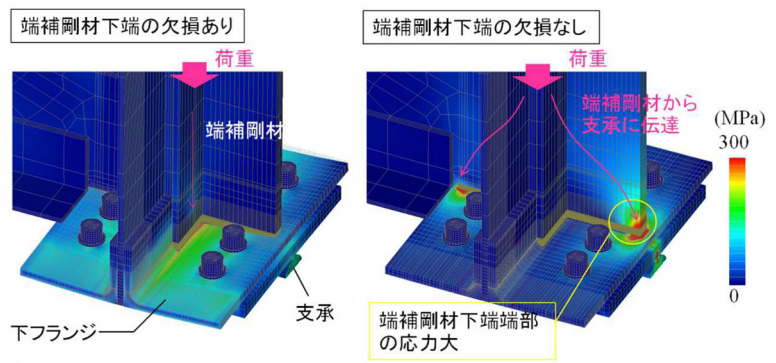


図 12 支承部の Mises 応力コンター図

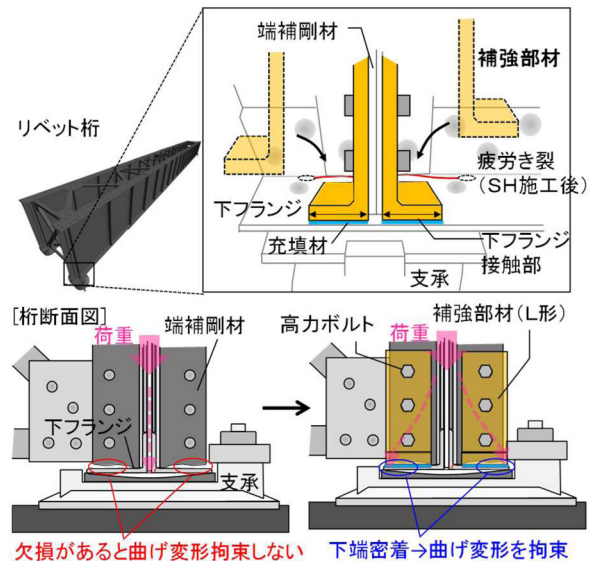


図 13 補強工法（TypeA）の概要

ンジの疲労き裂先端の応力を低減するものである。従来は、平板を端補剛材に添わせて補強していたこともあるが、経年したリベット桁では下フランジ上面が腐食して凹凸が発生していることが多く、補強部材である平板の下端と下フランジが密着しにくくなり、下フランジの曲げ変形を拘束することが難しかった。考案した補強工法（TypeA）は、補強部材を L 字の形状としたうえで、下フランジとの間に充填材を敷き、補強部材と下フランジを確実に密着させていることに特徴がある。

本検討では、充填材として金属粉入りのエポキシ樹脂<sup>3)</sup>を用いた。エポキシ樹脂の中では剛性や強度の高い方であるが、局部的に荷重が集中すると樹脂が大ききひずみ、下フランジの曲げ変形を拘束できないことや、充填材自体が破壊する可能性がある。このため、補強部材の下フランジ接触部を長くして充填材の支圧面積を増やすとともに、補強部材の板厚を増して下フランジ接触部に均等に荷重が伝わるよう配慮することとし、これらの寸法については FEM 解析により検討した。

FEM 解析では、3 章の検討で用いた解析モデルに補強部材を追加するとともに、疑似的に疲労き裂と先端のストップホールも導入し、補強部材の寸法（下フランジ

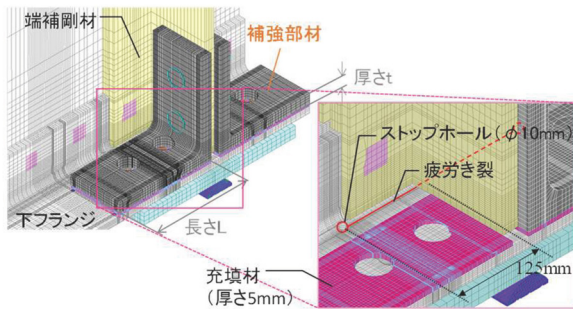
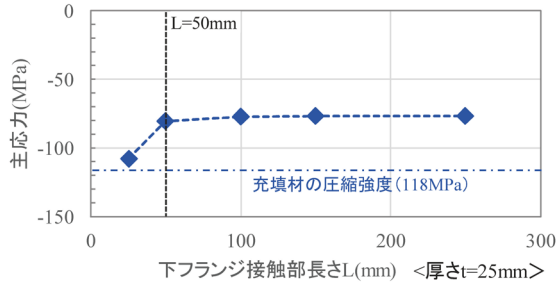
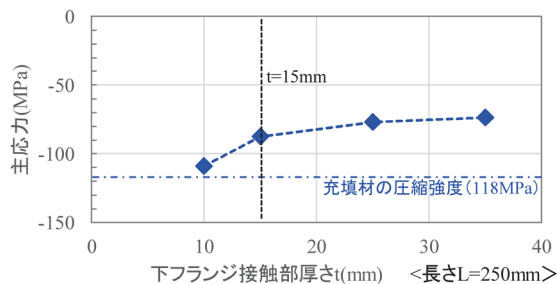


図 14 補強部材を追加した解析モデル



(a) 下フランジ接触部厚さ



(b) 下フランジ接触部長さ

図 15 補強部材寸法・充填材・疲労き裂先端応力

接触部の長さ(と厚さ)を変化させたときの充填材の応力を、金属粉入りエポキシ樹脂の圧縮強度(118MPa)と比較した(図14)。なお、充填材の厚さは5mmとし、ヤング率、ポアソン比は、 $E=2000\text{MPa}$ 、 $\nu=0.38$ とした<sup>4)</sup>。また、支承の隙は下フランジ中央に隙がある状態とし、荷重は420kNとした。

結果を図15に示す。充填材の応力は、下フランジ接触部の長さが25mm、厚さが10mmと小さい場合に、金属粉入りエポキシ樹脂の圧縮強度相当の大きさとなっているが、長さや厚さがこれより大きくなると応力は充填材の圧縮強度より低くなっている。以上の結果より、後述する荷重試験では補強部材の下フランジ接触部の長さを50mm程度以上、厚さを15mm程度以上とした。なお、これらの寸法は対象となるリベット桁の下フランジ幅・厚さ、通過列車の荷重や支承の隙の大きさなどによっても異なる。

#### 4.1.2 TypeB

補強工法(TypeB)の概要を図16に示す。本工法は、下フランジ中央に支承の隙がある場合に、下フランジとソールプレートをボルトで締め付けることにより、下フ

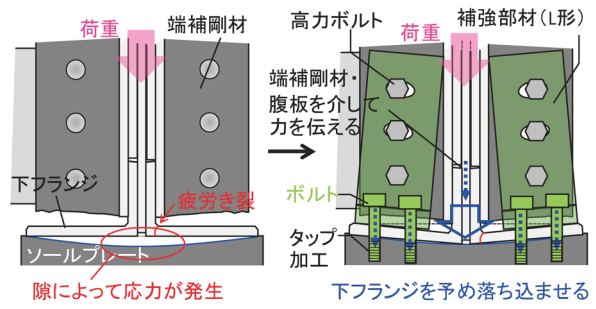


図 16 補強工法 (TypeB) の概要

ランジを予め落ち込ませるものである。前章の検討結果より、下フランジが落ち込みきった状態では下フランジのコーナー部の応力は変動しないため、疲労き裂の進展が抑制されると考えられる。

下フランジのボルト締め付けは支承があるソールプレート下面から行うことができないため、考案した補強工法(TypeB)ではソールプレートにタップ加工を行い、下フランジ上面からの作業のみでボルトの締め付けを行えるようにした。また、ボルトの締め付けは、端補剛材に設置したL形の補強部材を介して行った。これは、疲労き裂によって分断された下フランジの中央部(疲労き裂より腹板側の部分)を落ち込ませるために、ボルト締め付け時の下向きの力を端補剛材や腹板を介して下フランジ中央部に伝えることを目的としたものである。

#### 4.2 補強工法の疲労き裂進展抑制効果の検証

考案した補強工法の疲労き裂進展抑制効果を荷重試験により検証した。荷重試験では、最初に3章の検討に用いた試験体の支承上の下フランジに疲労き裂を模擬した切欠き(58mm)を導入し、支承の隙を導入して繰り返し荷重を行うことで疲労き裂を切欠きから100mm程度進展させた。そのうえで、疲労き裂先端にストップホール( $\phi=12\text{mm}$ )を施工してTypeA、TypeBの補強前後で荷重を行い、疲労き裂先端のストップホールの応力を比較した。さらに、TypeAの補強後に繰り返し荷重を行い、疲労き裂の進展が抑制されるかどうかを確認した。図17に、疲労き裂およびストップホール( $\phi=12\text{mm}$ )導入後、TypeA、TypeBの補強後における試験体の状況を示す。なお、荷重試験において、支承の隙は下フランジ中央に隙がある状態とし、荷重は420kNとしている。

図18に、TypeA、TypeBの補強前後で荷重を行った場合の、支間側の疲労き裂先端ストップホール近傍(疲労き裂と反対側のストップホール縁から10mm離れた位置)で測定した応力を示す。疲労き裂先端のストップホール近傍の応力は、TypeA、TypeBの補強後に大幅に減少していることがわかる。

図19に、繰り返し荷重の荷重回数と支間側の下フランジき裂進展長さの関係を、TypeAの補強前後につい

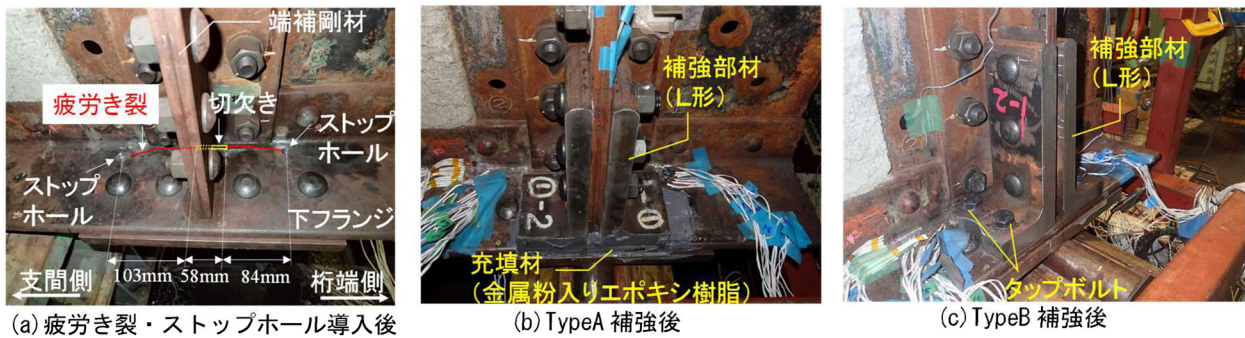


図 17 補強前後の試験体の状況

て示す。ここで、“補強前”の結果は、試験体の下フランジに導入した切欠きから疲労き裂を進展させたときのものである。図 19 より、TypeA の補強後に 370 万回 (10 両編成の列車が 200 本/日通過した場合の 5 年分に相当) の繰り返し载荷を行っても疲労き裂は進展しなかった。また、繰り返し载荷前後で充填材や補強部材の状態に変化はなく、本工法が、疲労き裂の補修を計画的に行ううえで必要な補修の猶予期間 (数年から十年程度) を確保するのに十分な耐久性を有していることを確認した。

以上より、考案した TypeA、TypeB の補強工法は、疲労き裂先端の応力を大幅に低減でき、TypeA については一定の耐久性を有していることがわかった。

## 5. おわりに

リベット桁の下フランジに発生した疲労き裂の進展を抑制する簡易な補強工法を開発した。開発に際して、実物大の载荷試験および FEM 解析を行うことにより、支承部の経年劣化と下フランジのコーナー部に発生する応力との関係を調査し、以下のことを明らかにした。

- (1) 下フランジのコーナー部の応力は、支承の隙によって下フランジの腹板側への曲げ変形が生じることで発生しており、荷重がある程度大きくなり、下フランジが落ち込みきった状態になると応力は増加しなくなる。
- (2) 端補剛材下端が経年によって腐食もしくは摩耗して欠損すると、支承の隙によって生じる下フランジの曲げ変形を拘束できず、結果として下フランジコーナー部の応力が増大し、疲労き裂が発生しやすくなる。

これらをもとに、施工時に桁の仮受けが不要な補強工法を 2 種類考案し、それぞれについて効果を検証した。その結果、考案した TypeA、TypeB の補強工法は、疲労き裂先端の応力を大幅に低減でき、TypeA については一定の耐久性を有していることがわかった。本工法を用いて疲労き裂の補修に着手できていないリベット桁を数年から 10 年程度延命化し、その期間に補修を計画的に

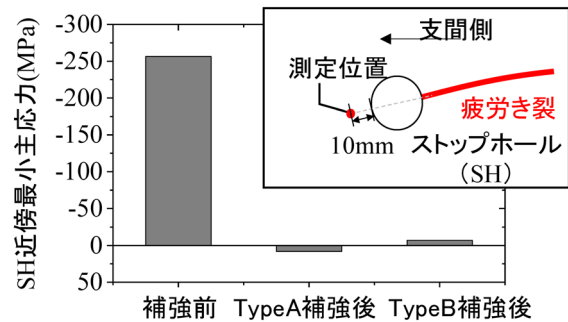


図 18 補強前後の疲労き裂先端応力 (支間側)

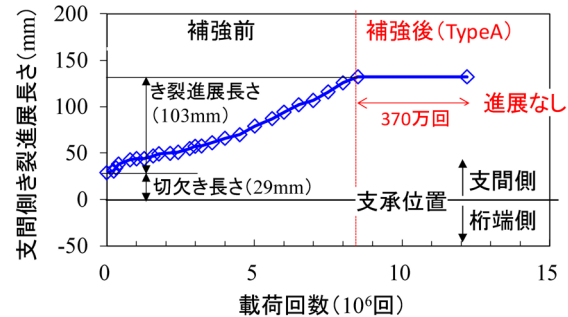


図 19 载荷回数-疲労き裂進展長さ (支間側)

行うことにより、補修にかかる手間を平準化できるようになると考えられる。

## 文献

- 1) 西田寿生, 金裕哲: 鉄道上路プレートガーダー下フランジ山形鋼に生じた疲労き裂発生要因に関する検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, I -518, 2011
- 2) 千明祐也, 塚原高志, 井上英一: 鋼鉄道橋の支承部補修および応力測定による安全性と補修効果の確認, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, VI -096, 2014
- 3) Devcon チタニウムパテ テクニカルデータシート: <http://www.itwppfjapan.com/devcon/img/file489.pdf> (参照日: 2020 年 3 月 11 日)
- 4) 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008