

# 既設鋼 I ビーム支点部疲労き裂の原因究明と コンクリート巻き立て工法

小林 裕介\* 福本 守\*\* 山下 健二\*\*\*

Cause Identification and Repair Method with Concrete for the Fatigue Crack of Existing Steel I-beam Bridge

Yusuke KOBAYASHI Mamoru FUKUMOTO Kenji YAMASHITA

I-beam is the structural type used for the bridges of 1.3-6.7 meters short span. In this structural type, fatigue crack often initiates at the connection between web and bottom flange immediately above the bridge support. This fatigue crack initiation normally forces the bridge to be replaced with new one, since there is no effective repair method to prevent the crack propagation or re-initiation by reason of the uncertain mechanism.

In this research, we identified the mechanism of the fatigue crack initiation by conducting the loading test with full-scale I-beam bridge and FEM analysis. Based on this result, we proposed an unprecedented repair method for the fatigue crack, which covers the end of the girder with concrete. Moreover, we verified the effect and the durability of this repair method by the loading tests.

キーワード：I ビーム，疲労き裂，原因究明，コンクリート巻き立て工法

## 1. はじめに

I ビームとは、主に支間 1.3m ～ 6.7m 程度の短スパン橋梁に利用される、I 形鋼を主桁に用いた構造形式<sup>1)</sup>である。線路が水路を跨ぐ場合や、盛土区間において一車線程度の車道を跨ぐ場合に利用され、架設数は比較的多い。I ビーム橋梁の支点には、ソールプレートとベッドプレートで構成される平面支承が用いられており、この支承直上の下フランジ首部に、疲労き裂の発生する事例が多い(図 1)。疲労き裂は、列車の通過による繰返し応力によるものであるが、疲労き裂の発生原因となる応力集中は、ベッドプレート下面の沓座モルタルの損傷<sup>2)</sup>や、端補剛材下端の隙<sup>3)</sup>といった支点部の損傷に起因していると言われている。

疲労き裂の一般的な補修としては、当板により部材断面を修復したうえで、さらに、疲労き裂が再発生もしくは再進展しないように、発生応力を低減させる対策を行う。しかしながら、I ビーム橋梁の支点部の疲労き裂では、発生部位が曲面を有する下フランジ首部であり、当板による断面修復が困難である。また、下フランジ首部における応力と支点部損傷との詳細な因果関係が明らか

になっていないため、疲労き裂の再進展を防止する効果的な対策がない。このような理由から、疲労き裂が発生した場合、き裂が短くても、橋梁自体を架け替えることが基本的な措置の方法となっている。

一方で、I ビーム橋梁を架け替える場合、橋梁本体の製作費は数百万円程度であるが、設計費や架設費などを考慮すると、総工費が 1,000 万円を超えることもあり、発生した疲労き裂の対策としては極めて高額となる。また、橋上にロングレールが敷設されている場合などは、桁のこう上ができないため架け替えの工法に制約があるうえ、ロングレールの圧縮軸力が高まる夏場には工事が制限されるといった問題もある。

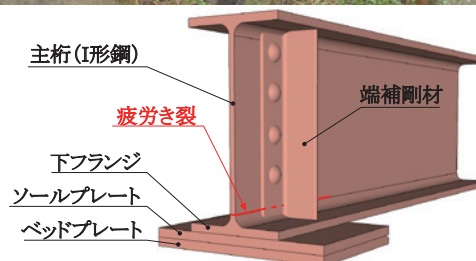


図 1 I ビーム支点部の疲労き裂

\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
(現 西日本旅客鉄道株式会社)  
\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
(現 JR 九州コンサルタンツ株式会社)

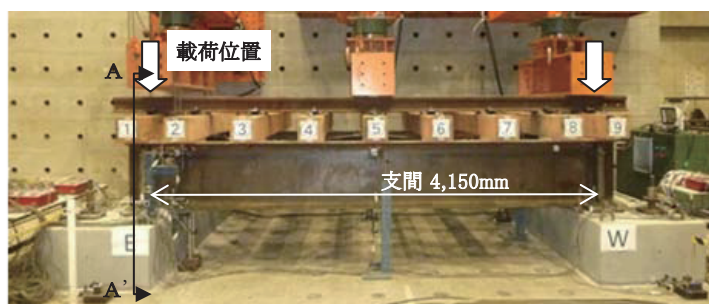


図2 実物大試験体概要・荷重状況

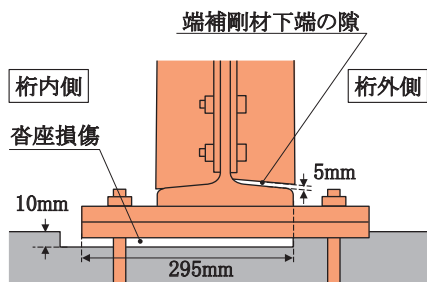
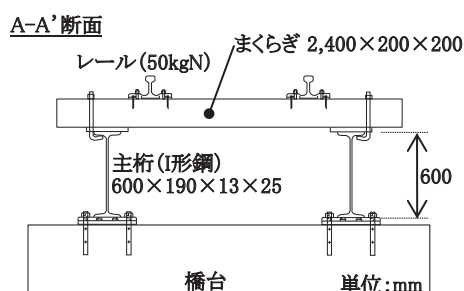


図3 模擬した支点部損傷

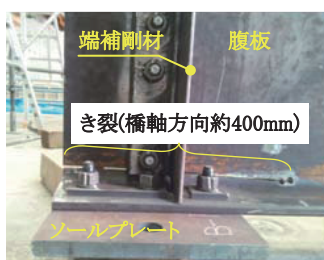


図4 模擬き裂

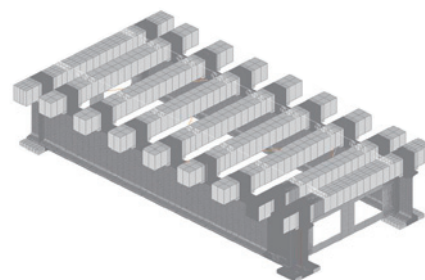


図5 FEMモデル

このように、既設Iビーム橋梁の支点部疲労き裂は、その発生数が多いにもかかわらず、有効な対策方法がないため、鉄道事業者にとって切実な問題となっている。そこで本研究では、実物大の荷重試験およびFEM解析により、Iビーム支点部の疲労き裂の発生原因を究明するとともに、対策方法としてコンクリート巻き立て工法を提案しその効果を検証した。本工法は、既存の桁をそのまま利用できる利点があるうえ、桁のこう上が不要であり簡易に施工できることに特徴がある。本稿では、これらの検討内容および工法について報告する。

## 2. 疲労き裂の発生原因究明

### 2.1 荷重試験およびFEM解析の概要

疲労き裂の発生原因究明を目的として、実物大Iビーム橋梁の試験体を用いて荷重試験を実施した(図2)。試験体の支間は4.15mで、この支間における国鉄の標準設計をもとに試験体を製作した。Iビーム橋梁の変形挙動や応力性状に、軌道部材の剛性も十分寄与することが想定されたため、50kgNレールとまくらぎで構成される軌道部材も設置した。橋台については鉄筋コンクリートにより構築し試験場床面にアンカーにて固定した。

荷重荷重はEA-17荷重<sup>4)</sup>を想定し170kNを桁端に荷重した。なお、各荷重位置では1本のアクチュエーターで2本のレールを同時に荷重するため荷重梁を用いている。

荷重試験では、試験体の各支点部を利用し、表1に示す状態について検討を行った。ケース①は支点部が健全な状態、ケース②は図3に示す支点部の損傷を有する状態、ケース③は支点部の損傷により疲労き裂が発生した

表1 検討ケース

状態	支点部損傷		疲労き裂	対策
	沓座損傷	端補剛材の隙		
① 健全時	—	—	—	—
② 支点部損傷時	あり	あり	—	—
③ 疲労き裂発生後	あり	あり	あり	—
③' 発生後	—	—	あり	—
④ 対策後	あり	あり	あり	実施

状態である。疲労き裂は、1支点部において下フランジ首部を400mm程度カットすることで模擬し、先端にはφ10のストップホール(以降、SH)を設けている(図4)。またケース③'は、疲労き裂の発生後に当板による断面修復をせずに、支点部損傷のみを補修した状態を想定している。なお、ケース④はコンクリート巻き立て工法について検討したものであり、詳細は3章で示す。

FEM解析は、荷重試験を補完する目的で、図5に示すFEMモデルを用いて行った。主桁、まくらぎ、沓座はソリッド要素、横桁はシェル要素、レールはビーム要素で作成し、モデル全体で約24万要素である。まくらぎと主桁、主桁とソールプレート、ソールプレートとベッドプレートの界面では接触要素を用い、レールとまくらぎの接続には締結装置を考慮するためのバネ要素を用いている。なお、解析には汎用コードNX/Nastran V9.0を利用した。

### 2.2 疲労き裂の発生原因

疲労き裂の発生原因として、沓座モルタルの損傷と端補剛材下端の隙の支点部損傷に着目し、損傷による下フランジ首部における発生応力について分析した。

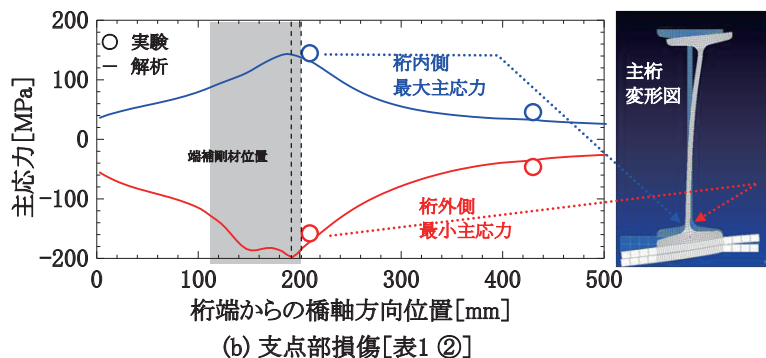
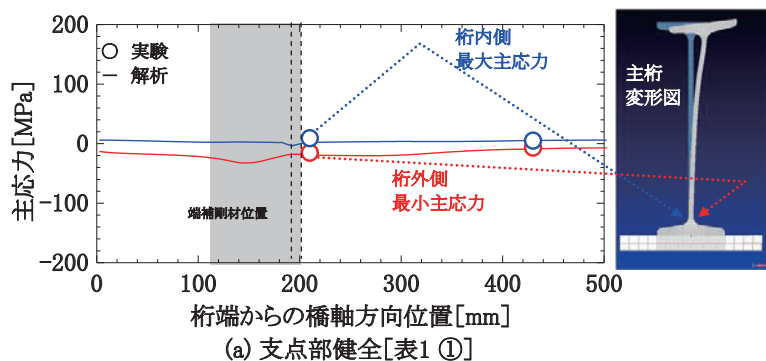


図6 下フランジ首部の応力性状と主桁断面変形図

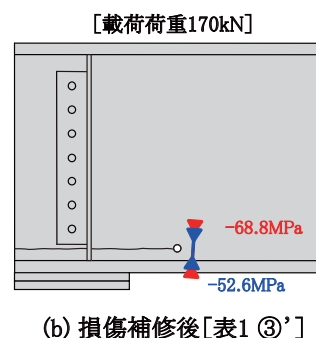
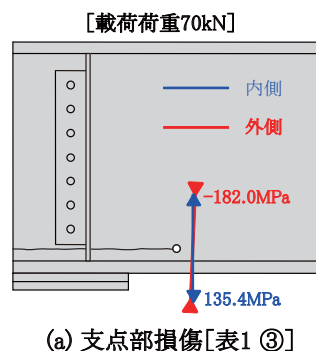


図8 疲労き裂先端SH前縁の主応力

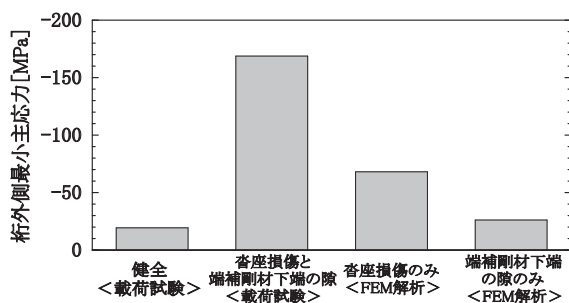


図7 支点部損傷と桁外側最小主応力の関係

桁端を載荷したときの下フランジ首部の応力性状について、載荷試験およびFEM解析の結果を図6に示す。また、図6にはFEM解析で得られた主桁断面（桁端から210mm位置）の変形図についても示す。なお、卓越応力成分が桁内側については最大主応力、桁外側については最小主応力であり、主応力はいずれも鉛直に近い方向であった。

支点部が健全な場合（図6(a)）は下フランジ首部に殆ど応力が生じていないのに対し、支点部に損傷がある場合（図6(b)）は、最大で200MPa程度（主応力の絶対値）の高い応力が生じているのが分かる。また、最大応力の橋軸方向における発生位置が端補剛材付近であることから、下フランジ首部の疲労き裂は、支点部損傷によって生じる応力集中によって端補剛材付近から発生するものと考えられる。

桁の内外の応力性状に着目すると、損傷がある場合は内側で引張応力、外側で圧縮応力となる面外応力が主成分となっている。これは変形図からも分かるように、沓

座損傷により内側の下フランジが下方向に落ち込んだことが原因であると考えられる。ここで、桁外側の最小主応力に着目し、支点部損傷ごとの発生応力について図7に示す。沓座損傷と端補剛材下端の隙の両方生じている場合と比べ、沓座損傷のみの場合は発生応力が半分以下となっている。これは沓座損傷により内側下フランジが落ち込もうとするのに対し、外側の下フランジが端補剛材下端に接しているためその変形が拘束されることによるものと考えられる。また、端補剛材下端の隙のみが生じている場合は、発生応力が健全な場合とほぼ同等である。これは沓座損傷がないため、そもそも下フランジが落ち込む変形を生じていないためと考えられる。

以上のことから、Iビーム支点部の下フランジ首部の疲労き裂は、沓座損傷と補剛材下端の隙の両方が生じているときに、片側下フランジの落ち込みで生じる面外応力によって端補剛材付近に発生すると言える。

### 2.3 疲労き裂の進展原因

疲労き裂が発生した場合に、その疲労き裂の進展に影響を及ぼす因子を把握することを目的に、模擬疲労き裂を導入した支点部における応力性状を分析した。図8に、載荷試験において桁端を載荷したときの、支点部損傷がある場合のSH前縁の応力と、支点部損傷がない場合（疲労き裂発生後に支点部損傷を補修したことを想定）のSH前縁の応力を示す。なお、支点部に損傷がある場合は100kNを載荷した時点で降伏応力に近い応力が生じたため、それ以上の載荷はしなかった。

特集：構造物技術

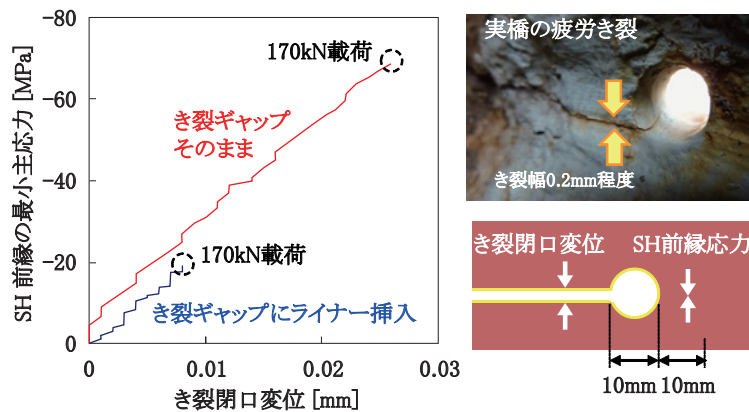


図9 き裂閉口変位と発生応力

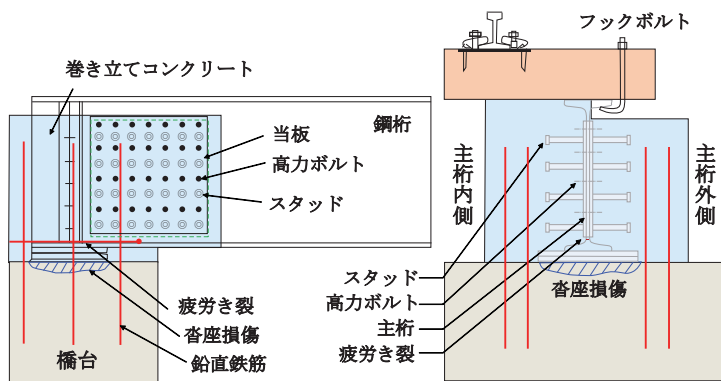


図11 構造の概要

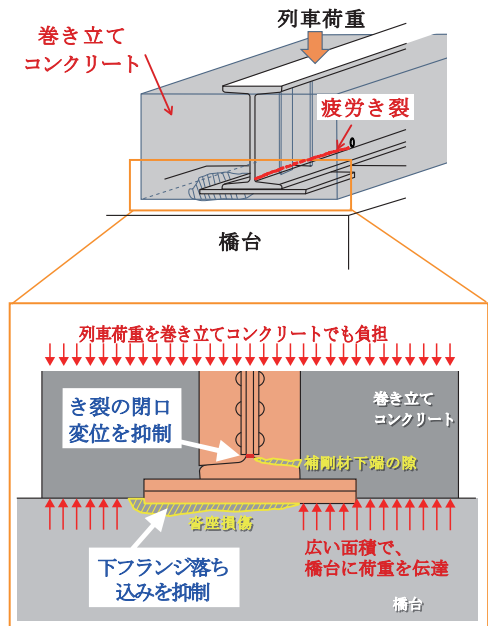


図10 コンクリート巻き立て工法の概要

図8において、支点部に損傷がある場合の桁の内外の応力性状に着目すると、桁の内側で引張応力、外側で圧縮応力となる面外応力が主成分となっており、疲労き裂がSHを超えて進展する応力レベルにある。一方で、支点部損傷が無い場合は170kN 载荷しても-70MPa程度の発生応力であり、面内応力が主成分となっていた。これより、疲労き裂がある場合、SHの対策だけでは疲労き裂が再進展する可能性が高く、その主たる原因は、疲労き裂の発生原因と同様に支点部損傷による下フランジ首部の面外応力であることが分かった。

なお、疲労き裂がある場合は、支点部損傷が無くても健全時(図6、図7)と比べて発生応力が高い。疲労き裂が応力増大の原因であることを証明するため、疲労き裂の閉口変位とSH前縁応力の関係に着目した。結果を図9に示す。図9には、疲労き裂のギャップにライナープレートを挿入し、閉口変位を拘束したときの結果も示している。

SH前縁の応力と閉口変位には高い相関があり、閉口変位を拘束した場合に発生応力が低減している。この結果から、疲労き裂の閉口変位が疲労き裂の進展に寄与していることが分かった。なお、本検討で用いた試験体では、疲労き裂を模擬するため下フランジ首部をワイヤーソーで切断したため、5mm程度のギャップを有していた。実際のギャップ量は、疲労き裂の長さ等に応じて異

なるが、図9に示すように0.2mm程度のギャップ量を有していた事例を確認している。

### 3. コンクリート巻き立て工法

#### 3.1 コンクリート巻き立て工法の概要

##### 3.1.1 工法の狙いと利点

前章の検討より、Iビーム支点部疲労き裂は、沓座損傷と端補剛材下端の隙により下フランジ片側が落ち込む変形が原因となって疲労き裂が発生し、疲労き裂はこれらの支点部損傷と疲労き裂の閉口変位によって進展していくことが分かった。これに対し、沓座損傷と端補剛材下端の隙を補修すれば、疲労き裂先端のSH前縁応力はある程度低減可能であるものの、健全時の応力レベルまでは回復しない。さらに沓座損傷の補修には、桁をこう上させて沓座モルタルを打ち直す必要があり、補修も大掛かりとなる。

本研究で提案するコンクリート巻き立て工法を図10に示す。本工法は、桁端の主桁まわりをコンクリートで巻き立てるものであり、桁端上に载荷された荷重をコンクリートを介して橋台に伝達するものである。これにより下フランジ片側が落ち込む変形を抑制するとともに、疲労き裂の閉口も抑制することで、下フランジ首部もしくは疲労き裂先端の発生応力を低減させることを狙いと

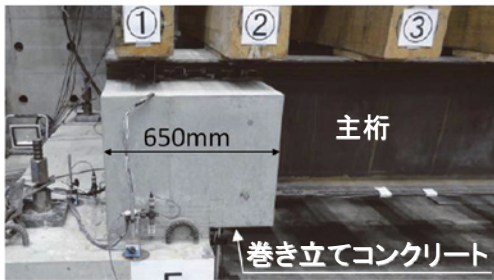


図 12 巻き立てコンクリート

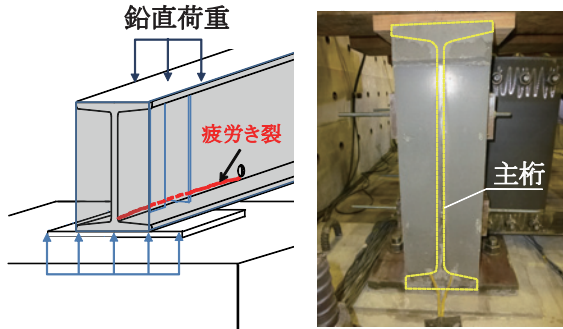


図 13 フランジ幅でコンクリート打設した構造

している。

本工法では、桁のこう上を必要とする沓座損傷の補修をせずに施工するため、活線での施工が容易となることに特徴がある。また、疲労き裂については先端にSHを設けるのみで、当板などの補修は不要である。なお、一般に桁端は腐食損傷の著しい部位であるが、コンクリートを巻き立てることにより、腐食の進行抑制を期待できる利点もある。

### 3.1.2 構造の概要

桁端にコンクリートを巻き立てた場合、列車の車軸が通過し桁がたわむごとに、巻き立てコンクリートと橋台天端の界面が開閉口し、界面のコンクリートが損傷して荷重を橋台に伝達できなくなる可能性がある。そこで巻き立てコンクリートと橋台を、鉛直鉄筋で固定した(図11)。この場合、単純桁としていたIビーム橋梁が、橋台と一体化したことで門型のラーメン構造となり、列車荷重や温度変化に対し隅角部に断面力が生じる<sup>5)</sup>。この断面力に対して鋼桁と巻き立てコンクリートがずれないように、鋼桁ウェブにスタッドを配置した。現場において横向きにスタッド溶接をすることは施工性が劣るため、予め当板にスタッドを溶殖しておき、その当板を鋼桁ウェブにボルト接合する構造とした。これにより、現地での施工性が向上するうえ、桁端が腐食している橋梁については、当板補強の効果も期待できる。

本工法では、上記の鉛直鉄筋とスタッドを設けることを基本としているが、鉛直鉄筋とスタッドの必要本数と配置については、別途設計照査<sup>6)</sup>を行うことで決定する。巻き立てコンクリートの長さや幅については、鉛直鉄筋

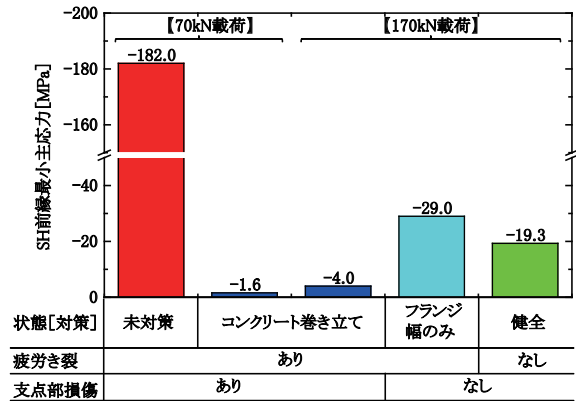


図 14 効果の検証結果

とスタッドの配置に合わせて設定するが、長さについては疲労き裂を完全に覆うことができる長さを優先し設定する。

なお、本工法では疲労き裂の先端にはSHを設けておき、巻き立てコンクリート内にはひび割れ防止鉄筋を配置することとしている。また、巻き立てコンクリートの桁外側上端は、フックボルトの取り外し等を阻害しないよう上フランジとの間にギャップを設けている。

### 3.2 工法の効果の検証

本工法の効果を検証するため、図2に示す試験体においてコンクリート巻き立て工法を適用し(図12)、桁端上を載荷したときの疲労き裂先端(SH前縁)の応力低減程度について確認した。なお、沓座損傷と端補剛材下端の隙を補修したうえで、疲労き裂の閉口変位のみを抑制することを目的に、フランジ幅のみコンクリートを巻き立てた構造(図13)についても、比較対象として載荷試験を実施した。

載荷試験の結果を図14に示す。SH前縁において、コンクリート巻き立て工法の適用前は70kNの載荷で-182MPaの発生応力であったが、適用後の発生応力は-1.6MPaまで低下した。また、適用後において170kNまで載荷しても発生応力は-4.0MPaであり、健全時の発生応力よりも低いレベルであることが確認できた。

フランジ幅のみコンクリートを巻き立てた場合(図13)は、発生応力が-29.0MPaであり健全時に近い発生応力となっていたが、コンクリート巻き立て工法よりはるかに高い発生応力となっている。このように、コンクリート巻き立て工法は、沓座損傷や端補剛材下端の隙を補修し、さらにコンクリートにより疲労き裂の閉口変位を抑制した場合よりも、高い応力低減効果を有していることを確認した。

### 3.3 工法の疲労耐久性の検討

本工法の耐久性について確認するため、桁端上を

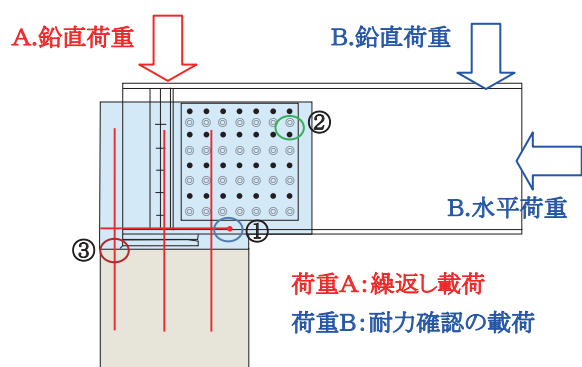


図 15 疲労試験の概要

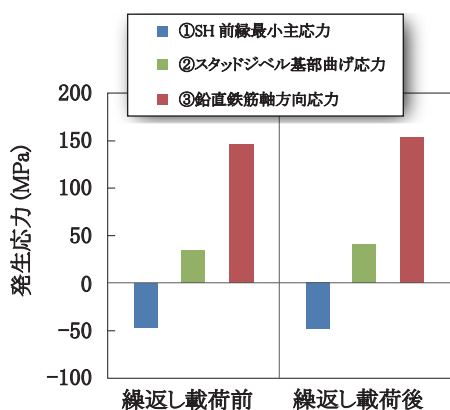


図 16 疲労試験前後の発生応力比較

130kN (EA-17 荷重+衝撃荷重相当) の荷重で、200 万回繰返し載荷した前後で、SH 前縁の発生応力について変化がないかを確認した。なお、隅角部に断面力が発生するときは、鋼桁と巻き立てコンクリートの最前縁のずれ止め (図 15 の②)、および巻き立てコンクリートと橋台とを繋ぐ最背面の鉛直鉄筋 (図 15 の③) が耐力上の弱点となりうる<sup>6)</sup>。このため、疲労試験は図 15 のように 1 支点のみを再現した試験体を用いて桁端上に繰返し載荷し、その前後において隅角部に設計上の最大断面力が生じるよう鋼桁の先端を鉛直および水平方向に載荷し、その時の発生応力 (図 15 の①~③) を確認した。

結果を図 16 に示す。繰返し載荷後も、載荷前とほぼ同じ応力状態となっており、コンクリート巻き立て工法が十分な耐久性を有していることを確認した。

#### 4. まとめ

本検討では、実物大の載荷試験および FEM 解析から、I ビーム橋梁支点部における下フランジ首部の疲労き裂の発生原因を究明するとともに、対策方法としてコンクリート巻き立て工法を提案し、その効果を検証した。本

検討の要旨および得られた知見を以下に示す。

- (1) I ビーム橋梁支点部における下フランジ首部では、杓座損傷と端補剛材下端の隙の両方が生じているときに下フランジ片側が落ち込む変形を呈し、その結果として下フランジ首部に応力集中が生じることで、疲労き裂が端補剛材付近から発生する。
- (2) 発生した疲労き裂の進展に対しても、杓座損傷と端補剛材下端の隙による下フランジ片側が落ち込む変形が大きく寄与する。ただし、これらの支点部損傷を補修したとしても、発生応力を十分に低減させることはできず、疲労き裂の閉口変位も拘束する必要がある。
- (3) 支点部損傷による下フランジ首部の変形と、疲労き裂の閉口変位を抑制し、疲労き裂の先端における発生応力を低減させるコンクリート巻き立て工法を提案した。本工法は、桁のこう上を不要としているうえ、桁端部の腐食進行の抑制効果も期待できる。
- (4) 下フランジ首部に疲労き裂が発生した I ビーム橋梁において、コンクリート巻き立て工法を適用すると、疲労き裂の先端における SH 前縁の発生応力は健全時よりも低いレベルまで低減することが可能であることを確認した。また、桁端上を 200 万回繰返し載荷した後も、SH 前縁および隅角部の弱点となる箇所が発生応力は変化せず、十分な耐久性を有していることも確認した。

#### 文 献

- 1) 小野田滋：鉄道構造物探検，JTB キャンプックス，p.149，2002.12
- 2) 和泉大祐，栗林健一：鉄道鋼橋の支点部における異常検知指標の検討，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.69，VI-465，2014.9
- 3) 杉本一朗，小林裕介，市川篤司：溶接付加物が鋼リベット桁の疲労に及ぼす影響と延命化手法，鉄道総研報告，Vol.20，No.5，pp.17-22，2006.5
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 (鋼・合成構造物)，丸善，2009.7
- 5) 小林裕介，杉本一朗，横山知昭，須賀基晃，栗山亮介，笹山勝：既設鋼鉄道橋における鋼桁・橋台・盛土一体化構造の温度変形特性，構造工学論文集 A，Vol.58A，pp.721-731，2012.4
- 6) 青木千里，福本守，小林裕介，松尾仁：I ビーム橋りょう支点部の疲労き裂対策工法の構造に関する検討，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.69，I-563，2014.9