

鉄道総研報告
RTRI REPORT支点上補剛材下端の疲労き裂に対する
支圧接合用高力ボルトを用いた当て板補強吉田 善紀* 穴見 健吾** 長坂 康史***
竹渕 敏郎# 小林 裕介*

Retrofit for Preventing Fatigue Crack Initiation at End Stiffener Using Splice Plate with Bearing-type Bolt

Yoshinori YOSHIDA Kengo ANAMI Yasushi NAGASAKA
Toshio TAKEBUCHI Yusuke KOBAYASHI

One of the typical fatigue cracks found in welded girders of railway steel bridges is observed at the bottom of end stiffener. Bearing settlement leads to stress concentration and fatigue cracking at the bottom of end stiffener. Consequently, the necessary retrofits impose a significant maintenance burden. This study proposes a method for retrofitting end stiffener using splice plate with bearing-type bolt for pressing. This paper reports the results of static load test and cyclic load test conducted for evaluating the applicability of the proposed method.

キーワード：当て板，支点上補剛材，支圧ボルト，押し当て

1. はじめに

溶接構造の鉄道橋において、鋼桁の支点上補剛材下端に疲労き裂が生じることがある¹⁾ (図 1(a))。疲労き裂の原因は、桁架設時の支承の施工不良や沓座モルタルの損傷等²⁾により、桁と支承の間に図 1(b)のような隙（以下、支承の隙）が生じることで、桁が支承上で均等に支持されず、補剛材下端に応力が集中することによる³⁾。疲労き裂の発生を防止するために沓座モルタルを打ち替えて支承を据え直す対策が行われているが、施工時に桁の仮受けが必要となりジャッキアップのための桁補強や列車の運行調整に相応の負担を要している。また、鋼製橋脚などの鋼部材で支持された支承は、上記のように沓座モルタルを打ち替えて支承を据え直すことができないため、支承の隙を取り除くことが困難となる。

そこで、支承の据え直しをせずに、簡易な当て板のみで補剛材下端の応力を低減することで、疲労き裂の発生を抑制し鋼桁の延命化を図る補強工法を開発した⁴⁾。本検討では、鋼桁の支点部を実物大で模擬した試験体を用いて、支点上での当て板の施工性や補剛材下端の応力低減効果を確認するとともに、当て板施工後の試験体に対して繰返し载荷を行い、実際の運用における当て板の耐久性を検証した。本稿では、これらの結果について報告する。

2. 支圧ボルトを用いた支点上補剛材下端の補強方法

疲労き裂に対する補強方法として、対象の部材に当て板を添接し、当て板に荷重を分担させることで応力を低減する方法がある (図 2(a))。支点上の補剛材下端は下フランジと溶接で接合されており、図 2(b)の

* 構造物技術研究部 橋りょう研究室
** 芝浦工業大学
*** 川田工業株式会社
MK エンジニアリング株式会社

ように支承からの反力が下フランジから直接伝わる箇所である。当て板を下フランジと接触させて、補剛材下端に添接しただけでは、例えば溶接構造の桁製作時に生じる下フランジのひずみ等により、当て板下面が下フランジに均等に接触せず、支承からの反力を分担することができない（図2(c)）。支承からの反力を分担するためには、図2(d)のように当て板を下フランジに押し当てることで当て板下面と下フランジとを密着させることが必要となる。

開発した工法における当て板の押し当ては、支圧ボルトを挿入するボルト孔位置を当て板側と母材側でずらして設けることで、支圧ボルトの打ち込み時に導入される支圧力を利用して行う⁵⁾（図3）。当て板は

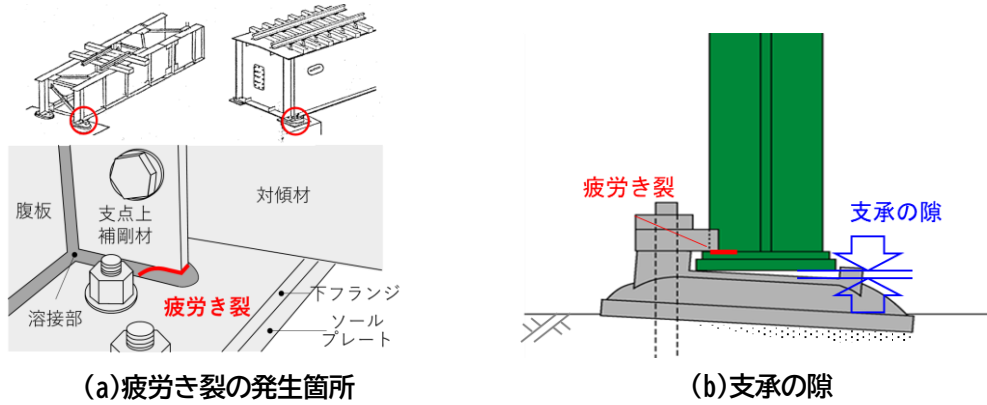


図1 支点上補剛材下端の疲労き裂

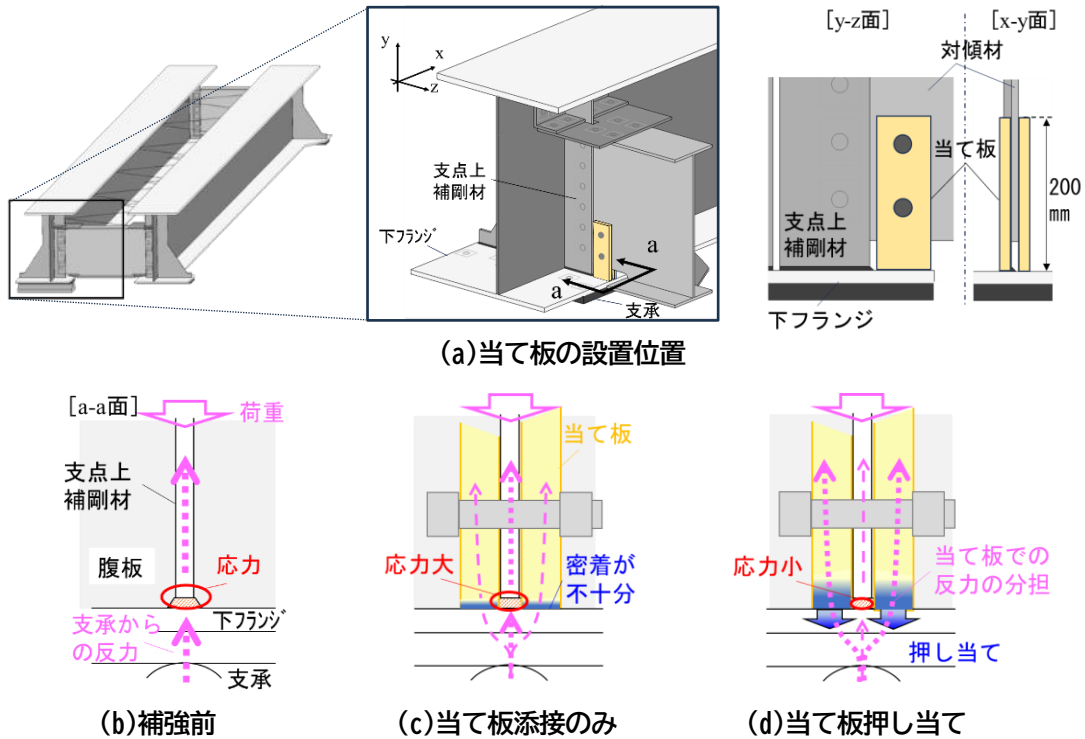


図2 支点上補剛材下端の当て板

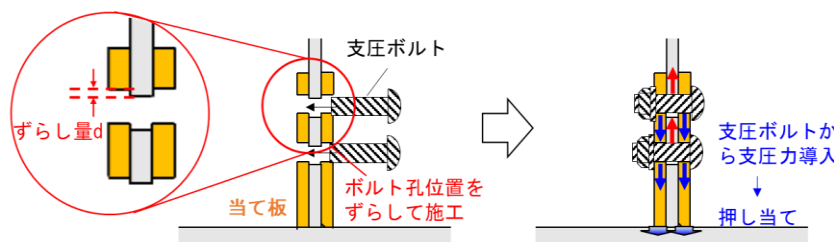


図3 支圧ボルトを用いた当て板の押し当て

簡易に製作可能な平板形状とし、図 2(a)のように対傾材を利用して下フランジ端部に押し当てる⁶⁾。なお、当て板下面と下フランジの間にはアクリル樹脂を塗布し、当て板下面の密着度をさらに高めるとともに、僅かに生じる隙への滞水を防止する。

3. 支点上での当て板施工および補剛材下端応力低減効果の検証

鋼桁の支点部を模擬した試験体を用いて、補剛材下端での応力低減効果を検証した。本章では、これらの結果について示す。

3.1 载荷試験の概要

試験体は、過去に支点上補剛材下端に疲労き裂が発見された鋼橋を対象とし、実橋と同じ鋼材を使用して支点部の断面を実寸法で製作した(図 4)。当て板を設置した支点上補剛材の寸法は幅が 120mm、板厚が 9mm である。試験体への当て板の設置状況を図 5 に示す。当て板は 200×70mm (板厚 12mm,16mm) の矩形とし、当て板の押し当てに用いる支圧ボルトは M22-B10T とした。対傾材のボルト孔は、予め作製したガイドを用いて当て板のボルト孔からずらした位置に施工した。支圧ボルトの打ち込みは、当て板を対傾材に仮固定した状態で、市販のハンマーを用いて打ち込むことにより行った。支圧ボルトの座面が対傾材と接するまで打ち込んだ後、トルクレンチによるボルト締め付けを行った。支点部においてもハンマーやトルクレンチを用いて支障なく作業を行うことができ、施工に要した時間は全体で 5~10 分程度であった。このことから、実際の橋りょうの支点上の狭隘な作業空間においても、簡易に当て板の施工が可能であると考える。

試験体の载荷は、支点上補剛材直上の上フランジに設置した载荷梁を介して行い、载荷装置の定格出力(500kN)を上限とし、荷重制御により漸増させた(図 6)。载荷時の支承は、着目する支点部にローラー(φ100mm)を使用して実橋と同様の線支承による支持状態を模擬し、図 7 のようにジャッキにより試験

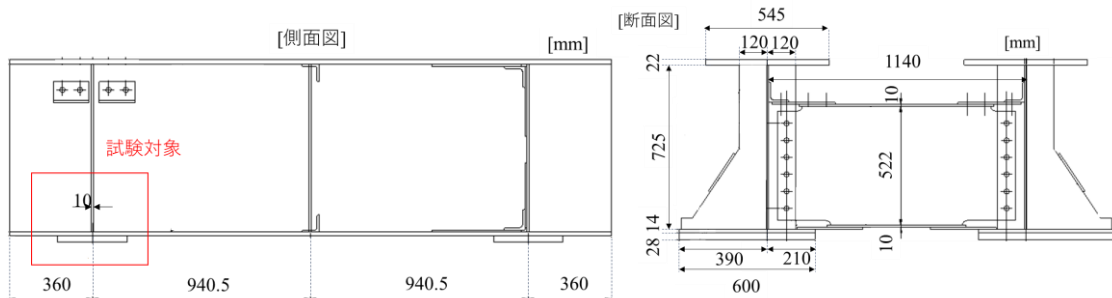


図 4 試験体形状・寸法



図 5 当て板の設置状況



図 6 载荷状況

体を傾けることで任意の大きさの支承の隙を導入した。

本稿の当て板施工のケースを表 1 に示す。本試験では、支承の隙の大きさや当て板のボルト孔位置のずらし量を変えた場合の応力低減効果の検討を行っている。

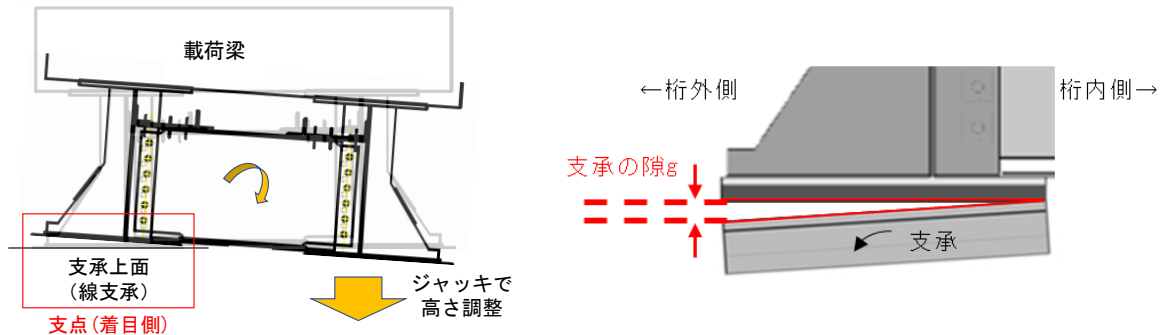


図 7 支承の隙の導入方法

表 1 当て板施工のケース

施工ケース	検証項目	当て板			支承の隙の大きさg	備考
		板厚	枚数	ボルト孔位置のずらし量d		
case1	当て板による補剛材下端の応力低減効果	16mm	2枚	0.8mm	0.58mm	
case2	当て板による補剛材下端の応力低減効果 (支承の隙量の影響)	16mm	2枚	0.5mm	0.15~1.53mm	
case3	ボルト孔位置ずらし量の影響	16mm	2枚	0.5mm	0.58mm	4章の繰り返し载荷試験に使用

3.2 当て板による補剛材下端の応力低減効果

表 1 の case1 について、当て板施工前後で载荷を行い、载荷時の補剛材下端の応力を比較することにより、当て板の応力低減効果を検証した。なお、本検討で用いる当て板 (case1) は、その後の試験に用いる当て板に取り替える際に撤去するため、2章で述べた当て板下面へのアクリル樹脂の塗布は行っていない。

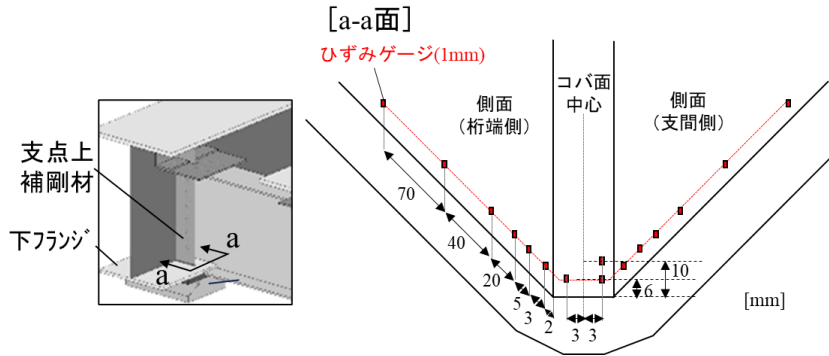
補剛材下端の応力測定位置を図 8(a)に、载荷時 (P=500kN) の応力測定値を当て板施工前後で比較した結果を図 8(b)に示す。当て板施工前の補剛材下端の応力はコバ面で最大であり、当て板施工後はコバ面の応力が5割程度に減少しており、当て板による補強の効果が得られていることが確認できる。

当て板による応力の分担を確認するために、当て板施工後の载荷時の当て板下端の応力を測定した。当て板の応力測定位置を図 9(a)に、応力測定値を図 9(b)に示す。当て板下端の応力は、当て板の幅方向の位置や当て板の内外の面によって差が生じているものの、平均応力は -64N/mm^2 と圧縮となっており、当て板の下面全体で支承から伝わる反力を分担していることがわかる。このことから、当て板を下フランジに押し当てることで当て板下面と下フランジが密着し、当て板が応力を分担できていることが確認できる。

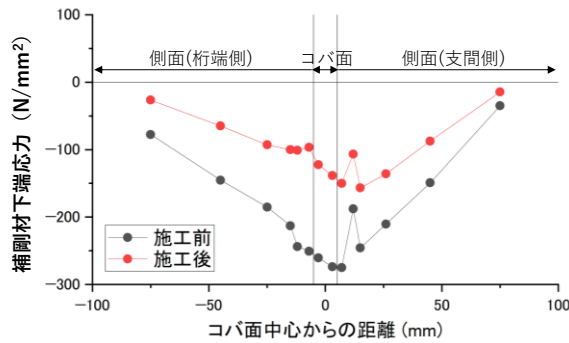
補剛材下端に生じる応力の分布は、支承の隙の状態によって変化することが想定される。そこで、支承の隙の大きさ g (以下、隙量) を変えて応力の低減割合を比較した (case2)。なお、3.3節で後述するように本試験で試行した範囲では、ボルト孔位置のずらし量 d の違いが応力低減効果に及ぼす影響は小さいことがわかっており、ボルト孔位置のずらし量が大きいとボルト孔に、より大きな負荷が生じる恐れがあるため、本検討ではボルト孔位置のずらし量を $d=0.5\text{mm}$ と小さくしている。

支承の隙量と载荷時 (P=500kN) の補剛材下端応力の関係を当て板の有無で比較した結果を図 10 に示す。当て板による応力低減割合は、隙量の大きい方が高くなる傾向がみられる。

以上より、鋼桁の支点上に当て板を押し当てることにより、载荷時の補剛材下端の応力を低減することが可能であり、支承の隙量の大きい方がより高い応力低減効果を得られることがわかった。

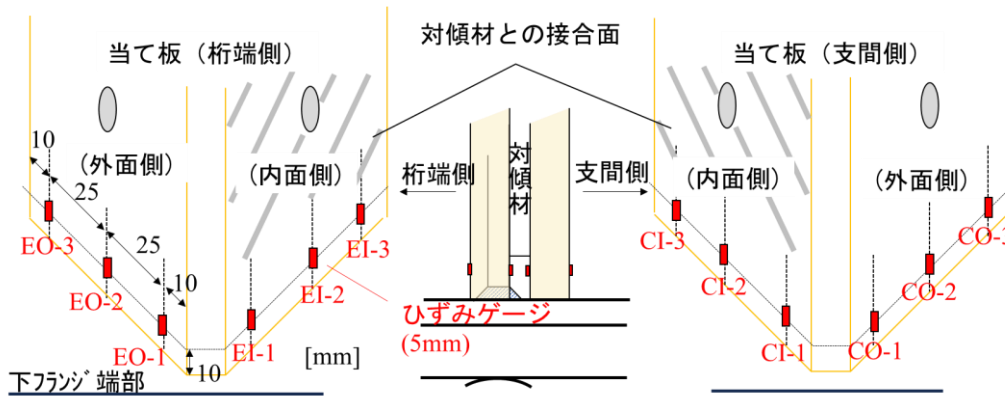


(a)支点上補剛材下端の応力測定位置

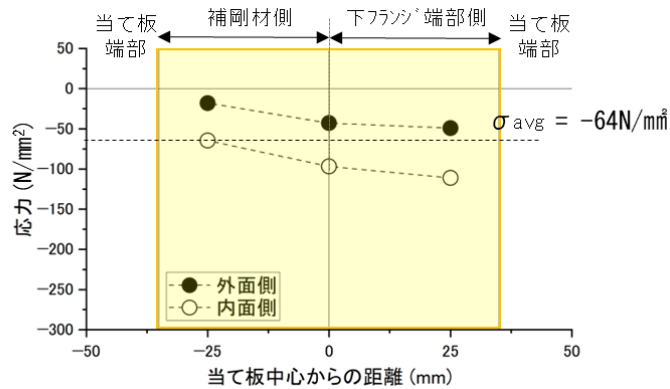


(b)支点上補剛材下端の応力測定値

図8 当て板施工前後の載荷時の支点上補剛材下端応力分布



(a)当て板下端の応力測定位置



(b)当て板 (桁端側) 下端の応力測定値

図9 試験体載荷時の当て板下端応力分布

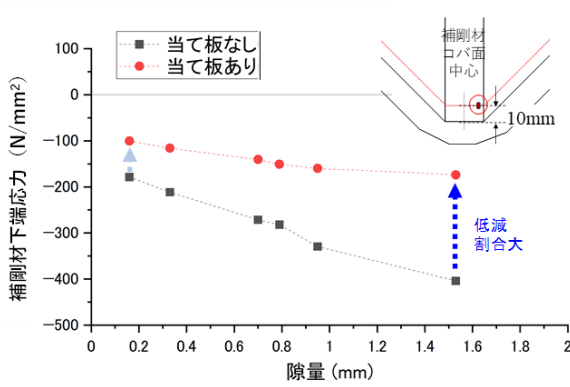


図10 隙量と当て板施工前後の補剛材下端応力

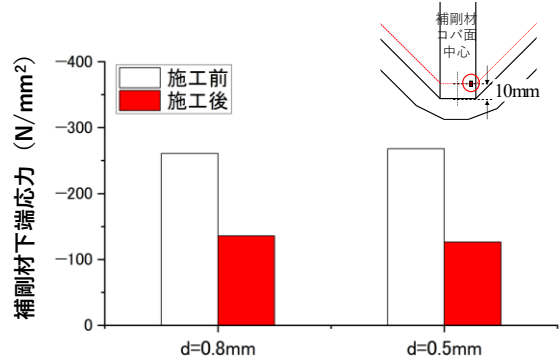


図11 ずらし量 d と施工前後載荷時の補剛材下端応力

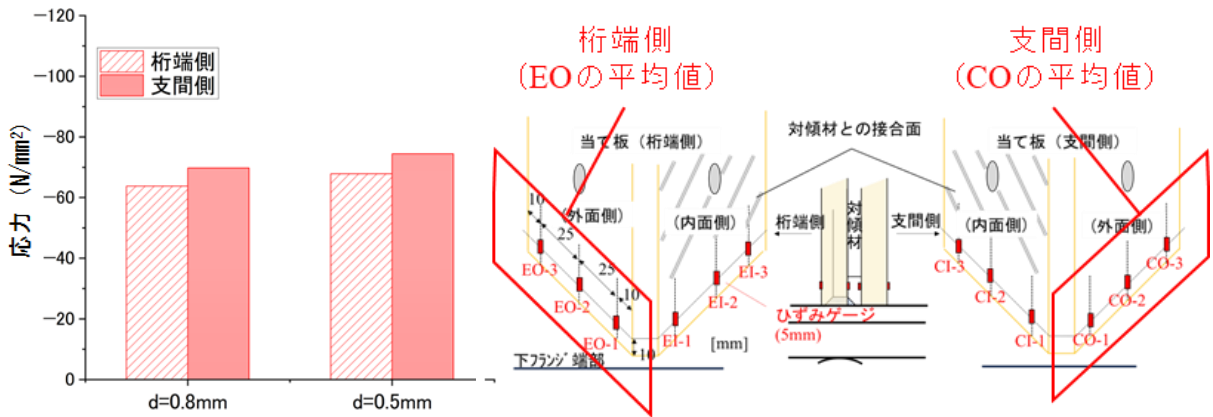


図12 ずらし量 d と載荷時の当て板下端平均応力

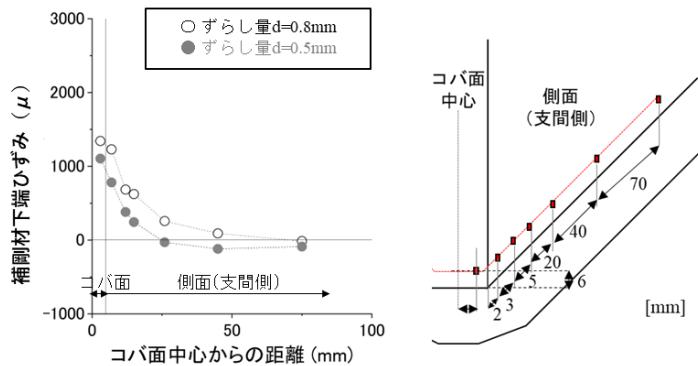


図13 ずらし量 d と施工時の補剛材下端ひずみ分布

3.3 ボルト孔位置ずらし量が応力低減割合に及ぼす影響

本工法では当て板と母材のボルト孔位置のずれを用いて支圧ボルトによる当て板の押し当てを行うため、ボルト孔位置のずらし量の管理が施工において必要となる。そこで、ボルト孔位置のずらし量 d を変えて当て板の施工を行い、応力の低減割合を比較した。試験ケースは、ずらし量 $d=0.8\text{mm}$ (case1) と、これよりずらし量を小さくした $d=0.5\text{mm}$ (case3) である。なお case3 の当て板は、case1 の当て板と同じ条件でずらし量による違いを比較するため、当て板下面へのアクリル樹脂の塗布を行っていない。当て板施工前後の載荷時 ($P=500\text{kN}$) の補剛材下端応力を図 11、当て板下端の平均応力を図 12 に示す。 $d=0.5\text{mm}$ の当て板は $d=0.8\text{mm}$ の場合と比較して、補剛材下端の応力低減割合は変わらなかった。また、当て板の平均応力も両者で大きな差はみられない。

比較した 2 ケースの支圧ボルトから導入される支圧力の違いを確認するため、支圧ボルトを打ち込んだ際に生じる補剛材下端のひずみを確認した。確認した結果を図 13 に示す。 $d=0.8\text{mm}$ の方が、わずかではあ

るが補剛材下端のひずみが大きくなっており、支圧ボルトから導入される支圧力が増加していることがわかる。ずらし量の大きい方が支圧ボルトの打ち込みによって当て板がより強く押し当てられるが、当て板下端の接触位置や範囲といった密着の程度が変わらなかったことで、図 11 のように応力の低減効果に差が生じなかったものと考えられる。

以上より、ボルト孔位置のずらし量 d の違いについては、本試験で比較した範囲では当て板下面と下フランジの密着程度は変わらないため、効果に及ぼす影響は小さく、ずらし量が小さい方がボルト孔への負荷が小さいことから、ずらし量は $d=0.5\text{mm}$ とすることが望ましいといえる。

4. 繰返し荷重に対する当て板効果の持続性検証

実際の運用において当て板の効果が持続的に得られることを確認するため、当て板を施工した試験体に対して列車通過時を模擬した繰返し載荷を行い、当て板施工後の応力低減効果の持続性を検証した。本章では、これらの結果について示す。

4.1 繰返し載荷試験の概要

繰返し載荷の荷重範囲は、上限荷重を列車通過時の最大支点反力相当の 390kN 、下限荷重を 30kN とした。ここで、荷重の算出には、対象鋼橋上を走行する旅客列車の列車荷重(M-10 相当)と衝撃荷重($V=80\text{km/h}$)を考慮した⁷⁾。

4.2 応力低減効果の持続性

当て板施工後の試験体に対して 250 万回の繰返し載荷を行った。当て板は 3 章の case3 の試験で使用したのと同じであり、実際の運用を想定し当て板下面にアクリル樹脂の塗布を行った。繰返し載荷中に行った静的載荷時の補剛材下端の応力を図 14 に示す。ここで、静的載荷の最大荷重は繰返し載荷の上限荷重と同じ 390kN である。載荷回数 50 万回程度において応力増加がみられるが、これは繰返し載荷中にみられた支承沈下を解消するために、支承の調整を行ったことが原因であり、当て板の耐久性に関連するものではない。その後、補剛材下端の応力は概ね一定の応力範囲で推移しており、250 万回の繰返し載荷後も当て板による応力低減効果が持続されたことが確認できた。

本工法では、支圧ボルトの支圧力を用いて当て板を下フランジに押し当てているため、繰返し載荷による支圧ボルトの摩耗の発生や当て板と下フランジの接触面における塑性変形の増大が懸念された。そこで、

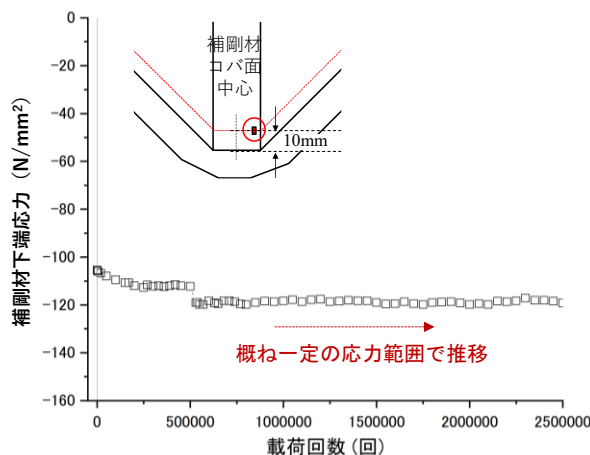


図 14 載荷回数－補剛材下端応力

試験終了後に当て板を撤去し、支圧ボルトおよび当て板を観察し、これらの損傷がないことを確認した。支圧ボルトの摩耗等が生じていた場合は、応力低減効果が徐々に低減していくと考えられるが、図 15 に示したように、補剛材下端の応力が増加するような傾向は確認されなかった。本試験では、250 万回以上の繰返し载荷による補剛材下端の応力の推移については未確認ではあるものの、支圧ボルトの摩耗等が生じていないことから、250 万回以上の繰返し载荷を行った場合でも、応力低減効果が急激に低下することはない、維持されると考えられる。

以上より、当て板と支圧ボルトは繰返し载荷を受ける実橋においても、一定の応力低減効果を保持することが可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、支圧ボルトを用いた当て板の押し当て方法を開発し、その施工性の確認と当て板補強による支点上補剛材下端の応力低減効果の検証を行うため、実物大の試験体を用いて载荷試験を行った。さらに、当て板施工後の試験体に対して繰返し载荷を行い、実際の運用における当て板による効果の持続性を確認した。以下に得られた結論を示す。

- ① 支圧ボルトを用いた方法により、対傾材を利用して当て板を支点上の下フランジに押し当てることが可能であり、支点上の狭隘な作業空間においても、人力により短時間で施工が可能である。
- ② 鋼桁の支点上に当て板を押し当てることにより、载荷時の補剛材下端の応力を低減することが可能となる。なお、支承の隙量の大きい方がより高い応力低減効果を得られる。
- ③ ボルト孔位置のずらし量 d が小さいと当て板に導入される支圧力は減少するが、本試験で比較した範囲では当て板と下フランジの密着程度は変わらないため、効果に及ぼす影響は小さく、ずらし量が小さい方がボルト孔への負荷が小さいことから、ずらし量は $d=0.5\text{mm}$ とすることが望ましいといえる。
- ④ 支圧ボルトを用いた当て板補強は繰返し载荷を受けた場合でも、補剛材下端の応力低減に対して一定の効果を持続することが可能である。

文 献

- 1) 喜多輝, 中山太土, 小林裕介, 萬代能久: 半円切欠き工法を用いた鋼鉄道橋の端補剛材の補修, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集, I -615, pp.1229-1230, 2011
- 2) 川田真也, 塚原高志, 窪田利幸, 松田芳範: JR 東日本における鉄道橋支承部の変状対策, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.1, No.1, pp.445-451, 2022
- 3) 吉田善紀, 小林裕介, 小野秀一, 宇田陽亮, 勝山真規: 支承のあおりを生じた溶接桁端補剛材の疲労き裂発生因子, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, I -535, pp.1069-1070, 2015
- 4) 吉田善紀, 穴見健吾, 長坂康史, 竹瀝敏郎, 小林裕介: 支圧接合用高力ボルトを用いた当て板による支点上補剛材下端の補強, 構造工学論文集, Vol.70A, pp.626-638, 2024
- 5) 穴見健吾, 竹瀝敏郎, 米山徹, 長坂康史, 木ノ本剛: 支圧接合用高力ボルトを用いた鋼床版垂直補剛材上端の当て板補修, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.533-543, 2019
- 6) 田邊琢, 穴見健吾, 竹瀝敏郎, 吉田善紀: 溶接桁端補剛材下部に対する当て板補強法, 鋼構造年次論文報告集, Vol.30, pp.253-258, 2022
- 7) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物), 丸善出版, 2009