

鉄道における補修・補強, 改良事例とバックルプレートの簡易下支え工法

REPAIR, REINFORCEMENT AND IMPROVEMENT FOR RAILWAY STEEL BRIDGES AND SIMPLIFIED SUPPORT METHOD FOR BUCKLE PLATE

小林裕介*, 木村元哉**

Yusuke KOBAYASHI and Motoya KIMURA

ABSTRACT Railway steel bridges have been in service especially longer than the other infrastructures in Japan. This paper presents the example of repair, reinforcement and improvement particularly used for railway steel bridges, and the simplified support method which is recently developed as the repair for buckle plate.

KEYWORDS: 鋼鉄道橋, 補修・補強, バックルプレート

Railway steel bridge, repair and reinforcement, buckle plate

1. まえがき

わが国では新橋～横浜間に初めて鉄道が開通したのち、明治7年に最初の鍊鉄製鉄道橋として武庫川橋りょうが架設され、以降、数多くの鋼鉄道橋が架設されてきた。鋼鉄道橋は、他のインフラ設備と比べて供用年数が長く、100年以上供用しているものも多く、維持管理の重要性は高い。鉄道における維持管理の体系

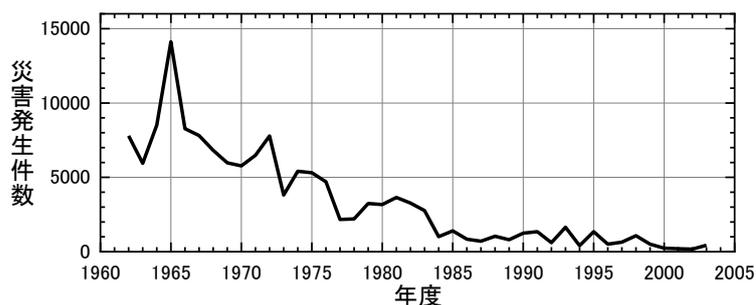


図 1-1 災害の発生件数の減少

としては、1965年以前は何か問題が発生してから対処する事後保全が主流であった。しかし、世界大戦などの戦争中の構造物の荒廃などから事故が多発するようになったため、予防保全を前提とした維持管理に体系を変えることで、災害件数が急激に減少し(図1-1)、事故も減少した。この予防保全の考え方は、定期検査で事前に弱点箇所や変状箇所を抽出し、詳細な検査をしたうえで必要に応じて措置(補修・補強等)を行うというものであり、現在の維持管理においても継承されている。供用年数が100年を超えるような鋼鉄道橋が現存しているのは、今でこそ一般的な考え方である予防保全を、50年以上も前に諸先輩の努力により導入した功績によるものである。実際のところ変状の発生を完全に防止できていないわけではないが、変状が軽微なうちにより簡易な補修・補強で済ませてきたこと、標準設計の橋りょうが多く補強を水平展開しやすかったこと、さらに構造的な弱点箇所については設計へのフィードバックを図ってきたことも、鋼鉄道橋の長寿命化の要因と考えている。

鋼鉄道橋の補修・補強, もしくは改良における要素技術は、道路橋と共通の技術も多いが、鉄道橋の使用環境や構造に応じた変状に対する特有の技術もある。例えば、供用年数が長いために、経年に

*工博 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造 研究室長 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

**工博 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室(鋼構造) 課長 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20)

よる腐食・摩耗・劣化に伴って局部応力が増加することで生じる疲労き裂などは、鉄道橋の方が多い印象がある。また、古い鋼鉄道橋は床版を持たない開床式構造が殆どで、通過列車の輪重が部材に直接作用し、部材連結部に高い二次応力が生じることで疲労き裂が発生しやすい傾向にもあり、鉄道橋特有の補修・補強を行ってきている。本稿の前半では、特に疲労き裂を対象として、これらの鉄道橋特有の補修・補強、もしくは改良の事例について紹介する。

本稿の後半では、近年開発したバックルプレートの簡易下支え工法およびバックルプレート上面の補修工法について紹介する。詳細は後述するが、鉄道橋のバックルプレートは上面を防水工で覆ったうえでバラストを支えており、防水工が破損すると雨水等に曝されプレートが腐食減肉し、それに伴う局部応力によりき裂が発生する。この変状は以前から確認されており補修工法もあったが、近年においてその発生数が増加したこと、少子高齢化等に伴う維持管理負担が増加したことで、より簡易に補修・補強することを目的に新たに工法を開発した。本稿では、この工法についてその開発概要も含めて紹介する。

2. 疲労き裂に対する補修・補強, 改良事例

2.1 プレートガーダー, I 梁桁の下フランジ首部の疲労き裂

鋼鉄道橋のうちプレートガーダーやI 梁桁では、支点部において下フランジ首部に疲労き裂が発生する(写真 2-1)²⁾。主たる原因は、経年等に伴う沓座の損傷で下フランジが片当たりの状態となり、列車通過時の荷重で下フランジが首を振り(以降、支点部のあおり)、首部に応力集中を生じることによる(図 2-1)²⁾⁶⁾。一部の橋りょうでは、経年に伴いソールプレート上面が摩耗して凹みを生じ、そこに下フランジが落ち込むことによって生じた疲労き裂もある^{2),3)}。この疲労き裂は、形鋼を組み合わせたリベット桁に生じる特徴がある。これは、アングル材を用いた端補剛材下端が経年で腐食や摩耗し、下フランジとの間にギャップを生じると、支点部のあおりが助長されることによる⁶⁾。現在でも供用年数の長いリベット桁が多数存在することから、この疲労き裂の発生数が多い。

フランジもアングル材で構成されるプレートガーダーにおいては、疲労き裂に対する補修はフランジ部材を交換するのみとなる(写真 2-2)。ただし、根本原因である支点部のあおりを解消するため、



写真 2-1 下フランジ首部のき裂

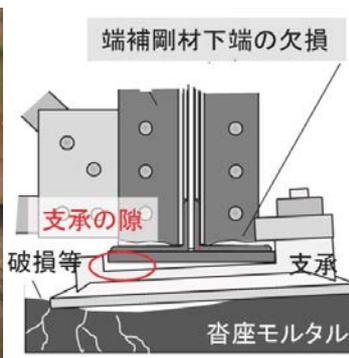


図 2-1 支点部のあおり

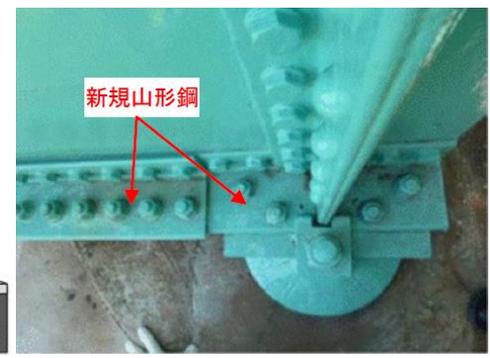


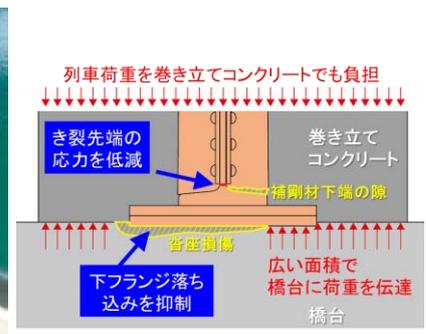
写真 2-2 下フランジの交換



写真 2-3 I 梁桁の当板



図 2-2 I 梁桁の桁端コンクリート巻き立て⁸⁾



沓座損傷の補修で支点部をジャッキアップし沓座モルタルを打ち直す必要があり、幾分、補修には手間を要す。

I ビーム桁に対しては、桁が数 m と短く、沓座損傷のためのジャッキアップも必要となることから、疲労き裂の発生した桁を補修せずに交換することも多い。疲労き裂の進展長さが短い場合などは当板により補修する場合もあるが（写真 2-3）、当板は腹板と下フランジに沿った形状で曲げ加工する必要があるため、一般的な当板と比べると難易度は高い。近年では、補修をより簡易にするため、支点部をジャッキアップせずにアクリル樹脂を注入することで、支点部のあおりを解消した事例もある⁷⁾。

夜間の施工間合いが極端に短く、重機も侵入できない環境にあった I ビーム桁で、図 2-2 に示すように支点部をコンクリートで巻き立てて補修した事例もある⁸⁾。コンクリートを介して荷重を橋台天端に伝達することで、疲労き裂の先端に応力がほぼ生じない状態としている（図 2-2）^{9),10)}。なお、単に桁端部をコンクリートで巻き立てるだけでは、列車通過や温度変化の影響により、巻き立てコンクリートと鋼桁の界面がずれたり、橋台との打ち継ぎ面が破壊したりする恐れがある。そこで、鋼桁にはスタッドによるずれ止めを配置し、橋台には鉛直鉄筋を設けて、巻き立てコンクリートと鋼桁・橋台は一体化している。

2.2 開床式下路構造における縦桁・横桁連結部の疲労き裂

床版を有していない開床式構造は、死荷重を低減できる一方で、列車の輪荷重が軌道を支える部材に直接作用し疲労き裂が発生しやすい。特に下路形式の構造における縦桁は部材支間が短く剛性も低いことから、輪荷重による変動応力が大きく繰り返し数も多い。縦桁では、いくつかの部位で疲労き裂が発生することが報告されているが（例えば¹¹⁾）、ここでは縦桁と横桁との連結部に着目して事例を紹介する。

縦桁と横桁の連結部で生じる疲労き裂も幾つかの種類に分類できるが、縦桁に輪荷重が作用した際に横桁との連結部に高い二次応力を生じることが共通した原因である。これは、前述のとおり縦桁と横桁の剛性が低いことによるものであるが、以前の鋼鉄道橋では縦桁端部でせん断力のみを伝達する

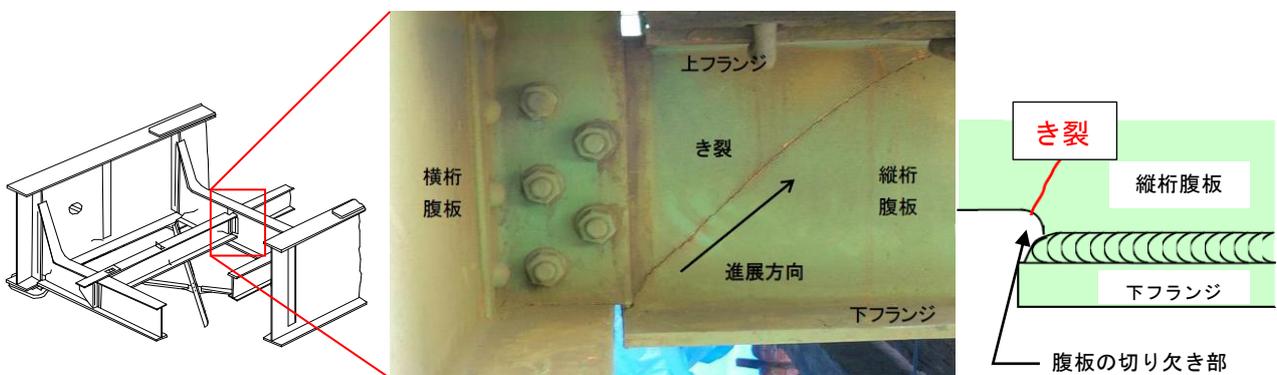


図 2-3 縦桁・横桁連結部の疲労き裂

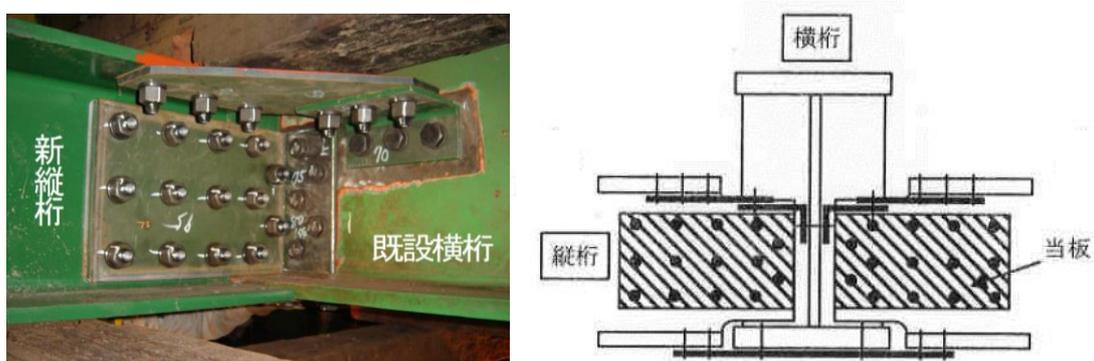


図 2-4 フランジ連結による補修・補強¹²⁾

設計思想としており、腹板のみで横桁と連結されていたことが根本の要因となっている。図 2-3 に、縦桁が完全に破断するまで疲労き裂が進展した事例を示す¹²⁾。この例では、腹板の下端が切り欠かれており、当該部位に応力集中を生じて疲労き裂が発生し、疲労き裂が斜め上方向に進展した(図 2-3)。対策としては、疲労き裂が発生した縦桁は新規部材に交換したうえで、図 2-4 に示すように隣り合う縦桁同士の下フランジを連結しモーメントを伝達できる構造に改良している。なお、鋼鉄道橋の補修マニュアル¹³⁾にも連結部においてフランジを連続させる補強方法が示されている。

現在の設計標準¹⁴⁾では、モーメントを伝達できる構造として図 2-5 に示すディテールを採用するよう規定しているが、この構造に至る過渡期には、縦桁の下フランジを横桁腹板に貫通させる構造(図 2-6)を採用していた時代もあった。この場合、図 2-6 に示すような部位において疲労き裂が発生することが報告されている^{15)・17)}。これは横桁が面外方向に変形することが一つの要因であり、これに対し、ブラケット部材で補強するとともに、横桁腹板のスリット部は当板で補強する対策が取られている(写真 2-4)¹⁷⁾。

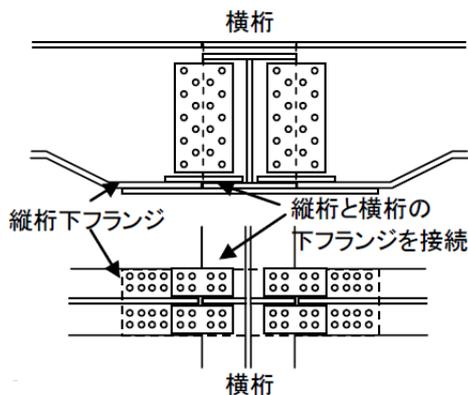


図 2-5 新設設計での縦桁・横桁連結部の構造

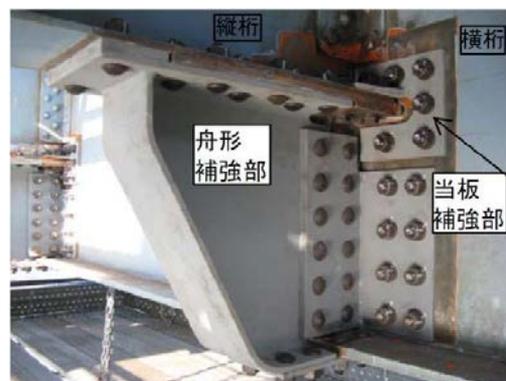


写真 2-4 連結部の補強¹⁷⁾

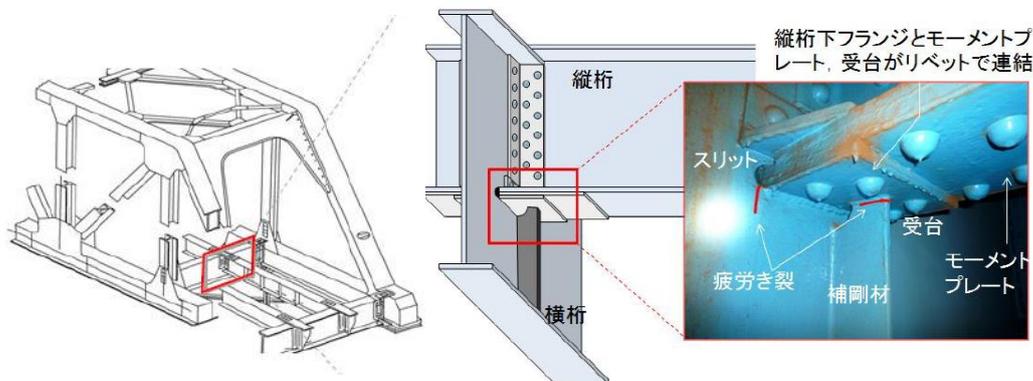


図 2-6 縦桁のフランジが横桁腹板を貫通した構造における疲労き裂

3. バックルプレート桁のき裂対策

バックルプレート(以下、BP)桁は主に 1950 年代以前に架設された支間 10~30m 程度の橋梁で、図 3-1 のように有道床鋼橋に用いられた構造である。BP 桁は騒音等への優位性から、当時すでに市街地であった東京、大阪、神戸等の中心部に限定的に架設された。そのため、今日においても BP 桁の架設環境は列車運転密度が多い線区かつ交通量の多い道路上を交差するような市街地が多くを占めており、架け替えが困難であるという課題を抱えている。

BP 桁では写真 3-1 に示すように BP の取り付け部に沿ったき裂が発生することがある。BP は道床バラストを介して列車荷重を支える部材であるため、この種のき裂は看過できない変状といえる。しかし、桁の架け替えが容易でないことから、このき裂に対して適切な補修・補強を施すことにより、桁の長寿命化を図ることが求められている。

3.1 バックルプレート桁の損傷

BP 桁は図 3-1 の断面図に示すように、BP の上部が防水層（アスファルトシート等）や保護工（防水層を道床から保護するためのコンクリート）、道床で覆われていることから、BP の上面からの調査が困難なため、これでき裂の原因の究明や合理的な対策の確立に至っていない。また、同じ理由でき裂の進展が BP の耐荷性状に与える影響も未解明であった。

既往の研究により、BP のき裂の原因として取付け部の局所的な面外曲げ応力による疲労であることが指摘された¹⁸⁾。筆者らはさらに原因究明を進め、疲労き裂に至る前提条件として、防水機能の喪失による BP 上面の腐食の影響が大きいことを実橋調査に基づき明らかにした¹⁹⁾。また、実物大試験体を用いた載荷試験および FEM 解析に基づき、道床バラストの荷重分散効果により、BP の分担荷重が設計値に比べて小さいこと¹⁹⁾や、き裂が BP の取付け部 4 辺のうち 2 辺全長まで進展しても、設計活荷重に対して BP が耐荷性を満足することを示した²⁰⁾。

3.2 これまでの対策工法

これまでのき裂の対策として、BP の下面を新たな鋼床版で覆い、BP との隙間にモルタルを充填する工法¹³⁾（以下、従来下支え）や、図 3-2 に示すとおり道床を撤去した後、既設の主桁や横桁に支点を設け、新たな軌道桁を架設する工法²¹⁾（以下、桁式工法）がある。しかし、従来下支えは施工性や経済性、鋼床版上面の腐食等の視認性に課題がある。桁式工法の採用にあたっては、一つの桁に多数取り付けられている BP のうち、どの程度の BP 枚数が損傷しているかがポイントとなる。つまり桁式工法はき裂が多くの BP で発生した桁では抜本対策として有効であるが²¹⁾、き裂が発生した BP が少ない桁では BP 単位で補修する工法と比較して非効率となる。

そこで、一つの桁あたりの BP 損傷数が比較的少ないケースを対象として、従来下支えに代わる新しい対策として、簡易下支え、および上面補修の 2 工法を考案した。

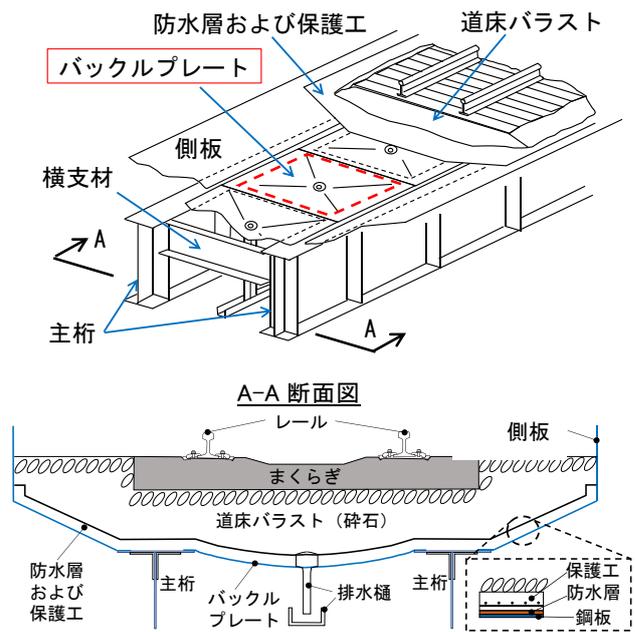
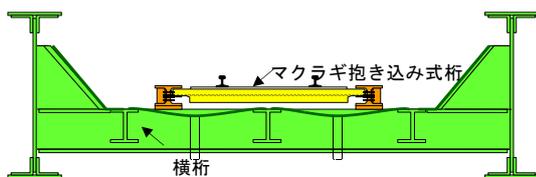


図 3-1 BP 桁の構造概要(上路形式の例)



写真 3-1 取付け部に沿うき裂(上路形式の例)



(a) 断面略図



(b) 設置後の状況

図 3-2 桁式工法の例²¹⁾

3.3 新たな対策工法の開発

(1) 簡易下支え工法

簡易下支え工法は、図 3-3 に示すように、はしご状に組んだ H 形鋼を主桁等の骨組部材に取付け、その上部にガイド材（溝形鋼）を設け、BP との間で間詰めを行うもので、従来下支えより簡易な補修方法である。簡易下支えは、従来下支えよりも施工性・経済性に優れること、および BP のき裂を下面から目視で確認できること等の利点がある。

載荷試験および FEM 解析の結果、腐食疲労により取付け部の 4 辺全てが破断し、かつ板厚が製作時の 50% (3.2mm) に減肉した BP においても、設計活荷重に対して BP および簡易下支えの構成材料（H 形鋼、CA モルタル）が耐荷性および耐疲労性を満足することがわかった^{20),22)}。

さらに、図 3-3(b)に示したように、下路形式の実橋において、き裂が生じた BP に簡易下支えを適用したところ、施工性に問題はなく、また、従来下支えと比較して作業量も約 60%となった。

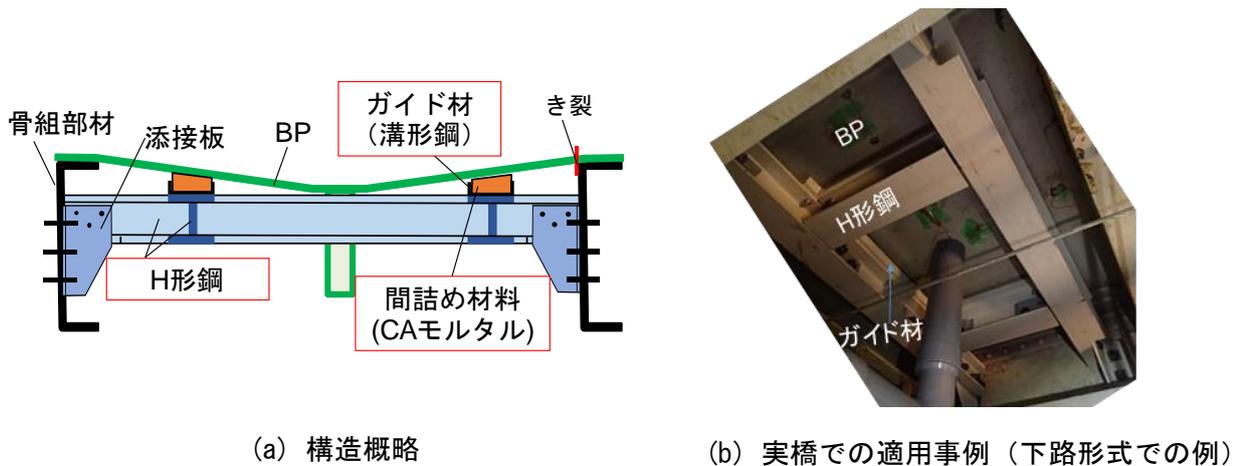


図 3-3 簡易下支えの構造概略と実橋適用事例

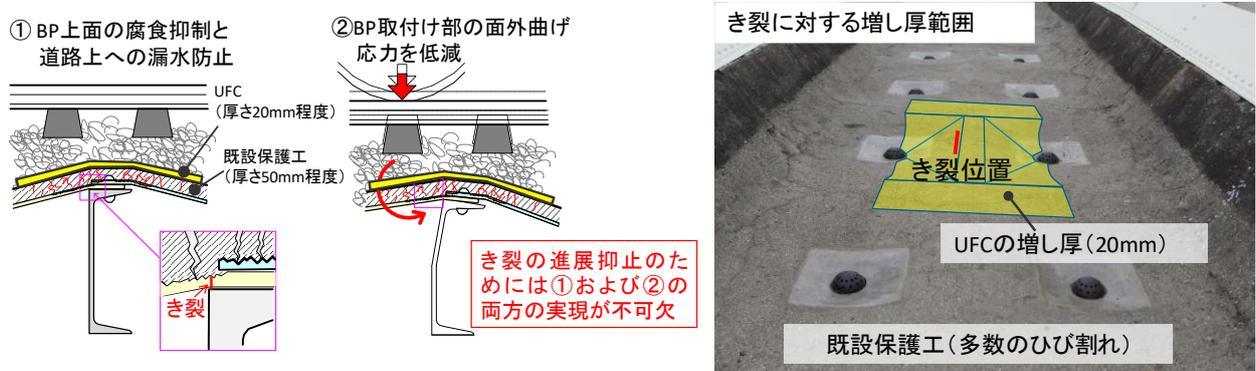


図 3-4 上面補修のイメージと期待する効果

(2) 上面補修

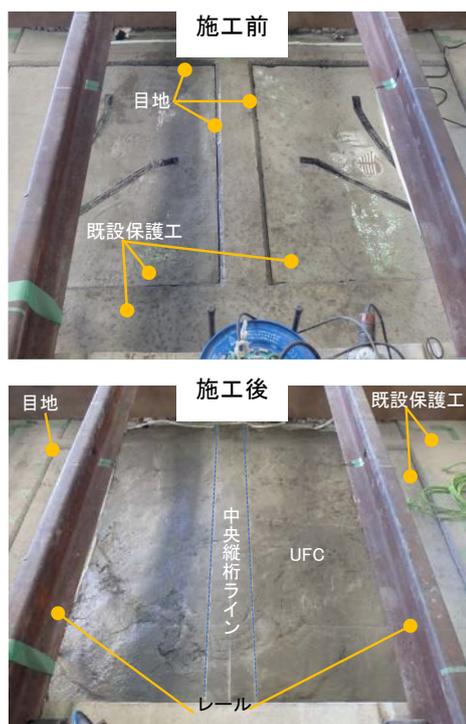
(1)では耐荷性・耐疲労性について BP 取付け部の 4 辺全てが破断しても性能を満足することを述べたが、防水層が機能しない場合、BP 上面の腐食が進行することで BP の欠損なども考えられ、維持管理上は好ましい状態ではない。そこで、BP 上面の腐食対策として上面補修を検討した。

上面補修は、図 3-4 に示すように、BP の取付け部を覆う形で既設保護工上を超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC : Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete）により増し厚施工する補修方法である。

これにより、BP 取付け部上面の腐食が抑制され、さらに取付け部の局所的な面外曲げ応力が低減することを期待できる。なお、UFC の厚さは施工性や所定の道床厚確保のため 20mm と設定した。

なお、図 3-1 に示すとおり、BP は中央部が低い凹型形状であるため、中央の排水孔に向けて十分な排水勾配が取られている。そこで、BP 取付け部を覆う範囲のみに UFC を打設することで防食効果が期待できる。

本工法については、列車の間合いで行う実施工を想定した場合、施工時間の制約や UFC の若材齢時期の耐荷性等が懸念された。そこで、実物大試験体を用いた施工試験と載荷試験、ならびに FEM 解析を行った。施工試験前後の状況を写真 3-2 に示す。その結果、施工性は良好で、UFC が若材齢時期も含めて長期的な遮水機能と耐荷性を発揮することを検証し、さらに BP の取付け部の面外曲げ応力低減にも寄与する結果を得た。



※バラストとまくらぎを一時撤去して施工
写真 3-2 上面補修の施工前後の状況

3.4 今後のバックルプレート桁の補修・補強

本章では、BP 桁き裂に対する簡易下支え工法および上面補修について述べた。

同一桁で変状が生じたパネルの割合が多い場合などは、抜本対策として軌道桁工法が挙げられる。一方、変状パネル割合が少ない場合は個々のパネルに対して簡易下支え工法が有効である。

さらに、き裂発生の要因である BP 上面の腐食進行を抑制する対策として上面補修が有効と考える。以上のような対策工法を使い分け、あるいは組み合わせることで、取替え困難な BP 桁の長寿命化を目指す。

4. おわりに

本稿では、鋼鉄道橋に特有の補修・補強もしくは改良の事例を紹介するとともに、近年開発したバックルプレート桁のき裂および腐食への簡易下支え工法と上面補修工について開発経緯も含めて示した。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編 鋼・合成構造物），丸善出版，2007.
- 2) 西田寿生，金裕哲：鉄路上路プレートガーダー下フラ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 回年次学術講演会概要集，I-518，pp. 1035-1036，2011.
- 3) 西田寿生，木村元哉，金裕哲：上路プレートガーダー下フランジ山形鋼疲労き裂の発生原因推定，土木学会第 67 回年次学術講演会概要集，VI-069，pp. 137-138，2012.
- 4) 池頭賢，丹羽雄一郎，松本健太郎，判治剛，舘石和雄：鉄道橋 I ビーム桁支点首部に発生した疲労き裂対策の効果検証，鋼構造年次論文報告集，Vol. 25，pp. 661-666，2017.
- 5) 判治剛，舘石和雄，清水優，岩井将樹，池頭賢，丹羽雄一郎：鉄道橋 I ビーム桁支点部の疲労き

- 裂とその補修対策による延命効果, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 2, pp. 290-305, 2018.
- 6) 吉田善紀, 小林裕介: 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, 鉄道総研報告, Vol. 34, No. 6, pp. 41-46, 2020.
 - 7) 丸田健博, 丹羽雄一郎, 池頭賢, 中口聡志: 冬季における簡易沓座補修工法の適用性, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-275, pp. 549-550, 2018. 9.
 - 8) 笹田航平: 若手技術者のための土木講座⑮, 短スパン鋼鉄道橋のインテグラル化 (支承部のき裂補修事例), 日本鉄道施設協会誌, Vol. 58, pp. 75-76, 2020. 3.
 - 9) 小林裕介, 福本守, 山下健二: 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, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 10, pp. 17-22, 2015. 10.
 - 10) 濱上洋平, 小林裕介, 福本守, 青木千里, 佐名川太亮, 西岡英俊: 既設 I ビームに対するコンクリート巻き立て工法の接合構造, 鉄道総研報告, Vol. 30, No. 12, pp. 35-40, 2016. 12.
 - 11) 池頭賢, 丹羽雄一郎, 松本健太郎: 鋼鉄道橋における垂直補剛材上端の疲労損傷対策, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, 2015. 11.
 - 12) 鈴木延彰, 工藤伸司: 中央線第二平等側橋梁縦桁損傷とその対策, SED, No. 25, pp. 2-9, 2005. 11.
 - 13) 鉄道総合技術研究所: 鋼構造物補修・補強・改造の手引き, 1992.
 - 14) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (鋼・合成構造物), 丸善出版, 2009.
 - 15) 高橋和也, 内藤繁, 関雅樹, 市川篤司, 三木千壽: 鋼鉄道トラス橋縦桁横桁連結部の疲労き裂の原因解明, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 235-247, 2008. 4.
 - 16) 高橋和也, 内藤繁, 関雅樹, 市川篤司, 三木千壽: 鋼鉄道トラス橋縦桁横桁連結部の疲労特性とその改善方法, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 394-407, 2008. 4.
 - 17) 勝山真規, 関口琢己, 谷利晃, 小林裕介: 開床式下路トラスにおける縦桁横桁連結部の疲労き裂対策, 構造工学論文集, Vol. 58A, pp. 622-634, 2012. 3.
 - 18) 下山貴史, 成嶋健一, 小芝明弘: バックルプレート桁の変状と原因究明について, 土木学会第 55 回年次学術講演会, IV-297, pp. 594-595, 2000. 9.
 - 19) 福本守, 吉田尚弘, 池頭賢, 木村元哉: バックルプレート桁の変状原因と荷重分担に関する検討. 日本鉄道施設協会誌. Vol. 54. No. 11. pp. 52-54. 2016. 11.
 - 20) 福本守, 木村元哉, 小林裕介, 小野秀一, 橋本国太郎: き裂を有するバックルプレートの耐荷性状と簡易な補修方法の開発. 構造工学論文集. Vol. 65A. pp. 492-505. 2019. 3.
 - 21) 小池健司, 馬場正光: バックルプレート桁改良工事の施工について. SED. No. 22. pp. 2-7. 2004. 5.
 - 22) 福本守, 濱上洋平, 橋本雅行, 橋本国太郎: 簡易な下支えで補修した鋼橋のバックルプレート部における耐疲労性の検証. 鉄道工学シンポジウム論文集. No. 23. pp. 25-32. 2019. 4.