

鋼橋き裂補修における対応

伊藤 丈博¹

¹中部地方整備局 静岡国道事務所 管理第二課 (〒420-0054 静岡県静岡市葵区南安倍2丁目8-1)

静岡国道事務所（以下、静岡）では国土交通省インフラ長寿命化計画に基づき、5年サイクルで、点検・診断・補修対応を実施してきた。鋼橋においては、点検時に溶接止端部で疲労き裂を確認しており、診断の結果、補修対応を実施してきた。静岡でのき裂補修設計では、当て板等による対策が主であったが、今回取り上げる静岡維持管内塗装工事は発見された軽微な疲労き裂に対し事後保全として、簡易な補修工法を実施した。また、簡易な補修工法を採用し予算の合理化を図ることで、疲労き裂の発生が懸念される箇所への予防保全も併せて実施した。本工事を踏まえて、今後の点検・診断・補修に要求される一連のプロセスを提案する。

キーワード き裂補修、ニードルピーニング、エコクリーンクラックバスター、
予防保全、循環式ショットピーニング工法

1. 背景

高度経済成長期に集中的に整備されてきた橋梁等の老朽化が加速的に進行している。国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）¹⁾では「予防保全」への本格転換が謳われ、「持続可能なインフラメンテナンス」の実現を目標としている。インフラメンテナンスの現状として、昨年度の報告²⁾では、早期措置段階（判定Ⅲ）の橋梁数は年々減少傾向にあるが、対策区分判定 C1 の主要部材数は増加していることが報告された。今後これらの部材が C2 判定に移行していくことが懸念され、従来から実施されている事後保全だけでなく、予防保全を並行して実施していくことが、喫緊の課題と言える。

そこで、本稿では静岡管内において、事後保全と並行し予防保全を実施した国道1号静岡バイパス興津高架内埠頭第3橋梁の事例を紹介する。本事例は塗装塗り替え工事時に発見された疲労き裂に対して事後保全を実施し、疲労き裂が確認されていない箇所に対しても予防保全として疲労強度向上手法を施した例である。また、施工前後で健全性を確認することを目的に疲労照査を実施した。本稿では、本工事を踏まえ、今後の予防保全に求められる点検から補修までの一連のプロセスについて考察し、提案する。

2. 静岡における橋梁保全の状況と課題

過年度、静岡で実施された補修設計は主に再溶接や当て板による事後保全が主であった。こういった事後保全

により十分補修効果があるものの、予防保全を実施していかなければ非補修箇所にき裂の発生の余地を残してしまう。実際に、本稿で取り上げる興津高架内埠頭第3橋梁では2017年に当て板が施されたが、その後、2023年の塗装塗り替え時に新たな疲労き裂が発見された。

また、再溶接や当て板は優先度の高い箇所に対して用いられることに加えて、補修設計の検討や工事発注などにより施工までに時間を有する可能性があり、その間にき裂が進展することも考えられる。

2 巡目点検を終え見えてきた課題を踏まえ、より簡易な事後保全を実施することが可能となれば、予防保全を実施する予算の捻出が可能となり、結果として維持管理にかかる Life Cycle Cost（以下、LCC）を低減することが可能となる。（図-1）

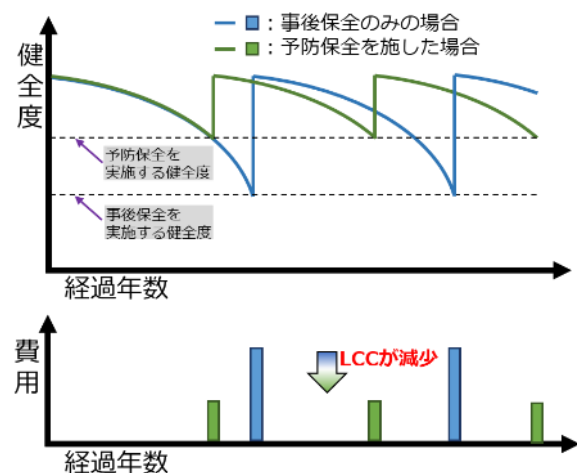


図-1 予防保全の有無によるLCCの違い

3. 対象橋梁工事概要

(1) 橋梁概要

本稿で対象とする興津高架内埠頭第3橋梁の外観を図-2、橋梁諸元を表-1に示す。対象橋梁は1974年に建設され約50年が経過、地域高規格道路である静岡東西道路、静岡バイパスの一部を担っている。交通渋滞の緩和、交通安全の確保、静岡都市圏の発展の支援等を目的に計画された幹線道路であり、コンテナ交通の多い重交通路線であることから、疲労損傷が懸念される。



図-2 興津高架内埠頭第3橋梁外観

(2) 工事履歴

対象橋梁の主桁・横桁に関する点検・補修工事履歴を表-2に示す。2008年に実施された全部材を対象とした定期点検において、主桁、横桁において腐食、防食機能の劣化が確認され、部材の対策判定区分はB（状況に応じて補修する必要がある損傷）であり、2010年の定期点検時においても同じ判定であった。その後、2014年の橋梁の定期点検が法令化されたうえで実施された定期点検では対策区分S1（詳細調査の必要がある）の塗膜割れが発見された。MT（磁粉探傷試験）により疲労き裂が確認され、2017年に損傷部は当て板により補修された。2019年に2巡目となる法令点検では主桁・横桁の溶接継手部に疲労き裂は確認されなかったが、腐食損傷部や防食機能の低下が見られた。

表-1 橋梁諸元

項目	諸元
竣工年	1974年
路線名	一般国道1号 現道 (静岡東西道路)
道路管理者	中部地方整備局 静岡国道事務所 静岡国道維持出張所
橋梁区分 種別	本線・高架橋
上部構造 適用基準	昭和47年道路橋示方書
橋長	46m
幅員	18.4m
橋梁形式	単純合成鉄桁橋
下部構造	T型橋脚柱円型(RC)

表-2 主桁・横桁の
点検・補修履歴

年	点検 補修履歴	判定
2008	定期点検	主桁・横桁に対策区分Bの腐食、防食機能の劣化を確認
2010	定期点検	主桁・横桁に対策区分Bの腐食、防食機能の劣化を確認
2014	定期点検	主桁・横桁に疲労による塗膜割れが見つかる
2017	補修工事	き裂補修工事として当て板補強が実施された
2019	定期点検	主桁・横桁に損傷は認められなかった
2023	補修工事	塗装塗り替え工事時に疲労き裂と疑われる塗膜割れが発見される

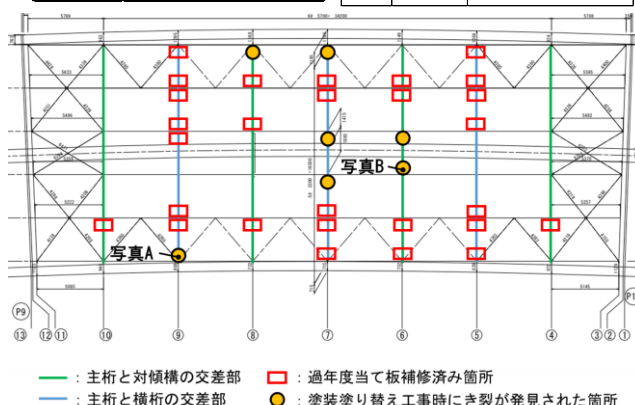


図-3(a) 新たに発見された損傷箇所

(3) 工事概要

2019年の法令点検結果に基づき、防食機能の改善を目的に2023年に塗装塗り替え工事が発注された。当該工事中に疲労き裂が疑われる塗膜割れが確認されたため、ブラストによる塗膜除去後にMTによるき裂の調査が実施され、疲労き裂を確認した。

図-3(a)に示すように、塗装塗り替え工事中に新たに7箇所でき裂が発見された。発見された溶接継手部の詳細を図-3(b)、(c)に示す。7箇所のうち4箇所は図-3(b)に示す上フランジと横桁取付部の垂直補剛材溶接継手部から、残り3箇所は図-3(c)に示す上フランジと対傾構取付部の垂直補剛材溶接継手部から発見された。当該溶接継手部は桁や床板とのたわみ差などに起因し、生じた応力により疲労き裂が発生しやすい箇所である³⁾。こうした溶接継手部の疲労特性を考慮すると、き裂損傷部に対する事後保全だけでなく、き裂の発生が想定される箇所への予防保全が求められることから、本工事では、以下の対策方法を施工した。

- 発見されたき裂に対しては事後保全として疲労き裂進展の停留を目的とし、エコクリーンクラック



図-3(b) 主桁横桁交差部 (A)

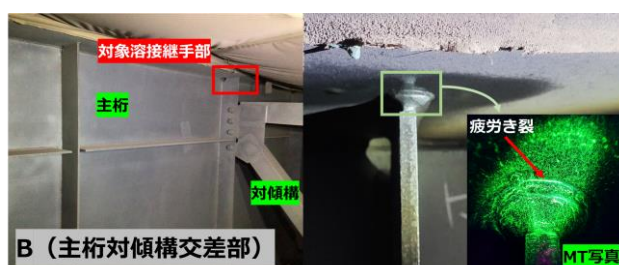


図-3(c) 主桁対傾構交差部 (B)



図-4 エコクリーンクラックバスター装置図

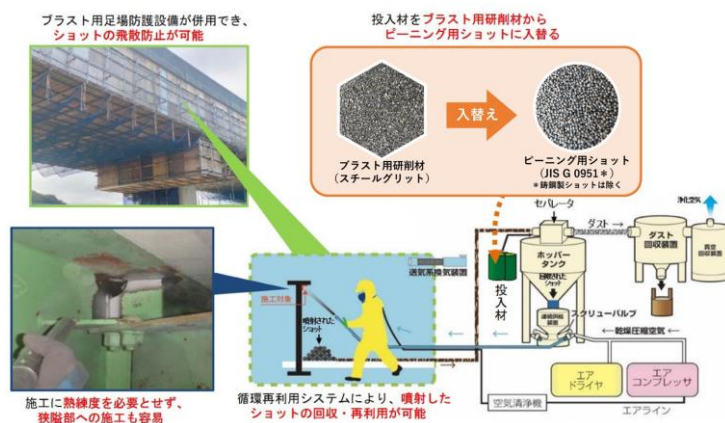


図-5 循環式ショットピーニング処理機構

バスター（以下、クラックバスター、NETIS：CB-220007-A、図-4）を実施した。

- 過年度当て板施工し、同様の未補修箇所から疲労き裂が発生しているため、これ以上疲労損傷箇所を増やさないための予防保全として循環式ショットピーニング工法（以下、ショットピーニング、NETIS：CB-180024-A、図-5）を行った。

4. き裂損傷部に対する事後保全

(1) 疲労き裂発生メカニズム

溶接継手部は、溶接時、溶接金属の急冷による熱収縮に起因し、溶接止端部に高い引張残留応力が導入されており（図-6）、引張残留応力は疲労強度を低下させる一つのパラメータとなっている。加えて、対象とする溶接継手部は急激な断面変化に起因する構造的な応力集中が溶接止端部に生じており（図-7）、この点においても疲労き裂が発生しやすい箇所となっている。こうした箇所に交通荷重に起因する繰り返し荷重が作用することにより疲労き裂は発生し、進展する。

(2) 本工事で使用する工法

発生した疲労き裂に対する補修工法の比較を次ページの表-3に示す。従来技術として、軽微なき裂に対してグラインダーで切削する工法や疲労き裂箇所の応力をバイパスするように高力ボルトで当て板を施工する工法がある。前者は施工者の技量によって品質が左右され、狭隘部への施工が難しいことに加え、箇所あたりの単価が比較的高い。また、後者の当て板の施工では製作費、施工スピードから箇所あたりの単価が高くなる。

そこで、発生した疲労き裂の近傍を打撃し、積極的な塑性流動を起こすことで溶接止端部に圧縮残留応力を付与し、前項で挙げた疲労き裂発生要因となる引張残留応力を改善することを目的としたニードルピーニングの

一種であるクラックバスターを使用した。

当該工法は、ピーニングヘッドとピーニングヘッドへの圧縮空気の供給量を管理する制御ボックスにより構成されている。これにより、打撃能力が制御可能となり、作業者の技量によらず安定したピーニング施工が可能となる。また、長さ約60mm、先端曲率半径1.5mmの狭隘部用のニードルピンを使用することでスカラップ等の狭隘部への施工も可能となる。さらに、母材にまで進展していない疲労き裂に対して施工することにより、疲労強度を疲労き裂発生に至った期間と同等以上の期間、延命することが可能である⁴⁾。

以上より、本工事で対象とする疲労き裂は母材にまで進展していないき裂範囲であること、簡易に施工が可能であること、単価の面で他工法と比較し優位であることから当該工法を選定している。

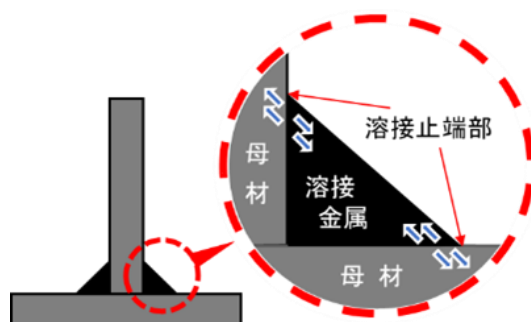


図-6 溶接止端部に導入されている引張残留応力

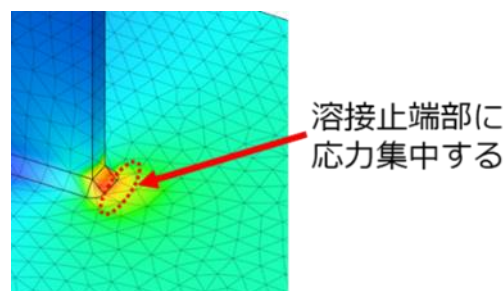


図-7 溶接止端部に生じる応力集中

表-3 事後保全工法の比較

	従来技術		ニードルピーニング	
	グラインダー仕上げによる 切削補修工	当て板工法	超音波ピーニング処理(UIT)工法	エコクリーンクラックバスター
工法概要	溶接止端部を切削し、微細な溶接キズを除去するとともに、形状を滑らかにして応力集中を低減させ疲労強度の改善を図る処理方法。	疲労き裂箇所の応力をバイパスするような位置に当て板を高力ボルトを用いて設置する。	溶接継手の溶接止端部に超音波ピーニング処理(UIT)を施し、溶接構造物の疲労強度を向上させる工法。	ポータブル型の空気圧式ニードルピーニング装置を使用して、溶接止端部で発見された微細なき裂を打撃することにより閉口する。
施工性	削り深さ2mmとし、2mm切削してもき裂が残存する場合、追加切削を実施。追加切削に関しては切削方向や最大削り深さなどの要領を事前に検討することが求められる。スカラーップ部などの狭陰部に適用することは困難。	当て板施工し、ボルト締めが可能な十分なスペースが必要。	先端に曲率を持ったピンを超音波振動により加振し対象箇所を打撃する。施工量が少ない工事や狭陰で作業に制限を受ける作業環境および湿気対策等追加対策が必要な施工条件下においては経済性、工程短縮に効果が期待できない場合がある。	施工対象箇所に対し一定の打撃力が伝わる仕組みになっており、施工面に対し垂直に押し当てる必要がなく狭陰部の施工も可能。先端の打撃部から作業者が保持する外側本体に伝わる振動を抑制する緩衝機構を装備しており、振動障害に対するリスクが低い。
	△	△	○	◎
歩掛	2～8箇所/日	3.3箇所/日	NETIS掲載期間終了技術	23.9箇所/日
(NETIS参照)	○	△		◎
単価	24,089円/箇所	105,877円/箇所		7,509円/箇所
(NETIS参照)	○	△		◎

(3) 施工状況

図-8に施工状況を示す。事前にMTによりき裂部位や範囲の特定を実施した。加えて、き裂の存在箇所が適切に処理されていることを確認するため、施工対象部分をペン型の特殊蛍光ペンにより着色した上で打撃処理を行った。打撃は止端部のき裂上（き裂位置から2mm以内）を打撃し、施工後は、UV-LEDブラックライトを使用して施工残しが無いことを確認した。施工残しがある場合は、再度施工を実施した⁹⁾。き裂閉口後は浸透探傷試験を実施し、き裂が閉口されていることを確認した。



図-8 クラックバスター施工状況

5. き裂の発生が想定される箇所への予防保全

(1) 本工事で使用する工法

溶接継手部に発生する疲労き裂の予防保全工法には、溶接部周辺に導入された引張残留応力（図-6）を緩和し圧縮残留応力を導入するものと、構造的な応力集中（図-7）を緩和する手法がある。本工事では、前者の引張残留応力の緩和を目的にショットピーニングを用いて疲労強度の改善を行った。特徴として、ショット材を鋼面に打ち当て、表面近傍を塑性変形させることで圧縮残留応力を導入させ、引張残留応力を緩和させるものである。対象箇所はすでに疲労き裂が発生し、当て板並びにクラックバスターが実施された継手と同様のき裂未発生箇所を対象箇所として施工した。ショットピーニングは、塗装塗り替え時に実施する循環式ブラスト®処理設備・足場を活用し、ショット材を回収・循環可能とした環境に優しい既設鋼橋溶接継手部の疲労き裂予防保全技術であ

る⁹⁾。疲労強度向上手法の一つであるグラインダー仕上げのように施工者の技量によって品質が左右されことなく、投射材とその投射方法の管理により、品質を担保することが可能である。また、塗装塗り替え時に使用する循環式ブラスト®の研削材をショットピーニング用ショット（JIS G0951）に入れ替えることにより施工可能な技術⁷⁾であり、塗装塗り替えと同時に行うことで事業費の低減を図ることができる。

ショットピーニングを面外ガセット溶接継手部の溶接部近傍に施工した際の疲労試験結果を次ページの図-9に示す。ショットピーニングが施工された試験結果は施工されていないものと比べ、疲労強度等級が2等級向上することが示されている⁹⁾。言い換えれば、疲労寿命約4倍に延命が可能な技術である。

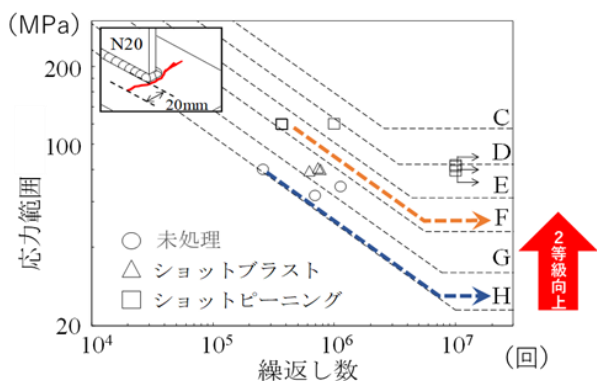


図-9 ショットピーニングの効果

(2) 施工状況

図-10 に施工状況を示す。事前に施工対象箇所蛍光塗料を塗布し、ショットピーニング施工後、対象面にショット材が十分に当たっていることを確認することを目的にカバレッジチェックを実施した。カバレッジチェックは事前に塗布した蛍光塗料がショット材により剥離したことを確認するものであり、カバレッジ率 90%以上の施工を 2 回実施することを基準としている⁹⁾。また、ショットピーニングは 1 回の施工あたり 72 秒/m⁹⁾として、各施工箇所の施工時間を算出し管理されている。



図-10 ショットピーニング施工状況

(3) 疲労照査による健全性の診断

本工事では、受注者の共同研究先の機関において当該現場で応力計測が実施された。実際の橋梁に作用する応力についてひずみゲージを用いて計測し、その計測結果から健全性の診断を実施した。ショットピーニング施工前の回し溶接部前面の上フランジ側にひずみゲージを貼付し(図-11)、約 1.7 日分の計測を行った。得られたひずみ計測結果から鋼構造物の疲労設計指針⁹⁾に示されるレインフロー法を用いて応力頻度分布を作成した(図-12)。ただし、15MPa 以下の応力に関しては計測時のノイズ並びに当該継手の疲労き裂の発生に寄与しない応力であるため⁹⁾示していない。

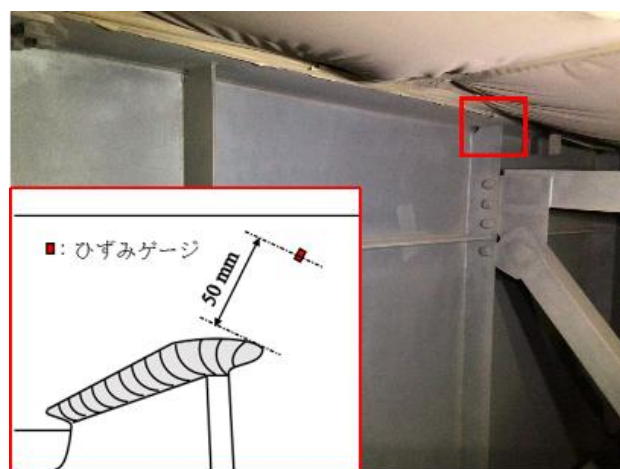


図-11 ひずみゲージ貼付位置

得られた応力頻度分布から簡便な疲労照査を実施した。溶接のままの面外ガセット溶接継手の強度等級は G 等級であり、その一定振幅応力の打ち切り限界は 32MPa⁹⁾である。ここでショットピーニングは疲労強度等級が 2 等級向上することが実証されている⁹⁾ことから、施工された溶接継手の疲労強度は E 等級となり、一定振幅応力での打ち切り限界は 62MPa⁹⁾となる。

簡便な疲労照査⁹⁾は

最大応力範囲 > 当該継手の打ち切り限界

のように、当該継手一定振幅応力での打ち切り限界と得られた最大応力範囲を比較して打ち切り限界を最大応力範囲が上回る場合、疲労き裂の発生の可能性があるとして診断するものである。今回得られた最大応力範囲は

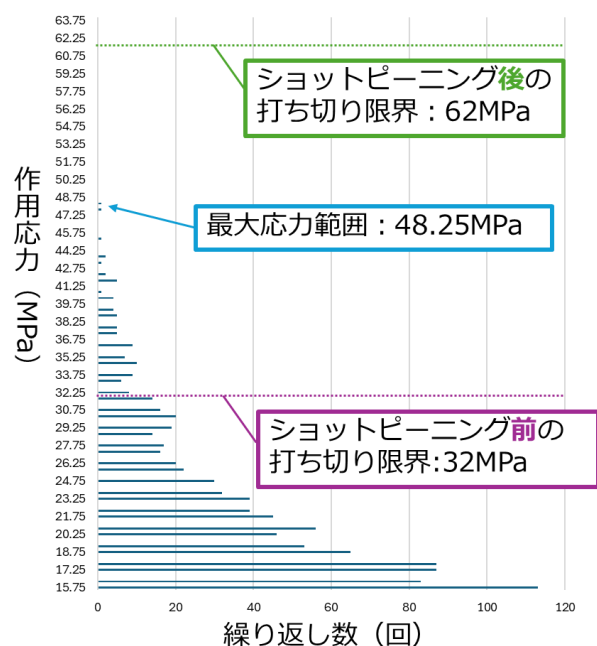


図-12 応力頻度分布

48.25MPaであり、溶接のままの場合、

最大応力範囲48.25MPa

>

溶接のままの打ち切り限界32MPa

となる。つまり、疲労き裂が発生する可能性がある。一方、ショットピーニングが施工された場合、

最大応力範囲48.25MPa

<

循環式ショットピーニング後の打ち切り限界62MPa

となり、ショットピーニングが施工された溶接継手部から疲労き裂は発生しないと言える。

以上より、従来疲労き裂が発生するような応力が作用していたが、ショットピーニングの施工により疲労強度が向上し、適切な予防保全を実施したと言える。

6. 結言～今後の橋梁保全のあり方～

これまで鋼橋保全では広く一般的にき裂損傷部に対する補強方法として、再溶接や当て板等を事後保全として実施してきた。

このような補修工法だけでなく、軽微な疲労き裂に対しては簡易な補修工法を用いることで橋梁保全にかかる費用の合理化を図ることが重要である。その結果として、予防保全を実施する予算の捻出が可能となり、予防保全の実施に着手することができ、最終的に LCC の低減を図ることができるといった予防保全型メンテナンスサイクルの形成が実現可能となる。また、予防保全の検討に際しては疲労耐久性を満たしているか疲労照査で確認し、疲労耐久性を要していない橋梁に関しては予防保全工を実施するといった流れが望ましい。これらの点検・診断・補修の一連のプロセスを国道1号静岡バイパス興津高架内埠頭第3橋梁の事例をもとに提言する。

謝辞：本稿を作成するにあたり、情報提供や助言等多大な御協力をいただきましたヤマダイインフラテクノス(株)並びに関係者の皆様に感謝いたします。また、疲労照査に関してはヤマダイインフラテクノス(株)と岐阜大学との共同研究により実施されました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画），2021.
- 2) 平根玄規：橋梁保全に舵をきれ！～損傷傾向から診る予防保全について～，令和5年度中部地方整備局管内事業研究発表会，維持管理部門②，7，2023.
- 3) 三木千壽，竹ノ内博行，森猛，大川征仁治：主桁と対傾構との取合部の疲労損傷に対する補修方法の提案，構造工学論文集，Vol.34A，pp.543-550，1988.3.
- 4) Koji Kinoshita, Yuki Banno, Yuki Ono, Shohey Yamada, Mitsuru Handa：Fatigue Strength Improvement and Fatigue Crack Closure by Portable Pneumatic Needle-Peening Treatment on Welded Joints, International Journal of Steel Structures, Vol.19, No.3, pp.693-703, 2019.
- 5) 株式会社交通構造コンサルタンツ，国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学，東洋精鋼株式会社：エコクリーンクラックバスター施工要領
- 6) Koji Kinoshita, Yuki Ono, Yuki Banno, Shohey Yamada, Mitsuru Handa：Application of Shot Peening for Welded Joints of Existing Steel Bridges, Welding in the World, Vol.64, pp.647-660, 2020.
- 7) 鋼構造物の予防保全工法、及びこれに用いられる循環式ブラスト装置，特許 6304901，J-Plat-Pat：
<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-6304901/15/ja>
- 8) 一般社団法人日本鋼構造物循環式ブラスト協会：循環式ショットピーニング工法施工要領
- 9) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012年改訂版，技報堂出版。