

供用中鋼道路橋の溶接継手部に対する ピーニング系工法による予防保全効果の検証

阪神高速技術(株)技術部技術統括・開発課 塚本 成昭
阪神高速技術(株)技術部調査点検課 坂根 英樹
阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課 柿木 啓

要 旨

既設鋼道路橋の溶接継手部に対する疲労強度改善のための補強・予防保全対策として、ピーニング系工法の適用可能性を検討した。ここでは、PPT, UIT, ICR の 3 つのピーニング系工法を抽出し、その疲労対策効果について板曲げ振動疲労試験を行いその効果を確認した。また、施工性について、過去にデッキプレートとコーナープレーートの溶接線にデッキ貫通き裂が発見された湾岸線大和川橋梁において、前述の 3 工法に加え SmartZIC 工法を加えた 4 つの予防保全対策工の試験施工の結果、施工条件や規模により現場施工性は大きく異なることを明らかにした。

キーワード：鋼床版、き裂、予防保全、ピーニング、施工性

はじめに

阪神高速道路では構造物の高齢化に伴い、鋼構造物では鋼床版を始めとして疲労損傷が増加している¹⁾。鋼床版では、デッキプレートを貫通する

き裂に対する予防保全的な対策（以下、予防保全）としてデッキプレートにSFRCが施工されつつあるが、施工効率に加え、施工時の交通規制に伴う交通影響の点で大きな課題がある。また、疲労について配慮の乏しい古い鋼橋において、横桁が主桁を貫通するような低等級な溶接継ぎ手部からの疲



(a) 鋼床版上面より



(b) 箱桁内部より

図-1 コーナープレート (C-PL) とデッキプレート (D-PL) 溶接部のき裂

労損傷の懸念がある²⁾。これらに対し、疲労損傷部に対する補修工法と同様の当て板による予防保全は、全対象箇所への対策を考慮すると、施工効率の点で課題が大きい。そこで、交通影響が少なく、高い施工効率が期待できるピーニング系工法に着目し、実橋における施工を再現した環境で作成した試験体の疲労試験により、供用中の鋼橋に対するピーニング系工法の疲労対策としての予防保全効果を検証した。この検証では、阪神高速道路4号湾岸線大和川橋梁の鋼床版箱桁内主桁ウェブのコーナプレート（以下、C-PL）とデッキプレート（以下、D-PL）との溶接止端部からD-PLを貫通するき裂（図-1）に対する予防保全を想定し、4つのピーニング系工法について実橋における施工を再現した試験体を用いた。さらに、C-PLとD-PLの溶接線に対しそれぞれの工法について75mの

現地試験施工を行い各工法の施工性を評価した。

本稿では、各工法について試験体による疲労対策効果に加え、現地試験施工時における施工効率、騒音などについても報告する。

1. 試験体の作成概要と試験方法

本検討では図-1 に示す鋼床版箱桁内主桁ウェブのコーナプレートとデッキプレートとの溶接止端部からデッキプレートを貫通するき裂に対する予防保全を想定とした検証を行った。C-PL とD-PL の溶接線を模した試験体（図-2）を、実橋における施工と同じ施工条件を再現して箱桁内に設置後（図-3）、ピーニング施工することで作成した。その後、ピーニング箇所における残留応力の計測および図-4 に示すような板曲げ振動疲労

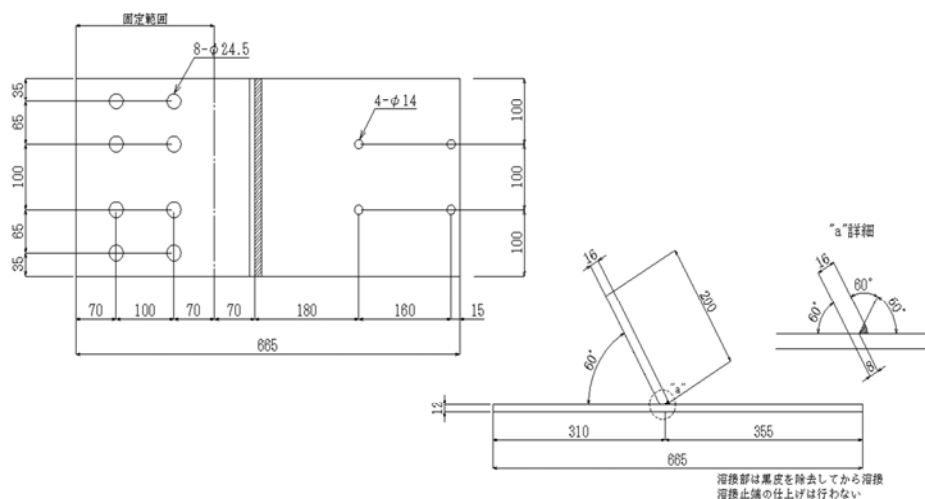


図-2 疲労試験体寸法



図-3 箱桁内における試験体に対するピーニング施工例

試験機を用いた疲労試験により疲労対策効果を検証した。

なお、本検討ではピーニング系工法として PPP³⁾、UIT⁴⁾、ICR⁵⁾ (一般的に ICR はき裂損傷に対する補修工法であり、予防保全に用いる名称ではないが、ここでは一般的に認知されている ICR と呼称する)、コールドスプレー工法 (SmartZIC 工法, 以下 SZ)⁶⁾ を選定した。それぞれの工法の概要を表-1 に示す。なお、SZ は粉末金属の投射であり、その他 3 工法とのメカニズ

ムが異なるため、疲労強度の評価から除外した。

また、各試験体に対し cos 法を用いた X 線回折法⁷⁾ による残留応力を計測した。表面形状の制約により、溶接止端上の残留応力の計測は困難であったので、**図-5** に示す通り計測位置は、溶接止端から 5mm、10mm 離れた位置とし、計測のため ϕ 8mm、深さ 0.1mm を電解研磨した。残留応力は試験体に対し各 2 回計測した。それぞれの試験体の平均の残留応力を表-2 に示す。溶接止端から 10mm 離れた位置 A、B の残留応力の計測値は、各

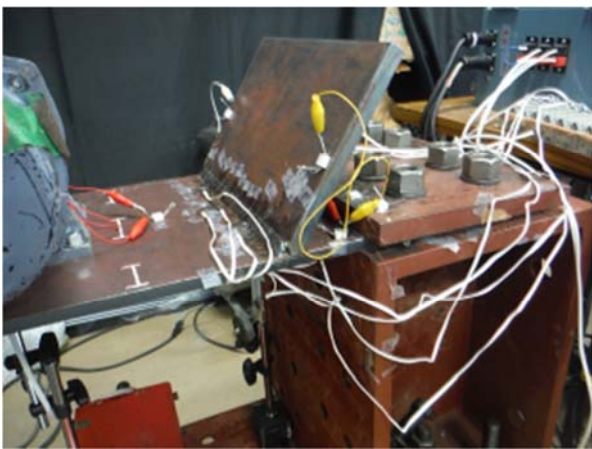


図-4 疲労試験状況

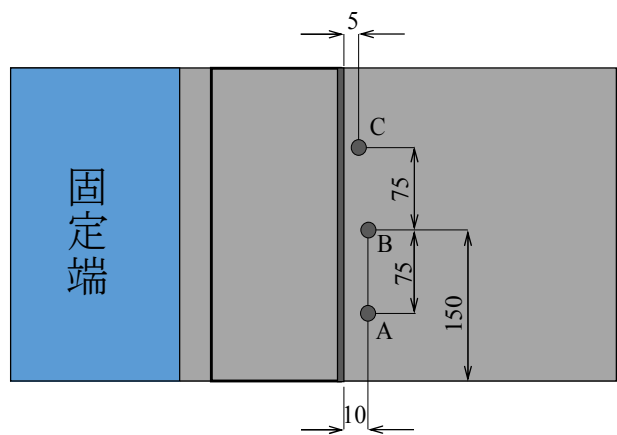


図-5 残留応力の計測位置

表-1 ピーニング系工法概要一覧


	PPP	UIT	ICR	SZ
工法の原理	圧縮空気を用いたピンによる打撃	超音波を用いたピンによる打撃	圧縮空気を用いたピンによる打撃	亜鉛とアルミ粉末の投射
使用機器				

表-2 各種試験体の残留応力の平均値 (N/mm²)

試験体名	A(10mm)	B(10mm)	C(5mm)
AW	91	114	34
UIT	103	106	-26
PPP	58	96	-27
ICR	37	99	7

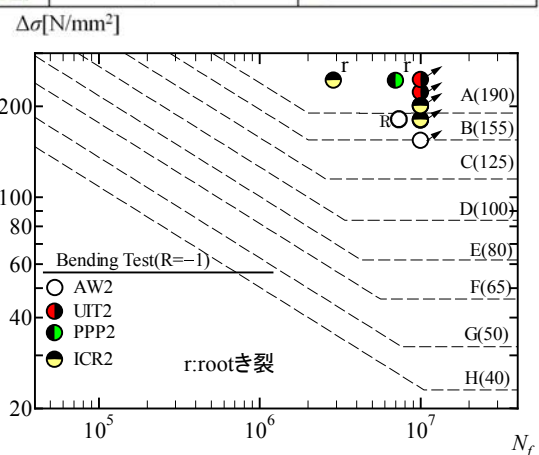


図-6 各工法の疲労試験の結果 (R=-1)

試験体で大きな差はなかった。溶接止端から 5mm 離れた位置では、全工法とも最初に溶接のまま (As weld, 以下 AW) やそれぞれの 10mm 離れた位置 A, B と比較して溶接止端部近傍の引張残留応力が大きく低下し、中でも PPP, UIT では圧縮残留応力が計測された。ICR も 5mm の位置 C では、圧縮残留応力ではないものの溶接止端部近傍の引張残留応力が大幅に小さくなっていた。

2. 板曲げ振動試験機を用いた疲労試験結果

板曲げ振動疲労試験機を用いた疲労試験は、最初に AW に対して疲労試験した。応力比 $R=-\infty$ 、応力範囲では 100N/mm^2 , 120N/mm^2 , 150N/mm^2 に上げて疲労試験したが、繰返し回数が 1,000 万回に達した。さらに、 190N/mm^2 でルートき裂が発生した。そこで、以後の試験体に対しルートき裂発生抑制のため、試験体裏面に ICR を施工し、実橋の荷重条件と比べて、より厳しい条件となる応力比 $R=-1$ で試験を行った。なお、ICR 施工後に X 線回折法により溶接止端近傍の残留応力を計測し、着目した疲労き裂発生に関して、裏面に施工した ICR の影響がないことを確認している。AW に対して応力範囲を 150N/mm^2 にて疲労試験したが、繰返し回数が 1,000 万回に達したので、応力範囲を 180N/mm^2 に上げて再度疲労試験したところ、溶接止端部から疲労き裂が発生した。PPP, UIT, ICR に対しても応力範囲を 180N/mm^2 および 200N/mm^2

にて疲労試験したが、それぞれ繰返し回数が 1,000 万回に達した。次に応力範囲を 240N/mm^2 に上げて再度疲労試験したところ、UIT は繰返し回数が 1,000 万回に達したのに対して、PPP と ICR は溶接ルート部からき裂が発生した。各試験体の S-N 関係を図-6 に示す。横軸 N_f は疲労き裂が試験体の縁に達して試験を終了した際の繰返し回数を示している。繰返し回数が 1,000 万回に達した場合、プロットに矢印を付している。また、AW において疲労き裂が発生したものには R を付している。先に述べたように、PPP, UIT および ICR 処理の試験体では、AW と比べて、疲労強度が大きく向上した。また、各工法間における効果の大きな差異はないと判断できる。

3. 供用中鋼橋におけるピーニング系工法による試験施工の概要と結果

本検討では大和川橋梁において、先に述べた 4 つのピーニング系工法について C-PL と D-PL の溶接線 D-PL 側止端 75m の施工を行い、上向き作業による施工性、施工時の騒音、品質管理、経済性、施工スピードなどの観点で評価した。試験施工箇所を図-7 に示す。

施工性等を評価した試験施工の結果を表-3 に示す。試験施工は打撃系の 3 種類は比較のため全て同じ作業員により実施した。SZ はレールを走行する機器による自動施工であった。以下に試験

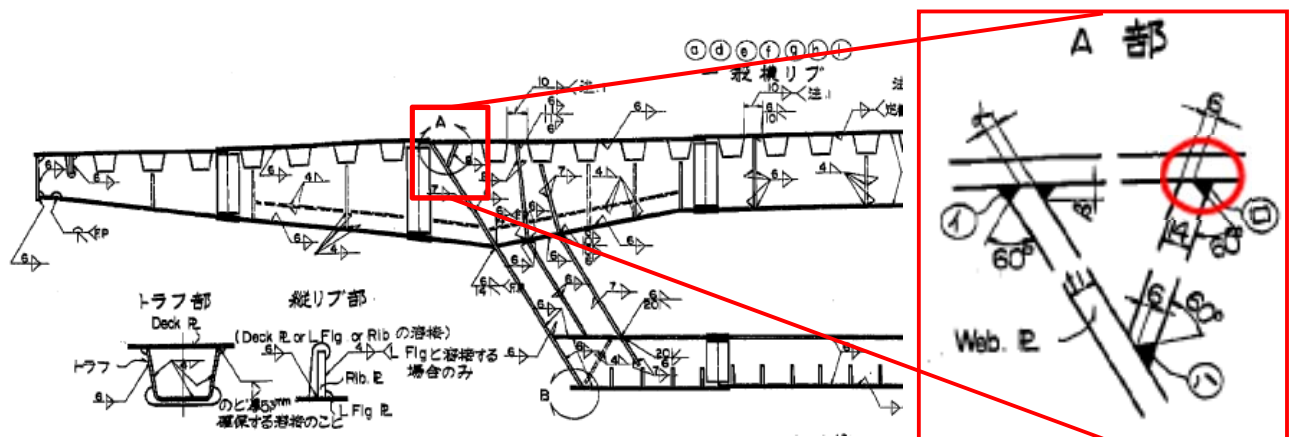


図-7 ピーニング系工法試験施工箇所

表-3 ピーニング系試験施工結果一覧

項目	PPP (エア式ニードルピーニング)	UIT (超音波衝撃処理)	ICR	Smart ZIC
施工性評価 (上向き作業性)	<ul style="list-style-type: none"> 重量及び大きさ共に適切 機器を持つ部位と、操作時に動かす部位が同じのため、楽に施工できる。 故障時の修理に時間を要する場合がある (エア駆動のため UIT より構造が簡単のため、UIT よりは容易)。 	<ul style="list-style-type: none"> ハンドツールが大きい隙間に入らない ハンドツールが重く長時間不可能 下向きの場合は、比較的楽に施工できる 故障時の修理に時間を要する可能性あり。 	<ul style="list-style-type: none"> 押さえる方向とハンドルの向きが違うため安定しない 打撃の際の機器の振動が強い。 上向きの場合は、特に上に押さえつけるのに非常に疲れる ホームセンターで購入できる機器のため故障時の対応も容易。 	<ul style="list-style-type: none"> レールを設置しての自動施工の場合、桁の振動が伝わり噴射位置が安定しない 手持ちの施工の場合、反動がないので、比較的楽に施工できる。
環境評価 (騒音、振動など)	<ul style="list-style-type: none"> 連続作業に影響するほどの振動は感じない 	<ul style="list-style-type: none"> 連続作業に影響するほどの振動は感じない 	<ul style="list-style-type: none"> 振動が大きく連続作業困難 桁内部に打撃音が反響 	<ul style="list-style-type: none"> 騒音、振動無し 騒音や振動に配慮必要な場所では、非常に有力
騒音レベル (テストピース施工時)	箱桁内 通常時 80dB (ノイズ音有) 施工時 95dB 路下の作業場所直下 通常時 68dB 施工時 77dB (実橋 69dB)	箱桁内 通常時 80dB (ノイズ音有) 施工時 92dB 路下の作業場所直下 通常時 68dB 施工時 74dB (実橋 68dB)	箱桁内 通常時 80dB (ノイズ音有) 施工時 98dB 路下の作業場所直下 通常時 68dB 施工時 78dB (実橋 71dB)	箱桁内 通常時 80dB (ノイズ音有) 施工時 未計測 (打撃無し) 路下の作業場所直下 通常時 68dB 施工時 未計測 (打撃無し)
品質管理の評価 (簡易性)	<ul style="list-style-type: none"> 品質項目で時間当たりの長さが決められているので管理が容易 	<ul style="list-style-type: none"> 溝深さが浅いため計測しづらい 	<ul style="list-style-type: none"> 外観および触手により比較的容易 	<ul style="list-style-type: none"> 噴射速度及び膜厚測定による
施工 1m 当りコスト比 (最も低コストの ICR を基準)	1.36	1.33	1	1.22
経済性評価	<ul style="list-style-type: none"> 圧縮空気の供給に設備 (中継のエアタンク) が必要 ピーニング機械の購入が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 機械使用料が高価 長距離での電源 (200V) の確保が必要 機器のレンタル費および事前の講習費が高額 	<ul style="list-style-type: none"> 機材が安価 ホームセンターで購入できる機材のため、機材が安価。 	<ul style="list-style-type: none"> 機材使用料及び機材費が高価 溶射のため、景観上の必要性を除き、塗装が不要
施工スピード	<ul style="list-style-type: none"> 連続作業可能なため、比較的早い 	<ul style="list-style-type: none"> ハンドツールが重い連続作業は困難 機材重量の関係で移動が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 振動、騒音及び圧縮空気の関係で連続作業困難 施工時の振動により作業員が疲れるので、施工数量が大きい場合に、効率が落ちる場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的早い 塗装が不要のため、塗装工程が省略できる。

施工の結果を示す。

置などが必要である。また、機器が複雑であり故障時の対応に時間を要する可能性がある。

3-1 PPP

PPP は、機器の重さや大きさは上向き施工に支障はなく、品質管理も時間当たり施工長さが定められており比較的容易である。作業員へのヒアリングでは、最も施工が容易な工法であった。一方、施工に際し圧縮空気の供給が必要なため、連続箱桁などの長距離連続施工を行う場合は、長い圧縮空気のホースに加え、圧縮空気の中継タンクの設

3-2 UIT

UIT は、騒音レベルは打撃系の中では最も小さい測定値となった。一方、施工機器の重さおよび大きさのため、狭隘部の上向き連続施工を行うに工夫が必要である。さらに、施工に際し 200V 電源が必要なため、連続箱桁などの長距離連続施工を行う場合は、長い電源ケーブルの配線に加え、

電源の降圧対策や機器の運搬などにおいて注意が必要である。また、機器が複雑であり故障時の対応に時間を要する可能性がある。

3-3 ICR

ICR は、施工に際し施工機器であるフラックスチップパーの打撃による振動が強い上、打撃操作レバーと機器を押さえる方向が異なるため、連続上向き施工では安定しにくく、施工には熟練を要する。また、振動は大きく打撃音も箱桁内に反響するため、長時間連続作業を安定して行う場合は耳栓など騒音に対する作業員の対策が必要である。一方で、施工機器が安価かつ入手容易であり故障時の対応は容易である。さらに機器構成がコンパクトで箱桁内の運搬も他工法より容易であるため小規模施工に適用性が高い。

3-4 SmartZIC

SZ は、レールを設置した自動施工であったが、交通車両に伴う桁の振動を受けて噴射位置が安定しなかった。そのため、手動による施工性は今後確認する必要がある。一方、亜鉛とアルミニウムの微細金属を高速で投射させる特性から、直接打撃による騒音及び振動がないため、環境に配慮すべき箇所における適用性が高い。さらに、他の工法と大きく異なり、処理後の鋼面には亜鉛とアルミニウムの溶射被膜を形成するため、景観上の要請以外は施工後の塗装が不要となる。そのため、施工後の防食の配慮が必要な一般外面や、施工の短縮が必要な箇所への適用性が高い。

4. まとめ

実橋の箱桁内において供用中の鋼床版橋梁への施工を再現した試験体に対し PPP, UIT, ICR の 3 つの工法による疲労対策効果を検証した。また、実橋の箱桁内におけるピーニング系工法の試験施工の結果を以下に、結果をまとめる。

- (1) X 線回折法による残留応力計測の結果、PPP, UIT は圧縮残留応力を確認した。ICR につい

ても引張残留応力が大きく低減した。

- (2) 板曲げ振動疲労試験を用いた $R=-1$ の疲労試験では PPP, UIT, ICR は、溶接止端に高い圧縮の残留応力が残されているため、AW と比べて、疲労強度が大きく向上した。
- (3) PPP は作業員へのヒアリングにおいても最も施工が容易な工法であったが、長距離連続施工の場合、設備面で課題がある。
- (4) UIT は打撃系の中では最も小さい騒音測定値であった。一方で、狭隘部の上向き施工や長距離連続施工の場合、機材の重量や設備面で課題がある。
- (5) ICR は連続作業性が他の工法より低い。一方で、機器構成がコンパクトで小規模施工に適用性が高い。
- (6) 上向き作業における連続施工性及び施工スピードは若干ながら PPP が良い結果となったが、施工条件や規模により適用性は大きく異なる。

本検討における疲労対策効果は、試験体サイズの制約により実構造物と溶接部の拘束および荷重条件が異なるため、今後、実橋における拘束・荷重条件を再現した、より詳細な試験を行う予定である。また、今回の試験施工は、箱桁内における狭隘部の鋼床版上面に対する上向き作業での試験施工結果であるため、施工場所や施工条件、施工規模を考慮して適宜評価する必要がある。

謝辞：「本論文の一部は阪神高速道路(株)、阪神高速技術(株)、関西大学との共同研究「既設鋼橋へのピーニングの効果の検証に関する研究」の成果である。この共同研究を指導頂いた関西大学石川敏之准教授にはここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、阪神高速道路(株)、(財)阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策、2012。
- 2) 岡本亮二、高村義行、田畑晶子：供用下における鋼桁橋の疲労照査のための応力計測、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、I-581, 2013。
- 3) 苗木隆太郎、安部央矩、高橋宏治、安藤柱、北條恵

- 司, 半田充: 溶接止端部にき裂を有するステンレス鋼のピーニングによる疲労限度向上とき裂の無害化, 圧力技術 第53巻3号, pp.30-pp.38, 2015.
- 4) 富永知徳, 松岡和巳, 佐藤嘉昭: 補修溶接を施した既設クレーンランウェイガーダーの超音波衝撃処理による疲労寿命向上, 鋼構造論文集, Vol. 14, No. 55, pp. 47-58, 2007.
- 5) 石川敏之, 山田健太郎, 柿市拓巳, 李蒼: ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, pp. 264-272, 2010.
- 6) 松原由典, 石川敏之, 曾我麻衣子, 井口進: Smart ZIC 工法による溶接継手の疲労強度向上効果, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, I-265, 2017.
- 7) 佐々木敏彦, 広瀬幸雄: 2 次元 X 線検出器イメージングプレートを用いた全平面応力成分の単一入射 X 線応力測定, 「材料」(J. Soc. Mat. Sci. Jaoan), Vol. 44, No. 504, pp. 1138-1143, 1995.

VERIFICATION OF THE EFFECT OF PEENING AS A PROACTIVE MEASURE ON WELD LINES IN STEEL BRIDGES IN SERVICE

Shigeaki TSUKAMOTO, Eiki SAKANE and Hiroshi KAKINOKI

Applicability of peening as a proactive measure for improving fatigue strength of weld lines in steel bridges in service was investigated. For the verification, ultrasonic impact treatment (UIT), portable pneumatic needle-peening (PPP), impact crack closure retrofit (ICR) and Smart ZIC were selected as peening methods, and bending fatigue tests were carried out. Workability was also verified by performing test execution on the Yamatogawa Bridge at weld lines between a deck plate and a corner plate which were known to have penetrating fatigue cracks. This paper reports the effect of peening in improving fatigue strength and the workability of the four methods.

塚本 成昭



阪神高速技術株式会社
技術部 技術統括・開発課
Shigeaki Tsukamoto

坂根 英樹



阪神高速道路株式会社
技術部 調査点検課
Eiki Sakane

柿木 啓



阪神高速道路株式会社
大阪管理局保全部保全設計課
Hiroshi Kakinoki