

特集：インフラ溶接構造物の疲労寿命延長技術

亀裂表面を閉口させて疲労寿命を向上させる工法 (ICR 処理)

関西大学 環境都市工学部
石川 敏之

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社 顧問
名古屋大学 名誉教授
山田 健太郎

1. はじめに

鋼橋では、これまでに重交通路線を中心に疲労亀裂の発生が数多く報告されている。その中でも鋼鈹桁の垂直補剛材上端部の亀裂や鋼床版の垂直補剛材上端部の亀裂 (図 1) の発生数が非常に多い。特に、大型車の輪荷重を直接受ける鋼床版では、デッキプレートに疲労亀裂が発生し、そして貫通すると交通に多大な影響を及ぼすことになる。そこで著者らは、垂直補剛材の接合部のデッキプレート側溶接止端に発生する疲労亀裂の簡易な補修法として、2008 年に亀裂の近傍をエアーツールで叩いて、亀裂表面を閉口させ、疲労寿命を向上させる工法(衝撃亀裂閉口処理: Impact Crack Closure Retrofit Treatment、ICR 処理)を開発した^{1), 2)}。その後、様々な溶接継手に対して疲労寿命向上効果の確認や実橋への試験施工が行われている³⁾⁻¹⁷⁾。ここでは、面外ガセット溶接継手に着目して ICR 処理の適用による疲労寿命向上効果や、実橋への試験施工について紹介する。

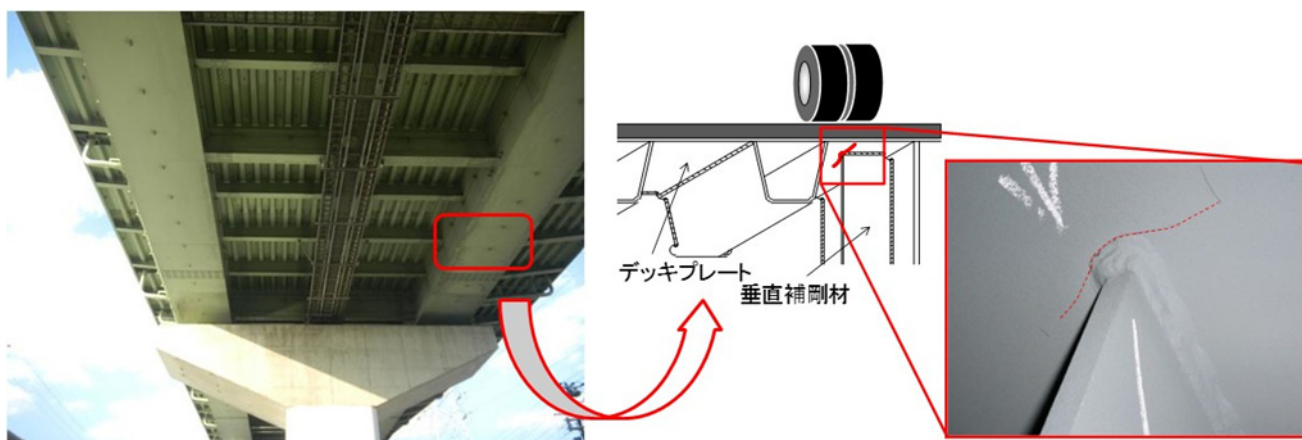


図 1 鋼床版デッキプレートと垂直補剛材上端の疲労亀裂の例

2. ICR 処理

ICR 処理に用いるツールを図 2 に示す。ICR 処理では、図 2 に示すような先端が丸みを帯びた 4×5mm 程度の平坦な面になるように加工されたタガネと汎用のエアーツール（フラックスチッパ）を用いて亀裂近傍を叩いて、亀裂を閉口させている。フラックスチッパの性能は、打撃数 90Hz、ピンストローク 16mm、消費空気量 0.14Nm³/min である。ICR 処理中の空気圧力はフラックスチッパの性能に合わせて 0.5～0.6MPa になるように調整している。

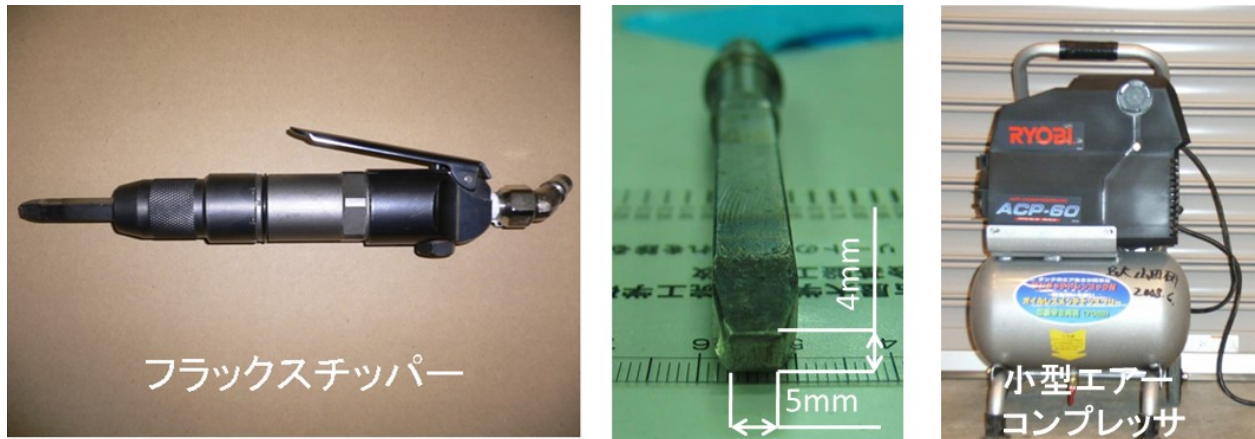
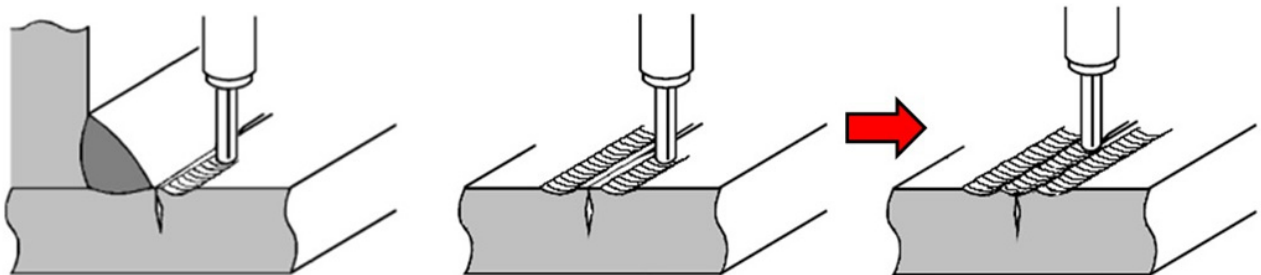


図 2 ICR 処理ツール

疲労亀裂を閉口させる手順を図 3 に示す。溶接止端に発生した疲労亀裂に対しては、図 3(a)に示すように疲労亀裂の前面の主板部分を叩いて疲労亀裂を閉口させる。溶接止端から離れて主板へ進展した疲労亀裂に対しては、図 3(b)に示すように亀裂の両側を叩き、その後、亀裂直上を叩くことによって亀裂表面を閉口させる。



(a) 溶接止端亀裂への ICR 処理

(b) 主板に進展した亀裂への ICR 処理

図 3 ICR 処理手順

閉口した亀裂の断面の一例を図 4 に示す。図 4 は、厚さ 12mm の鋼板にレーザーで切込みを入れ、板の両表面を図 4 の I～VI の順序で ICR 処理して閉口させた結果である。この図から、レーザーの切込み幅 0.7mm 程度に対して、鋼板の両表面から 1.5mm 程度が ICR 処理によって閉口していることがわかる。実際の疲労亀裂に対しても、1～3mm 程度の深さまで亀裂が閉口していることが確認されている²⁾。このように、ICR 処理によって疲労亀裂の表面から 1～3mm 程度閉口しているため、断面 2 次モーメントの回復程度が、断面の回復程度よりも高くなる。すなわち、板曲げモーメントを繰返し受ける場合は、亀裂進展を遅延させる効果がより高くなると言える。

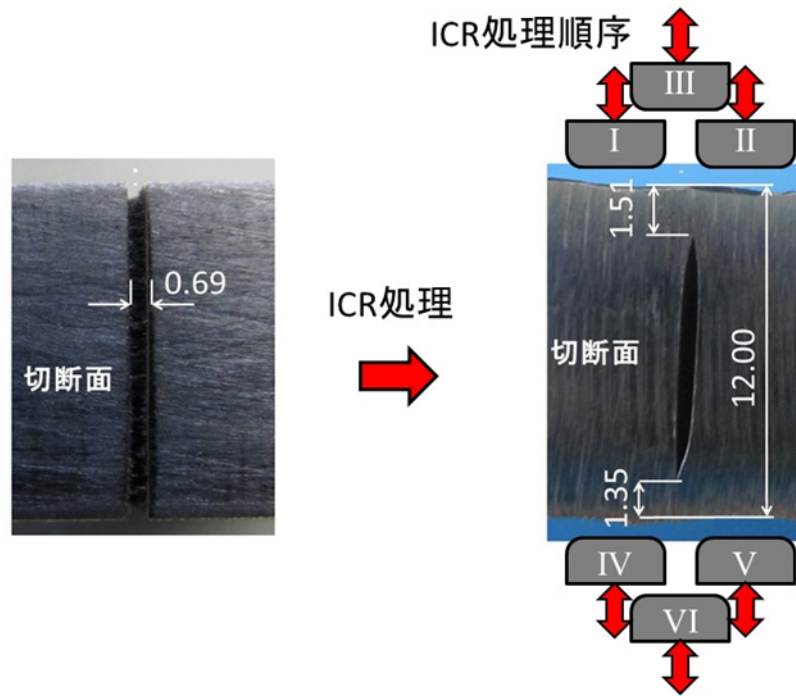


図4 ICR処理によって閉口した切込みの断面

3. 板曲げを受ける面外ガセット溶接継手に対する疲労寿命向上効果

鋼床版デッキプレート側の垂直補剛材接合部の溶接止端の亀裂は、大型車の輪荷重の通過により繰り返し板曲げを受けて発生する。この部分を図5に示すように、板曲げを受ける面外ガセット溶接継手で模擬した。疲労試験は、図6に示すような板曲げ振動疲労試験機¹⁹⁾を用いて、最小応力を最大応力で除した応力比(R)を $R = -1$ (図6のパネを用いない状態)として実施した。

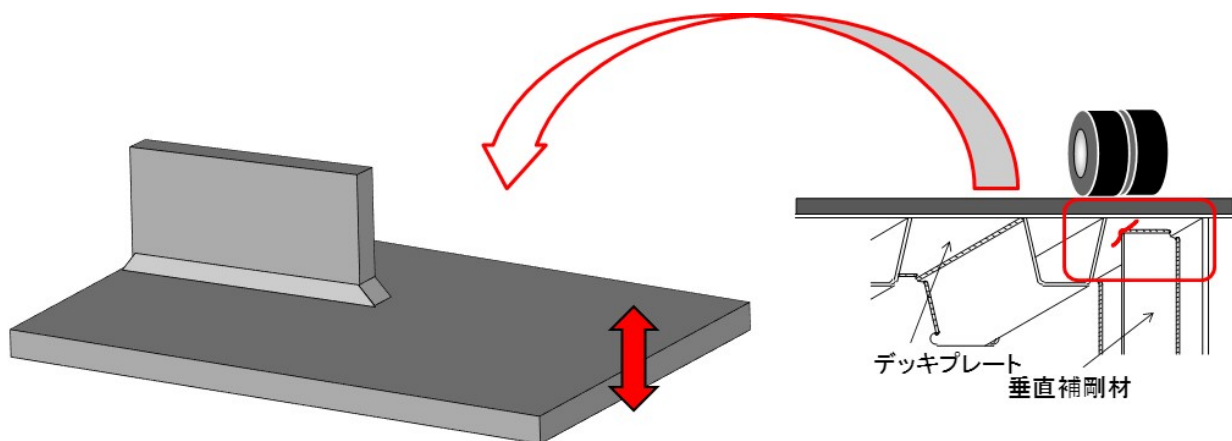


図5 板曲げ疲労試験に用いた面外ガセット溶接継手試験体

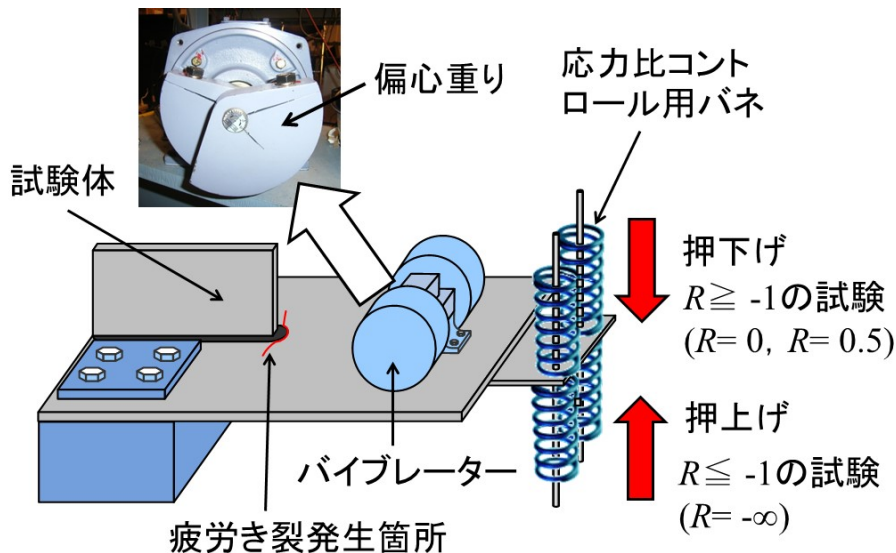
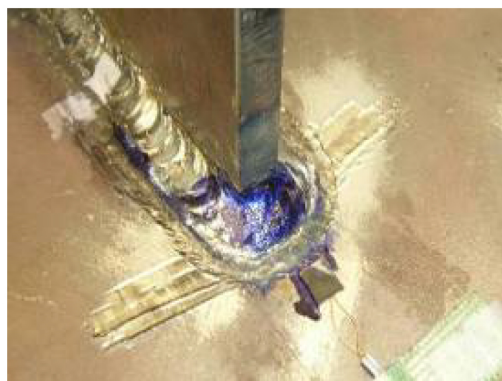
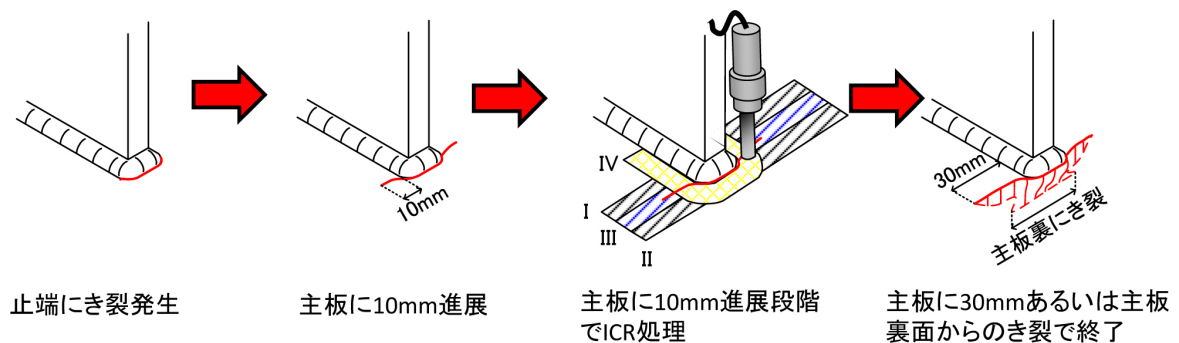


図6 板曲げ振動疲労試験

まず、溶接したままの試験体の疲労試験を実施し、溶接止端から疲労亀裂を発生させ、その亀裂が溶接止端に沿って伝播し、まわし溶接部の止端から離れて 10mm 進展した段階(N_{10})で、図7に示すように、主板に進展した両側の亀裂を ICR 処理し(図中の I→II→III)、最後にまわし溶接部を ICR 処理した(図中の IV)。ICR 処理速度を規定していないが、図7の手順に対して 3~5 分で ICR 処理が完了する。ICR 処理した鋼材表面は、図7に示すように 0.2mm 程度凹み、光沢が出る。ICR 処理後、再び疲労試験を実施し、亀裂が ICR 処理部から抜けて、まわし溶接部の止端から 30mm 進展した段階あるいは裏面から亀裂が発生した段階(図7参照)で疲労寿命 N_f とした。



ICR 処理した試験体の表面の例

図7 疲労亀裂の進展と ICR 処理の手順および疲労試験終了の条件

作用応力と ICR 処理してからの疲労寿命 N_f との関係を図 8 に示す。図では、主板裏側から疲労亀裂が発生したデータに対しては、プロットの右上に”b”のマークを付けている。また、ICR 処理してから、1,000 万回以上繰り返し応力を作用させても疲労寿命に達しなかった試験体は、run-out(図中の矢印)として取り扱い、いくつかの試験体では再び高い応力範囲で疲労試験を行った。また、図 8 には、溶接したままの試験体 AW の疲労寿命 N_f に対する $S-N$ 関係もプロットしている。

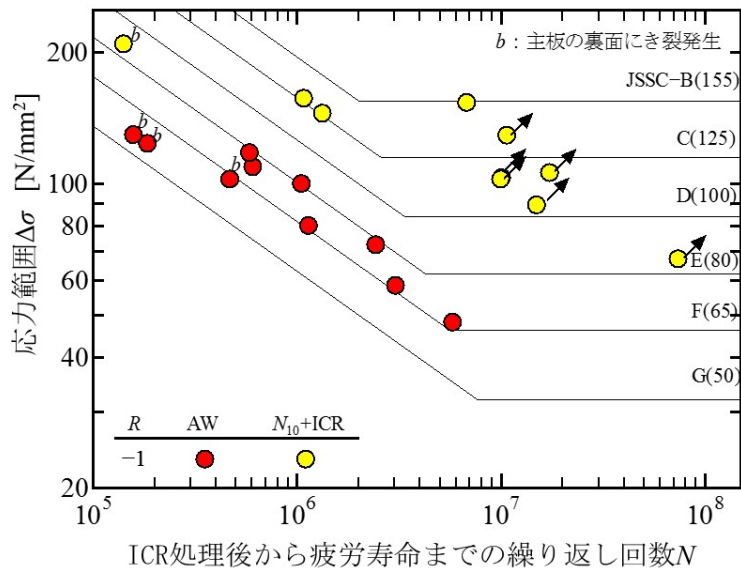
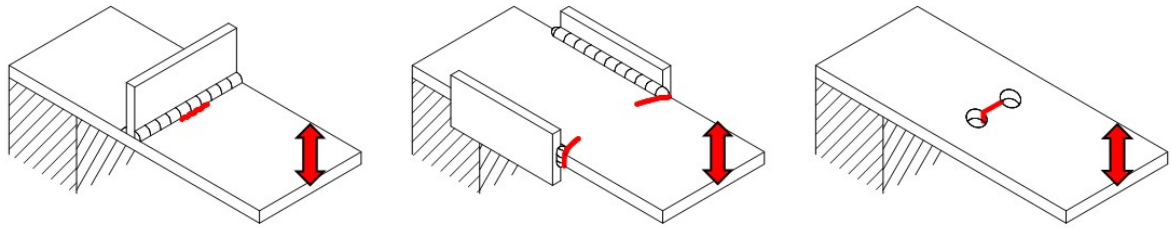


図 8 応力範囲と ICR 処理してからの疲労寿命 N_f の関係

図 8 から、応力範囲が高くなると、溶接したままの試験体 AW も、ICR 処理した試験体 $N_{10}+ICR$ も最終的に主板の裏面から疲労亀裂が発生する傾向であった。しかし、ICR 処理した試験体は、応力範囲 100N/mm^2 以上でも run-out した試験結果があるが、溶接したままの試験体 AW では、応力範囲 100N/mm^2 になると疲労寿命が 100 万回未満になるため、ICR 処理によって疲労寿命が大幅に向上していることがわかる。作用応力範囲が高くなると、ICR 処理による疲労寿命向上効果が小さくなるが、溶接したままの試験体 AW と比べて十分に疲労寿命が向上している。また応力範囲 67N/mm^2 の ICR 処理した試験体では、繰返し回数が 7,400 万回に達しても、表面の亀裂の進展が見られなかった。

文献 14)では、同様な面外ガセット溶接継手で応力比を $R=0.5$, 0 (図 6 のバネを下側に押下げた状態で疲労試験)および $R=-\infty$ (図 6 のバネを上側に押上げた状態で疲労試験)とした場合の試験結果も示されており、いずれの応力比の状態でも ICR 処理によって疲労寿命が向上することが示されている。このように板曲げを受けて発生した疲労亀裂に対して ICR 処理によって疲労寿命が大幅に向上するが、応力の繰返し過程で、閉口した亀裂の一部が開閉口を繰返す状態となることも明らかにされている²⁰⁾。

他方、板曲げの繰返しを受ける場合に対しては、図 9 に示すような構造詳細に対しても ICR 処理による疲労寿命向上効果が明らかにされている^{3), 5), 8)~10)}。



(a) T字継手 (b) 側面ガセット溶接継手 (c) ストップホール

図9 ICR処理によって疲労寿命延命の効果が確認されている構造詳細

4. 引張を受ける面外ガセット溶接継手に対する疲労寿命向上効果

図10に示す引張の繰り返しを受ける面外ガセット溶接継手に対して、溶接止端に発生した長さ5mm程度の小さな疲労亀裂(N_{10e} と呼ぶ)と、溶接止端に沿って20mm程度進展した疲労亀裂(N_b と呼ぶ)を対象として、ICR処理による疲労寿命向上効果が明らかにされている¹⁶⁾。

試験体の寸法を図10に示す。面外ガセット(高さ80mm、厚さ12mm、長さ120mm)は主板(幅90mm、厚さ12mm、長さ700mm)の片面に溶接されている。

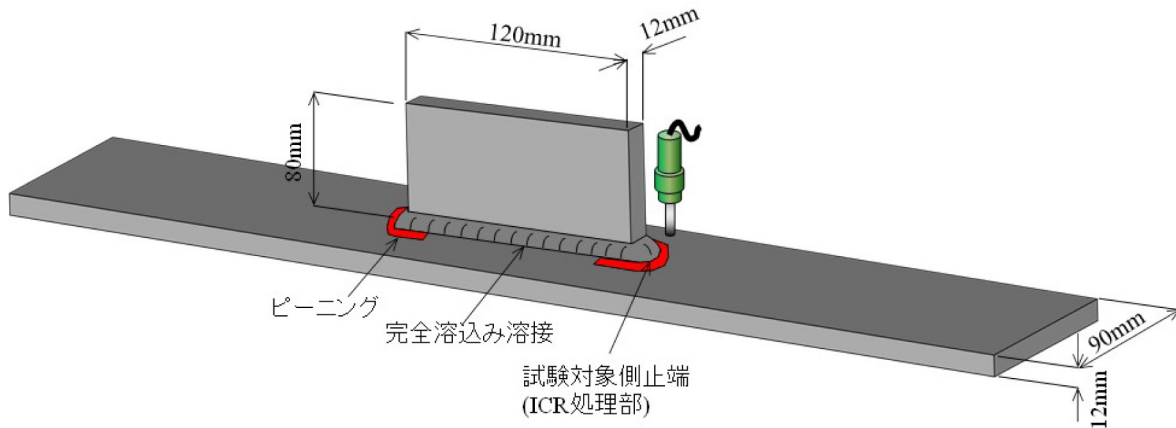


図10 引張疲労試験に用いた面外ガセット溶接継手試験体

まず溶接したままの状態での疲労試験を実施し、溶接止端に N_{10e} あるいは N_b 程度の亀裂を発生させ、無負荷状態で溶接止端に沿って3往復ICR処理を実施し(それぞれ $N_{10e}+ICR$ 、 N_b+ICR と呼ぶ)、再び同じ条件で疲労試験を行った。試験体が破断した時の繰り返し回数を疲労寿命 N_f とした。

疲労試験結果を図11に示す。この図では試験体 $N_{10e}+ICR$ および試験体 N_b+ICR の疲労試験結果は、亀裂発生前からの総繰り返し回数を示している。図には、文献21)で報告されている疲労試験結果(Ref)も示されている。試験体 $N_{10e}+ICR$ では、今回疲労試験を行った全ての応力範囲に対して、溶接したままの試験体AWの疲労寿命の10倍の繰り返し回数に達しても疲労破断しなかった。この結果は、溶接したままの試験体にピーニング処理(亀裂がない状態へのICR処理)を行った結果(試験体AW+Peening)と同等であった。試験体 N_b+ICR では、試験体 $N_{10e}+ICR$ ほどの疲労寿命の向上効果が見られなかったが、亀裂進展の遅延により疲労寿命が向上していることがわかる。ただし、表面の亀裂が同程度の場合でも板厚方向に深い亀裂($\Delta\sigma = 120\text{N/mm}^2$ の2体)は、疲労寿命の向上効果が小さか

った。したがって、引張を受ける場合、亀裂がより小さく浅い段階で ICR 処理することにより、疲労寿命がより向上できると考えられる。

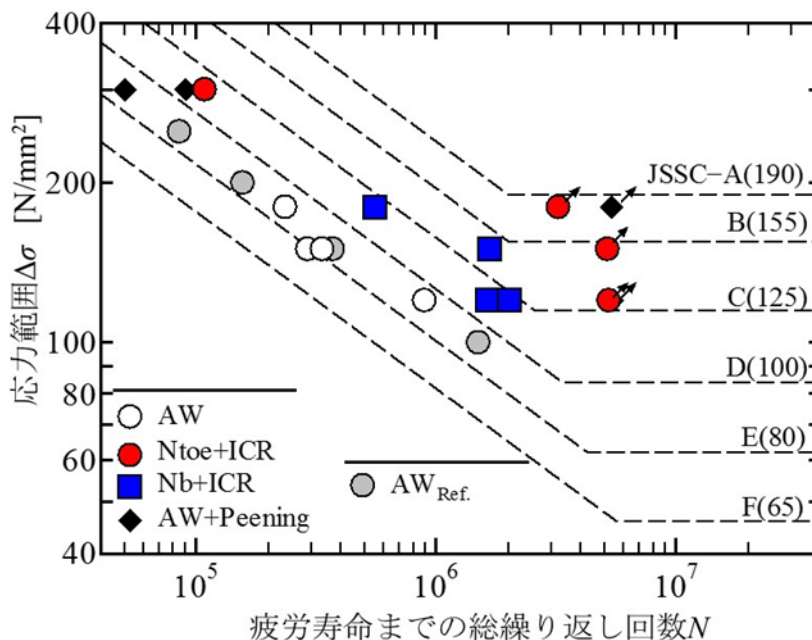


図 11 応力範囲と疲労寿命までの総繰り返し回数の関係

次に、ICR 処理後からの疲労亀裂進展寿命を図 12 に示す。図 11 から明らかなように、試験体 $N_{toe}+ICR$ は、 $AW+Peening$ と同程度の疲労寿命の向上効果があったため、試験体 N_b+ICR に対して、ICR 処理してから疲労破断するまでの亀裂進展寿命 $N_b \rightarrow N_f$ を示している。図には試験体 AW に対する亀裂進展寿命 $N_b \rightarrow N_f$ もプロットしている。この図から、 $N_b \rightarrow N_f$ までの亀裂進展寿命は、 N_b の段階で ICR 処理を行うことで 4 倍以上向上していることがわかる。このように、引張を繰返し受ける場合に対しても、疲労亀裂へ ICR 処理することにより、亀裂進展の遅延効果がある事がわかる。

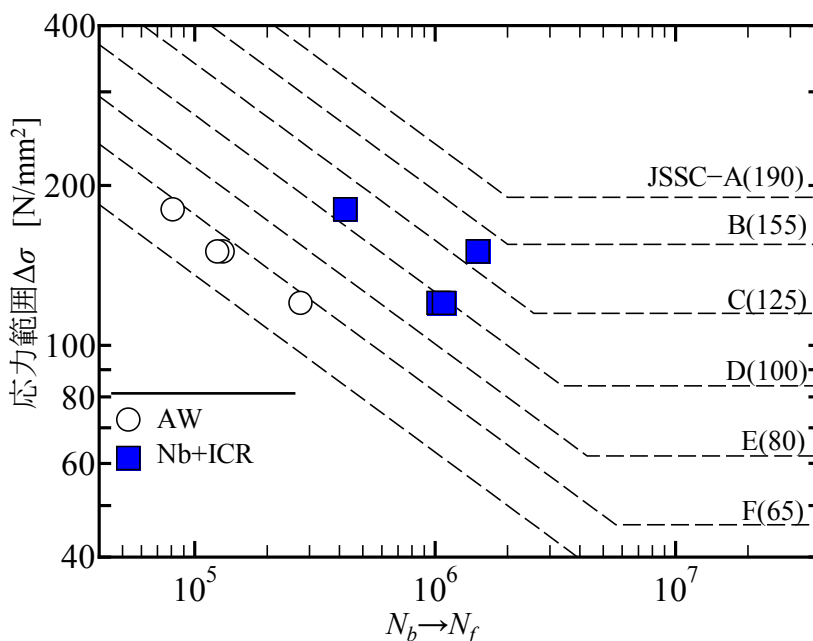


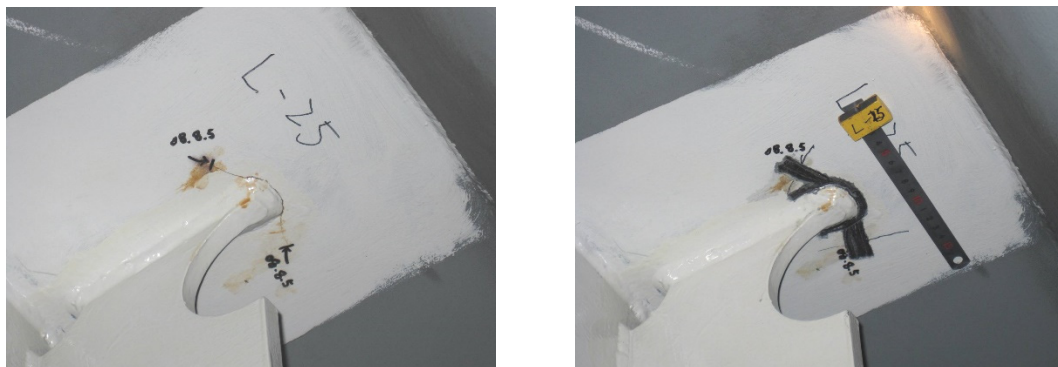
図 12 応力範囲と $N_b \rightarrow N_f$ の関係

他方、引張を受ける状態に対しては、主桁のウェブ面外ガセット溶接継手の貫通亀裂に対する ICR 処理の効果が検討されている^{11), 14)}。これらの結果から、板曲げの繰り返しを受ける面外ガセット溶接継手のような大幅な疲労寿命向上効果は得られていないものの、亀裂の進展が遅延されること、ICR 処理時の平均応力の状態によっては、疲労寿命向上効果が高いことが示されている。

5. 実橋に発生した疲労亀裂への ICR 処理の適用

図 1 のような大型車の輪荷重を直接受ける鋼床版の垂直補剛材の接合部のデッキプレート側溶接止端の疲労亀裂は多数発生している。また、この疲労亀裂は板曲げの繰り返しを受けて発生しているため、ICR 処理による疲労寿命向上効果が期待できる箇所の一つである。そこで、実橋に発生した鋼床版デッキプレートの垂直補剛材端亀裂に対して、2009 年の 3 月に ICR 処理を試験的に施工した⁴⁾。

実橋では、まわし溶接部からデッキプレートに 10mm 亀裂が進展した状態 N_{10} に対して ICR 処理を実施した。ICR 処理順序は図 7 と同様とし、初めにデッキプレートの亀裂を閉口し、その後まわし溶接に沿って ICR 処理を行った。図 7 の I-IV の各工程で、ICR 処理を 2 往復施工している。ICR 処理は、供用中に実施し、ICR 処理時間は 5 分程度であった。ICR 処理前の垂直補剛材上端の亀裂の状況と、ICR 処理後の垂直補剛材上端の亀裂の状況を図 13 に示す。この橋では、垂直補剛材の亀裂の進展を予防する目的で、垂直補剛材の上端近くに半円孔が設けられていた。



(a) ICR 処理前の疲労亀裂

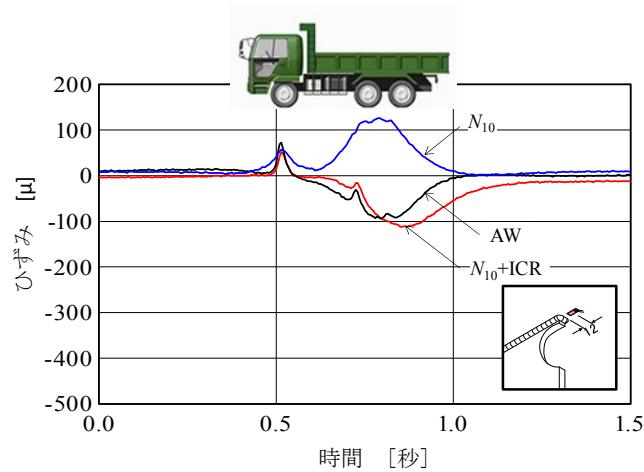
(b) ICR 処理後の状況

図 13 ICR 処理前後のデッキプレート下面の疲労亀裂の状況

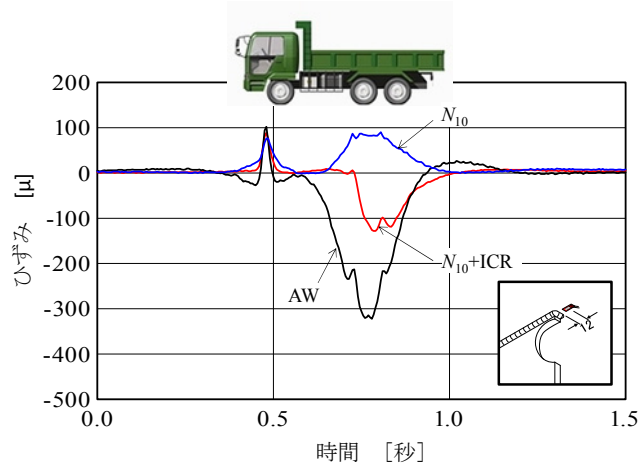
ICR 処理の効果を確認する目的で、ICR 処理直後、半年後(2009 年 9 月)、1 年半後(2010 年 8 月)に 30 分程度ひずみ計測を実施した。ひずみゲージは、溶接止端から 12mm 離れたデッキプレート下面とし、比較として、亀裂が発生していない位置(AW)とデッキプレートに 10mm 程度進展した亀裂が発生している位置(N_{10})も同様にひずみ計測を行った。ひずみ計測を行った 3 か所の垂直補剛材は、橋軸方向に最大 8m 離れているが、計測した橋が直線橋であるため、ほぼ同様な位置を大型車が通っていると考えられる。

ひずみ計測結果を図 14 に示す。ICR 処理直後の 2009 年 3 月の計測結果から、亀裂が発生していない AW のひずみ波形と亀裂が発生している N_{10} とでひずみの波形に大きな違いが見られる。 N_{10} の亀裂に ICR 処理した $N_{10}+ICR$ のひずみ波形は、亀裂がない AW の波形に近くなっている。したがって、ICR 処理によって亀裂が閉口していると考えられる。半年後の 2009 年 9 月の計測は、気温が高いためアスファルトの剛性が低くなり全体的にデッキプレートに生じているひずみが大きくなっている。

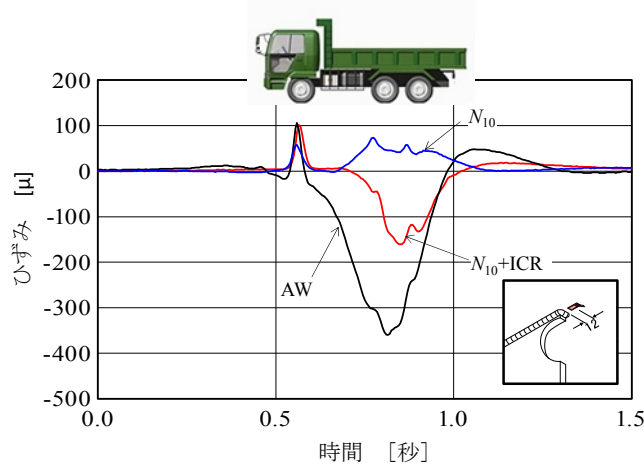
N_{10} の亀裂をICR処理した N_{10} +ICRは、亀裂がないAWの状態から少しずれているが、まだAWと同様に大型車の前輪の通過で引張ひずみが生じ、後輪の通過で圧縮ひずみが生じている。したがって、ICR処理による効果は持続していると考えられる。1年半後の2010年8月の計測結果は、2009年9月の計測結果とほぼ同様であり、ICR処理の効果が持続していると言える。



(a) 2009年3月



(b) 2009年9月



(c) 2010年8月

図14 ICR処理部近傍のデッキプレートのひずみ波形

実橋への ICR 処理の効果に関する研究は、文献 7)、15)、17)、18)でも報告されており、面外ガセット溶接継手以外の溶接継手に対しても試験的に ICR 処理が行われている。

6. まとめ

本稿では、亀裂の近傍を叩いて亀裂表面を閉口させる ICR 処理について、面外ガセット溶接継手に着目した疲労寿命向上効果や、実橋への試験施工について紹介した。これまでの研究成果から、ICR 処理を行うことにより疲労亀裂の進展が遅延することが示されており、溶接したままの状態と比べて疲労亀裂の進展を助長することはないと言える。ただし、大きな亀裂の場合や作用応力によっては ICR 処理による疲労寿命向上効果が十分に得られない場合も考えられるため、実橋へ ICR 処理を適用する場合は応急処置とし、定期的に経過観察するのが良いと考えている。

参考文献

- 1) 山田健太郎, 石川敏之, 柿市拓巳: 疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.961-965, 2009.
- 2) 石川敏之, 山田健太郎, 柿市拓巳, 李 薈: 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.
- 3) Yamada, K., Ishikawa, T. and Kakiichi, T.: Rehabilitation and improvement of fatigue life of welded joints by ICR treatment, Advanced Steel Construction, Vol.11 No.3, pp.294-304, 2015.
- 4) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: 鋼床版箱桁橋の垂直補剛材直上き裂への ICR 処理の施工試験, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 巻, pp.351-358, 2009.
- 5) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: 鋼板の側面にガセットプレートがすみ肉溶接された継手への ICR 処理による疲労強度向上効果, 鋼構造論文集, Vol.18, No.70, pp.39-47, 2011.
- 6) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: 面外ガセット継手のルートき裂・ガセット止端き裂への ICR 処理, 鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, pp.323-330, 2011.
- 7) 石川敏之, 清水 優, 三輪浩二, 河野広隆, 山田健太郎: 旧鳥飼大橋縦桁ウェブき裂への ICR 処理の施工, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, pp.571-576, 2012.
- 8) 石川敏之, 松本理佐, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎: き裂表面閉口によるストップホール縁の応力集中の低減, 材料, 第 62 巻, 第 1 号, pp.33-38, 2013.
- 9) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: すみ肉溶接継手の溶接止端に発生した疲労き裂の ICR 処理による補修・補強, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.665-672, 2013.
- 10) 松本理佐, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎: き裂閉口によるストップホールの疲労強度の向上効果, 鋼構造論文集, Vol.21, No.83, pp.53-61, 2014.
- 11) 判治 剛, 舘石和雄, 小野秀一, 段下義典: 橋梁用高降伏点鋼板(SBHS)を用いた溶接継手の疲労特性, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.587-595, 2014.
- 12) 松本理佐, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎: 過荷重がき裂を閉口したストップホールの疲労強度に与える影響, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.801-808, 2014.
- 13) 松本理佐, 石川敏之, 青木康素, 河野広隆, 山田健太郎: ICR 処理による垂直補剛材直上の鋼床版デッキプレートに生じた疲労き裂の補修効果, 第 28 回信頼性シンポジウム講演論文集, pp.164-169, 2014.
- 14) 舘石和雄, 判治 剛, 石川敏之, 清水 優: 引張または曲げ荷重を受ける溶接継手に対する ICR 処理の効果, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.620-637, 2015.
- 15) 杉本義博, 塚本成昭, 青木康素: 疲労き裂に対する ICR 処理の試験施工と補修効果, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 68 巻, I-553, pp.1105-1106, 2013.

- 16) 田中一夫, 原 考志, 石川敏之: 引張荷重を受けて生じた微小き裂への ICR 処理の効果, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 70 巻, I-376, pp.751-752, 2015.
- 17) 米村大和, 竹市雅人: アーチ橋の補剛桁ウェブと横げたフランジ接合部の疲労き裂に行う ICR 処理, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 70 巻, I-399, pp.797-798, 2015.
- 18) 松本健太郎, 七村和明, 池頭 賢, 石川敏之: 鉄道橋 I ビーム桁支点首部のストップホールに対する片面 ICR 処理の応力低減効果, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 70 巻, I-533, pp.1065-1066, 2015.
- 19) 山田健太郎, 小藺江朋堯, 小塩達也: 垂直補剛材と鋼床版デッキプートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, Vol.14, No.55, pp.1-8, 2007.
- 20) 石川敏之, 松本理佐, 河野広隆, 山田健太郎: ICR 処理された疲労き裂の引張および圧縮荷重下での挙動, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 70 巻, I-377, pp.753-754, 2015.
- 21) 森影 康, 中西克佳, 伊木 聡, 村上琢哉, 鞆 一: 母材打撃ハンマーピーニングによる継手疲労強度向上, 鋼構造年次論文報告集, 第 21 巻, pp.790-794, 2013.

<略歴>

石川 敏之 (いしかわ としゆき)

1996 年 近畿大学 理工学部 土木工学科 卒業
 1998 年 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士前期課程 修了
 1998 年 駒井鉄工株式会社 入社 (2002 年退社)
 2005 年 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士後期課程 修了
 博士 (工学) 学位取得
 2005 年 大阪大学大学院 工学研究科 特任研究員
 2007 年 名古屋大学大学院 環境学研究科 助教
 2010 年 京都大学大学院 工学研究科 助教
 2015 年 関西大学 環境都市工学部 准教授 現在に至る

山田 健太郎 (やまだ けんたろう)

1969 年 名古屋大学 工学部 土木工学科 卒業
 1971 年 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 修了
 1975 年 米国メリーランド大学大学院 博士課程 修了
 Ph.D. 取得
 1975 年 米国メリーランド大学ポストドクトラルフェロー
 1976 年 名古屋大学 工学部 助手
 1978 年 名古屋大学 工学部 講師
 1979 年 名古屋大学 工学部 助教授
 1988 年 名古屋大学 工学部 教授
 1996 年 名古屋大学大学院 工学研究科 教授
 2001 年 名古屋大学大学院 環境学研究科 教授
 2010 年 名古屋大学 名誉教授
 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 顧問 現在に至る