

ICR 処理による比較的小さな疲労き裂の補修・補強について

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社	正会員	○有馬 直秀
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社	正会員	山田 健太郎
関西大学	正会員	石川 敏之

1. 目的

大型車の交通量が多い鋼道路橋では、応力や変形の繰返しにより疲労損傷が生じることがある。従来の補修（溶接や当て板補修等）は、補修効果、補修費および施工時間の面で長所、短所がある。場合によっては交通規制を伴うため簡易な補修・補強方法が望まれる。疲労き裂近傍の母材を叩いて鋼材表面を塑性変形させ、き裂を閉口させることでき裂の進展を停留、あるいは遅延させて疲労寿命の延命化を図る工法として、衝撃き裂閉口処理（impact crack closure retrofit treatment, ICR 処理）が開発された。

本論文では、ICR 処理の概要および ICR 処理によってもたらせる疲労寿命の延命効果について、破壊力学からの考察、疲労試験および実橋梁を対象とした施工試験を紹介する。また、実施工に ICR 処理が適用されおり、事前に半日程度の講習会（座学・実技）を実施している。そこでは、ICR 処理の基礎知識、品質管理、施工方法、留意点を説明し、試験体を用いた実技訓練を行っており、その内容についても紹介する。

2. ICR 処理の概要

ICR 処理に用いる主な工具は、図-1 に示すフラックスチッパーおよび小型コンプレッサである。市販のタガネの先端を角が丸みを帯びた $4 \times 5\text{mm}$ 程度の平坦な面になるように加工し、き裂近傍の母材を打撃する。疲労き裂を閉口させる手順を図-2 に示す。溶接止端に発生した疲労き裂に対しては、図-2 (a) に示すように疲労き裂の主板部分を打撃して疲労き裂を閉口させる。溶接止端から離れて主板へ進展した疲労き裂に対しては、図-2 (b) に示すようにき裂の両側を打撃し、その後き裂直上を打撃することによりき裂を閉口させる。ICR 処理によって、き裂は表面から $1\sim 2\text{mm}$ 程度閉口する^り。

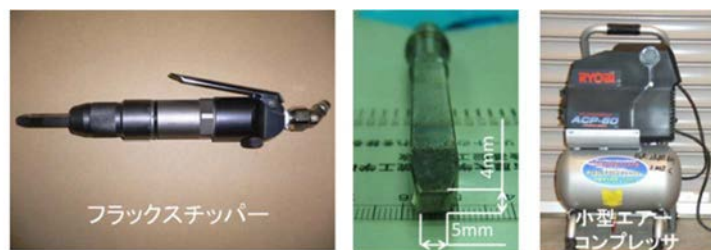
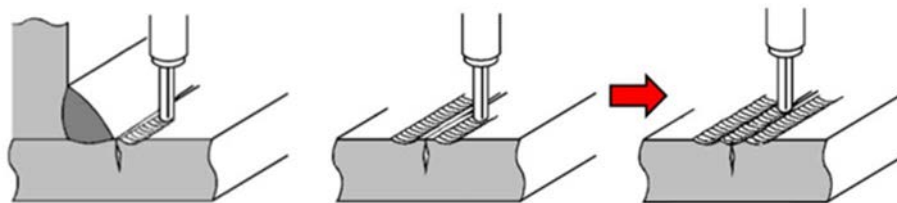


図-1 ICR 処理ツール



(a) 溶接止端き裂への ICR 処理

(b) 主板に進展したき裂への ICR 処理

図-2 ICR 処理の手順

キーワード ICR 処理, 疲労き裂, 補修・補強, 疲労寿命, 延命化, 疲労試験

連絡先 〒460-0003 名古屋市中区錦 1-8-11DP スクエア錦 9F 技術開発部 長寿命化推進課 TEL 052-212-4774

3. 破壊力学の基礎理論に基づいた ICR 処理の効果の評価

(1) 破壊力学による疲労き裂進展の解析

破壊力学を用いた疲労き裂進展のモデルは、疲労き裂先端の力学的特性である応力拡大係数範囲 $\Delta K(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ が疲労き裂進展速度のパラメータとなる(以下、 ΔK と示す)。すなわち、疲労き裂進展速度 $da/dN(\text{m/cycle})$ は、式(1)で示される^{2),3)}。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (m \cong 3) \quad (1)$$

ここで、 C と m は材料定数で、鋼材では m は 3 に近い値となる。また、 ΔK_{th} は、下限界応力拡大係数範囲で、応力拡大係数範囲が小さい領域では疲労き裂が進展しなくなり、そのしき値である⁴⁾。 ΔK は、式(2)で表現される。

$$\Delta K = F \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta \sigma$ は応力範囲(MPa)、 a はき裂長さ(m)、 F は部材の形状やき裂の形によって変わる係数で、遠方に応力 σ が作用する無限板に長さ $2a$ のき裂がある場合の Griffith crack (図-3 (b)) との比を示す。式(2)を式(1)に代入した微分方程式を解くか、式を変換して積分することで、疲労き裂進展寿命 N_p を求める。 ΔK が小さくなるとその 3 乗に逆比例して疲労き裂進展速度が遅くなり、結果的に疲労き裂進展寿命が長くなる。また、何らかの方法で ΔK を小さくして ΔK_{th} 以下にできれば、その疲労き裂を停留させることが可能になる。

(2) 疲労き裂に ICR 処理する効果の試算

破壊力学の基礎理論から、荷重によってき裂が開閉しない状況をつくると、疲労き裂の進展を遅延、あるいは、停留させることが可能となる^{2),3)}。図-3 に示すように板の端部からのき裂長さを a とすると内部のき裂は $2a$ と表される。ICR 処理により表面から 1~2mm き裂が開閉するので、き裂長さは内部のき裂の状態のようになる。すなわち、ICR 処理後のき裂長さは、 $a \cong 2a'$ と仮定することができる。

ICR 処理によって、表面のき裂が開閉した場合の応力拡大係数を ΔK_{ICR} とすると、 ΔK に対する ΔK_{ICR} の比は、式(3)のように約 0.7 倍となる。疲労き裂進展速度は、その 3 乗に逆比例して遅くなり、結果として疲労寿命は、ICR 処理前に比べて 3 倍程度 ($1/0.7^3$) の疲労寿命が向上すると試算される。

$$\frac{\Delta K_{ICR}}{\Delta K} = \frac{F \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{2}}}{F \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \cong 0.7 \quad (3)$$

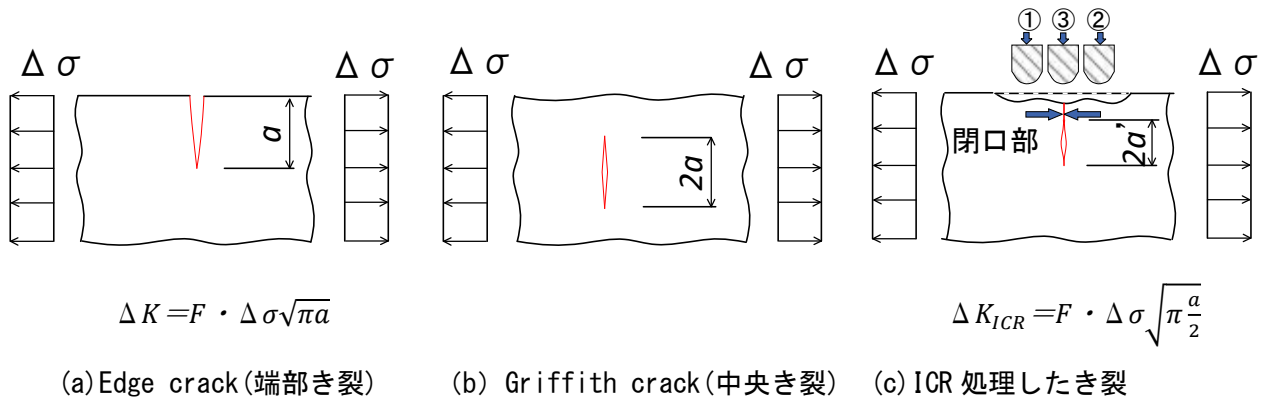


図-3 き裂の定義と ICR 処理後のモデル

4. 面外ガセットの試験体を用いた疲労試験による ICR 処理の効果

(1) 疲労試験の概要

鋼床版の垂直補剛材直上付近は、大型車の繰返し通行により図-4(a)に示すような疲労き裂が発生している。これまでに、図-4(b)に示す面外ガセットの試験体を用いた板曲げ疲労試験を行い、き裂が進展した段階で ICR 処理を行った場合の疲労寿命の延命効果を確認している¹⁾。き裂が図-4(c)に示すように回し溶接止端から離れる段階を N_b 、溶接止端から平板にき裂が 10mm 進展した段階を N_{10} として ICR 処理を行った。疲労試験は、き裂が溶接止端から 30mm 進展した段階あるいは試験体の裏面からき裂が発生した段階を N_f として終了した。疲労き裂の発生と進展状況に応じて疲労試験機を停止するため、試験体表面に $\phi 0.04\text{mm}$ の銅線を貼付けた。

(2) 疲労試験の結果

ICR 処理を行わない試験体 (as-welded) および疲労き裂が N_b に達した段階で ICR 処理を行った試験体における結果を図-5(a)に示す。as-welded では、疲労強度等級は JSSC⁴⁾ の E 等級であったが、 $N_b + \text{ICR}$ 処理した試験体では、C 等級程度と疲労強度等級が向上している。また、疲労き裂が N_{10} に達した段階で ICR 処理を行った結果を図-5(b)に示す。as-welded の試験体では、疲労強度等級が E 等級に対し ICR 処理後は、C 等級以上疲労強度等級が向上している。疲労強度等級が 1 等級向上すれば疲労寿命は約 2 倍、2 等級向上すれば約 4 倍の疲労寿命となることから、ICR 処理による疲労寿命の大幅な延命効果が得られる。

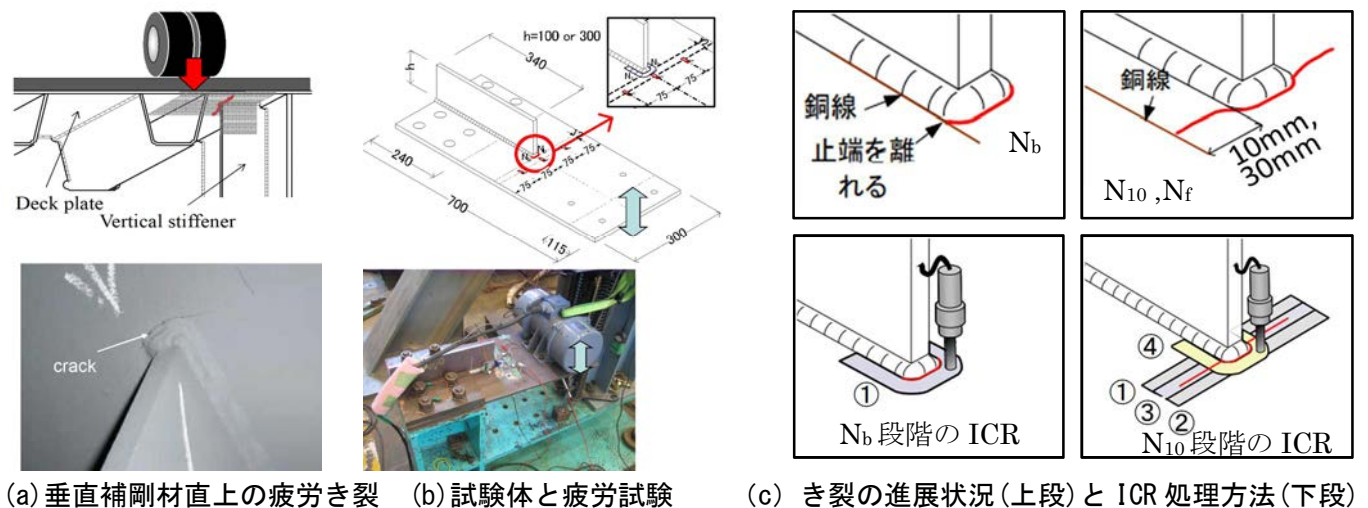
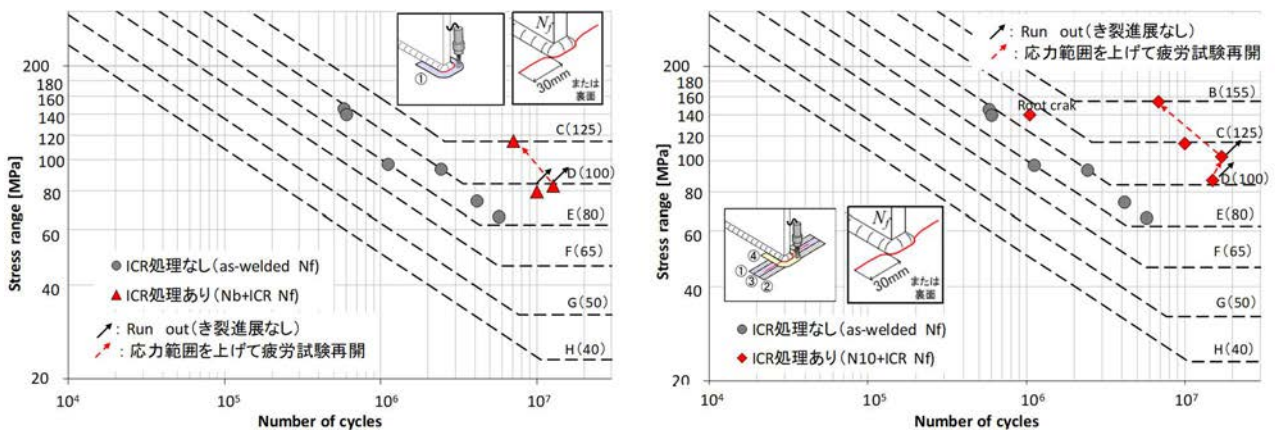


図-4 垂直補剛材上端をモデル化した面外ガセットの疲労試験



(a) 疲労き裂 (N_b) 段階における ICR 処理の効果 (b) 疲労き裂 (N_{10}) の段階における ICR 処理の効果

図-5 面外ガセットを用いた ICR 処理の疲労試験結果

5. 実橋梁を対象とした ICR 処理の施工試験

(1) 計測概要

鋼床版を対象に疲労き裂箇所にて ICR 処理の前後でひずみ計測を行い、大型車が通過した際のひずみ波形を確認し、その効果を確認している⁵⁾。対象橋梁は、3 径間連続鋼床版箱桁橋であり、その断面図を図-6 に示す。輪荷重が通過するデッキプレートと垂直補剛材直上の溶接部で疲労き裂が数多く発生していた。このき裂に対しては、疲労き裂周辺の応力範囲を低減するため、垂直補剛材上端に半円孔が設けられている。本橋梁の疲労き裂は、補修せず、将来的に SFRC 舗装することで疲労き裂の補修・補強対策としている。ひずみ計測は、き裂 N_{10} に対して ICR 処理の前後でひずみ計測を実施した。また、き裂の有無による影響を確認するため、同一車線上の 15m 程度離れたき裂がない箇所(as-welded)でも計測を行った。ひずみゲージは、垂直補剛材上端の溶接止端から 12mm 離れた位置に貼付した。

(2) 計測結果

as-welded のケースでは、図-7 の黒線で示すように前輪が通過する際に引張ひずみ、後輪が通過する際には圧縮ひずみが発生していた。き裂が N_{10} 程度まで進行していたケースでは、前輪および後輪が通過する際に引張ひずみが発生していた(青線)。ICR 処理後は、as-welded と同様な波形(赤線)が生じていた。つまり、ICR 処理によってき裂が閉口し、き裂が発生していない場合と同程度まで回復していることが確認できる。

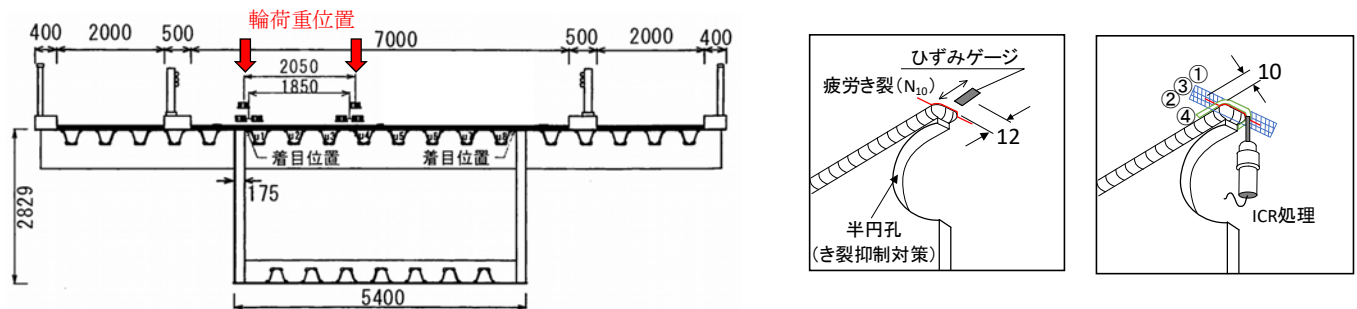


図-6 対象橋梁の断面図とき裂箇所の測定概要

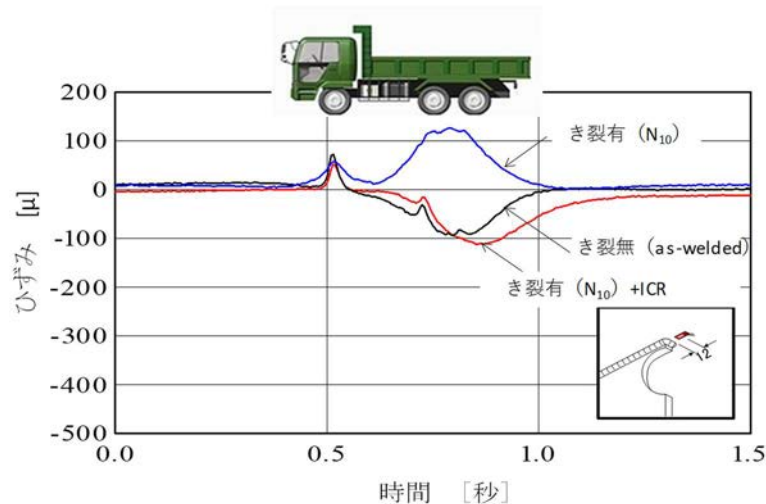


図-7 ICR 処理の前後で 3 軸トラックによって生じるひずみ波形

6. ICR 処理の施工指導

(1) 座学による講習会

ICR 処理は、他の疲労き裂補修工法に比べて容易に施工ができる。ただし、ICR 処理が適切に施工できていないと延命効果は得られない。そのため、座学では、ICR 処理を行う施工会社と作業員を対象に ICR 処理の原理や概要、品質管理、施工方法、留意点について説明している。

品質管理では、以下の3点を重点的に説明している。1) ICR 処理によるへこみ量を 0.1mm 以上確保する。これは、へこみ量が 0.1mm 以上であれば、鋼材の降伏強度の 80% 程度の圧縮残留応力が導入されているためである⁶⁾。2) ICR 処理面の出来形形状（外観）の確認。打撃面が写真-1(a)のように滑らかな表面に仕上げる。ただし、写真-1(b)のようにたとえうろこ状になっても、再度 ICR 処理を行うことである程度平坦になるように施工することで、均一に圧縮残留応力を導入できる。3) ICR 処理によるき裂の閉口確認。ICR 処理は、表面のき裂は閉口するが内部のき裂までは閉口していない。磁粉探傷試験（MT）は、内部のき裂に対して、写真-2(a)のように指示模様がでる場合がある。このため、浸透探傷試験（PT）を行い、写真-2(b)のようにき裂が閉口しているか確認することが重要である。ただし、PT では、溶接止端の打撃した溝に探傷液が浸透する場合があるため、注意が必要である。また、ICR 処理の施工では、図-9 に示すように打ち方の施工手順や ICR 処理の施工範囲および留意点について指導している。

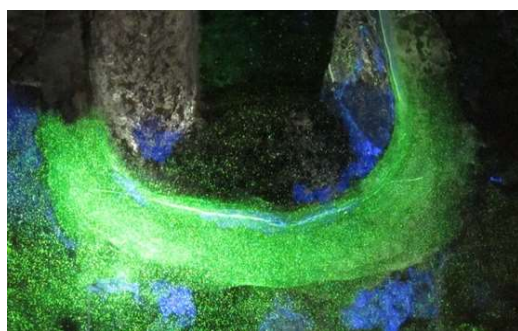


(a) 良好な ICR 処理表面



(b) うろこ状の ICR 処理表面

写真-1 ICR 処理した鋼材表面の状況



(a) 磁粉探傷試験(MT)の状況



(b) 浸透探傷試験(PT)の状況

写真-2 ICR 処理したき裂の閉口確認

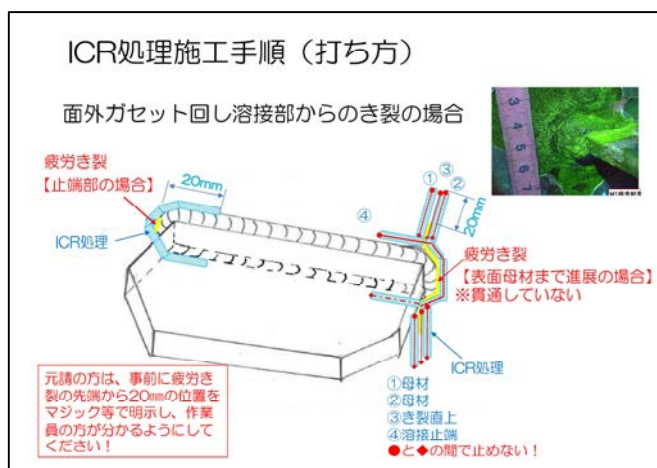
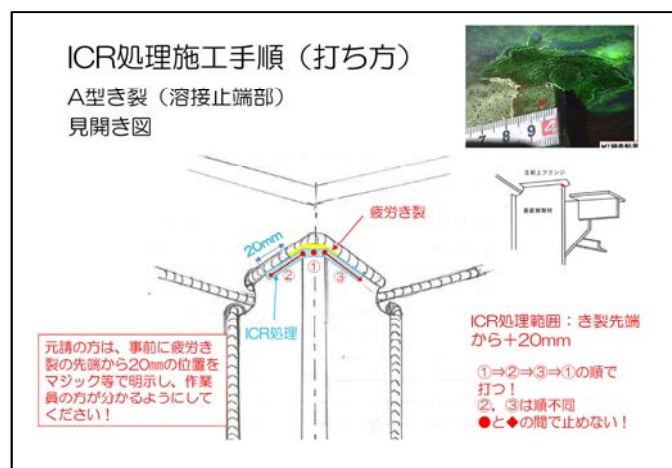


図-9 ICR 処理の施工手順の一例

(2) 実技による講習会

実技による講習会は、実際に ICR 処理を施工する作業員を中心に施工指導を行っている。まず、写真-3 (a) に示す平板を用いて施工での留意点を意識しながら、所定のへこみ量や出来形形状（外観）になるまで訓練する。平板にき裂を模擬した切込みを入れた箇所では、切込みの両側を叩き、最後にき裂直上を叩く訓練を行い、ICR 処理によるき裂の閉口を体験する。次に、写真-3 (b) に示す面外ガセットの溶接接手形状を模擬した試験体を用いて溶接部への ICR 処理の施工性を確認している。なお、実技による講習会の最後に、作業員一人一人が ICR 処理の確認試験（へこみ量と外観確認）を実施することで、一定の品質を確保できる取り組みを行っている。



(a) 平板を用いた ICR 処理 (b) 面外ガセットを用いた ICR 処理 (c) ICR 処理部の拡大写真

写真-3 平板および面外ガセットの試験体による実技指導

7. まとめ

- 1) 比較的小さな疲労き裂に対して、簡易な補修・補強方法として ICR 処理工法を開発した。これは、疲労き裂近傍の母材を叩いて鋼材表面を塑性変形させ、き裂を閉口させることでき裂の進展を停留、あるいは遅延させて疲労寿命の延命化を図る工法である。
- 2) ICR 処理による効果は、破壊力学の基礎理論に基づいた考察、面外ガセットの試験体を用いた疲労試験で確認した。さらに、実橋梁を対象とした ICR 処理の施工試験により、疲労寿命の延命化を確認した。
- 3) ICR 処理は、他の疲労き裂補修工法に比べて容易に施工ができる反面、ICR 処理が適切でないとその効果は得られない。そのため、講習会では、ICR 処理の原理や施工方法、品質管理や留意点等を指導している。また、試験体を用いた ICR 処理の訓練を行うことで、一定の品質を確保できる取り組みを行っている。

参考論文

- 1) 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接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.
- 2) 山田健太郎，石川敏之：破壊力学を用いた ICR 処理の延命効果の予測手法，構造工学論文集，Vol.63 A，pp.659-667，2017.3.
- 3) 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.961-965，2009.11.
- 4) 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～，pp.21-88，2014.3
- 5) 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.351-358，2009.11.
- 6) 米村大和，竹市雅人，中尾健太郎，瀬谷千恵：鋼床版の垂直補剛材の疲労き裂に対して行う ICR 処理の品質管理基準の検討，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，I-552，pp.1103-1104，2013.9