

疲労き裂の補修・補強に用いる ICR 処理の破壊力学的考察

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）正会員 ○山田 健太郎

1. 概要

鋼道路橋や照明柱、標識柱などの溶接継手部に、繰返し荷重による疲労き裂が発生しており、溶接継手の疲労強度向上法の検討や疲労き裂対策が喫緊の課題となっている。疲労き裂対策のうち、発生した疲労き裂の補修・補強方法として、ICR 処理が開発された^{1,2,3,4)}。この方法では、疲労き裂の表面近傍をエアーツールで叩き、鋼材表面を塑性変形させることでき裂を閉口させる。作用荷重によって疲労き裂が開口しない状況であれば、破壊力学で定義されるき裂先端の応力拡大係数範囲 ΔK が小さくなり、疲労き裂進展が遅延されるため、疲労寿命が向上する。この効果は、疲労試験で確認され、実橋での適用も広がっている。

ICR 処理のメカニズムは、これまで2次元表面き裂で説明されてきた。ここでは、溶接継手に発生する3次元表面き裂に ICR 処理した場合の ΔK の考え方を考察し、延命効果を簡便に推定する手法を提案する。

2. ICR 処理の効果確認のための実験とメカニズム

ICR 処理の効果は、①ビードオンプレート¹⁾、②面外ガセット溶接継手²⁾、③T形継手³⁾、④すみ肉溶接継手³⁾、などを用いて、板曲げ疲労試験で確認されてきた。また、引張繰返し荷重下では、高張力鋼の桁疲労試験で面外ガセットに発生したき裂に適用した事例がある。また、実橋では鋼床版デッキプレートに垂直補剛材が溶接された部位に発生したき裂に対して試行的に適用してきた⁴⁾。

ICR 処理の効果は、これまで図1に示す2次元のき裂、すなわち edge き裂を用いて説明されてきた。すなわち、き裂の表面を叩いて閉口させ、作用荷重によってき裂が開口しないと、このき裂は内部き裂とみなすことができる。これは、あたかもき裂長が $1/2$ になったことと同義であり、き裂先端の ΔK が小さくなる。 ΔK が小さくなると、疲労き裂進展速度も小さくなり、結果的に延命効果が発揮される。

3. 3次元なきき裂への適用と考え方

溶接継手に発生する疲労き裂は、3次元き裂となる。たとえば、面外ガセットの端部やすみ肉溶接止端に発生する半だ円表面き裂、である。図2に、板曲げと引張を受ける面外ガセット溶接継手の典型的な疲労破面を示す。ICR 処理の効果の確認実験では、主に板曲げ疲労試験を行ってきた。ここでは、板曲げや引張荷重を受ける面外ガセット溶接継手に発生する疲労き裂に ICR 処理を実施した場合の ΔK の簡便な考え方を示す。

(1) 板曲げの場合：板曲げ疲労試験を行うと、面外ガセットのまわしすみ肉溶接止端に疲労き裂が発生する。板表面では、まわし溶接止端に沿って進展した後、溶接止端から離れる方向に進展する。深さ方向のき裂進展はこの段階では見えないが、疲労破面を見ると、疲労き裂進展がある深さで遅くなっていることが分かる。板曲げによって、応力範囲が小さくなるのと、き裂の進展方向が変わるのがその理由である。

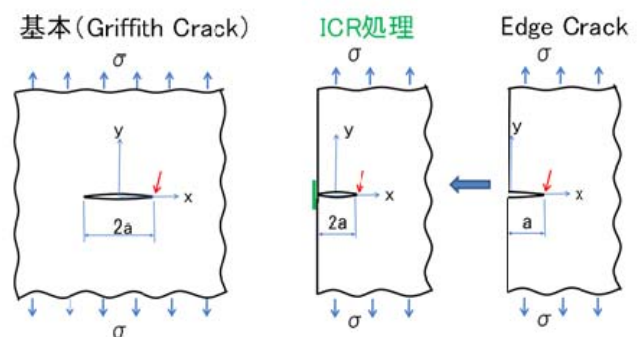


図1 2次元のき裂による ICR 処理の効果の説明

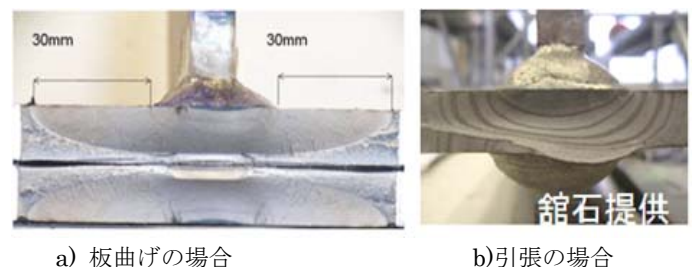


図2 面外ガセット試験体の疲労破面の例

キーワード 溶接継手、疲労き裂、補修、延命化、破壊力学

連絡先 〒460-0003 名古屋市中区錦 1-8-11 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株） TEL052-212-4577

ICR 処理では、まわし溶接止端に沿ったき裂は、まわし溶接に沿って叩く。また、止端から離れて平板部に進展したき裂は、き裂の両側を叩いて閉口させる²⁾。図3には、ICR 処理した試験体の破面を示す。止端から 10mm 離れたき裂を発生させた後に ICR 処理し、その後 3,000 万回の繰返し荷重を載荷したが疲労き裂が進展しなかった。そこで、応力範囲を 1.5 倍に増加したところ、128 万回で裏面からのき裂によって破断した。破面には、ICR 処理で停止した内部のき裂の縁からも、き裂の進展が見える。

半だ円形表面き裂の表面を閉口させた場合、図4に示す板内部に存在するだ円形き裂としてモデル化できる。き裂が板曲げ応力を受ける場合、応力勾配があるので ΔK の定義は複雑になる。この場合、表面の曲げ応力範囲（最大値）を受けるだ円形き裂と仮定すれば、定義が簡単で安全側の疲労寿命の予測が可能になる。基本的には、図4に示す深さ方向の A 点と幅方向の B 点の ΔK を求めて、半だ円形表面き裂の場合と比較して、疲労き裂の遅延効果を検討することになる。

(2) 引張の場合：面外ガセットでは、疲労き裂はガセット端のすみ肉溶接止端に発生し、溶接止端に沿って少し進展した後、溶接止端から離れて進展する。図2に示す破面は、ガセットが板の両面に溶接されている場合である。応力勾配がない分、板曲げの場合より深さ方向の進展が早い。

このき裂は図4に示すように、半だ円形表面き裂の A 点の ΔK と ICR 処理した内部のだ円形き裂の ΔK の比較によって、ICR 処理の効果の確認が可能になる。 ΔK の計算では、表面の長さ $2b$ (長軸) に対する深さ a (短軸の 1/2) が不明であるが、過去の実験で得られた疲労破面、たとえば図2が参考になる。

(3) 板厚を貫通したき裂の場合

図5には、片側に溶接された面外ガセット溶接継手のき裂のモデルを示す。板厚貫通前は、前述のようにモデル化できる。板厚貫通後は、裏面に現れた疲労き裂に対しても ICR 処理する。この場合、裏面のき裂が ICR 処理によって進展しなければ、このき裂を内部だ円形き裂と仮定して長軸方向の ΔK を計算し、その後の疲労き裂の遅延状況、すなわち ICR 処理の効果を推定できる。

4. まとめ

疲労き裂進展は、き裂先端の力学的な挙動、すなわち破壊力学で定義される応力拡大係数範囲 ΔK に左右される。ここでは、疲労き裂を閉口させ、作用荷重によって開口しないレベルにすることで補修・補強する ICR 処理の効果を、破壊力学を用いて検討する考え方を示した。3 次元的なき裂の ΔK に対しても、まずは簡単なモデルで検討することで、その効果を推定できる。

疲労き裂に対する破壊力学的な考察と適用例は、一時期に比べて少ないように思われる。疲労き裂の挙動を理解するためにも、もっと活用して良いと筆者は考えている。

参考文献 1) 山田、他：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. 4，2009. 2) 石川、他：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. 2，2010. 3) 山田、他：ICR 処理による疲労き裂の補修、溶接フォーラム 2012、溶接学会。4) 柿市、他：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，2009.

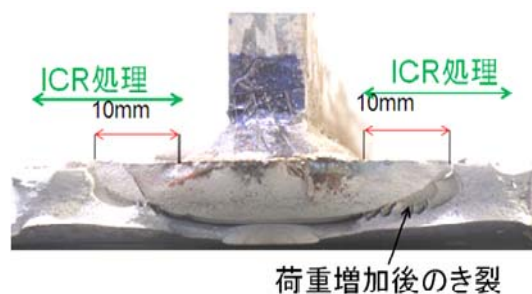


図3 ICR 処理の効果確認後の疲労破面

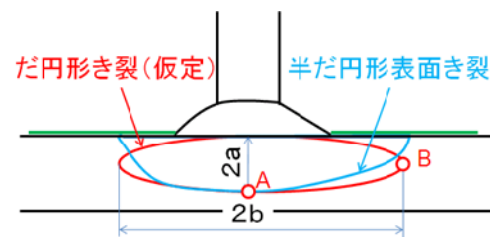
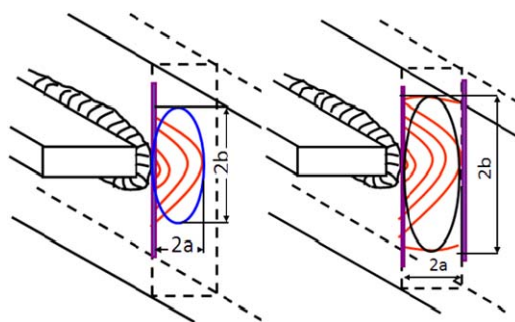


図4 閉口させた場合のき裂モデル



a) 板厚貫通前のき裂 b) 貫通き裂の ICR

図5 閉口させた貫通き裂のモデル