

ICR 処理を施した表面き裂の応力拡大係数の評価法

名古屋大学 正会員 ○清水 優, 名古屋大学 正会員 判治 剛
 名古屋大学 フェロー会員 館石 和雄, 名古屋大学 学生会員 鶴田 義隆

1. はじめに

近年、鋼材に発生したき裂の補修方法として、き裂近傍を打撃し塑性流動させることによって、き裂表面を閉口する ICR 処理工法が用いられ始めている。特に表面き裂に対して ICR 処理を行う場合には、片面のみからのアクセスで補修することができる。一方、ICR 処理はき裂表面を閉口することは可能であるが板厚内部にはき裂が残存する。ICR 処理後の板厚方向へのき裂の進展を評価するためには、板厚内部に残存したき裂前縁の応力拡大係数を評価する必要がある。本研究では ICR 処理後の表面き裂底の応力拡大係数の評価法を提案する。

2. 有限要素解析

汎用有限要素解析ソフト Abaqus ver.6.10 を用いて有限要素解析を行い、ICR 処理前後のき裂底の応力拡大係数を評価した。解析対象は図-1 に示すように、中央に長さ $2a$ 、深さ $d(=a)$ の表面き裂を有する平板(400mm×400mm)とし、対称性から 1/4 モデルとした。表-1 に示すように d/t が 0.17~0.75 となるように解析ケースを変化させた。鋼板の弾性係数およびポアソン比はそれぞれ 200kN/mm^2 および 0.3 とした。

ICR 処理部の長さ、幅、深さは過去に実測された値を参考にそれぞれ $2a+15$, 6, 2mm とした。ICR 処理部のみに伝導率 0.05W/mm 、熱膨張係数(x, y 方向のみ) $10.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を与え、 550°C まで加熱することによって ICR 処理部を熱膨張させて ICR 処理部近傍に圧縮残留応力を導入した。その後、一様引張あるいはき裂表面が引張側となるように曲げ荷重を与え、き裂底の応力拡大係数を求めた。

3. ICR 処理後のき裂底の応力拡大係数

ICR 処理後に引張荷重を徐々に増加させるときの鋼板の公称応力とき裂底の応力拡大係数の関係の一例を図-2 に示す。ただし、この図には ICR 処理によってき裂底に発生する応力拡大係数は含まれていない。図-2 には、表面き裂ままのき裂底の応力拡大係数¹⁾と偏心荷重を受ける楕円状埋没き裂のき裂底の応力拡大係数²⁾も示している。●で示しているのは、ICR 処理によって閉口されたき裂面が再開する点である。このき裂が再開するときの公称応力は板厚やき裂サイズによって変化する。

図-2 より、ICR 処理後のき裂底の応力拡大係数は公称応力 400N/mm^2 程度までは埋没き裂のき裂底のそれと同等まで低減していることがわかる。一方、き裂再開後は表面き裂ままのき裂底の応力拡大係数と平行になっている。

表-1 解析ケース

Case	板厚 t (mm)	き裂長 $2a$ (mm)	き裂深さ d (mm)	d/t
t6-sc-1	6	3	1.5	0.25
t6-sc-2		6	3	0.5
t6-sc-3		9	4.5	0.75
t12-sc-1	12	6	3	0.25
t12-sc-2		12	6	0.5
t12-sc-3		18	9	0.75
t18-sc-1	18	6	3	0.17
t18-sc-2		9	4.5	0.25
t18-sc-3		12	6	0.33
t18-sc-4		18	9	0.5
t18-sc-5		24	12	0.67
t18-sc-6		27	13.5	0.75
t24-sc-1	24	12	6	0.25
t24-sc-2		24	12	0.5
t24-sc-3		36	18	0.75

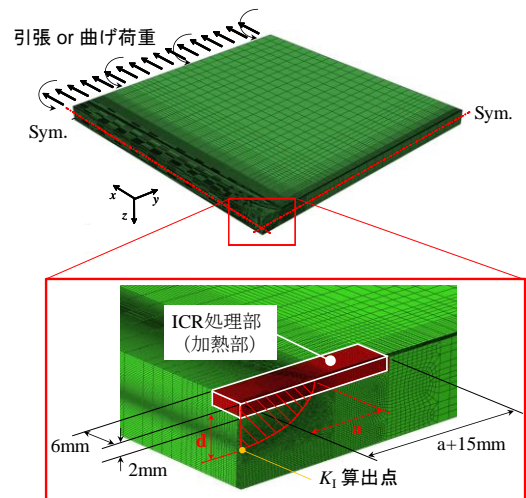


図-1 解析モデル

キーワード ICR 処理, 表面き裂, 応力拡大係数, 再開, 埋没き裂

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学部 9 号館 6 階 627 号室 TEL:052-789-4514

これらより、ICR 処理後のき裂底の応力拡大係数は、き裂閉口時は埋没き裂の式、き裂再開後は表面き裂の式から算出できる。

4. 板厚およびき裂の寸法と ICR 処理後の応力拡大係数の関係

ICR 処理によってき裂が閉口している場合、応力拡大係数がどの程度低減するかを板厚およびき裂サイズをパラメータとして検討した。図-3 は表面き裂ままのき裂底の応力拡大係数に対する ICR 処理後のき裂底の応力拡大係数の比を示している。図-3(a)より、引張荷重を受ける場合、同じ板厚であればき裂深さが小さいほど応力拡大係数範囲は大きく低減しており、き裂が小さいうちに ICR 処理を行うとき裂進展の遅延効果が高いことが明らかである。また、同サイズのき裂で比較した場合、板厚が小さい方が応力拡大係数範囲は大きく低減している。図-3(b)に示す曲げ荷重では、全体的に引張荷重よりも応力拡大係数範囲が低減しており、き裂進展の遅延効果が得られやすいと考えられる。また、板厚による応力拡大係数の違いが引張荷重よりも顕著になっている。ただし、き裂深さが板厚の半分より大きい場合には ICR 処理前の段階から応力拡大係数範囲が小さいため、ICR 処理を施しても応力拡大係数範囲はあまり低減していない。

5. き裂が再開する時の公称応力の推定式

図-2 で示したように、公称応力がある値より大きくなると ICR 処理によって閉口されたき裂が再開する。また、き裂が再開する時の公称応力は板厚やき裂のサイズによって異なる。全ての解析ケースに対してき裂が再開するときの公称応力を求め、回帰分析によって板厚やき裂サイズからき裂が開く公称応力 $\sigma_{n,op}$ の推定式を導いた。

$$\sigma_{n,op} = \begin{cases} e^{4.985} \cdot (d'/t)^{0.581} \cdot (a/t)^{-0.3610} & (\text{for tension}) \\ e^{5.458} \cdot (d'/t)^{0.485} \cdot (a/t)^{-0.262} & (\text{for bending}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 d' はき裂深さ d から ICR 処理によって閉口された深さを引いた値である。図-4 に式(1)の推定式および有限要素解析から求めたき裂が再開する時の公称応力の関係を示している。限られた解析ケースではあるが、推定式(1)によって、ある程度の精度でき裂が再開する公称応力を求められている。ただし、引張荷重、曲げ荷重ともに板厚によって推定式の精度に違いが見られるため、推定式(1)の改善が今後の課題である。

謝辞：本研究は国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(代表：館石和雄)によるものである。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Newman, J.C. and Raju, I.S.: Stress-intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads, NASA Technical Memorandum 85793, 1984.
- 2) 日本鋼構造協会(WES): 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例一 (2012年改定版), 技報堂出版.2012.

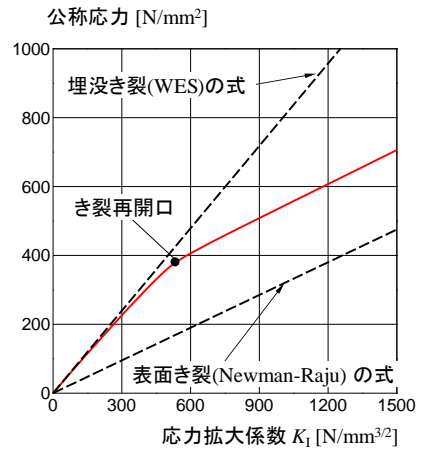
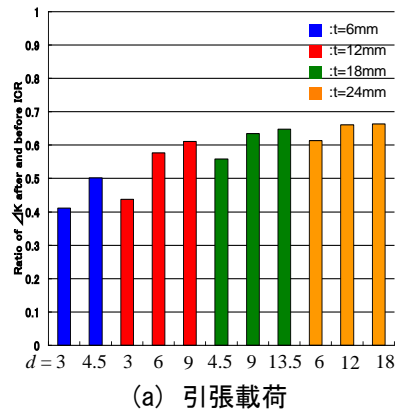
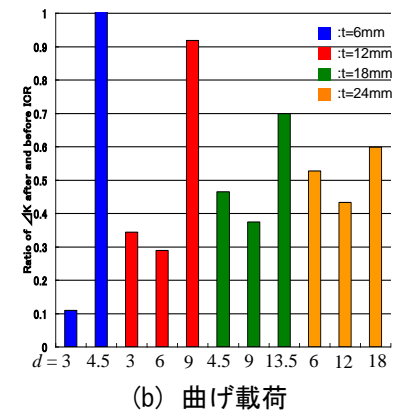


図-2 ICR 処理後の応力拡大係数

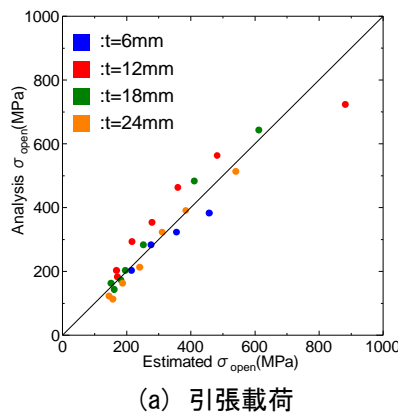


(a) 引張荷重

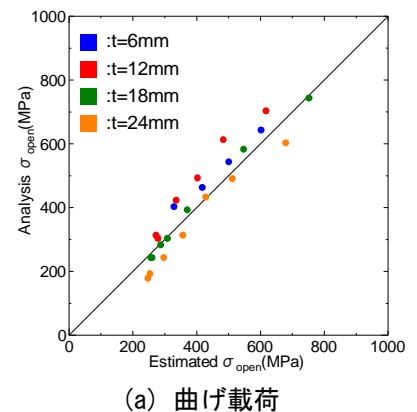


(b) 曲げ荷重

図-3 表面き裂ままに対する 応力拡大係数の比



(a) 引張荷重



(a) 曲げ荷重

図-4 推定式と解析値の関係