

フェーズドアレイ超音波探傷を用いた残存き裂の再進展性評価に関する試み

岐阜大学大学院 学生会員 ○小原 健司, 岐阜大学 正会員 木下 幸治
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 正会員 納土 武久, 小塚 正博

1. はじめに

我が国の鋼道路橋において、2000 年以降、鋼床版や鋼製橋脚の溶接継手部に疲労き裂が検出されている¹⁾。中でも、微小な疲労き裂は数多く存在しており、今後、重大な疲労損傷を招く可能性が懸念されるため、このような微小き裂の内にき裂の無害化あるいはき裂進展の抑制を図る手法の開発が望まれている。このような課題に対し、近年では、き裂近傍に塑性流動を生じさせ、き裂表面を閉口させるき裂閉口処理と呼ばれる手法の適用が検討されている。この処理手法による疲労寿命延命効果については、母材や溶接継手を対象として疲労試験が実施されており、一定以上の疲労寿命延命効果が得られることが示唆されている^{2),3)}。一方で、き裂表面閉口後も鋼板内部にき裂が残存する可能性があり、き裂面に作用する応力によってはこの残存き裂が再進展することが懸念されている。このため、残存き裂の再進展性を非破壊的に評価する必要がある。

著者らは、これまでに曲げ荷重を受ける残存き裂に対する再進展メカニズムを明らかにするために、フェーズドアレイ超音波探傷を用いて残存き裂の開閉口挙動の検出を行ってきた⁴⁾。本概要では、引張荷重下での残存き裂の開閉口挙動結果を示した上で、応力拡大係数範囲を用いて、探傷結果で得られた開閉口挙動の証明を試みた。

2. 開閉口挙動試験概要

2.1. 試験体概要

図-1、図-2 に試験体形状、疲労試験状況を示す。本研究では面外ガセット試験体を用いて、引張荷重での疲労試験を実施し、溶接止端部に疲労き裂を発生させた。き裂の開口処理としては既往研究[4]と同様に表面き裂長さが回し溶接部全面まで進展した(Nb) 段階で ICR 処理を用いてき裂表面を閉口させた。なお、試験体は既往研究結果⁴⁾も含め表-1 に示すとおりである。

2.2. フェーズドアレイ超音波探傷

本試験では超音波探傷として、OLYMPUS 製の OmniScan sx、探触子には公称周波数が 5.0MHz のものを用いた。図-3 に開閉口挙動試験概要を示す。探傷方法としてはき裂表面を閉口後、静的に荷重載荷し、公称応力が 10MPa ごとにエコー高さの計測を行った。計測箇所については図中に示す 3 点とし、実橋梁への適用性も考慮して主板上面および主板下面からの探傷を行っている。

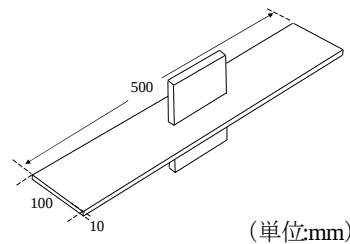


図-1 試験体形状

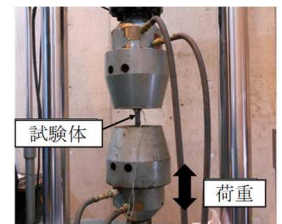
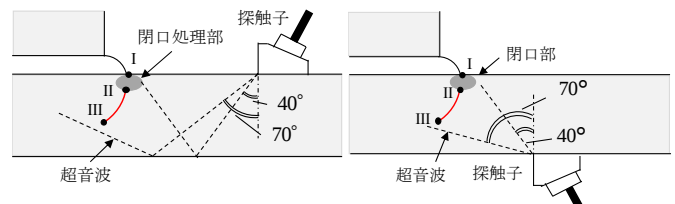


図-2 疲労試験状況

表-1 試験体一覧

試験体名	鋼種	表面き裂長さ	载荷荷重
ICR-SM490A-Tensile	SM490A	Nb	Tensile
ICR-SM490A-Bending	SM490A		Bending
ICR-SM570-Bending_1	SM570		Bending
ICR-SM570-Bending_2	SM570		Bending



I:閉口処理表面部, II:残存き裂上端部, III:残存き裂先端部

図-3 開閉口挙動試験概要

3. 開閉口挙動試験結果

図-4 に探傷結果を示す。図中にはこれまでの曲げ荷重下での開閉口挙動試験結果⁴⁾も併記している。図より、曲げ荷重下での試験結果と同様に公称応力の増加に伴って各端部のエコー高さが変動していることが確認できる。即ち、引張荷重を受ける残存き裂の開閉口挙動においてもエコー高さの変動を基に検出可能であると言える。加えて、引張荷重下での再進展メカニズムは曲げ荷重下と同様に、閉口処理部の再開口に先行して残存き裂先端部から開口する結果であった。一方、各端部の開閉口挙動を示す応力については、残存き裂先端部の開口応力は同程度であるものの、残存き裂上端部および閉口処理表面部の開口応力は曲げ荷重下と比べ早期に開口していることがわかる。これは、既往研究[5]で示されている曲げ荷重下と比べ軸荷重下での疲労寿命延命効果が低減する結果と一致している。

4. 応力拡大係数範囲による開閉口挙動結果の証明

本研究では、残存き裂先端部の応力拡大係数範囲を基に探傷結果より得られた開閉口挙動の証明を試みた。ここでは、閉口処理部が開口していない残存き裂を対象としており、その残存き裂の応力拡大係数範囲 ΔK については、残存き裂を埋没楕円き裂と仮定

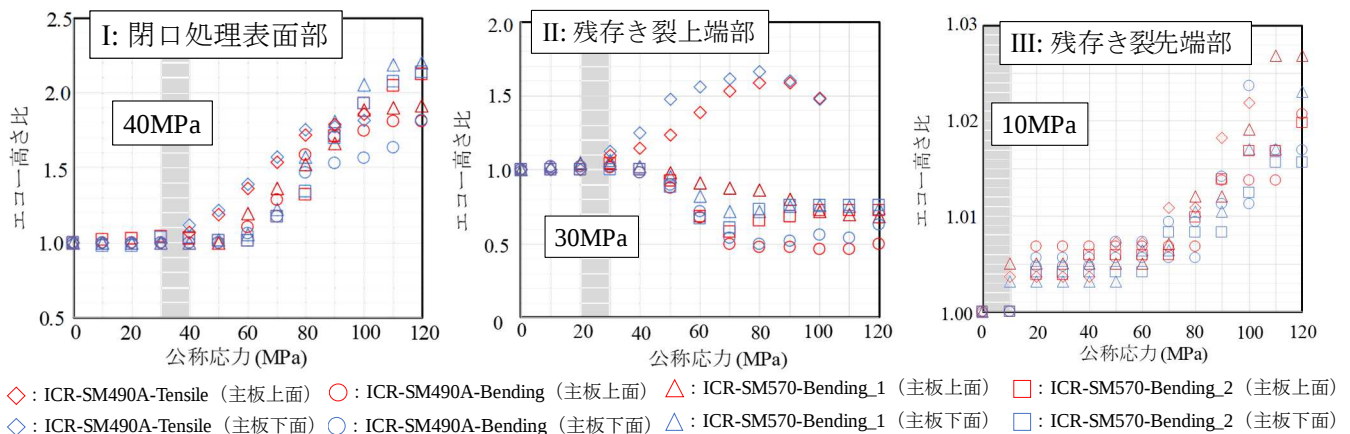


図-4 開閉口挙動試験結果

し、下式(1)に基づき算出した。

$$\Delta K = F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots\dots(1)$$

なお、補正係数は鋼構造物の疲労設計指針⁶⁾を参照し、 F_g はFEM解析を用いて、き裂が無い場合のき裂面に作用する応力分布を求め、き裂面に作用させた際の応力拡大係数の解より求めている。図-5、表-2に疲労試験結果、各試験体の残存き裂を示す。ここでは、修正パリス則(式(2))に基づく式(3)の条件下で残存き裂が再進展すると言えるため、鋼構造物の疲労設計指針⁶⁾に示されている下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を $91.71(\text{N}/\text{mm}^{2/3})$ と与え、残存き裂が再進展する際の公称応力範囲および開口応力を算出した。

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad \dots\dots(2)$$

$$\Delta K_{th} < \Delta K \quad \dots\dots(3)$$

その公称応力範囲および開口応力の算出値を表-2中に示す。この応力拡大係数範囲を基に得られた開口応力は探傷結果による開閉口挙動結果とよく一致しており、探傷結果の開閉口挙動は残存き裂の開口応力を捕らえられていると言える。

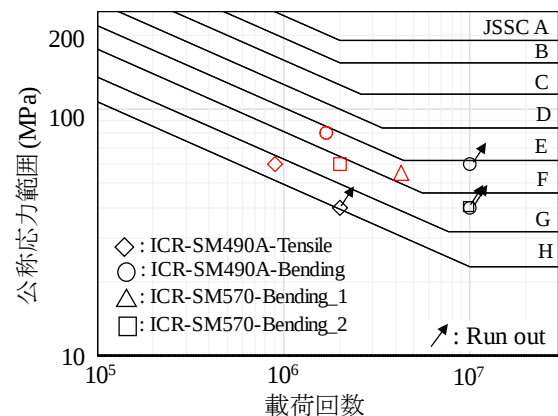


図-5 疲労試験結果

表-2 各試験体の残存き裂

	ICR-SM490A -Bending	ICR-SM570 -Bending_1	ICR-SM570 -Bending_2	ICR-SM490A -Tensile
き裂深さ (mm)	2.30	3.80	2.56	3.66
き裂幅 (mm)	24.00	26.84	15.60	13.68
公称応力範囲 (MPa)	60 80	- 55	40 60	40 60
応力拡大係数範囲に基づく残存き裂が進展する公称応力範囲 (MPa)	45	31	44	38
応力拡大係数範囲による開口応力 (MPa)	15~25	0~24	-4~16	2~22
探傷結果による開口応力 (MPa)	20	10	10	10

(※赤字は残存き裂が再進展した際の公称応力)

5. 結論

- ✓ フェーズドアレイ超音波探傷によるエコー高さの変動を基に軸荷重下においても、残存き裂の開閉口挙動を検出可能であり、再進展メカニズムは曲げ荷重下と同様に残存き裂先端部から開口挙動を示す結果が得られた。
- ✓ 残存き裂先端部の応力拡大係数範囲および疲労試験結果を基に算出した開口応力は探傷結果で開閉口挙動を示した際の公称応力とよく一致していることから、フェーズドアレイ超音波探傷により得られた開閉口挙動は残存き裂の開閉口挙動を正確に検出していることを証明した。

参考文献

- 1) 三木千壽, 坂野昌弘, 舘石和雄, 福岡良典: 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析, 土木学会論文集, 第392号, pp.403-410, 1988.4

- 2) 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.
- 3) Kinoshita K, Banno Y, Ono Y, Yamada S, Handa M: Fatigue Strength Improvement and Fatigue Crack Closure by Portable Needle-Peening Treatment on Welded Joints, International Journal of Steel Structures, pp.1-8, 2014.
- 4) 木下幸治, 小原健司, 納土武久, 小塚正博: 超音波探傷による閉口処理されたき裂の再開口メカニズムの把握, 鋼構造年次論文報告集, 第27巻, pp.772-777, 2019.11
- 5) 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.627-637, 2015.3
- 6) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 2012.