

## フェーズドアレイ超音波探傷を用いた閉口処理された残留き裂の再進展性評価

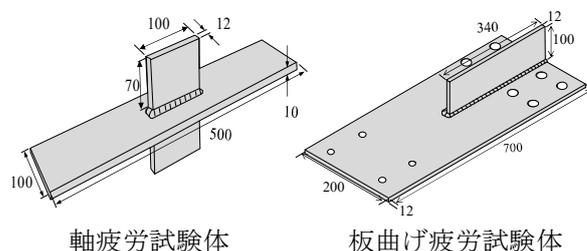
首都高速道路株式会社（研究当時，岐阜大学大学院） 正会員 ○小原 健司  
岐阜大学 正会員 木下 幸治

## 1. はじめに

我が国の鋼道路橋では，2000年以降，大型車輛の交通増加に伴い，鋼床版や鋼製橋脚の溶接継手部において疲労き裂が生じた事例が報告されてきている<sup>1)</sup>。中でも，き裂長さが数mm程度の微小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，微小き裂の内にき裂の無害化あるいはき裂進展の停留ないしは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補修工法の適用が検討されてきている。この補修工法による疲労寿命延命効果については，これまでに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ものの<sup>2)</sup>，き裂表面閉口後も鋼板内部にはき裂が残留しており，き裂面に作用する応力によって残留き裂が再進展し疲労寿命延命効果が低減する可能性が懸念されている。このため，残留き裂の再進展性を定量的に評価することが望まれており，残留き裂に生じる応力拡大係数範囲に基づいたき裂進展解析による評価が試みられている<sup>3)</sup>。しかしながら，閉口処理部が再開口しないといった仮定を踏まえた上でのき裂進展解析に留まっており，普遍的な残留き裂の再進展性の評価とまでは至っていない。このため，著者らは閉口処理部の再開口挙動を考慮した残留き裂の再進展性を定量的に評価する手立てとして，フェーズドアレイ超音波探傷により板曲げ荷重を受ける残留き裂に対し，き裂閉口挙動の検出を試み，その有用性を明らかにしてきた<sup>4)</sup>。本概要では新たに軸荷重を受ける残留き裂に対するき裂閉口挙動を非破壊的に検出することを試み，残留き裂のき裂閉口挙動を踏まえた応力拡大係数を基にき裂進展解析を実施し，残留き裂の再進展性評価を試みた。

## 2. フェーズドアレイ超音波探傷を用いた残留き裂のき裂閉口挙動の非破壊的検出

図-1に本試験で用いた試験体形状を示す。本試験では面外ガセット溶接継手試験体を対象とし，軸荷重下での疲労試験により溶接止端部に疲労き裂の導入を行った。また，き裂閉口処理としては表面き裂長さが回し溶接部全面まで進展した( $N_b$ )段階でICR処理を用いてき裂表面を閉口させた。試験体一覧は既往研究<sup>4)</sup>も含め表-1に示す通りである。図-2にフェーズドアレイ超音波探傷試験状況を示す。本検討では，フェーズドアレイ超音波探傷装置としてOmni Scan sx (OLYMPUS製)，探触子には公称周波数が5.0MHzのものを用いて探傷を行った。また，探傷方法としては図中に示すように，アレイ探触子を主板表面あるいは主板下面に固定させ，閉口処理表面部(I)，残留き裂上端部(II)，残留き裂先端部(III)の3箇所に対し，載荷荷重(公称応力)に伴うエコー高さの変動を計測した。図-3に各端部のエコー高さの計測結果を示す。図より，軸荷重を受ける残留き裂においても板曲げ荷重下の結果と同様に荷重の増加に伴いエコー高さの変動が確認できる。即ち，軸荷重

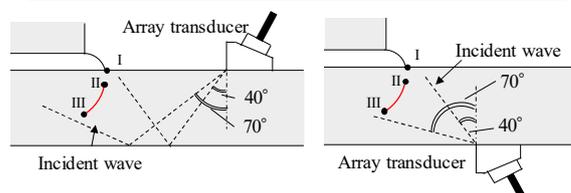


軸疲労試験体 板曲げ疲労試験体

図-1 試験体形状

表-1 試験体一覧

試験体名	鋼種	表面き裂長さ	載荷方法
ICR-SM490A-Axial	SM490A	$N_b$	Axial
ICR-SM490A-Bending			Bending
ICR-SM570-Bending 1	SM570		
ICR-SM570-Bending 2			



(a) 主板上面からの探傷 (b) 主板下面からの探傷

図-2 超音波探傷試験状況

を受ける残留き裂に対しても，エコー高さの変動を基にき裂閉口挙動を検出可能であると言える。また，既往研究<sup>5)</sup>と同様に，エコー高さが変動した後に一定に収束してくる付近でき裂閉口挙動が生じているものと定義し，各端部でき裂閉口挙動を整理した。その結果を表-2に示す。表より，軸荷重下と曲げ荷重下でき裂閉口挙動に顕著な差はなく，同様な公称応力下でき裂閉口挙動を生じていると言える。

## 3. き裂閉口挙動を考慮した残留き裂の再進展性の定量的評価

ここでは，2章で得られた残留き裂のき裂閉口挙動を踏まえ，残留き裂に生じる応力拡大係数範囲を基にき裂進展解析を実施し，残留き裂の再進展性の評価を試みた。本検討ではGriffithき裂に対し補正係数を乗じた下式(1)に基づき，残留き裂に生じる応力拡大係数範囲の算出を行った。

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

$F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g$ は補正係数， $\Delta \sigma$ は公称応力， $a$ は板厚方向のき裂長さである。ここでは，き裂閉口挙動結果に従って，残留き裂上端部が開閉口挙動を示さない公称応力下では埋没楕円き裂(図-4(a))，再開する公称応力下では表面半楕円き裂(図-4(b))と置換し，鋼構造物の疲労設計指針・同解説<sup>6)</sup>を参照してき裂形状の補正係数 $F_s$ ， $F_e$ ， $F_t$ を与えている。また，応力集中による補正係数 $F_g$ はFEM解析によりき裂が無い場合のき裂面に作用する応力分布を求め，き裂面にその応力分布を作用させた際の応力拡大係数の解より算出した。その上で，得られた応力拡大係数を基に下式

キーワード：残留き裂，き裂閉口挙動，フェーズドアレイ超音波探傷，き裂進展解析，再進展評価  
連絡先：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-4-1 TEL：03-3502-7311

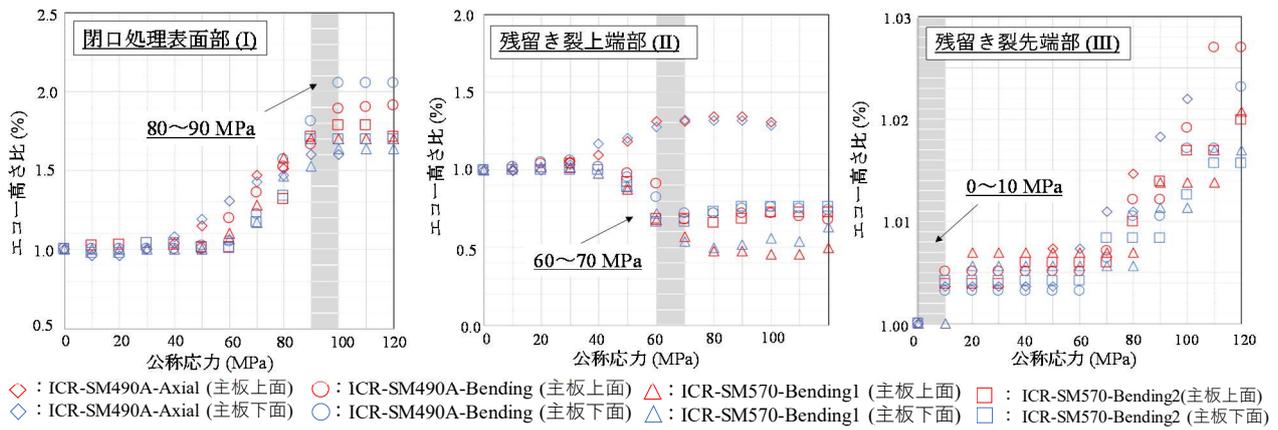


図-3 エコー高さ-公称応力

表-2 各試験体のき裂開閉口挙動結果

	ICR-SM490A-Axial	ICR-SM490A-Bending	ICR-SM570-Bending 1	ICR-SM570-Bending 2
閉口処理表面部 (I)	90~100MPa	90~100MPa	80~90MPa	80~90MPa
残留き裂上端部 (II)	50~60MPa	60~70MPa	70~80MPa	50~60MPa
残留き裂先端部 (III)	0~10 MPa	0~10 MPa	0~10 MPa	10~20 MPa

(2) の修正 Paris 則に従い、き裂進展解析を行った。

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

$da/dN$ は1サイクルごとのき裂進展量、 $C$ および $m$ は材料定数、 $\Delta K_{th}$ は下限界応力拡大係数範囲であり、鋼構造物の疲労設計指針・同解説<sup>6)</sup>に記されている平均設計曲線値を与えている。ここでは、任意の荷回数 $\Delta N$ を与えた際のき裂進展量 $\Delta d$ を求め、そのき裂進展量を加味したき裂形状を基に限界き裂長さ $a_f$ に達するまで繰り返し実施し、疲労寿命を求めた。尚、簡便にき裂進展計算を実施するために ICR 処理後は板厚深さ方向のみき裂進展するものと仮定し、限界き裂長さは板曲げ下では板厚の7割、軸荷重下では板厚のき裂長さとした。図-5にき裂進展計算結果を示す。また、同図には ICR 処理後の疲労試験結果を併記している。尚、表面き裂長さが閉口処理部を抜けた段階を破断時、板曲げ荷重下では1,000万回、軸荷重下では200万回達しても再進展しないものを疲労限として整理している。その結果、き裂進展解析により推定した疲労寿命曲線が疲労試験結果の疲労限および破断時を精度よく捉えられていることがわかる。これより、探傷結果による残留き裂のき裂開閉口挙動を考慮した残留き裂の応力拡大係数範囲を基に残留き裂の再進展性を評価できる可能性が示されたとと言える。

**結論**

- ✓ フェーズドアレイ超音波探傷を用いて軸荷重を受ける残留き裂の開閉口挙動を検出した結果、曲げ荷重下と同様にエコー高さの変動を基にき裂開閉口挙動を検出できることが確認できた。
- ✓ 探傷結果による残留き裂のき裂開閉口挙動を考慮した応力拡大係数範囲を基にき裂進展解析を行った結果、残留き裂の再進展性を定量的に評価可能であることが示された。

**謝辞** フェーズドアレイ超音波探傷試験の実施にあたり、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)の納土武久氏、小塚正博氏より多大なご協力を得た。ここに記して感謝の意を示します。

**参考文献**

1)三木ら：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文秀，第392号，pp.403-410，1988. 2)石川ら：ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き

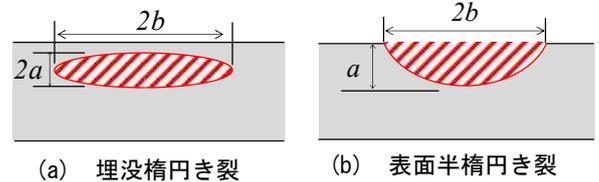


図-4 閉口処理された疲労き裂の置き換え

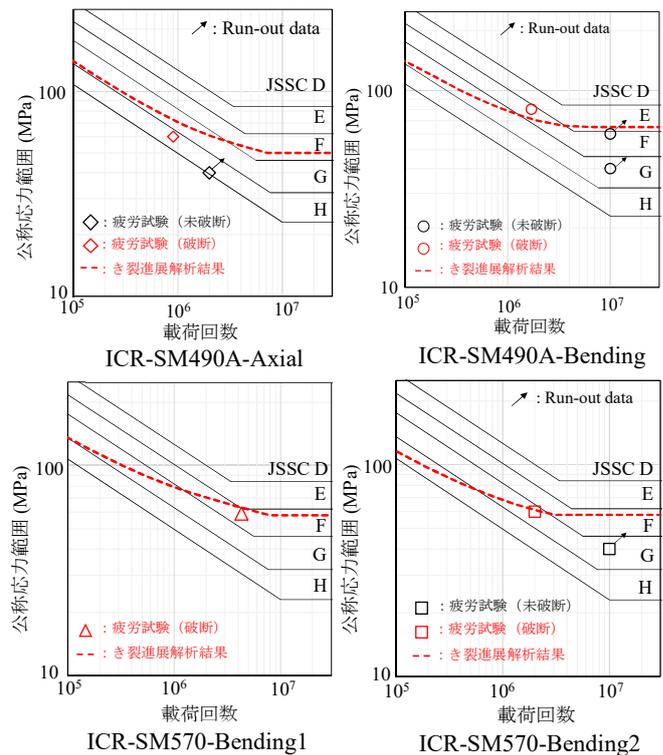


図-5 き裂進展計算結果

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 3)山田ら：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.63A, pp.659-667, 2017.3 4)木下ら：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，鋼構造年次論文集，Vol.27, pp.772-777, 2019.11 5)三木ら：超音波を用いた疲労亀裂の検出，構造工学論文集，Vol.33A, pp.383-391, 1987.3 6)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技術堂出版，2012.