

フェーズドアレイ超音波探傷を用いた閉口処理された疲労き裂の開閉口挙動の把握

岐阜大学 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

これまでに鋼道路橋の鋼床版や鋼製橋脚の溶接継手部において疲労き裂の発生事例が多数報告されている¹⁾。このため、近年では溶接継手部から発生する疲労き裂に対する補修方法についての検討が精力的に行われつつある。中でも、コスト面や施工性の観点から ICR 処理や PPP 処理といったき裂表面を閉口させることで疲労寿命の延命化を図るき裂閉口処理が着目されつつある。この処理の効果については平板や溶接継手を対象に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明らかにされつつある²⁾⁵⁾。しかしながら、現状では閉口処理されたき裂の再開口のメカニズムが不確かであること、き裂長さや作用する応力範囲によっては閉口されていないき裂先端からき裂が進展するといったことが懸念されるため、応急的な補修手法の一つとして分類されている。逆に言えば、閉口した疲労き裂の開閉口挙動を捉える非破壊的な技術を開発することができれば、応急的な補修方法から恒久的な補修方法へと移行することが可能になると考えられる。

一方で、閉口したき裂の開閉口挙動を検出可能な非破壊的な手法として、超音波探傷試験の適用が考えられる。これまでに、超音波探傷によるき裂の開閉口挙動の検出の試みが実施されてきており⁶⁾⁷⁾、近年では超音波探傷の入射角度をある範囲内で操作可能なフェーズドアレイ法を用いた実橋梁での疲労き裂の検出が進められてきている⁸⁾。そこで本研究では、閉口処理された疲労き裂の開閉口挙動を把握することを目的とし、フェーズドアレイ超音波探傷を用いて PPP 処理により閉口したき裂の開閉口挙動の検出を試みた。

2. 疲労き裂導入方法およびき裂閉口処理

本試験では図-1 に示す板曲げ疲労試験を用いて、面外ガセット試験体の溶接止端部にき裂の導入を行った。用いた試験体としては鋼材 SM490A であり、主板、付加板は板厚 12mm の鋼板である。溶接は CO₂ 半自動溶接である。疲労試験機は山田ら⁹⁾が開発した板曲げ振動疲労試験機を用いた。モータの回転振動のみでは応力比 $R=-1$ の両振り疲労試験になるが、この試験機では試験体の先端にばねを設け、ばねで試験体を押し下げた状態のまま疲労試験を行うことにより、応力比 R を制御している。公称応力には図に示すように、ガセット中央部の溶接止端から長手方向に 12mm の位置で幅中央から左右 50mm 離れた箇所の位置のひずみゲージ A, B の平均値とした。

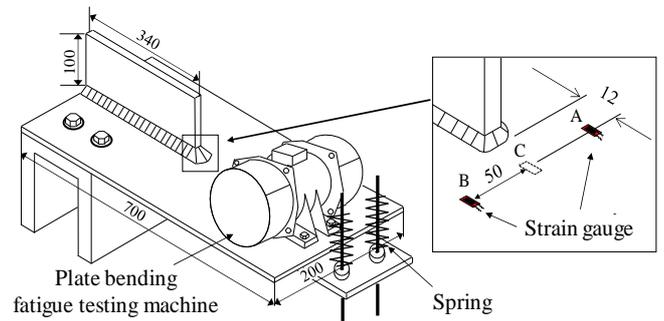


図-1 板曲げ疲労試験概要

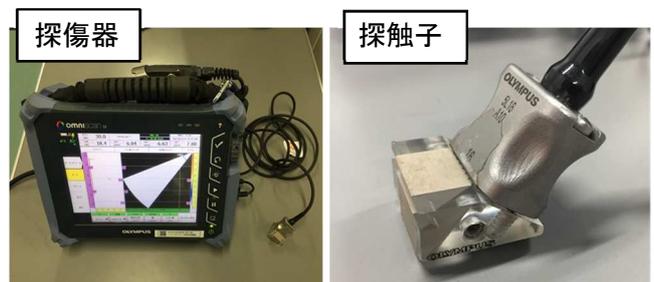


図-2 フェーズドアレイ超音波探傷装置

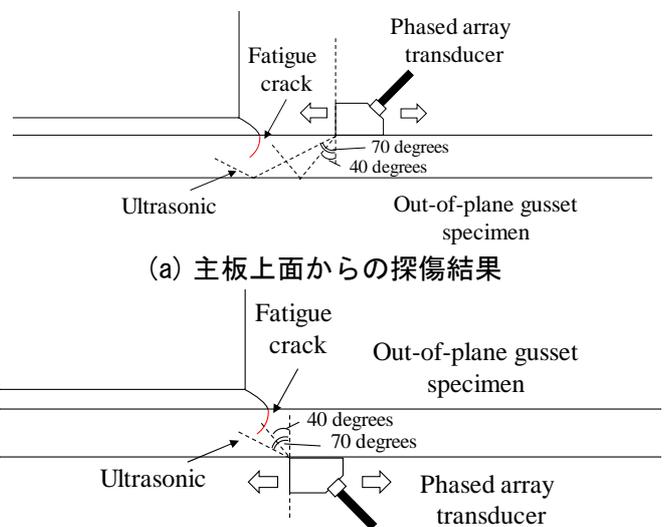


図-3 探傷方法

本試験では、公称応力範囲 $\Delta\sigma=80\text{MPa}$ 程度とし、応力比 $R=0$ の片振り引張疲労試験とした。き裂の閉口処理としては、疲労き裂が回し溶接部まで進展した N_b の段階で PPP 処理によりき裂表面の閉口させた。なお、浸透探傷試験を実施し、き裂表面が閉口処理されていることを確認している。

キーワード：フェーズドアレイ超音波探傷、開閉口挙動、き裂閉口処理

連絡先：〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1 TEL：058-293-2424

3. フェーズドアレイ超音波探傷方法

図-2 に本試験で用いたフェーズドアレイ超音波探傷装置を示す。探傷器は OLYMPUS 製 OmniScan sx を用いた。探触子の周波数 5.0MHz, 素子配列はリニア配列, 振動素子数は 16 素子, 素子のピッチは 0.6mm である。ウェッジは斜角接触用を用い, 入射角は 40~70° の範囲で操作可能である。本試験では, 同一平面で超音波ビームを扇状に移動させる走査であるセクターキャンを用いた。図-3 に探傷方法を示す。本試験では主板上面および主板下面からの検出精度を把握するために主板両面から探傷を実施している。なお, 主板表層からの直射法による探傷では, き裂形状が曲面を有していることからき裂先端部まで超音波を照射することが難しい。そのため, 主板上面からの探傷では, 図-3(a) に示すように超音波を主板下面で反射させて探傷を行う 1 回反射法を用いて探傷を行った¹⁰⁾。

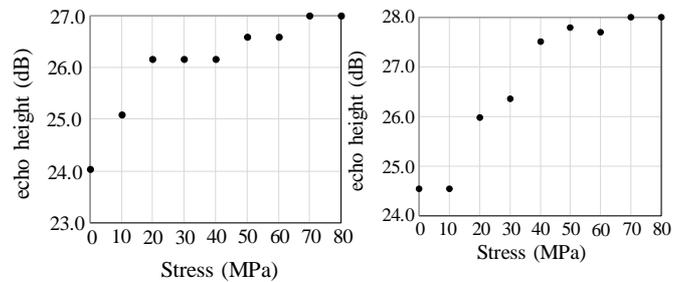
4. 探傷試験結果

図-4 にき裂閉口処理前の探傷結果を示す。探傷試験としては公称応力が 0MPa から 80MPa まで 10MPa ずつ载荷を行い, 各応力時のき裂先端部からの返信エコー高さの計測を行った。横軸には公称応力, 縦軸には返信エコー高さを示す。図より, 10~20MPa 付近で返信エコー高さが急激に上昇していることがわかる。このことから, 10~20MPa 付近でき裂が開いているといえる。これは, き裂面が閉口している場合は超音波が透過しやすくなるためエコー高さが小さくなり, き裂面が開いている場合は超音波が透過せずにそこで反射し返信エコー高さが大きくなることから, 超音波探傷によって開閉口挙動を捕らえることができていると考えられる。図-5, 6 に PPP 処理後の探傷結果を示す。ここでは, き裂先端部に加え, 閉口処理したき裂表面部の計測も併せて行った。これらの探傷結果より, 閉口処理された疲労き裂においても返信エコー高さの変化から開閉口挙動を判定可能であることがわかる。図-5 のき裂先端部の探傷結果では公称応力の増加, 即ち, 荷重が増加するにつれて返信エコー高さが大きくなる傾向が確認出来なかった。これはき裂表面の閉口処理により板厚方向のき裂長さが短くなったことより, き裂先端に作用する応力集中が小さくなったためだと考えられる。一方で, 図-6 よりき裂表面部では公称応力が増加するにつれて, 返信エコー高さも増大しており, 主板下面からの探傷では, 公称応力が 40~50MPa 付近で開閉口挙動を示していることが確認できる。これらの結果より, PPP 処理により閉口したき裂の再開は閉口した表面がき裂先端に先行して再開する結果が得られた。今後, 疲労試験により得られるき裂進展状況などから明らかにすることを考えている。

5. 結論

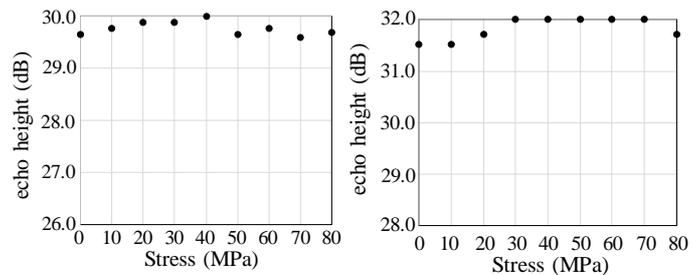
本研究によって得られた知見を以下に示す。

- ✓ PPP 処理により閉口されたき裂に対して, フェ



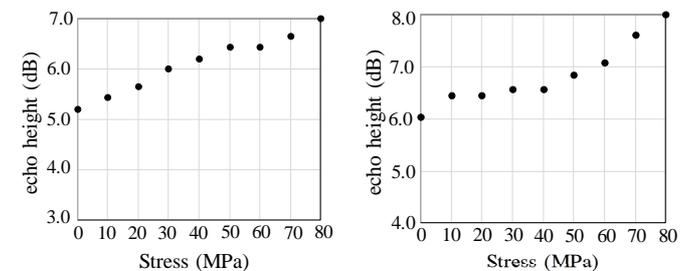
(a) 主板上面からの探傷 (b) 主板下面からの探傷

図-4 き裂先端部の探傷結果 (閉口処理前)



(a) 主板上面からの探傷 (b) 主板下面からの探傷

図-5 き裂先端部の探傷結果 (閉口処理後)



(a) 主板上面からの探傷 (b) 主板下面からの探傷

図-6 き裂表面部の探傷結果 (閉口処理後)

ーズドアレイ超音波探傷によって得られる返信エコー高さの変化より, き裂の開閉口挙動を判定可能であることが考えられる。

- ✓ 曲げ荷重下において, 閉口処理された疲労き裂の再開はき裂先端部に先行してき裂表面部から再開していることがわかった。

(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, 土木学会論文集, 第 392 号, pp.403-410, 1988. 2)苗木ら：溶接止端部にき裂を有するステンレス鋼のピーニングによる疲労強度向上とき裂の無害化, 圧力技術, Vol.57, No.3, pp.140-148, 2015. 3)Kinoshita et al : Fatigue Strength Improvement and Fatigue Crack Closure by Portable Pneumatic Needle-Peening Treatment on Welded Joints, International Journal of Steel Structures, pp.1-8, 2014. 4)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裂の寿命向上効果, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.264-272, 2010. 5)山田ら：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. 6)三木ら：超音波を用いた疲労き裂の検出, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.383-391, 1987. 7)三木ら：タンデム超音波探傷による K 開先溶接部の品質管理と疲労き裂検出, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.628-638, 2007. 8)白旗ら：フェーズドアレイ超音波探傷による鋼床版デッキプレート進展き裂の非破壊評価, 土木学会論文集, Vol.72, No.1, pp.206-219, 2019. 9)山田ら：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, 第 14 巻, 第 55 号, pp.1-8, 2007. 10)井上ら：疲労き裂形状のフェーズドアレイ超音波探傷法による評価, 鋼構造年次論文報告集, 第 25 巻, pp.546-550, 2017.