

疲労き裂面の接触状態による超音波透過特性に関する基礎的検討

愛媛大学 学生会員 ○川崎藍流 正会員 丸山泰蔵
非会員 勝田順一 高橋学 正会員 中畑和之

1. はじめに

橋梁に見られる金属部材の損傷の一つにき裂がある。き裂が開いている場合には超音波探傷試験 (UT) が適用され、端部エコー法や TOFD 法を用いることで、超音波の伝搬時間やエコーの大きさから、き裂の位置や深さを評価することができる。しかし、疲労き裂などの閉口き裂は、塑性域の中を進展し、き裂面に生じた残留応力のため、一定の引張応力に達するまではき裂端部が開かない。き裂端部が閉口している場合、端部エコーが微小であるためき裂の見落としや過小評価につながる。

閉口き裂の超音波計測に関する既往の研究¹⁾では、大振幅の超音波を閉口したき裂面に送信することで、高調波や分調波などの非線形超音波が発生することが報告されている。しかしながら、非線形超音波は送信波と比べて振幅が非常に小さい。そのため、土木構造物などの大型構造物では距離減衰の影響によって非線形超音波の検出が困難だと考えられる。一方、中畑ら²⁾は疲労き裂に作用する引張・圧縮応力を変化させたときに、周波数 f_0 のバースト波で超音波透過試験を行い、そのときの振幅および周波数の変化に着目している。閉口き裂による f_0 の周波数をもつ透過波の変化を検査に用いることができれば、土木構造物への適用が期待できる。しかしながら、中畑らの研究ではき裂端部で塑性変形が発生する程の大きな引張・圧縮応力をき裂面に作用させながら超音波計測を行っていた。そこで本研究では、弾性変形の範囲でき裂面に応力を作用させながら超音波透過試験を行い、透過波の変化を詳細に調べる。

2. き裂の開閉口による超音波透過試験

図-1(a)に示すように、幅 31mm、高さ 38mm の矩形断面部材の底面中央部にスリットを挿入し、繰返し 3 点曲げ試験によりき裂を約 15mm まで進展させた疲労き裂試験片 (長さ 351mm) を作製した。疲労試験で用いた繰返し荷重は 7~20kN である。弾性変形の範囲でき裂を開閉口させるため、図-1(b)に示すような 4 点曲げ載荷試験により荷重を ± 5 kN の範囲で変化させた。ここでは、試験片の両端に探触子を設置し、疲労き裂面を垂直に超音波が通過するような超音波透過試験を行った。使用したパルサ・レシーバは Japan Probe 社製の JPR-600C であり、送信波の波形は 6 サイクルの正弦バースト波 ($f_0=1.0$ MHz) とした。送信側には中心周波数 1MHz の垂直探触子、受信側には中心周波数 2MHz の広帯域垂直探触子を使用した。探触子の直径はどちらも 10mm である。

図-2(a), (b) に受信探触子 A で受信した第一到達波の時刻歴波形とそのフーリエスペクトルを、図-2(c), (d) に受信探触子 B で受信した第一到達波の時刻歴波形とそのフーリエスペクトルをそれぞれ示す。ここで、正荷重はき裂が開く試験、負荷重はき裂が閉く試験としている。図-2(a) より、受信位置 A ではき裂が開くにつれて、振幅が増大している様子がわかる。図-2(b)からは、全体的にフーリエ振幅が変化している様子がわかる。ここで、 $f_0=1.0$ MHz のバースト波を送信しているにもかかわらず、3MHz 付近にもピークが見られる。これは、バースト波を駆動するために矩形波を用いているためにパルサーから発生する成分であり、高調波成分ではない。一方、受信位置 B では、き裂が開くにつれて f_0 のフーリエ振幅が顕著に増大しているのがわかる。また、3MHz の成分はほとんど変化が見られない。

3. シミュレーションによる考察

前節で示した受信波形の伝搬経路を調べるため、動弾性有限積分法 (EFIT)³⁾を用いて、2次元超音波伝搬シミュレーションを行った。ここでは、き裂のない健全な試験片モデルと開口き裂試験片モデルに対して、計

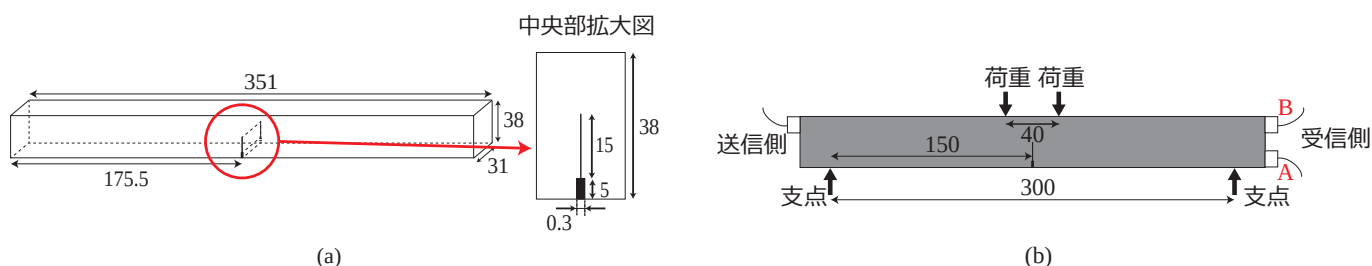


図-1 (a) 疲労き裂試験片, (b) 超音波計測方法

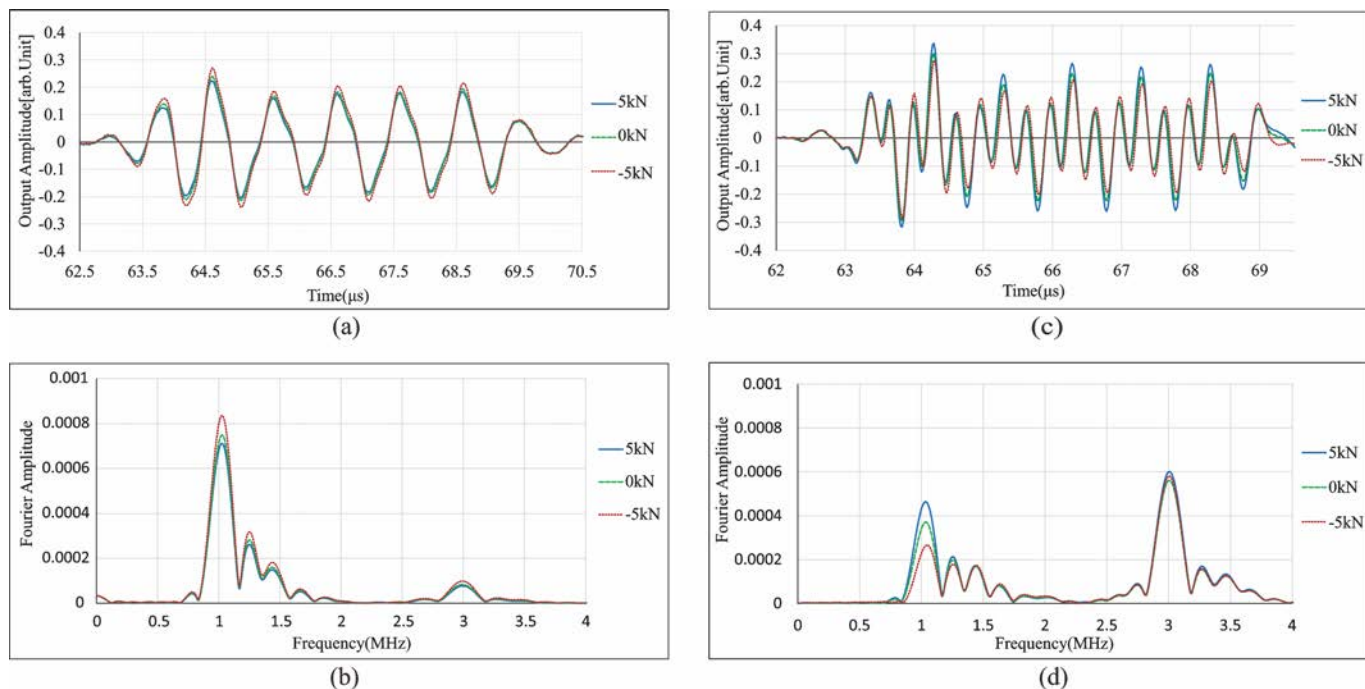


図-2 受信位置 A における (a) 時刻歴波形, (b) フーリエスペクトル, 受信位置 B における (c) 時刻歴波形, (d) フーリエスペクトル

測実験と同様の探触子位置を模擬して計算を行った。図-3 に健全な試験片モデル, 図-4 に開口き裂試験片モデルの超音波伝搬シミュレーション結果を示す。ここで, 送信波を励起した 30, 45, 60 μ s 後の速度場の絶対値 $|v|$ をプロットしている。図-4 から, 時刻 $t = 45\mu$ s の赤丸の部分で, き裂端部から散乱波が発生していることがわかる。また, 時刻 $t = 60\mu$ s では, 送信波がき裂で反射することによって受信位置 A では透過波の振幅が小さくなるのに対し, 受信位置 B では振幅が大きくなっていることがわかる。このとき, き裂端部で散乱した波動が, 受信位置 B へ伝搬することで, B での振幅が大きくなることがわかる。3MHz の超音波を送信した場合の結果の詳細は割愛するが, 3MHz の成分はき裂にほとんど干渉せず直進するため, 開閉口によるフーリエ振幅の変化は小さい。

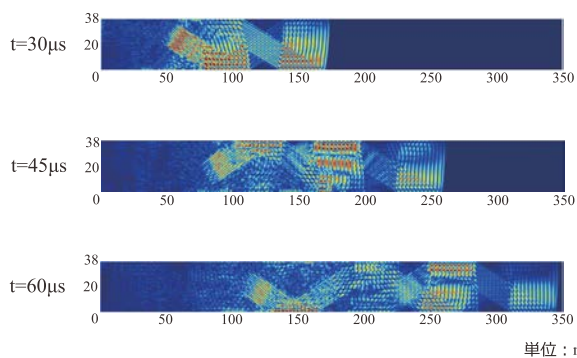


図-3 中心周波数 1MHz の健全な試験片モデルに対する超音波伝搬シミュレーション結果

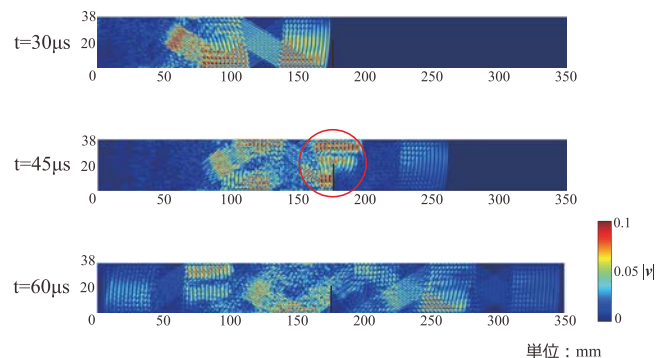


図-4 中心周波数 1MHz の開口き裂試験片モデルに対する超音波伝搬シミュレーション結果

4. おわりに

本研究では, き裂面に引張・圧縮応力を作用させながら超音波透過試験を行った。その結果, 弾性変形の範囲内で応力を変化させた場合, 超音波透過波に変化が見られた。特に, 探触子の位置によってはフーリエ振幅が大きく変化することがわかった。これらは, 送信波の周波数にも依存するため, 数値シミュレーションを援用しながら適切な探触子位置や径を選定することが肝要である。

参考文献

- 1) 山中一司, 小原良和, 山本撰, 三原毅: き裂の非線形超音波映像法, 非破壊検査, Vol.56, No.6, pp280-285, 2007.
- 2) 中畑和之, 高橋栞太, 細川隼人, 高橋学: 疲労き裂面の接触状態による透過超音波の波形特性の変化, 構造工学論文集, Vol.66A, 2020(印刷中).
- 3) Fellinger, P., Marklein, R., Langenberg, K.J. and Klaholz, S.: Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT, Wave Motion, Vol.21, pp.47-66, 1995.