

リニアアレイ探触子を用いた超音波法による疲労き裂の画像化

○東京工業大学大学院 学生員 上野真一郎
 東京工業大学大学院 正 員 木本 和志
 東京工業大学大学院 正 員 廣瀬 壮一

1. はじめに

疲労き裂の非破壊的な検出と評価は、材料や構造物の破壊力学解析に基づく強度評価を行う上で不可欠である。代表的な非破壊検査法の一つである超音波探傷試験は、疲労き裂の評価にも用いられており、特に、き裂先端からの回折波を捉えてき裂検出と評価を行う TOFD 法が有効であることが知られている。TOFD 法では、対向させた二つの探触子を機械的に走査しながら送受信を行い、計測した波形を B スコープ表示するなどしてき裂の評価をする。一方、近年建設分野でも利用が始まっているアレイ探触子を用いれば、あまり機械的走査を行うことなく同様な計測が可能であり、大量のデータをほとんど瞬時に取得できる。それらのデータを適切に処理して画像化すれば、従来の B スコープ表示よりも高精度なき裂の評価ができる可能性がある。そこで、本研究ではリニアアレイ探触子を用いて回折波の計測を行い、その結果を用いて精度良く疲労き裂の画像化を行うことを目的として研究を行う。

2. 実験概要

(1) 疲労試験

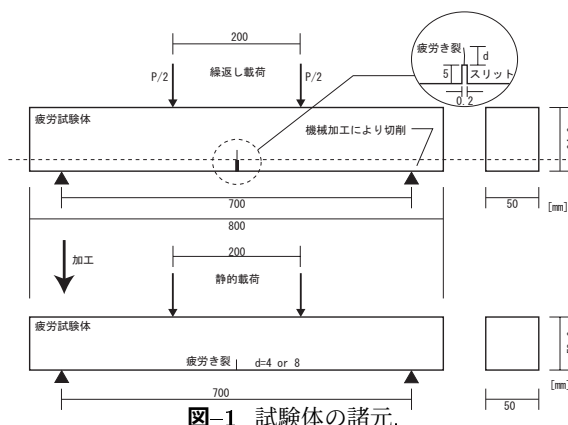


図-1 試験体の諸元。

図1に示すような鋼棒試験体に、クラックスターとして放電加工によってスリットを作成し、四点曲げ試験によって疲労試験を行った。ここでは三体の試験体を用意し、そのうち一体は疲労試験を行わず、疲労き裂と人工欠陥の比較ができるように超音波探傷試験にそのまま用いる。残る2体は、疲労き裂の長さがそれぞれ4mm、8mmとなるまで疲労試験を行い、その後スリット部分を機械加工によって削除した。

(2) アレイ超音波探傷試験

図2に、実験に用いたアレイ探傷システムの構成を示す。アレイ探傷器には東芝 UT03C1A-200MS-2 を、探触子は Japan Probe 社製の SH 波の接触型リニアアレイ探触子を用いた。探触子の中心周波数は2MHz、素子数32、各素子は12mm×0.7mmの矩形でありそれらが2mmピッチで一列に並べられている。これらの装置を用いて32×32=1024個のAスコープ波形を測定し、測定結果は研究室内のワークステーションに転送して画像化処理を行う。画像化範囲の指定には、探触子中心を原点とした図2のような座標系を用い、計測点は探触子中心(原点)がき裂開口部に一致するようにとる。また、超音波探傷試験は無負荷の場合に加えて、き裂を開口させる方向に段階的に载荷しその各段階で行う。

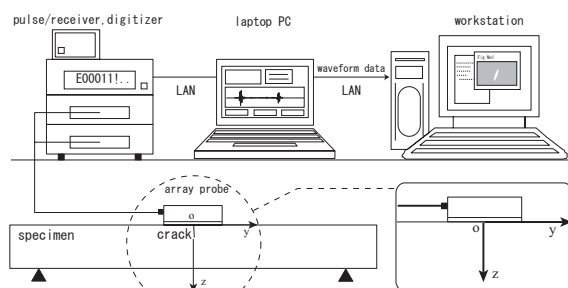


図-2 アレイ超音波探傷システム。

3. 画像化手法

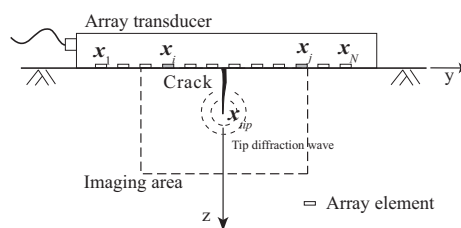


図-3 画像化領域およびモデル。

図3に示すように、き裂先端を含む適当な大きさの画像化領域を定める。アレイ探触子の素子数は N とし、各素子の中心位置を $x_i, i=1, \dots, N$ 、 x_i の y 座標を y_i によって表す。 i 番目の素子で送信し、 j 番目の素子で受信した波形を $f_{ij}(t)$ として $\{f_{ij}(t)|i, j=1, \dots, N, y_i y_j < 0\}$ からき裂先端部の画像化を行なう。ここで、 $y_i y_j < 0$ と、き裂を跨ぐ送受信素子の組に限定したのは、送受信点がき裂からみて同じ側にある場合は、直達波やき裂コーナー部からのエコーが大きく、き裂先端位置の画像化には利用しにくいためである。

Key Words: 疲労き裂、リニアアレイ探触子、開口合成、逆伝播

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 TEL 03-5734-3587 FAX 03-5734-3587 URL <http://www.cv.titech.ac.jp/>

(1) 開口合成法

開口合成法では、計測した波形 $f_{ij}(t)$ の時刻 t に現れるエコーは、波速を c として $ct = |x_i - x| + |x_j - x|$ となるいずれかの位置 x に散乱体があるものと考えて、

$$S(x) = \sum_{i,j}^N f_{ij} \left(\frac{|x_i - x|}{c} + \frac{|x_j - x|}{c} \right) \quad (1)$$

を計算する。これを x の関数として表示することで欠陥の画像化を行う。

(2) 時間反転集束の考え方による画像化 (逆伝播集束法)

き裂先端を x_{tip} 、超音波が探触子内部のシュー材を伝播する時間を s とすればき裂先端からの回折波が波形 $f_{ij}(t)$ において観測される時間は $s + |x_i - x_{tip}|/c + |x_j - x_{tip}|/c$ となる。そこで、

$$B(x) = \sum_{i,j}^N f_{ij} \left(s + \frac{|x_i - x_{tip}|}{c} + \frac{|x_j - x|}{c} \right) \quad (2)$$

なる x の関数を考える。 $B(x)$ は $x = x_{tip}$ において大きな値を持つから、これを用いてき裂の画像化を行うことができる。ただし、 x_{tip} は既知でないため何らかの方法で推定しなければならない。ここでは、 $B(x)$ がき裂端部を含む適当な閉領域を ΔR として、 ΔR で最大値 $B(x_{tip})$ をもつと考え、式 (2) の最大値を探索することで x_{tip} を推定した。

4. 画像化結果

(1) 開口合成法

図4に開口合成法による画像化結果を示す。き裂長さが8mmのケースでは、無負荷 ($P=0\text{kN}$) では明瞭なピークが得られないものの、15kN 載荷時には+で示したき裂先端位置付近のピークが際立ってくる様子がみられる。しかしながら、き裂長さ4mmのケースでは、15kN まで載荷を行っても、き裂先端と認識できるような指示は現れない。そこで、き裂長さ4mmの試験体に対しては35kN まで載荷して計測を行ったところ、5kN, 15kN 載荷時とは異なる画像が得られたが、やはり、はっきりとしたピークは見られない。

(2) 逆伝播集束法

図5は逆伝播集束法によるき裂端部の画像を示したものである。き裂長さ8mmの場合、 $P=0\text{kN}, 15\text{kN}$ とも同じ位置にピークがみられ、15kN の場合 S/N 比が向上している。一方、き裂長さ4mmの場合では、 $P=0\text{kN}$ のとき、解がき裂コーナー部に収束してしまい、き裂先端を発見することができなかった。 $P=15\text{kN}$ の場合には、コーナー部に収束することはなかったものの、明瞭なピークが得られていない。 $P=35\text{kN}$ の場合も一見同様な結果だが、この場合は、深さ3.5mmの位置に解が収束しており、コーナー部とははっきり区別できる位置に解が得られている。

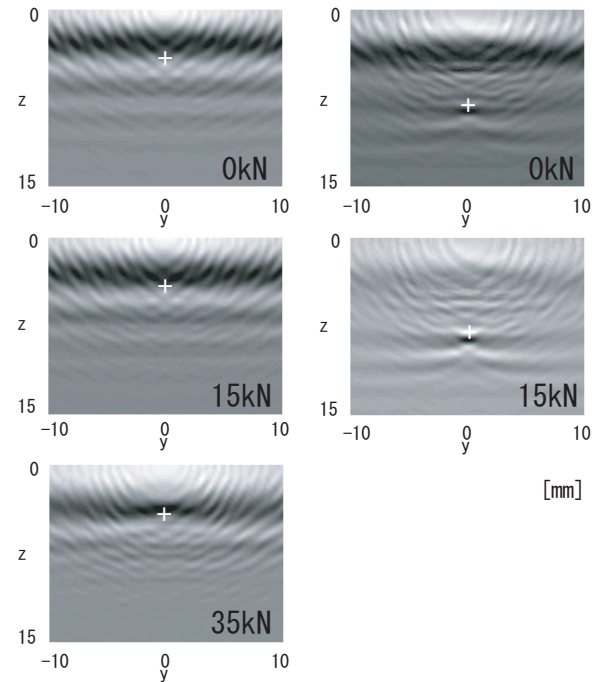


図-4 開口合成法によるき裂端部の画像化。き裂長さ4mm(左), 8mm(右)。+はき裂先端位置を表す。

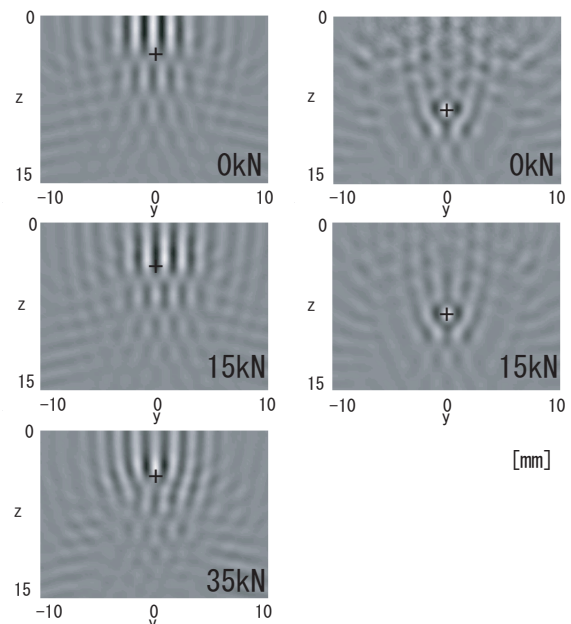


図-5 逆伝播集束法によるき裂端部の画像化。き裂長さ4mm(左), 8mm(右)。+はき裂先端位置を表す。

5. まとめ

開口合成法により、8mmのき裂端部を画像化することができた。一方、き裂長さ4mmの場合は荷重をかけて計測した場合にも開口合成像にはき裂先端部を見ることはできなかった。逆伝播集束法では8mmのき裂端部の画像化を精度よく行なうことができた。4mmのき裂に対しても、荷重35kNの時には開口合成では見ることのできなかったき裂端部を検出することができた。様々なき裂長さについて実験を行ない、各画像化手法ごとにき裂の検出限界や画像化精度を詳しく調べることが今後の課題である。