内部にき裂を有する弾性体の振動に関する二次元モデルを用いた数値解析

Dynamic response of a two-dimensional crack model

○正 伊藤 伸 (秋田県立大)

正 林 一夫 (東北大流体研)

Shin ITO, Akita Prefectural University, 84-4 Tsuchiya-Ebinokuchi, Yurihonjo Akita

Kazuo HAYASHI, Tohoku University

Key Words: Elasticity, Crack, Boundary Element Method, Nondestructive Inspection

1. 緒言

機械部品, もしくは電子機器の部品など, 大量に生産されている部品それぞれの信頼性を高めるためには, 生産されている全ての部品に対して何らかの非破壊検査を行う必要がある. 全ての生産品を検査する場合, 検査対象となる物品が大量となるため, 検査そのものを行う時間は, 可能な限り短いことが望まれる. その一方で, 検査を行うシステムの経済性も要求される. 部品の検査手法としては, 顕微鏡などを用いた目視によるもの, X線などを用いた手法など様々あるが, 本研究では部品の内部に存在するき裂などの欠陥を捕らえる可能性がある打音検査に注目する.

本研究では, 内部にき裂を有する有限の大きさの弾性体に打撃力が作用した場合に, 弾性体表面にどのような振動が生じるか検討する. 具体的には, き裂を有する有限の大きさの弾性体を二次元にモデル化し, 境界要素法を用いた数値解析を行う. その上で, 弾性体自体の共振周波数とき裂に生じる振動の周波数, ならびに, き裂に生じる振動がどのように弾性体表面に現れるか検討する.

2. 問題の提示

本研究では, 図1に示すような, 二次元にモデル化された横 0.5m, 縦 0.05m の大きさの試験片 (部品) について考える. ここで, 図1に示すとおり, 座標系 $O-X_1, X_2$ を導入する. この試験片を検査する状況として, 中央部分を幅 0.05m の固定具で挟み込むことで固定した上で, 試験片の上面と下面の表面を 0.005m の直径のハンマで同時に打撃を加えた状況を想定する. また, き裂は, X_1 軸上に存在するものとし, き裂中心と原点 O との間の距離を X_C とする. このような状況を解析するため, 数値計算については, X_1 軸の面 (き裂面) に対して上下対称な振動を対象とした解析を行う. 試験片の材料については, アルミ合金を想定する.

図2に, 数値解析のための座標系を示す. 数値解析は, き裂中央を原点とした座標系 O_C-x_1, x_2 を用いて行う. き裂の長さを $2a$ とし, き裂開口幅は試験片の縦の大きさ 0.05m より十分小さいものとする. また, 試験片の縦の大きさの半分の $H (=0.025\text{m})$, 原点 O_C から試験片の左端と右端までの距離をそれぞれ W_L, W_R とする.

数値計算は, 一定要素を用いた境界要素法を用いた. 試験片の固定部分については, X_1, X_2 方向の変位を固定した. また加振については, X_2 方向に加振力 1kN が衝撃的に加わったものとした. 加振力が加わる領域と固定した領域以外の部分については, 表面力が作用していないものとした. なお, 境界の一定要素の大きさについては, 長さ H を 10 等分, もしくは 20 等分した大きさとし, き裂先端付近ではさらに要素の大きさを細かくした.

3. 計算結果

数値計算に用いた物性値は, 試験片がアルミ合金であるものとして, ヤング率を 68.1GPa, ポアソン比を 0.319, 密度を $2.68 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$, S波の位相速度 C_T を 3100m/s とした. き裂

Fig.1 Schematic diagram of test piece and coordinate system.

Fig.2 Coordinate system for numerical simulation.

Fig.3 Variation of eigen frequencies f_1 with respect to the distance from the origin O to the center of crack X_C .

面に生じる振動において, 振動の節の数がき裂両端を除き 0, 1, ..., n 個あるものを, それぞれ 1, 2, ..., $n+1$ 次振動モードと呼び, その固有周波数を $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ と表すことにする.

数値計算は, き裂半長 a を 0.025m, 0.050m, 0.100m の 3通りとして行った. また, き裂中心と原点 O との間の距離 X_C を, き裂が試験片内部に存在する範囲で変化させながら行った. さらに, 加振する位置については, 試験片の左端と右端 ($X_1 = \pm 0.250$), ならびに, 試験片の左端もしくは右端と固定位置の中間 ($X_1 = \pm 0.125$) を加振した.

図3に, き裂に生じる1次振動モードの固有周波数が, き

Fig.4 Distribution of amplitude spectra of the displacement in the x_2 direction on the surface of the test piece in the case where there is no crack (Crack half length a is 0.050m, stimulate point is $X_1=0.125$ on the top of test piece.)

裂中心の位置によりどのように変化するか示す。き裂中心が原点 O と一致した場合については、同じ位置で試験片が固定されているため、き裂の大きさが固定されている部分よりある程度大きくならないとき裂に振動が生じない。よって、き裂中心が原点 O と一致した場合については、図 3 に示していない。き裂が試験片を固定している領域に近い場所に存在する場合、それ以外の場所に存在するときよりも固有周波数が大きい。これは、試験片を固定している部分の影響により、き裂の振動が抑制され、見かけとして、き裂の大きさが実際の大きさより小さいものとして振舞うためだと推測される。き裂の振動が試験片を固定する部分から離れると、固有周波数はほぼ一定となる。さらに、き裂の位置が試験片の端部に近い場所となると、固有周波数は小さくなる。き裂が試験片を固定している場所近傍の場合と逆であることから、き裂が試験片の端にある場合は、き裂は何かの理由により変形しやすい状況であるものと推測される。以上より、同じき裂の大きさでも、き裂の位置によりき裂に生じる固有振動数は変化することがわかる。

図 4 に、き裂が無い場合に試験片の上面、つまり、図 1 中の AB 間に生じる X_2 軸方向変位のスペクトル分布を示す。縦軸は、S 波の位相速度 C_T と便宜的に導入したき裂半長 a で無次元化した周波数となっている。横軸は、図 2 で示した座標系を用いて示しており、便宜的に導入したき裂半長 a で無次元化している。図 5 に、図 4 と同様に、き裂が存在する場合の試験片の上面における X_2 軸方向変位のスペクトル分布を示す。図 5 の縦軸と横軸は、図 4 と同様に無次元化している。き裂は、 $-1 \leq x_1/a \leq 1$ の範囲に存在している。図 4 と図 5 は、いずれも、試験片の上部の $X_1=0.125m$ の位置を加振した場合である。これらの図より、試験片固有の振動が常に現れており、また、加振した領域周辺にもスペクトルの大きさが大きい領域が広がっていることがわかる。また、図 4 と図 5 を比較することにより、き裂に定在波が生じた固有の周波数においてスペクトルの大きさが大きい領域が存在していることがわかる。さらに、き裂の共振が試験片の共振周波数近傍で生じると、たとえば図 5 中の $2\pi fa/C_T=1.6$ におけるスペクトルのように、試験片の共振周波数におけるスペクトルの大きさが大きくなることをわかる。

(a) $X_C=0.125m$

(b) $X_C=0.190m$

Fig.5 Distribution of amplitude spectra of the displacement in the x_2 direction on the surface of the test piece in the case where there is a crack (Crack half length a is 0.050m, stimulate point is $X_1=0.125$ on the top of test piece.)

4. 結果と考察

検査を経済的に有利で、かつ、短時間に行うためには、経済的なセンサを用いて、測定された信号を短時間で処理可能な信号処理の手法を用いる必要がある。たとえば、き裂の固有周波数を直接捕らえるためには、広い周波数領域を測定し検査を行う必要がある。また、試験片固有の共振の信号に埋もれないように、周波数分解能を向上させた測定を行う必要がある。このことは、測定時間がある程度必要であることを意味するので、検査の時間をある程度確保する必要があることになる。また、センサが適応しないほど高周波の振動を生じる小さいき裂については対応できないことも意識する必要がある。広い周波数領域を観察するのではなく、逆に、試験片固有の共振周波数（付近）に注目し、その周波数のスペクトルの大きさ（もしくは振動振幅の大きさ）の変化からき裂を捉える可能性もある。しかし、これは注目した周波数の付近にき裂の固有周波数があり、き裂に生じる振動が試験片に生じる固有振動に影響を与えているという条件が必要である。以上の検討を含め、経済的で短時間で行うことが可能な検査方法について、今後とも検討を続ける予定である。