

# 非線形振動を利用した疲労き裂の評価に関する基礎的研究

愛媛大学 学生会員 ○小野寺慧 川崎藍流  
正会員 丸山泰蔵 中畑和之

## 1. はじめに

橋梁に見られる代表的な損傷の一つに疲労き裂がある。この疲労き裂が開口している場合には、目視検査で検出できたり、あるいは超音波探傷試験（UT）による端部エコー法などを用いることで、き裂の位置や高さを評価することができる。しかし、疲労き裂はき裂端部に形成される塑性域の中を進展し、き裂面に残留変形を残すため、ある引張応力になるまではき裂端部が開かない<sup>1)</sup>。閉口状態にある疲労き裂は目視では識別できない場合が多く、UTを適用した場合には超音波がき裂面を透過することから、疲労き裂の見落としの危険がある。近年では、閉口したき裂の性状を評価する方法として、大振幅の超音波を送信することで、き裂面同士が一時的にたたき合うことにより発生する非線形超音波を利用した方法がある<sup>2)</sup>。この非線形超音波法は、き裂の位置があらかじめ既知である場合に、局所的に大振幅超音波を送信することで、き裂の閉口部の長さが評価できる。しかし、土木構造部材は長尺で大型であるため、広い範囲から閉口した疲労き裂の有無を判断するだけでも有用である。そこで、本研究では、疲労き裂試験片に対して加振器を用いた強制加振を行い、疲労き裂面の応力状態を動的に変化させ、そのときに発生する非線形性を利用して疲労き裂の非破壊評価を行うことを試みる。ここでは、2つの加振器を用いて振動数の異なる加振を行うことで、和差調波共振の発生を利用した疲労き裂の検出を検討する。

## 2. 数値シミュレーションによる振動解析

図-1(a)に示すように、ステンレス鋼 SUS304 のインゴットを加工して、幅 31mm、高さ 38mm の矩形断面を有する長さ 351mm の試験片を作成した。試験片中央部には深さ 5mm の導入スリットから、深さ 15mm の疲労き裂を進展させた。まず、有限要素解析によって試験片をモデル化し、周波数応答解析及び応力解析を行った。図-1(b)に示すような位置に加振器を設置することを想定し、周波数応答解析を行った結果、2413Hz 付近で振幅応答が卓越することがわかった。2413Hz における試験片全体の弾性ひずみの結果と、疲労き裂断面に対するひずみ分布を図-2に示す。解析結果より、この振動数のときに疲労き裂端部に応力が作用していることがわかった。

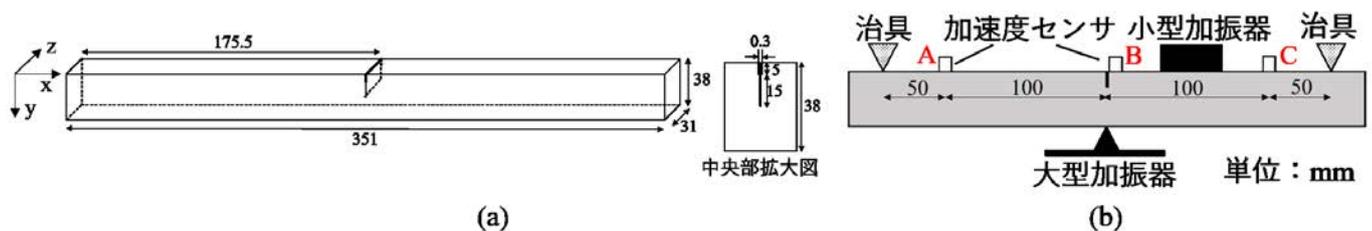


図-1 (a) 疲労き裂試験片, (b) 加振器とセンサの配置

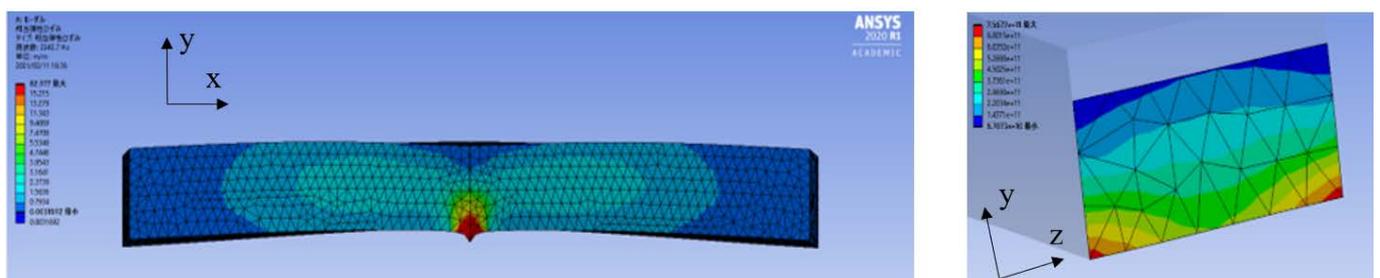


図-2 ひずみ分布解析結果

### 3. 2つの加振器を用いた振動計測実験

図-1(b)に示すような加振器によって振動を励起したときに、3つの1軸加速度センサ(A~C)を用いて計測を行った。計測実験では、図-1(a)に示すような疲労き裂試験片と、同寸法の疲労き裂のない健全な試験片を用いた。大型加振器による振動数 $f_1$ を2000~2800Hzまで50Hz刻みで掃引し、各振動数に対して小型加振器の振動数 $f_2$ を100Hzとして計測を行った。加振器による加振振幅が大きすぎると、装置系や材料の非線形性による振動成分も生じるため、加振器の励起を微小振幅とし、一定に保ったまま計測を行った。ここでは、 $f_1$ と $f_2$ を変えながら、それぞれ1秒間のデータサンプリングを行った。サンプリングレートは50kHzである。計測で得られた波形に対してフーリエ変換を行い、フーリエスペクトルのピークの出現について調べた。

$f_1=2000\text{Hz}$ ,  $f_2=100\text{Hz}$ で加振した場合のセンサBで計測された波形のフーリエスペクトルを図-3(a)に示す。この結果から、加振振動数以外のピークは見られないことがわかる。一方、 $f_1=2400\text{Hz}$ ,  $f_2=100\text{Hz}$ で加振した場合のセンサBで計測された波形のフーリエスペクトルを図-3(b)に示す。この実験結果から、疲労き裂試験片において、2300Hzと2500Hzにピークが立っていることが確認できた。これらは、100Hzと2400Hzの和と差の関係であることから、界面のたたき合いに起因する和差調波共振<sup>3)</sup>であることが推測できる。また、 $f_1+f_2$ ,  $f_1-f_2$ のフーリエスペクトルのピーク値を抽出してまとめたものをそれぞれ図-4に示す。図-4では、 $f_2=100\text{Hz}$ に固定し、 $f_1$ を2000~2800Hzまで変化させたときの値の変化である。図-4の横軸はそれぞれ $f_1+f_2$ と $f_1-f_2$ である。縦軸は、 $f_1+f_2$ と $f_1-f_2$ の振動数に相当するスペクトル値をそれぞれ図-4(a)と(b)にプロットしている。これらの結果から、 $f_1$ と $f_2$ の和と差とともに、2400Hz付近がもっともフーリエスペクトル値が大きくなっていることがわかる。

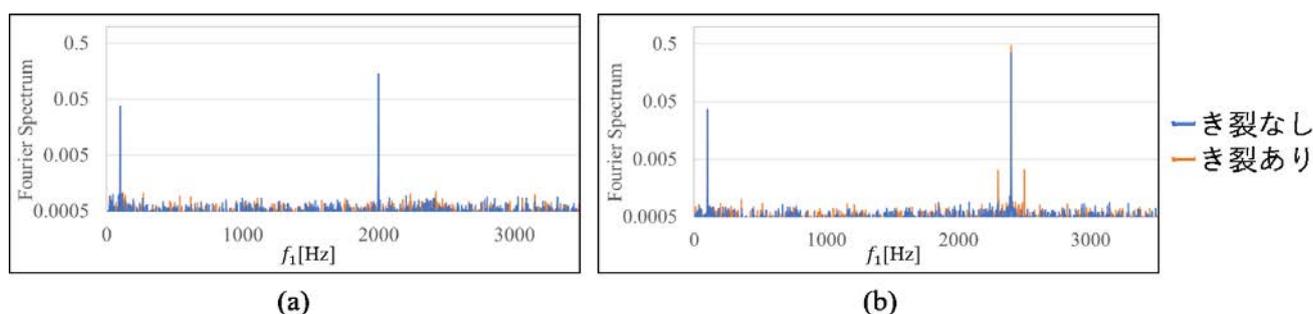


図-3 (a) $f_1=2000\text{Hz}$ におけるフーリエスペクトル, (b) $f_1=2400\text{Hz}$ におけるフーリエスペクトル

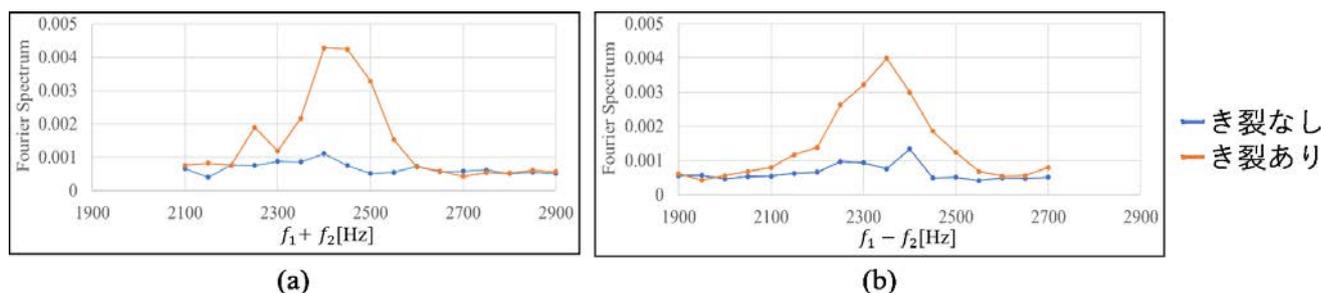


図-4 (a) $f_1+f_2$ のピーク値, (b) $f_1-f_2$ のピーク値

### 4. おわりに

本研究では、2つの振動数の異なる加振器による強制加振を利用して、疲労き裂の界面非線形性(界面のたたき合い)に起因する和差調波共振の発生を確認することができた。また、実験から、主振動となる $f_1$ が試験片の固有振動数に近いこと、和と差の関係である $f_1+f_2$ ,  $f_1-f_2$ が試験片の固有振動数に近いこと、この2つの条件を満たすことで、和差調波共振が発生しやすくなる傾向があるという結果が得られた。

### 参考文献

- 1) 城野政弘, 菅田淳, 変動荷重下の疲労き裂進展速度と開閉口挙動に及ぼす残留応力の影響, 材料, Vol.36, No.409, pp.1071-1076, 1987.
- 2) 川嶋紘一郎, 非線形超音波法を用いた材料内異質部と欠陥の可視化, 軽金属, Vol.68, No.2, pp.91-96, 2018.
- 3) Nayfeh, A. H. and Mook, D. T, Nonlinear Oscillations, Wiley-VCH, 1995.