

疲労き裂を透過した非線形超音波の挙動について

東京工業大学 正会員 廣瀬壮一, 非会員 酒井綾子
ジャパンプローブ 非会員 小倉幸夫, 非会員 高橋雅和

1. はじめに

疲労き裂の早期発見及び進捗の評価は鋼構造物の維持管理において非常に重要である。超音波探傷は空洞や開口したき裂の検出や評価に有効な非破壊試験法としてよく用いられるが、き裂面が閉じて接触している疲労き裂では超音波が透過してしまい、適切な評価が困難となる問題がある。昨今、閉じたき裂の評価において、非線形超音波の利用が注目されている。非線形超音波とは大振幅の超音波を入射してき裂を開閉させることにより、入射波とは異なる周波数成分で発生する波のことである。非線形超音波には入射波が持つ基本周波数の整数倍の高い周波数で発生する高調波³⁾と整数分の一の低い周波数で発生する分調波¹⁾²⁾があり、それぞれの現象を説明するためのモデルがいくつか報告されているものの、その発生メカニズムは十分に解明されていない。

本研究では、き裂面の接触状態が非線形超音波の発生にどのように関わっているかを解明するために、疲労き裂の入った鋼材の試験体を作製し、荷重を変動させてき裂の接触状態を変化させながら超音波試験を行ったので、その実験概要と結果を報告する。

2. 実験概要

図-1のように中央に疲労き裂を有する鋼製試験体を作製した。き裂の深さ d は奥行き方向に変化しており、手前側が12mm、奥側が4mmである。図-2に示すように、ジャッキによって載荷してき裂の接触状態を変化させながら送受信の探触子を配置してき裂面を透過する超音波を測定した。

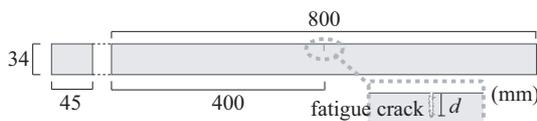


図-1 疲労き裂試験体

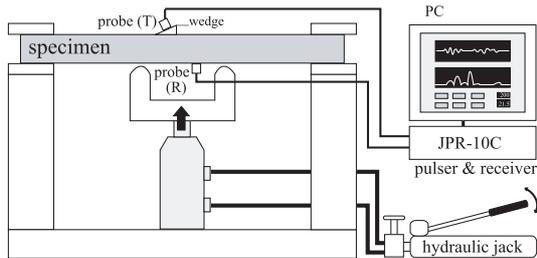


図-2 実験装置

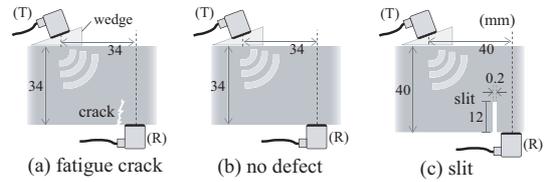


図-3 実験の種類

図-3(a)に示すように、送信探触子は鋼材中の縦波が入射角45°で入射するように楔にのせ、受信探触子は入射波が疲労き裂によって遮られるような位置に設置した。また比較のために、図-3の(b)欠陥のない部分と(c)常に開口しているスリット部においても透過波を測定した。なお、実験では周波数5MHzの矩形波を5波入射した。

3. 実験結果

図-4は、図-3(a)の疲労き裂に対して荷重を-200~250kgfの範囲で変化させたときの波形、及び、図-3(b)、(c)の透過波の波形とそれらのフーリエ振幅を示したものである。(a)の結果ではき裂を開く方向の荷重を負とし、試験体の上下を逆さにして設置してき裂を閉じる方向の荷重を正としている。図-5は、図-4に示したフーリエ振幅を基本波(5MHz)の振幅で正規化した結果をカラーマップで示したものである。(a)のき裂面を透過した超音波には、(b)と(c)に比べて、主として基本波以外の分調波成分に強い振幅が見られる。荷重の大きさに応じて分調波成分の大きさは変化しており、特にき裂が開口状態から閉口状態に移りつつある0kgf~150kgfの荷重において強い分調波が見られる。

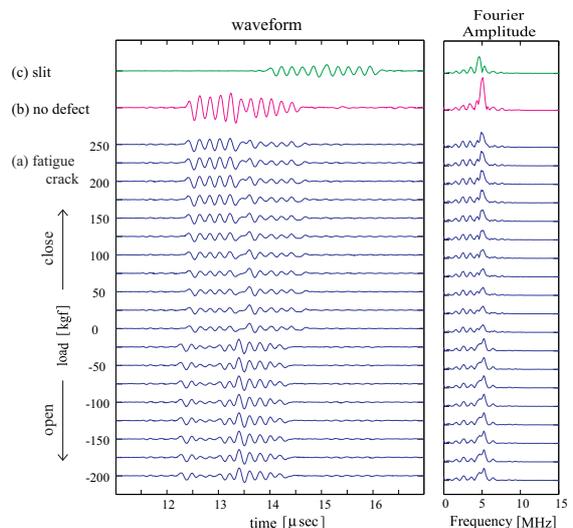


図-4 受信波形とフーリエ振幅

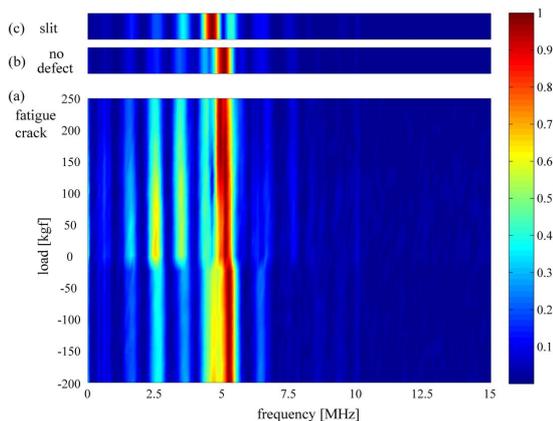


図-5 正規化されたフーリエ振幅

よって、これらの分調波は入射波を受ける疲労き裂が開閉口を伴って振動することによって発生する非線形超音波である可能性が高い。ただし、これらの分調波成分が開閉したき裂による線形応答によって発生しているとの疑念もある。そこで、以下においては、き裂面が常に開口している線形き裂モデルを用いた超音波の散乱解析を実施し、そのような解析によって実験で得られた分調波を説明できるか否かを検討する。

4. 線形き裂面透過波の解析

図-6 に示すように、線形き裂モデルとしてモデル 1~4 の 4 つを考え、き裂による超音波の散乱問題を解析した。モデル 4 はき裂が完全に開口しているモデルであり、モデル 1 はき裂が完全に閉じているモデルである。モデル 2,3 は荷重の载荷に伴ってき裂の接触状態が変化することを模擬したものである。ただし、入射波を受けた場合もき裂は常に開口していると仮定し、き裂面の振動に伴う開閉口は生じないものと仮定する。解析手法は周波数域境界要素法 (BEM) を用い、いずれも平面波が左上方より 45° で入射したときの受信探触子位置における平均変位応答倍率 \bar{a} を計算した。なお、図-6 における n, n_s はその区間の要素数を表している。

図-7 は、図-6 のモデル 1~4 に対する結果をカラーマップで表し、図-5 の実験 (a) の結果の一部と比較して示したものである。これより、線形のき裂モデルでは実験 (a) の結果に見られる分調波を再現することはできなかった。このことから、疲労き裂によって発生する分調波はき裂面での非線形挙動に起因するものであることが示唆された。

5. 結論

疲労き裂面の接触状態を変化させながら、き裂面を透過する超音波の波形を測定した。実験ではき裂面透過波に基本周波数よりも低い周波数に非線形分調波と思われる成分が強く含まれていた。その成分は载荷量によって変化するため、き裂の接触状態がこの成分に大きな影響を与えると

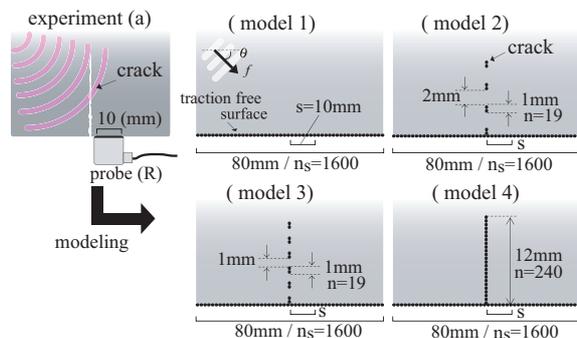


図-6 線形き裂モデル

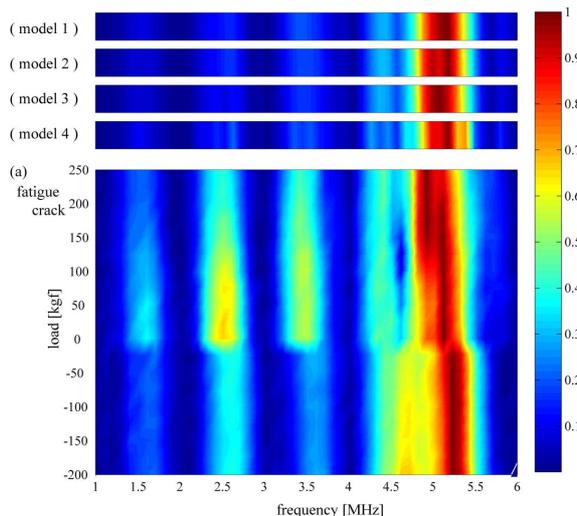


図-7 解析結果との比較

考えた。本来ならば直接、分調波を説明するモデルについて提案すべきであるが、分調波の発生メカニズムについては不明なところが多い。そこで本研究では、き裂の開閉口を伴わない線形き裂を仮定し、散乱解析を行って線形理論によって分調波の発生が説明できるか否かを検討した。その結果、実験結果と解析結果は一致せず、分調波はき裂の開閉口による非線形性が原因であるという結論に至った。今後の課題として、接触状態を考慮にいたした非線形き裂モデルの提案、接触状態をより精密に制御した実験が必要と考えられる。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (基盤研究 (S) 課題番号 18106010, 代表 三木千壽) の補助を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

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, 非破壊検査第 56 巻 6 号, pp.280-285, (2007)
- 2) K.Yamanaka, T.Mihara, T.Tsuji: Evaluation of Nanoscale Cracks By Low-Pass Filter Effect In Nonlinear Ultrasound, Proc 2003 IEEE Ultrasonics Symposium, Honolulu, Hawaii Oct 5-8, (2003)
- 3) S.Biwa, S.Nakajima and N.Ohno: On the Acoustic Non-linearity of Solid-Solid Contact with Pressure-Dependent Interface Stiffness, Trans. ASME J. Appl. Mech., 71, pp.508-515, (2004)