

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07235

研究課題名(和文) き裂面の接触による分調波発生現象に対する非線形定常振動解析を用いた定量的評価

研究課題名(英文) Quantitative evaluation of subharmonic generation due to contact of crack faces using nonlinear steady-state vibration analysis

研究代表者

丸山 泰蔵 (Maruyama, Taizo)

東京理科大学・理工学部土木工学科・助教

研究者番号：90778177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：構造物・機械の超音波を用いた非破壊検査手法の一つである非線形超音波法についての研究を実施した。非線形超音波法において、入射波の二分の一の周波数成分を含む受信波が得られる場合があり、その解析のための新たな数値シミュレーション手法を開発した。開発した手法を用い、き裂が部材に存在することによる共振特性の変化、及びき裂面の接触の相互作用に起因して、特定の条件下で局所的に複雑な共振現象が発生することを確認した。これは分数調波共振と呼ばれる現象であり、この現象によって入射波の二分の一の周波数成分を有する散乱波が発生し得ることがわかった。

研究成果の概要(英文)：This study dealt with nonlinear ultrasonic testing, which is one of the nondestructive techniques for structures and machines. A novel numerical method was developed to investigate the received wave with 1/2 frequency component of the incident wave in the nonlinear ultrasonic testing. In the numerical simulation, complex resonance was confirmed under certain conditions. This phenomenon is called the subharmonic resonance and was caused by the interaction between fluctuation of resonance characteristic and contact of crack faces. It was indicated that the scattered wave with 1/2 frequency component is generated in the nonlinear ultrasonic testing as a result of the subharmonic resonance.

研究分野：応用力学

キーワード：弾性波 非線形超音波法 接触音響非線形性 分調波 境界要素法 調和バランス法

1. 研究開始当初の背景

現存の機械・土木構造物を維持管理していく上で非破壊検査は不可欠である。非破壊検査手法の一つである超音波法は材料内部の探傷が行え、比較的手軽かつ安全に現場で用いることができるため、特に土木構造物の検査に適している。現在、一般的に広く用いられている線形超音波法では、母材ときずの音響インピーダンス差による散乱現象を利用している。そのため、き裂面が残留応力によって閉口している場合、検出が困難である。そこで、閉口き裂に対して有効な手法となることが期待されている接触音響非線形性に基づいた非線形超音波法について考える。

接触音響非線形性に基づいた非線形超音波法では、図1のように大振幅の超音波を送信し、閉口き裂面の接触を伴う振動を誘発させる。その結果発生する高調波・分調波から成る非線形超音波を受信・解析することによってき裂の検出・測定を行う。高調波の発生メカニズムはき裂面の繰り返し打撃、動摩擦による説明がなされており、理論的・実験的に概ね明らかにされてきている。一方、分調波の発生メカニズムは共振現象と関係があると示唆されているものの、明確にはされていない。

これまでに、計測実験による分調波の計測例はいくつかあり、系の共振と関わっていることが予想されている。また、非定常解析によって、分調波発生現象の再現が行われた例も報告されている。しかしながら、非線形共振の詳細は明らかでない。

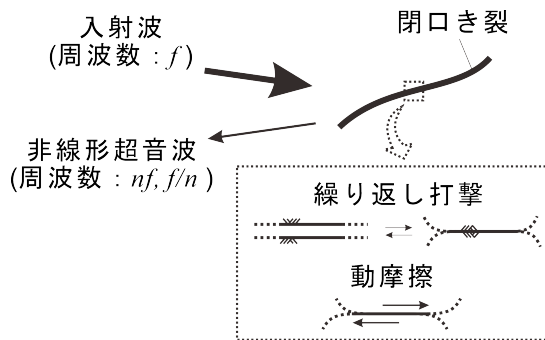


図1 接触音響非線形性に基づいた非線形超音波法の概要

2. 研究の目的

非線形超音波法における分調波発生現象のメカニズム解明を目指し、き裂による局所的な共振特性の変化と非線形性の相互作用によって引き起こされる非線形共振の詳細を調べることが本研究の目的とする。

その目的のために、接触を伴うき裂による定常散乱問題の解析手法を開発する。定常解析を行うことによって、既往の非定常解析では確認が困難であった分調波発生現象に必要な物理パラメータの同定、及び考察を行えることが期待できる。また、非定常解析では安定解のみしか求まらないため、系の分岐解

析の観点から現象を理解することは困難である。一方、定常散乱問題では安定解・不安定解が区別なく求まるため、安定解析と合わせて行うことで、解構造の詳細を調べられることが期待できる。

3. 研究の方法

接触を伴うき裂による定常散乱問題は、波動散乱問題の取り扱いに適した境界要素法、及び非線形動力学分野で発展してきた定常振動解析手法である調和バランス法を組み合わせ、調和バランス-境界要素法を開発し解析する。数値解析は、き裂面の動摩擦のみを接触条件とした場合の面外波動問題、及びき裂面の繰り返し打撃、動摩擦の両方を考慮した場合の面内波動問題に対して実行する。

境界要素法は、境界型解法であるため、(半)無限領域中のき裂による散乱現象を扱う際、き裂面のみを要素分割し、領域の要素分割を必要としない。また、き裂面における接触を考慮した非線形境界条件の設定を比較的容易に行うことができる。一方、調和バランス法では、求めたい物理量を有限のフーリエ級数で仮定し、三角関数の直交性によって連立非線形方程式を定式化する。その後、フーリエ係数を未知数として連立非線形方程式を解く。

非線形定常散乱解析を行うと、安定、不安定の区別なく解が求まる。そのため、調和バランス-境界要素法によって得られた解から物理現象を理解するには、解の安定性を調べる必要がある。調和バランス-境界要素法では、調和バランス法によって時間方向を取り扱うため、周波数領域で解析を行うこととなる。そこで、安定性の議論を周波数領域で行うHill's method が適していると考えられるため、その適用を行い、定常解の局所漸近安定性を調べる。

4. 研究成果

(1) 調和バランス-境界要素法の定式化

まず、動摩擦を伴うき裂による面外波動(SH波)散乱問題に対する調和バランス-境界要素法の定式化を行った。き裂面における動摩擦モデルはクーロン摩擦によって表現した。定式化はき裂による散乱問題を記述する時間領域境界積分方程式から出発し、き裂に対して平面波が入射されてから十分に時間が経過した意味で定常状態を導入した。き裂開口変位のフーリエ係数を未知量として扱い、連立非線形方程式を Numerical Continuation Method によって数値的に解くことで解析を行った。得られた解は従来の非定常解析結果と比較し、十分に時間が経過したときによく一致することから妥当性の確認を行った。

その比較の一例として、図2のような直線き裂に対して平面SH波を入射したときのき裂中心における開口変位の時刻歴波形を図3に示す。定常解析結果はフーリエ級数の次数

別に2種類載せている．黒の実線で示す従来の非定常解析結果が時間経過と共に，提案手法である定常解析結果（3次）と一致していく様子が見られる．この結果から，十分な次数のフーリエ級数を考慮すれば時間経過後の定常状態を解析できることが示された．

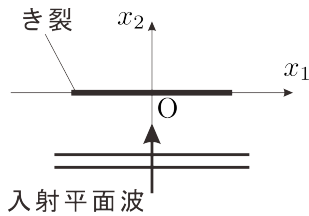


図2 直線き裂への平面波の垂直入射

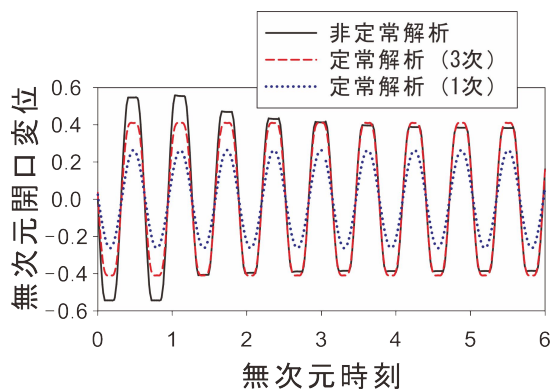


図3 平面SH波入射時のき裂中心における面外方向開口変位の時刻歴波形

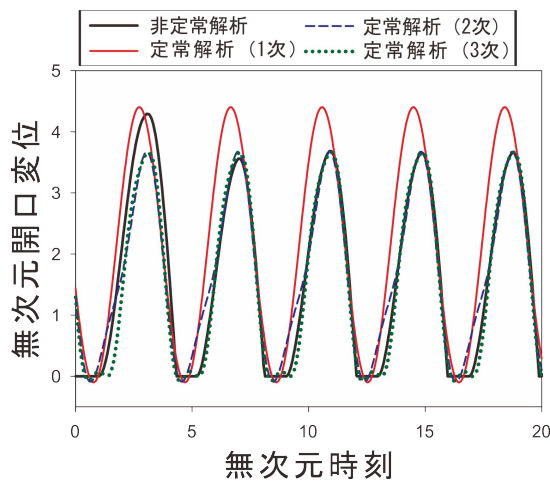


図4 平面P波入射時のき裂中心における鉛直方向開口変位の時刻歴波形

次に，き裂面の繰り返し打撃，動摩擦の両方をモデル化した面内波動（P-SV波）散乱問題への調和バランス・境界要素法の適用を行った．面外波動問題の場合と同様に，き裂面への入射波の到達から十分に時間が経過した意味で定常状態を導入し，連立非線形方程式を定式化した．数値解析結果は非定常解析結果と十分な時間経過後よく一致し，本定式化の妥当性が確認された．

その一例として，図2と同様のモデルで平

面P波を入射波とした場合のき裂中心における鉛直方向開口変位の時刻歴波形を図4に示す．こちらの結果でも時間が経過すれば，非定常解析結果が十分な次数のフーリエ級数を考慮した場合の定常解析結果と一致していく様子が見て取れる．

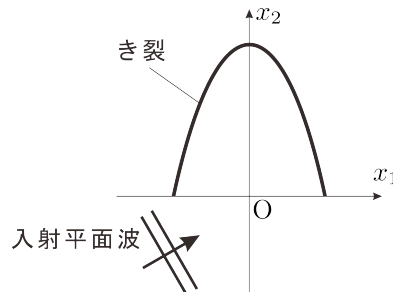


図5 曲線き裂への平面波の斜角入射

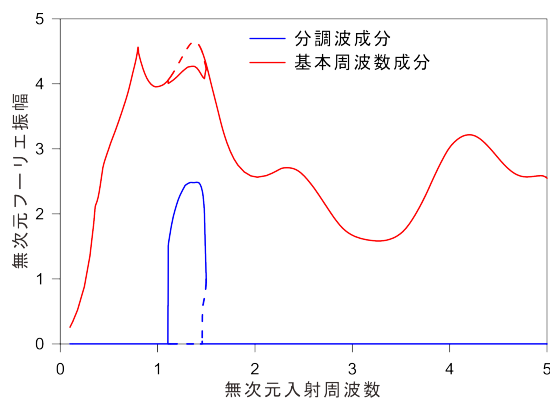


図6 分岐解析結果の一例

(2) Numerical Continuation Method によるパラメータを変化させたときの定常解の追跡・Hill's method による安定性解析

(1)で導出した面内波動問題に対する連立非線形方程式の解は入力パラメータによって分岐構造を有する場合がある．そのため，その入力パラメータを変化させたときの定常解の追跡を行い，解の分岐構造を調べた．分岐点の同定にはヤコビ行列の行列式のゼロ点を求める必要がある．しかしながら，行列式を直接計算するとアンダーフローが発生しやすく数値計算上好ましくないため，Bordered Method を用いた．また，Hill's method を時間領域境界積分方程式に適用することによって定常解の安定性を調べる方法を開発した．最終的に非線形固有値問題に帰着されたため，Sakurai-Sugiura method によって固有値を同定し，安定性の判別を行った．

解析結果の一例として，図5に示すように曲線き裂に対して平面P波を斜角入射したときのき裂中心における開口変位のフーリエ係数別の振幅を図6に示す．赤線が基本周波数（入射波の周波数）成分，青線が1/2次の分調波成分に対応している．また，実線が安定解，破線が不安定解を示している．解の分岐を伴い，分調波成分が値を示していること

がわかる．このときの入射周波数は系の共振周波数の2倍程度であり，分数調波共振が発生していることがわかる．また，この結果の安定解の部分は非定常解析との整合性も取れている．

(3)まとめ・今後の展望

本課題研究において，接触を伴うき裂による散乱問題に対する定常解析手法，及びその定常解の安定性解析手法の開発を行った．また，解空間の構造を調べるために Numerical Continuation Method によって入力パラメータを変化させた場合の定常解の追跡を行った．さらに，分岐現象が起こるパラメータの同定を行った．系の共振周波数の2倍程度の入射周波数を用いた場合に発生する分数調波共振が生じることがわかった．その結果，1/2 倍の周波数成分を含む散乱波が発生することが確認された．

当初の予定では，半無限弾性体中の表面き裂への定常解析手法の拡張を行う予定であったが，Numerical Continuation Method の適用による分岐現象の解析に重要性を感じたため，研究方法を変更した．分調波発生現象のメカニズムを調べることを目的としているため妥当であると考えられる．

そのため，実際の非破壊検査において重要となってくると考えられる材料表面のき裂を模した，半無限弾性体中の表面き裂への定常解析手法の拡張は今後の課題となる．また，計測実験との比較を行うことが重要である．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

丸山泰蔵，東平光生，き裂面の接触音響非線形性を伴う散乱問題に対する調和バランス・境界要素法，計算数理工学論文集 vol.17，pp.65-70，2017．

Taizo Maruyama and Terumi Touhei, Steady-state anti-plane shear wave scattering by a crack with friction, *J. Acoust. Soc. Am.* (accepted).

[学会発表](計 9 件)

Taizo Maruyama and Terumi Touhei, Harmonic balance-boundary element method for nonlinear ultrasonic waves caused by crack face friction, Society of Engineering Science 53rd Annual Technical Meeting, University of Maryland College Park Marriot Hotel & Conference Center, Maryland, USA, Oct. 2-5, 2016.

Taizo Maruyama and Terumi. Touhei, Steady-state analysis of nonlinear ultrasonic waves caused by crack face friction, 5th Joint Meeting of the

Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, Hilton Hawaiian Village Waikiki Beach Resort, Honolulu, Hawaii, USA, Nov. 28 - Dec. 2, 2016.

Proceeding of Meetings on Acoustics (POMA) vol.29, 045005, 2016.

丸山泰蔵，東平光生，き裂面の接触音響非線形性による非線形超音波発生現象に対する2次元定常振動解析，第24回超音波による非破壊評価シンポジウム，東京都立産業技術研究センター青海本部，東京，2017年1月26-27日．

丸山泰蔵，東平光生，接触条件を考慮したき裂による2次元散乱問題の調和バランス・境界要素法を用いた定常解析，第20回応用力学シンポジウム，京都大学吉田キャンパス，京都，2017年5月20-21日．

Taizo Maruyama and Terumi Touhei, Harmonic balance-boundary element method for 2-D wave scattering by a crack with contact boundary conditions, 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics, Palais des Congres, Montreal, Quebec, Canada, July 17 - 20, 2017.

丸山泰蔵，東平光生，き裂面の接触音響非線形性を伴う散乱問題に対する調和バランス・境界要素法，計算数理工学シンポジウム 2017 リゾートホテルオリビアン小豆島，香川，2017年12月15-16日．

丸山泰蔵，東平光生，接触音響非線形性を有するき裂による散乱問題の定常解の挙動について，第25回超音波による非破壊評価シンポジウム，東京都立産業技術研究センター青海本部，東京，2018年1月25-26日．

Taizo Maruyama and Terumi Touhei, Numerical continuation approach for steady-state wave scattering by a crack with contact acoustic nonlinearity, 4th International Conference on Computational Design in Engineering, Changwon Exhibition Convention Center, Changwon, Korea, April 1 - 5, 2018.

丸山泰蔵，東平光生，接触音響非線形性を伴うき裂による散乱問題に対する調和バランス・境界要素法の定常解の安定性について，第21回応用力学シンポジウム，名城大学天白キャンパス，愛知，2018年5月19-20日．

6．研究組織

(1)研究代表者

丸山 泰蔵 (MARUYAMA, Taizo)

東京理科大学・理工学部土木工学科・助教
研究者番号：90778177