

放射曲線辺を有する扇形板の振動に関する研究

学位論文内容の要旨

今日の科学技術の進歩によって、各種の機械は高速化・高性能化の一途をたどっている。また、省資源や省エネルギーの観点から軽量化の努力もなされている。この結果、機械や構造物の振動騒音問題はむしろ増加する傾向にあり、そのため、これらの動特性を追求することは工学的かつ工業的に重要なことである。本論文では、薄板理論に基づいて、放射曲線辺を有する片持扇形板の振動特性を論じている。このような曲線辺を持つ扇形板は、通信衛星のパラボラアンテナ、送風機や扇風機の羽根、プロペラなど、産業界の各分野で広く用いられている構造要素である。このため、これらの動特性を論じている研究もかなりあるが、その多くは放射直線辺を有する扇形板に関するものであり、支持条件も半径方向や円周方向が単純支持、あるいは固定された扇形板に関するものである。これに対して本研究では、内半径が固定され、他のすべての辺が自由である放射曲線辺を有する片持扇形板の振動特性を解析する。このような境界条件を持つ扇形板には厳密解が存在しないので、数値解析や、その他の手法によって近似解を求めなければならぬ。ここでは、半径方向の二つの辺が曲線辺であるため、変数変換を併用したリッツ法を用いて解析を行い、自由振動と定常応答に関する数値計算を実施するとともに、有限要素法による結果や、振動実験結果との比較を行うことにより、本解析方法の妥当性を検証している。

本論文は全6章で構成されており、その概要を以下に述べる。

第1章は緒論であり、本研究の目的と意義、さらにこれまでの研究動向と各章の概要を述べている。

第2章では、論文全体を通じて用いられている基礎式を与えている。はじめに、放射曲線辺を有する扇形板の定義と、解析に用いられる座標変換のヤコビアンについて述べている。すなわち、対称あるいは非対称な放射曲線辺を有する片持扇形板について、その定義式を誘導している。さらにこれらの扇形板を単位の大さの外半径を持ち、放射直線辺を有する扇形板に変換するため、変換マトリックスの定式化を行っている。次に、第4章と第5章で取扱う変厚扇形板とFRP積層扇形板の場合との比較を可能とするため、放射曲線辺を有する片持扇形板の自由振動と、力起振、ならびに変位起振されたときの定常応答の定式化を行なっている。

第3章では、等方性、等厚で、対称な放射曲線辺を有する片持扇形板と非対称な放射曲線辺を有する片持扇形板の自由振動と定常応答を解析し、以後の研究の比較の基準を与えている。まず、対称な放射曲線辺を有する扇形板に関して、開き角(α_i)の変化にともなう放射曲線辺の形状の変化の様子を明かにし、そのときの固有振動数を求めるとともに、扇形板の固有振動モードを与えている。なお、直線辺を有する扇形板の固有

値について、他の研究者の実験値との比較をおこない、本方法の妥当性を検討している。また、対称で凸形に曲がった放射辺を有する片持扇形板の固定端に、面外調和起振変位が作用するときの定常応答を求め、内部減衰比 δ_E が小さいときには鋭い応答ピークが現れるが、 δ_E が大きくなると応答ピークは鈍化すること、共振点は観測位置をかえても変化しないが、反共振点はその位置によって変化すること、さらには定常応答の変位振幅分布は自由振動モードの節線によって分割された領域内に分布することなどを明らかにしている。

一方、非対称な放射曲線辺を有する片持扇形板の自由振動では、固定部の開き角を一定 ($\alpha = 45^\circ$) とし、先端部の開き角 (α_3) を変化させたときの扇形板の形状の変化と、それに伴う固有値の変化を明らかにするとともに、非対称な放射曲線辺を有する扇形板の振動モードを与えている。また、非対称な扇形板の定常応答では、任意の一点に調和起振力が作用するときの、駆動点インピーダンスと変位振幅分布を求めている。その結果、減衰比 η が小さいとき鋭い応答ピークが現れるが、 η が大きくなると応答ピークは鈍化すること、曲がり角 α_3 が大きくなると共振振動数は減少すること、起振点 (ζ_1, φ_1) を変えても共振振動数はほとんど変わらないが、反共振点の振動数と変位振幅分布は、かなり変化すること、また応答変位分布の極大値は固有振動モードの節線によって分割される領域の数に対応して現れることなどを明らかにした。

第4章では、放射曲線辺を有する変厚片持扇形板について、対称と非対称な形状の扇形板の自由振動と、面外調和起振変位を受ける場合の定常応答を、リッツ法を用いて解析を行うとともに、数値計算を行った。このとき、板の曲げこわさを板厚の関数として取扱うとともに、単位の大きさの外半径を有する扇形板に変換し、変厚扇形板のエネルギーを評価することによって、運動方程式を誘導した。自由振動では、固定部の開き角、あるいは、先端部の開き角を変化させたときの形状の変化の様子と、板厚比を変化させたときの固有振動数の変化を調べた。また、板厚が固定端から自由端へ変化する、対称と非対称な変厚扇形板の固有振動モードを、等厚の扇形板と対比して示した。次いで、変厚片持扇形板の固定端に面外調和起振変位が作用するとき、対称、非対称の扇形板について検討した結果、内部減衰比 δ_E と板厚が増加すると一般に応答変位は小さくなること、変位振幅分布は自由振動モードの節線によって分割される領域内に現れること、さらに共振点は自由振動の固有値と一致し、反共振点は観測点の位置によって変化することなどを明らかにした。

第5章では、軽量、かつ強靱性のために構造要素として広く用いられているFRP積層扇形板の自由振動について論じている。ここでは、一方向に繊維強化されたラミナによって対称積層された4層のCFRP積層片持扇形板の自由振動を座標変換を併用したリッツ法によって解析を試みるとともに、有限要素法、ならびに加振実験と自由振動実験を行っている。すなわち、標準形の積層片持扇形板と非対称な放射曲線辺を有する積層片持扇形板について、有限要素法による解析では、汎用有限要素法解析ソフトウェアであるNISA IIによって、実験では、加振器とレーザ変位計を用いて板の面外変位を計測して振動モードを求めた。さらに自由振動実験では、FFTを用いて周波数分析を行った。その結果、固有振動数に関しては、リッツ法と有限要素法による結果は良く一致した。加振実験と自由振動実験の値は相互に良く一致しているが、計算で求めた値よりも低くなる傾向にある。また、振動モードは3者とも良い一致が認められた。以上のことより、本解析手法の妥当性を検証することができた。

第6章は本論文の結論であり、各章で得られた成果を取りまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 田 元
副 査 教 授 岸 田 路 也
副 査 教 授 三 上 隆

学 位 論 文 題 名

放射曲線辺を有する扇形板の振動に関する研究

今日の各種の機械は高速化・高性能化の一途をたどり、また省資源や省エネルギーの観点から軽量化が図られている。この結果、機械や構造物に生ずる振動・騒音問題は増加の傾向にあり、これらの動特性を追求することは工学的・工業的に重要である。

本論文は、薄板理論に基づいて、これらの構成要素である、放射曲線辺を有する片持扇形板の振動特性に関する基礎的な研究を行なったものであって、その主要な成果は次の点に要約される。

[1]放射曲線辺を有する扇形板の定義と、これらの扇形板を、単位の外半径を持ち、放射直線辺を有する標準形の扇形板に変換するための変換マトリックスの誘導、さらには放射曲線辺を有する片持扇形板の自由振動と、力あるいは変位励振されたときの定常応答の定式化を行ない、以後の解析の基礎となる式を与えた。

[2]等方で、一様板厚の、対称な放射曲線辺あるいは非対称な放射曲線辺を有する片持扇形板の自由振動と定常応答を、リッツ法を用いて解析し、曲線辺の形状が固有振動数と振動形、ならびに応答変位に及ぼす影響について論じた。さらに、標準形の扇形板の固有振動数について求めた結果を、他の研究者による数値結果との比較を行ない、用いた解析方法と得られた結果が妥当であることを示した。

[3]ついで、板厚が半径方向や円周方向に変化するときの、放射曲線辺を有する片持扇形板の自由振動と板の固定端が面外方向に変位励振されたときの定常応答を、リッツ法により解析し、扇形板の固有振動数と振動形に及ぼす板厚変化の影響を明らかにするとともに、板の内部減衰と厚さの変化がその応答に与える影響についても検討し、板の厚さの変化が扇形板の振動特性に及ぼす影響を明らかにした。

[4]さらには、一方向に繊維強化されたFRP積層片持扇形板の自由振動を座標変換を併用したリッツ法を用いて解析するとともに、有限要素法や振動実験の数値との比較・検討を行ない、固有振動数に関しては有限要素法による結果と、振動モードについては両者の結果と良く一致することを確認し、本解析法の有用性・妥当性を検証した。

これを要するに、著者は、放射曲線辺を有する片持扇形板の振動解析法と振動特性を

論じたものであり、この種の構造要素の振動解析上有益な知見を得ており、機械振動学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。