

内96-18

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

ロバスト構造に関する研究

申請者

廣安 知之

Tomoyuki Hiroyasu

機械工学専攻・構造振動研究

1996年 12月

近年、コンピュータがハードウェア・ソフトウェアの両面で急速に発達し、数値計算等で設計者を支援する機会が増加している。構造設計の支援を特に設計の上流部においてコンピュータによって支援するためには、従来、設計者が独自に使用してきた設計の大局的な基準や指針を明確にする必要があるものと考えられる。構造およびそれをとりまく環境には各種の変動要素が存在するが、それらに適切に対応することも設計の大局的な基準および指針の設定の際の重要な要素の一つであると考えられる。これまでに各種の変動に対してロバスト性を考慮するような設計法の研究は比較的多く行われているのに対して、構造を対象にそのロバスト性を特に検討している研究例はほとんどみられない。そこで、本研究では構造に各種変動が生じても構造の特性または応答が変動しにくい構造を「ロバスト構造(Robust Structure)」と簡単に呼び、新しい構造の概念であるととらえた。本論文では、そのロバスト構造に関して、問題を整理し、設計の際に必要な大局部的な基準関数の選択、その基準関数によって設計されるロバスト構造および設計方法などについて検討を行いました。特に設計の上流部においてロバスト構造を設計することは種々の観点から非常に有効であることを示し、設計の上流部におけるロバスト構造を設計する際に解決しなければいけない問題点をあげ、それについても検討を行い、最後に設計の指針を示した。

本論文は8章から構成されている。各章の概要は次の通りである。

第1章は緒言で、研究の背景、関連する従来の研究および本研究の位置付けと目的を示した。

第2章では「ロバスト構造」の定義を行い、ロバスト構造問題の整理を行った。それによるとロバスト構造問題は、設計の際に必要な評価関数から分類して「狭義のロバスト構造問題」と「広義のロバスト構造問題」とに分類できることが明らかとなった。また、狭義のロバスト構造は、局所的な感度と最適設計の手法を活用して設計できることを示した後、さらに、広義のロバスト構造問題を解くことで設計の上流部での設計がより合理的に行えることなどを示した。更に、広義のロバスト構造問題を解決するためには、基準関数の選択が非常に重要であることを明らかにし、その具備すべき条件を挙げ、いくつかの候補を挙げた。

第3章では、静的問題における広義のロバスト構造問題の基準関数を第2章で挙げ候補の中から選択し、それにより設計されるロバスト構造の検討をはりおよびトラス構造に対して行った。まず、弾性ひずみエネルギーを基準関数として採用したところ、構造がトラス構造の場合、弾性ひずみエネルギーの感度値を最小化することによって得られる構造は、構造全体にわたって変位および応力のロバスト性が向上することを示した。また、はりやトラス構造において特に重要な挙動である座屈に着目して、座屈応力を基準関数として採用した場合についても検討した。それによると、座屈モードの変位が仮定できる場合には、弾性ひずみエネル

ギのロバスト性を向上させるような設計を行うことで、座屈荷重のロバスト性も向上することを明らかにした。

第4章では、動的問題における広義のロバスト構造問題の基準関数を候補の中から選択し、それにより設計されるロバスト構造の検討を行った。まず、構造の固有値を基準関数として採用し検討を加えた。それにより固有値の感度値を最小化してロバスト構造を設計すると、得られたロバスト構造は、その固有値のロバスト性が向上するだけでなく、それに付加される制御系のコントロールゲインのロバスト性も向上することを明らかにした。また、ロバスト構造の形状特性として、振動モードの腹にあたる部分に質量が集中することも数値計算より明らかにした。さらに、振動モードによって表せる弾性ひずみエネルギーおよび運動エネルギーと固有値との関連を検討し、その基準関数によって設計されるロバスト構造についても考察した。それによると振動モードを剛性マトリクスまたは質量マトリクスで正規化した場合、固有値を基準関数とした場合に設計されるロバスト構造と同様のロバスト構造が設計できることを示した。この指標は、特に振動モードが仮定できる場合には特にロバスト構造設計の効率を向上させることができ、数値計算例でそれを示した。さらに、この指標は静的問題と動的問題を同時に考慮する場合に、静的問題における基準関数として弾性ひずみエネルギーを採用することで、これらを統合して基準関数を設定することが可能であることを示した。特に動的問題における固有振動モードが静的問題の変位に近い場合には、静的問題における弾性ひずみエネルギーを基準関数として採用することで、静的問題および動的問題を同時に考慮するロバスト構造が設計できることを示した。これらの結果を考慮して、さらに、一定時間に構造に蓄えられる弾性ひずみエネルギーおよび運動エネルギーを基準関数として選択し、変位応答や速度応答など構造の動的応答のロバスト性を検討した。ここでも弾性ひずみエネルギーを基準関数として採用することで、変位応答のロバスト性を有するロバスト構造が設計できることを明らかにした。

第5章では2次元弾性体およびその他の構造における広義のロバスト構造問題の基準関数の検討を行った。静的問題においては、線形弾性構造物に対して、はりおよびトラス構造のロバスト構造設計の際に有力な候補として挙がった弾性ひずみエネルギーの検討を行った。その結果、この場合にも弾性ひずみエネルギーは静的問題に対して基準関数の有力な候補の一つとなることを明らかにした。動的問題においては、固有値を基準関数として、主に曲げ板構造に対して、数値計算例などを示した。その結果、はりと同様に、質量を振動モードの腹の部分に集中させることでロバスト性を高めることができることを明らかにした。

上記の第3章から第5章では広義のロバスト構造問題の基準関数を候補の中からいくつか選択しその基準関数によって設計されるロバスト構造の検討を行った。

その結果、弾性ひずみエネルギーを基準関数として選択することで、いくつかの特性のロバスト性を同時に向上させることができ、弾性ひずみエネルギーは特に有力な広義のロバスト構造問題の基準関数の候補の一つであることを明らかにしたのであるが、設計の上流部においては、変動パラメータのより広い範囲でのロバスト性を保証し、より広い設計領域でロバスト構造設計を行うことが望ましい。

そこで、第6章ではそれらの問題に対して、変動パラメータのより広い範囲でロバスト性を保証し、より広い設計領域で設計されたロバスト構造を特に「広域ロバスト構造(Wide Ranging Robust Structure)」と呼び、その概念を示した。さらに具体的な設計方法として、ファジィロバスト構造とロバストフェイルセーフ構造の設計方法を提示した。すなわち、これまで行ってきた設計では、感度値をロバスト量として表しロバスト構造を設計することが有効であると考えてきが、感度は局所的な情報であり、場合によっては十分なロバスト性が得られない場合も生ずる。そこで、より広い範囲でロバスト性を保証できるようにファジィ関数で変動パラメータで表しロバスト構造を設計する手法を提示し、これをファジィロバスト構造設計と呼び設計手法を示した。これに従って数値計算を行いその有効性を確認した。さらに、ロバスト構造はこれまで弾性域の比較的小さな変動に対応することを想定しており、比較的大きな変動に対しては塑性域や破壊などを考慮した設計法の確立が必要である。そこでは、き裂が生じた際にも構造の機能が保持されるフェイルセーフ構造を検討して、ロバスト・フェイルセーフ構造の概念を提示した。また、構造の位相と構造の材料係数を同時に決定するようなロバスト・フェイルセーフ構造設計を示した。

第7章ではこれまで検討してきた結果を踏まえて設計上流部における合理的なロバスト構造設計を行うために次の3つの指針を示した。すなわち、基準関数の決定法、基準関数および変動パラメータが単一の際の広い範囲でロバスト性を保証するロバスト設計手法、および、基準関数と変動パラメータが複数存在する場合のロバスト構造設計に関する指針である。これらの指針に従ってロバスト構造を設計することで、設計上流部において合理的にロバスト構造を設計できることを示した。

第8章では、以上より得られた結果の総括を行った。