

外受21-12

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

感度解析と逆解析の

構造設計への適用に関する研究

Application of Sensitivity Analysis  
and Inverse Analysis to Structural  
Design

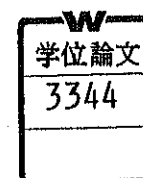
申請者

菊田 征勇

氏名

Yukio Kikuta

専攻・研究指導  
(課程内のみ)



2001年11月

理 2700 ( 3344 )

感度解析は、最適設計、逆解析、設計改善など、工学の広い分野で利用されており、また重要な役割を果たしている。構造物の応答などを部材断面形状寸法に関する変数などの感度変数で偏微分した値を感度係数と呼び、偏微分係数を求める方法を感度解析法という。最適解を求める場合、通常は収束するまで反復計算を行っているが、感度解析を簡潔に、精度良く行うことができれば最適化の計算効率を高めることができるし、収束にいたるまでの反復計算の回数を減らすことができる。また最適解が求められた後で、設計条件として用いたパラメータの値を変更したい場合にも、最適解としての最適目的関数値や設計変数値の感度係数を計算することにより、再度最適化計算をしないでも、近似的に感度係数から新たな最適解を推定できる。

構造最適設計は、構造物の部材の応力度や節点変位などの構造応答が等号制約、不等号制約および部材断面積の上限・下限などの側面制約条件を満足し、かつ、設計の優劣を判断する基準となる評価関数を最小（または最大）にするように設計変数を定める問題である。構造物を設計する場合に、設計者の勘や経験や過去の設計データに基づいて、作用荷重や座屈に対して安全であり、不快な振動や過度の変形が生じないように、また、建設費やライフサイクルの維持費も含めて経済的で安全な構造物を設計しなければならない。場合によれば居住性や使用性のよい構造物を設計しなければならないこともある。そのような場合に最適化手法を用いることは非常に有効である。

与えられた構造諸元や構造特性に基づいて、構造物の応答を求めるという通常の問題は、順問題あるいは順解析といわれるが、これとは逆に、構造応答や制約条件が与えられていて、それらの応答や制約条件を満たすように構造諸元や構造特性を推定する問題は逆問題あるいは逆解析といわれる。構造物の経年変化や荷重の作用による変形から必要とするパラメータを逆解析的に求めて維持管理や施工管理に役立てようとするのが行われている。

本研究は、土木構造物のうち鋼構造物を対象として感度解析を行い、それを基に最適設計・逆解析を行なって、得られた成果をまとめたものである。なお、逆解析は、多層弾性構造物である舗装構造を対象として維持修繕に必要なパラメータを求めるためのものである。

各章の主な結論を列挙すれば下記のとおりである。

第1章の「序論」では、本研究の背景および目的について述べるとともに、本研究の構成、使用した用語の定義や記号を明らかにしている。

第2章の「構造応答に対する感度解析」では、感度解析についての一般的記述を行い、平面骨組構造物の静的応答問題を例にとり、感度解析より得られる応答感度係数に感度変数値を乗じた構造物全体の総和が常に原系（現構造系）の応答値の定数倍となる性質を誘導した。感度解析の精度としては、はり部材では断面2次モーメントの逆数や断面積の逆数を感度変数とした場合がよく、トラス部材では断面積の逆数を感度変数とした場合がよいことが分かった。

平面骨組構造物の固有値問題では、感度解析より得られる固有円振動数および

固有ベクトルの感度係数を原系の固有円振動数および固有ベクトルと感度変数値で無次元化し、骨組構造物全体について総和した値がある定数となる特性を導いた。この特性から感度解析を行う場合選択すべき感度変数についての情報が得られた。感度係数特性に基づいた感度係数の新しい近似解法も提案した。

モーダルアナリシスを用いた骨組み構造物の動的応答の感度解析では、固有値および固有ベクトルの設計変数による偏微分を求めることなく、動的応答解析と平行して効率的に感度解析を行う方法を開発し、4種類の構造モデルを解析してその妥当性を確認した。減衰マトリックスCが剛性比例型の場合でもあるいは減衰マトリックスの感度を無視した場合でも、減衰マトリックスの偏微分が感度解析の結果におよぼす影響は非常に小さい。感度解析の精度は総合的に見て、断面2次モーメントの逆数が一番よくそのつぎに断面積の逆数がよい。

第3章の「動的荷重を受ける構造物の最適設計」では、まず最適設計発展の歴史を述べている。つぎに、動的荷重が作用する構造物に関する最適設計の一般的記述を行い、最適解を求める過程を示した。例題として動的荷重を受けるトラス構造物の最小質量設計を行い、理論の有効性を示した。構造物の最適質量は、外力の振動数の影響を大いに受ける。外力の振動数のある範囲に対応する質量は、外力の振動数を増加させていった場合と減少させていった場合のように、初期値が異なると最適解が別々に求まる。したがって、初期値が適切でなければ、局所的最適解に到達する。

また、応力、座屈、変位および最小断面等の制約条件の下で、静的荷重のみならず地震力の作用を受ける構造物の最適化手法を誘導し、例題を用いて、誘導したアルゴリズムの有効性を示した。同じ構造形式の構造物でも、異なる卓越周期の地震力が作用した場合、それに対応する最適構造物の構造特性（最適質量や固有振動数）がどのように変わるかを検討した。

さらに、変電施設を設計する場合の耐震設計基準に基づいて、共振正弦3波入力地の盤振動加速度を受ける構造物の最小質量設計のアルゴリズムを提案し、頂部に重量物が載っているトラス構造物の最適耐震設計を行い、そのアルゴリズムは時間領域での構造物の最適質量配分に有効であることを証明した。感度解析においては、質量マトリックスおよび減衰マトリックスの設計変数に関する偏微分は用いていないが、スムーズな収束が観察された。

第4章の「荷重方向の変動を考慮した構造物の最適設計」では、まず、複数の静的荷重が作用してそれぞれの荷重がその作用方向を変動できるという複雑な荷重状態のもとで、構造物の最適化を行うアルゴリズムを誘導し、例題を用いて解を求めアルゴリズムの妥当性を示した。つぎに、荷重の作用位置と大きさは定まっているが作用方向が任意に変動する動的荷重を受ける構造物の最適化のアルゴリズムを提案し、例題を用いてその有効性を示した。

荷重方向が変動する最適設計の場合、静的荷重であれ動的荷重であれ、設計変数を一定として制約条件を最大化する副問題と荷重方向などの環境変数を一定として目的関数を最小化する主問題に分離して取り扱ってよいことを理論的に導き、

数値計算例から理論の妥当性を示した。最大化の過程は構造解析の特性を考慮すると解析的に実行できる場合もあるが、最小化の過程は何らかの最小化の手法を用いて反復しながら解が求められる。本節で開発されたアルゴリズムは、風荷重を受ける鉄塔構造物や波浪荷重を受ける海洋構造物の設計に適用できるものと思われる。

なお比較のために、静的荷重を受ける場合に、2種類の近似解法を用いて最小質量設計を行い、本手法との比較を行っている。その1：荷重方向が変動する範囲を複数個の荷重方向に分割して最小質量設計を行い、それぞれの荷重方向の最適結果からそれぞれの部材の最大の断面積を選ぶ方法。この方法は、十分に注意をして用いないと危険な設計となることを示している。その2：複数個の荷重状態による応力制約条件を同時に満足するように最小質量設計を行い、断面積を決定する方法。この方法は比較的よい近似解を与える。精度を増すためには考慮する荷重方向の分割数を増やすことによって解決できる。

第5章の「多層弾性構造物の時間領域における逆解析」では、まず逆解析の現状について述べるとともに、舗装の支持力を測定する非破壊試験機として広く用いられているFWD(Falling Weight Deflectometer)試験について述べている。ついで、舗装の層弾性係数は未知である場合が多いため、あるいは経年変化で弾性係数が当初の値から変化しているため、FWDによって測定された表面たわみから層弾性係数を求める必要がある。この逆解析に有限要素解析を用いる場合解析精度に大きな影響を与える解析領域の範囲について検討している。多層弾性構造物を軸対称要素を用いて有限要素解析するとき、FWD試験における測定たわみの精度を考慮すると、荷重作用時間が25 msから50 msの範囲では、深さ方向および半径方向とも5.00 mとすれば十分である。また、最大荷重到達後荷重が0になるまでの荷重作用時間もたわみに影響をおよぼし、荷重作用時間が長くなるとたわみは大きくなる。FWD試験機で測定した最大荷重と舗装表面の各センサーの最大たわみを用いて静的に逆解析を行うのは計算効率を考慮すると大変都合がよいが、数種類あるFWD試験機の荷重波形が異なっているので、それに応じて応答も違ってくる。したがって、静的逆解析からパラメータを推定するのは難しいと思われるので、FWD試験機の作用荷重の変化の状況を統一することが望ましい。

最後に、リッツベクトルを導入して動的応答計算に用いる自由度の数を減らし、効率的に動的逆解析を行うアルゴリズムを開発し、5種類の減衰モデルを用いて逆解析を行い、数値シミュレーションによりその妥当性を検証している。運動方程式を用いて作成したリッツベクトルを感度方程式に適用しても逆解析が可能であること、今回検討した実舗装構造の減衰モデルとして剛性比例あるいは非比例モデルが適切であると思われること、またモデル誤差あるいは測定誤差の影響を受けやすい実測データを用いて逆解析を行う場合、数値計算上の不安定性を軽減するため、未知パラメータの無次元化と適切な閾値の設定が必要であること、などが分かった。

最後に逆解析最適設計および感度解析について今後の展望を述べている。