

構造最適化システムのための設計感度解析

Design Sensitivity Analysis for Structural Optimization System

あらまし

近年、構造最適化分野の研究が大幅に進み、その最新技術を組み込んだ構造最適化ツールが構造設計の現場で利用されはじめた。

今回、富士通は構造解析プログラム“POPLAS/FEM5”をベースとした構造最適化システム構築の一環として「感度解析」機能を開発した。感度解析の処理時間および精度は、構造最適化システム全体の性能（繰返し回数や目的関数の結果）に影響を及ぼす。そこで、米国VMA社^(注1)と共同で、構造最適化に必要な応答を一時的に削除する、スクリーニング機能を開発し、感度解析の処理時間を削減した。さらに、感度係数の精度を左右する適当なステップサイズを自動的に設定する機能を開発した。

本稿では、これらの技術の詳細を述べ、内圧を受ける容器および飛行機の翼の簡易モデルを使って実際の効果を示す。

Abstract

Recently there have been significant advances in structural optimization, and structural optimization tools are now being used in practical applications.

Fujitsu has developed a sensitivity analysis system as part of a structural optimization system based on POPLAS/FEM5. The calculation speed and accuracy during sensitivity analysis affect many aspects of the structural optimization, for example, the number of iterations and the calculated values of objective functions. Therefore, to reduce the calculation time, this system has a screening function that removes temporarily unnecessary responses before sensitivity analysis. Also, to improve accuracy, this system automatically establishes an optimal step size for the calculation of sensitivity coefficients.

This paper describes these techniques in detail and demonstrates their effects when applied to the sensitivity analysis of a simplified airplane wing and a pressure vessel.



鳥居和久 (とりい かずひさ)

1985年愛知教育大学教育学部数学科卒。同年(株)富士通東海システムエンジニアリング入社。以来構造解析パッケージの開発に従事。システムサービス事業部オープンシステム推進部。



大原敏晴 (おおはら としやす)

1986年信州大学工学部土木工学科卒。同年(株)富士通長野システムエンジニアリング入社。以来構造解析パッケージの開発に従事。解析研究室。



赤堀克彦 (あかほり かつひこ)

1984年金沢大学工学部機械工学第二学科卒。同年富士通入社。以来構造解析パッケージの開発に従事。1990年から3年間米国VMA社に駐在。科学システム統括部スーパーコンピュータシステム部。

まえがき

近年、製造業の設計部門では、設計期間の短縮、設計コストの削減を目指し、有限要素法に代表される構造解析ツールの導入が盛んになってきている。富士通が1977年から独自に開発を行っている構造解析ソフト“POPLAS/FEM5”(以下、FEM5)もその一つであり、現在650本の導入実績がある。この分野で最近注目を集めている先端技術の一つに構造最適化がある。

構造最適化は、設計上の様々な制約の下で、より優れた設計目標を達成するような構造物の寸法や形状を求める技術である。これは、構造解析をベースに、設計変更の指針を与える感度解析と与えられた条件から数学的な最適解を求める数値最適化とを組み合わせたシステムからなり、従来、設計者の経験や勘をもとに試行錯誤しながら行ってきた設計変更の繰返し作業を、コンピュータでシミュレートするものである。

構造最適化は、設計作業の効率化を図る上で期待されている技術ではあるが、構造解析と感度解析を何度も繰り返して実行するため、コンピュータが高速になった今日でさえ、実用モデルに適用するには、かなりの計算時間を覚悟しなければならない。このため、構造最適化の処理効率の向上は実用化に向けての重要な課題であるが、感度解析の「処理時間および精度」の改善は、これに大きく寄与するものである。

このような背景において、構造最適化システムの構築を前提とした感度解析の開発を、この分野では世界的に著名な米国VMA社¹⁾と共同で行った。

本稿では、感度解析の処理時間および精度の改善を中心に今回開発した技術的な特徴について述べる。

構造最適化における設計感度解析

● 構造最適化

構造最適化¹⁾に必要な設計データを表-1に示す。設計変数は、設計の変更を可能にする量で、梁(はり)の断面積や板の厚さなどを変更する寸法の設計変数と節点の座標値を変更する形状の設計変数の二つがある。設計制約は、設計変更の繰返しの過程で、満足されなければならない量、例えば、設計上重要な箇所の応力や構造物が持つ固有振動数に制限を設けるものである。目的関数

表-1 構造最適化に必要な主な設計データ

項目	設計データ	内容
設計変数	DESVAR DLINK	設計変数の初期値、上下限値を定義 設計変数間の1次結合を定義
設計変数と構造データの関係	DVPREL1 DVPREL2 DVGRID	設計変数と形状特性値の線形関係を定義 設計変数と形状特性値の非線形関係を定義 設計変数と節点座標値の関係を定義
設計応答	DRESP1 DRESP2	構造解析から出力される直接応答値を定義 (変位、要素力/要素応力、重量、体積、固有値) 合成応答値を定義 (直接応答、設計変数、節点座標値から成る応答を数式で定義)
設計制約	DCONSTR	設計応答値の上下限値を定義
設計目的関数	DESOBJ	設計目的関数に指定する設計応答値を定義

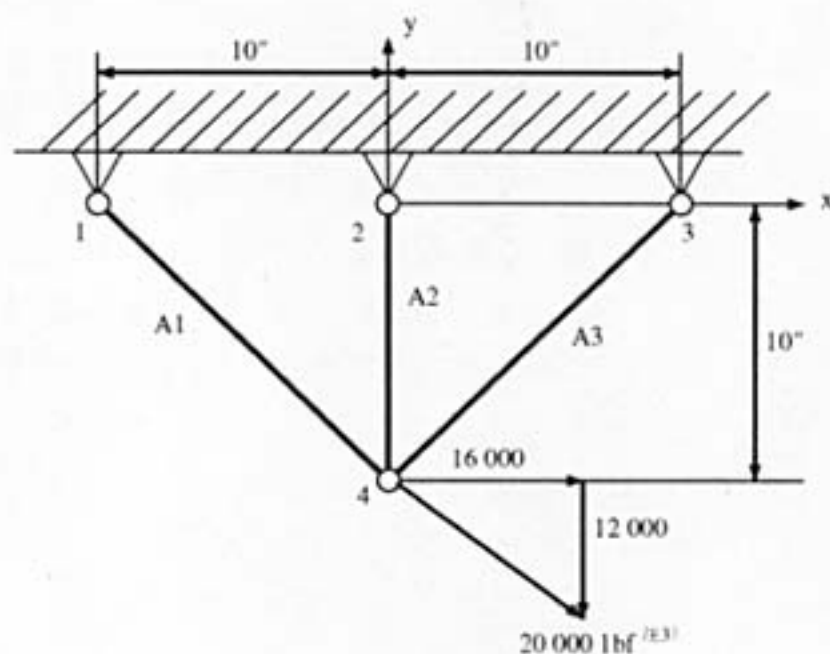


図-1 3部材トラスモデル

Fig.1-Three bar truss model.

は、設計の目標を示す量で、通常、重量の最小化や応力の最小化に用いられる。

構造最適化の概要を理解するために、ごく簡単な3部材のモデルを使った例を図-1に示す。この例では、各部材の断面積(A1, A2, A3)を設計変数に指定し、節点4のX, Y方向の変位を0.2"および各部材の応力を20,000 psi²⁾以下に抑えながら、三つの部材の総重量を最小にする問題を考えている。図-2は、構造最適化の繰返しによる目的関数と設計変数の変化を示す。

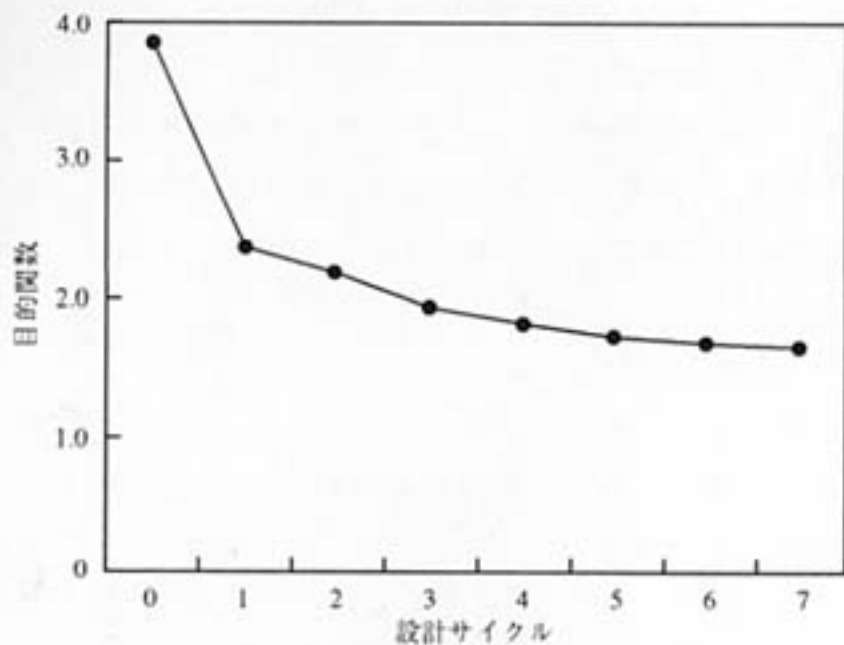
● 設計感度解析の役割

構造最適化システムは、図-3に示すように大きく三つの機能からなる。これらの機能が、設計の条件を満足し最適解を得るまで繰返し実行される。

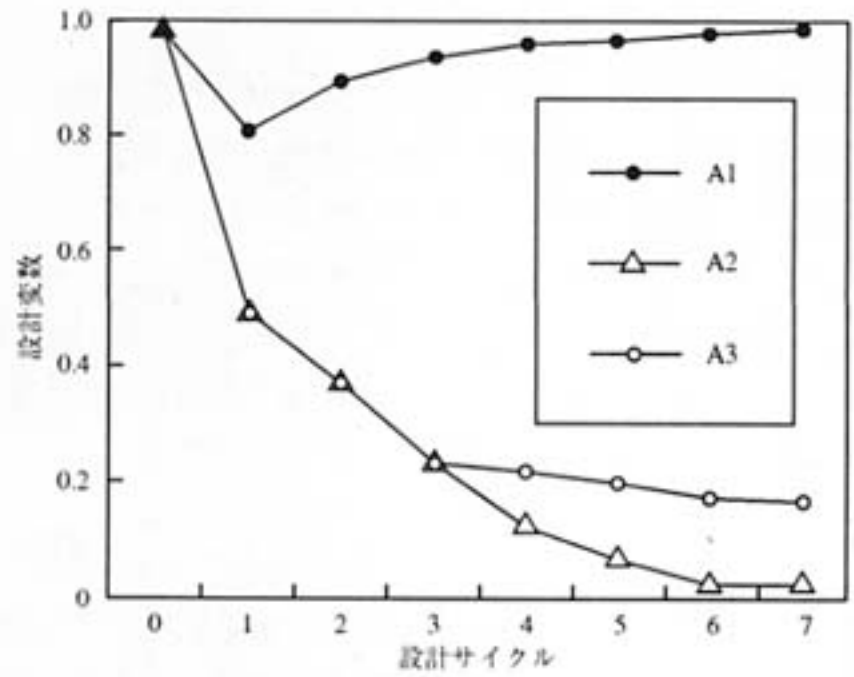
注1) VMA Engineering (VANDERPLAATS, MIURA & ASSOCIATES, INC.)。1984年にVanderplaats博士によって設立された会社。構造最適化分野の世界トップレベルの技術を有する。

注2) 1 psi = 6894 Pa

注3) 1 lbf = 4.448 N



a) 目的関数の変化



b) 設計変数の変化

図-2 3部材モデルの最適化過程

Fig.2-History of three bar truss optimization.

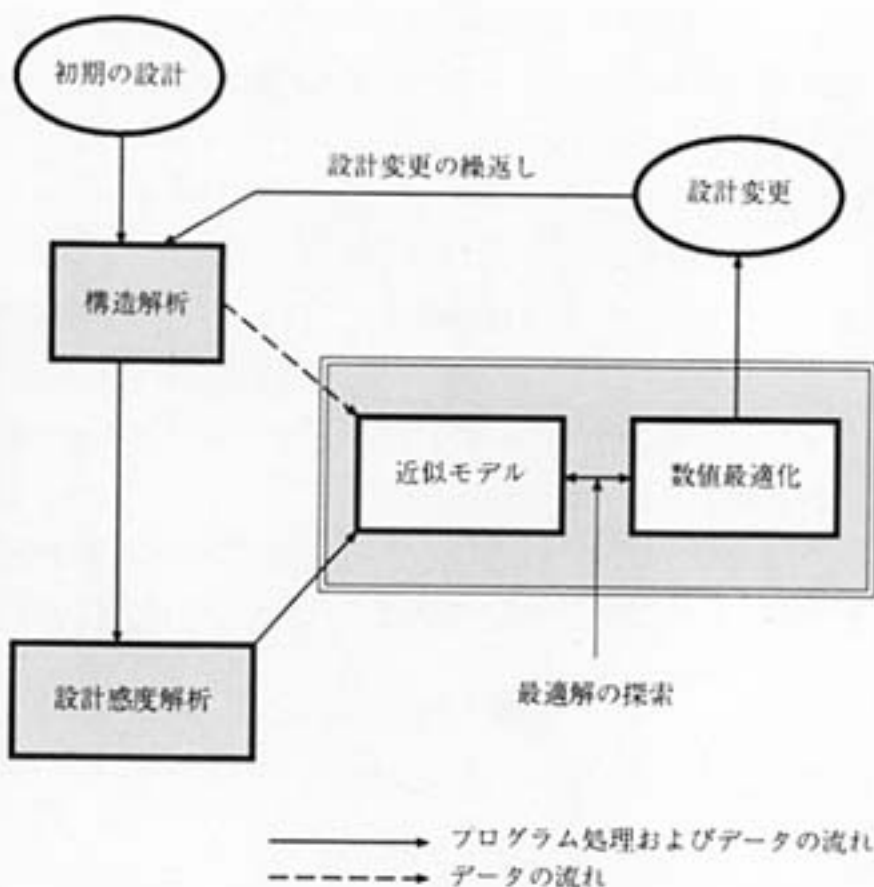


図-3 構造最適化システム

Fig.3-Structural optimization system.

【構造解析】

構造解析は、構造物に与えられた荷重条件や拘束条件から、構造物の変形や応力を計算する。これらは、つぎの平衡方程式に基づいて計算される。

$$[K(X_0)] \cdot [U(X_0)] = [F(X_0)] \dots \dots \dots (1)$$

$N \times N \quad N \times P \quad N \times P$

ここで、 N は構造物全体の自由度数で、 P はサブケース数である。 X_0 は設計変数のベクトルで、設計変更の

繰返しの過程で更新される最新の設計変数が用いられる。式(1)は $[U(X_0)]$ に関して解かれる。

構造最適化では、設計変数に変更されるごとに構造解析を行い、目的関数や設計制約の量を再計算する。これは、変更されたモデルの設計状況を正しく評価し、以降の設計変更の基礎データを提供する。

【設計感度解析】

設計感度解析は、設計変数の変更が、目的関数や設計制約に与える影響度(以下、感度係数)を定量的に計算する。ここでは、変位の感度係数を計算する式を説明する。

変位の感度解析は次式で計算する。

$$\frac{\partial u_{i,p}}{\partial x_i} \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, NDV \\ j = 1, 2, 3, \dots, N \\ p = 1, 2, 3, \dots, P \end{cases} \dots \dots \dots (2)$$

これは、 p 番目のサブケースでの i 番目の設計変数に関する j 番目の自由度についての感度係数を示す。式(2)は、式(1)を x_i に関して微分した。

$$[K(X_0)] \frac{\partial U(X_0)}{\partial x_i} = \left[\frac{\partial F(X_0)}{\partial x_i} - \frac{\partial [K(X_0)]}{\partial x_i} U(X_0) \right]_{i=1, 2, \dots, NDV} \dots \dots \dots (3)$$

から計算される。 $[K(X_0)]$ を分解したマトリックスは、式(1)を解いたときに保存されているので、 $\partial U(X_0) / \partial x_i$ の一つの列の計算は、サブケース数×設計変数回の前進消去後退代入処理になる。

