1407 FOA システム構築とボデー構造設計への応用

Fundamental Study of Dynamic Analysis of the Lumbar Vertebrae

○正 西垣英一 (豊田中研) 正 西脇眞二 (豊田中研) 正 尼子龍幸 (豊田中研)
正 小島芳生 (豊田中研) 菊池 昇 (ミシガン大)

Hidekazu NISHIGAKI, TOYOTA Central R&D Labs. Inc., Nagakute, Aichi
Shinji NISHIWAKI, TOYOTA Central R&D Labs. Inc.
Tatuyuki AMAGO, TOYOTA Central R&D Labs. Inc.
Yoshio KOJIMA, TOYOTA Central R&D Labs. Inc.
Noboru KIKUCHI, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, 48109, USA

CAE numerically estimates the performance of automobiles and proposes alternative ideas that lead to the higher performance. However, most automotive designers cannot directly utilize CAE since specific well-trained engineers are required to achieve sophisticated operations. Moreover, CAE requires a huge amount of time and many modelers to construct an analysis model. In this paper, we propose a new concept of CAE, *First Order Analysis* (FOA), in order to overcome these problems and to quickly obtain optimal designs. The basic ideas include (1) graphic interfaces using Microsoft/Excel (2) use of sophisticated formulations based on the theory of mechanics of material, (3) the topology optimization method. Further, some prototypes of software are presented to confirm the method for FOA.

Key Words: CAE, Automotive, Designe, Topology Optimization, Finite Element Method

1. 緒 言

近年のCAE(Computer Aided Engineering)⁽¹⁾の普及とその機能向上により、試作車を作る前段階で車両性能がある程度定量的に予測可能となり、より性能の良い構造が提案できるまでに至ってきた。しかし、他に多くの業務を抱えるボデー設計者が日常業務で取り扱えない程、CAEは高度化されて来ているのが現状である。さらに、解析モデル作成に多大な時間・人を要する上、専門知識も必要とされるため、解析専門家に委託せざるを得ない状況となっている。

そこで、この様な従来の詳細 CAE を補完する技術として、筆者らは、ボデー設計者自らが概念設計段階で容易に利用できる新しい CAE である *First Order Analysis* (FOA)⁽²⁾ を提唱する。この FOA の基本概念は、以下に示すものとする。

- (1) ボデー設計者が、特別な訓練なしに手軽で容易に扱えるように、Microsoft/Excel⁽³⁾ をフロント・エンドとするグラフィカルなユーザ・インターフェースを用意する。
- (2) 想定する設計の妥当性を簡便に検討するのが目的のため、材料力学的な基礎知識で十分理解できる手法(要素としては、梁要素とパネル要素)で構成する。
- (3) 新規構造のヒントや補強部材配置に示唆を与えるための、梁要素を用いたトポロジー最適化機能も用意する。

本報では、まず、FOA を構成し、Microsoft/Excel をインターフェースとして動作する解析ツールについて述べる。

さらに、車両設計の概念設計への適用可能性を示すため、FOA の概念に基づくプログラムのひな形を示す。

2. 梁要素とパネル要素を用いた静解析と固有値解析

FOA では、想定する設計の妥当性を簡便に検討するのが目的のため、梁要素とパネル要素を用いた、線形の静解析と固有値解析に注目する。

梁要素は、通常の線形弾性梁の定式化に従うが、車両構造を扱う上で重要な結合部の結合剛性を表現するため、一端に 3 自由度の回転ばね(残り 3 自由度の並進成分は剛結合)を与えることも可能とする。

なお、詳細な結合剛性が必要な場合には、結合部をシェル要素で詳細に表現した有限要素モデルを、Guyan Reduction⁽⁴⁾により自由度縮小して求めた剛性マトリクスを

用いることもできる。

パネル要素は、粗いモデル化により要素がねじれることを想定し、ゆがみに強く精度が良い応力仮定に基づく定式化⁽⁵⁾を用いる。

図 1 に示すパネル要素において、応力分布 $\mathbf{s}$ を式 (1) の形で仮定し、変位分布 $\mathbf{u}$ を一般的式 (2) の形で近似する。

$$\mathbf{s} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} + C_{12} y \\ C_{21} + C_{22} x \\ C_{31} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \\ b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy \end{Bmatrix} \quad (2)$$

この様に、応力の内挿関数を変位関数と独立に定義するため、力学理論を前提に重み付き残差法で、歪み・変位関係を近似することで、整合性をとる⁽⁶⁾。

Fig.1 Shape of panel element

3. 梁要素を用いたトポロジー最適化

梁要素を用いたトポロジー最適化は、新規構造のヒントを与え、補強部材の配置を決める時などに役立つ。

構造物の剛性を最大化するためのキーとなる概念は、(a) グランドストラクチャアプローチと、(b) 平均コンプライアンスの最小化である⁽⁶⁾。

(a) グランドストラクチャアプローチでは、まず、図 2 に示すように、多数の固定節点を予めセットし、これら節点間の全ての組合せに対して梁要素を配置する。そして、

Fig.2 Ground structure approach

最適化手法を用いて設計変数（今回は中実円筒断面の直径）を更新し、不要な梁要素を取り除いていくことにより、最適な梁構造形態を見つけ出していくものである。

(b)平均コンプライアンス L は、式 (3) の形で定義⁽⁶⁾され、歪みエネルギー ($\mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u}$) と等価である。

$$L = \mathbf{F}^T \mathbf{u} \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{F}$ は荷重、 $\mathbf{u}$ は変位、 $\mathbf{K}$ は全体剛性マトリクスである。そこで、梁構造の総重量を制約条件として、平均コンプライアンス L を最小化することにより、剛性最大化が図られる。なお、多目的問題を扱う上で、次式 (4) で示される Min-max アプローチに基づく目的関数を採用する。

$$\text{minimize } \max L^k \quad (4)$$

4. FOA の概念に基づくプログラムのひな形

Microsoft/Excel⁽⁷⁾ には、Visual Basic for Application (VBA) と呼ばれるマクロ言語が組み込まれている。この VBA の機能を用いることで、マウスクリックにより、(a)セルデータの読み書き、(b)他のシートへの移動、(c)数値演算、(d)外部ファイルとの入出力、(e)外部プログラムの起動などを行なうことができる。

図 3 は、車両全体を対象とした非常に簡単な FOA の例題を示したものである。例えば、Excel シート上に埋め込まれた車両の客室部を示すボタンをクリックすることで、客室部のシートに移ることができる。この客室部のシート上でスライダーバーを操作することにより、客室形状を瞬時に変更することができる。部材をクリックすることにより、断面形状を表示する画面が現れ、その形状を容易に修正することができる。また、静解析結果は、変形図とともに歪みエネルギーや部材力分布を円の大きさなどで表示できる。部材断面の応力分布も表示可能である。

Fig.3 Simple Example of FOA

図 4 は、穴の空いた板構造物に対する、補強部材の最適配置問題を対象とした簡単なトポロジー最適化の例題を示したものである。設計領域とその初期形状を、図 4 (a) に示す。白色の線は最適化対象の梁要素、薄い白色の部分是最適化から除外されるパネル要素を示している。図 4 (b) に示すような境界・荷重条件を与え、前述した梁要素を用いたトポロジー最適化を実施したところ、図に示すような形状が得られた。不要な梁要素はとても細くなって無視できるようになり、必要な要素が太くなっている様子が分かる。この様に、設計領域と設計者が想定する境界・荷重条件を設定するだけで、容易に骨格レイアウトの指針が得られることが確認できる。

(a) Initial shape

(b) Boundary condition & optimal design

Fig.4 Simple Example of Topology Optimization

5. まとめ

以上、本報では、詳細CAEを補完する技術として、ボデー設計者自らが概念設計段階で容易に利用できる新しいCAEである *First Order Analysis* (FOA) を提唱した。

そして、まず、FOAを構成し、Microsoft/Excelをインターフェースとして動作する解析ツールについて述べた。

さらに、車両設計の概念設計への適用可能性を示すため、FOAの概念に基づくプログラムのひな形を示し、その有効性を示した。

文 献

- (1) Lemon, J. R., Tolani, S. K. and Klosterman, A. L., 1980, "Integration and Implementation of Computer Aided Engineering and Related Manufacturing Capabilities into Mechanical Product Development Process", Gi-Jahrestagung.
- (2) Nishigaki, H., Nishiwaki, S., Amago, T. and Kikuchi, N., 2000, "First Order Analysis for Automotive Body Structure Design", ASME DETC2000/DAC-14533.
- (3) Microsoft Corporation, 1998, Microsoft Excel/Visual Basic Reference Second Edition, Microsoft Press.
- (4) Guyan, R. J., 1965, "Reduction of Stiffness and Mass Matrices", *AIJA Journal*, Vol.3 No.2.
- (5) Sekiguchi, M. and Kikuchi, N., 1999, "Remark on the Mixed Formulation of a Finite Element Stiffness Matrix Based on Clough's Paper in 1960", Proceedings of the Conference on Computational Engineering and Science, JSCES, Tokyo, Japan, Vol.4, No.1, pp.131-134.
- (6) Suzuki, K. and Kikuchi, N., 1991, "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization", *Comp. Methods. Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 93, pp. 291-318.