

有限要素法による構造物の解析

新技術応用部 富田 玄隆

1. 緒 言

茨城県の機械金属工業は、製造業の中核をなす重要な産業である。しかし、その事業所数 5, 680 所（昭和 62 年工業統計調査）のうち 98. 7%は中小企業であり、電気機械器具製造業、一般機械器具製造業及び金属製品製造業の 3 業種で全事業所の約 30%を占めている。機械金属関係中小企業の業界は、製品の高性能化、多機能化、新素材の利用、多品種少量生産及び短納期等に対応した設計工程、生産工程及び検査工程の省力化・自動化等幾多の課題を抱えている。それ等に対応するため、CAD/CAM システムや CNC 工作機械並びに検査データのコンピュータ処理機器を導入し、技術レベルの向上に努めている。しかし、技術の高度化に不可欠なコンピュータの利用は、円滑に進んでいない状況である。

そこで、当工業技術センターでは、昭和 59 年度より CAD システムを導入し、「プレス金型の自動設計に関する研究」を実施し、CAD システムの利用技術を中心とした技術力向上施策を行った。また、昭和 61 年度よりスタートした技術パイオニア養成事業の ORT 研修と先端技術研修を通じて関係業界の技術者に CAD 関連のテーマで指導してきた。しかし、現在の当工業技術センターの CAD システムは、製図支援システムであり、本来、設計業務の自動化で求められている構造解析や熱的解析等に対応できない。今後ますます設計業務で重要になるとされるコンピュータ利用による構造解析を、機械の動的解析や塑性変形解析などに有限要素法を利用し、高い技術力を有している機械技術研究所（工業技術院）で有限要素法解析技術の習得を目的に研修を行った。

2. 研修内容

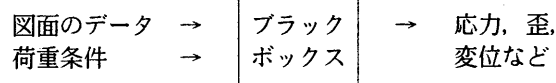
2. 1 システムの概要

研修に使用したシステムの構成を付図 1 に示す。ワークステーション（HP9000 シリーズモデル 800）では有限要素法の解析に必要なモデルの作成、メッシュデータの作成、境界条件、荷重条件及び強制変位の設定等を前処理用プログラム（JMESH）で行い、情報計算センターに設置されているホストコンピュータ（CRAY）では有限要素法の解析が行われる。解析プログラム（JNIKE2D/JNIKE3D）での解析結果が得られたら、再びワークステーションの後処理用プログラム（JPOST）で解析結果の図化処理を行う。その一連の流れを付図 2 に示す。

2. 2 有限要素法

今回使用した解析プログラムは、汎用のプログラムで、個々の解析問題ごとにプログラムを作らないで済むように、また、広範囲の問題を処理できるように作られている。ユーザーは、データの入

力方法さえ習得していれば、かなり複雑な計算まで行うことが可能である。この種の汎用プログラムを用いると、コンピュータを、



のようなブラック・ボックスとして使うことができる。その一般的な手順は次のとおりである。

- 1) 図面から、要素の位置、形状、材質、接続関係、拘束条件などのデータを拾う。
- 2) 荷重条件を想定する。
- 3) それらをブラック・ボックスに入れると答が出てくる。得られるものは、各要素の応力、歪、及び各接点の変位などである。

有限要素法とは、このブラック・ボックスのソフトウェアとしての名称である。

有限要素法により構造物を解析するには、いろいろな要素について剛性マトリックスを求めておく必要があり、その概念をバネ要素の剛性マトリックスを例に挙げて説明する。図1のバネの節点変位ベクトルは、

$$\sigma g = \begin{Bmatrix} U_i \\ U_j \end{Bmatrix} \text{ である。}$$

また節点カベクトルは

$$f g = \begin{Bmatrix} X_i \\ X_j \end{Bmatrix} \text{ である。}$$

いま、図2に示すように、 i 点を固定し、 j 点を1だけ変位させると ($U_j=1$) j 点にはフックの法則によって $K \times 1$ なる力が発生し、つりあい条件から i 点には $-K$ なる力が発生する。また、図3のように j 点を固定し、 i 点を1だけ変位させると ($U_i=1$)、 i 点には $K \times 1$ なる力が発生し、 j 点にはつりあい条件から $-K$ が発生する。

すなわち、

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} X_i &= K \\ X_j &= -K \end{aligned} \right\} & \begin{aligned} U_i &= 1 \\ U_j &= 0 \end{aligned} \\ \left. \begin{aligned} X_i &= -K \\ X_j &= K \end{aligned} \right\} & \begin{aligned} U_i &= 0 \\ U_j &= 1 \end{aligned} \end{aligned}$$

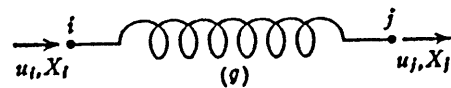


図1 バネ定数 (バネ定数; K)

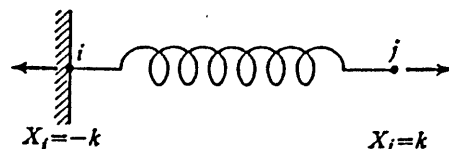


図2 $U_i = 0, U_j = 1$ を与えたときに節点に作用する力

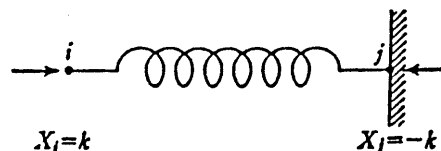


図3 $U_i = 1, U_j = 0$ を与えたときに節点に作用する力

したがってこのバネの剛性マトリックスは、 $\begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix}$ となる。これを完全な形で表わすと、
 $\begin{Bmatrix} X_i \\ X_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ U_j \end{Bmatrix}$ となる。つまり $\begin{Bmatrix} X_i \\ X_j \end{Bmatrix}$ と $\begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix}$ が与えられたとき変位 U_i がもとまる。このように、各要素の剛性マトリックスを計算し、それらを加え合わせて構造全体の剛性方程式を導いて変位の一次関数として解くのである。

今回使用した有限要素法プログラム (JNIKE2D/JNIKE3D) は、非線形構造解析プログラムである。材料非線形、幾何学的非線形の静解析、動解析、熱応力解析を高い計算精度で実行できる。本システムの特長として、構造物の大変形解析を始め、大歪が発生する弾性・熱弾塑性問題も扱えるためプレス加工・切削などの機械加工、圧延・鍛造などの塑性加工にも適していて、接触面として固着、剥離、接触、滑り、摩擦などの各種の条件が定義できる。解析対象の材料モデルとしては、等方性弾性、直交異方性弾性、弾塑性、土質、線形粘弾性、熱弾性クリープなどである。

以上のような特徴を備えた有限要素法プログラムを用いて次の三つの例題を解析した。

例1 図4に示すような軸対称の面内変形問題

節点及び要素番号は図中の様に設定し、節点1, 2, 3にY方向に、+1だけ強制変位を与える。

<形状データ> 節点数 18

要素数 10

<物性データ> 弾塑性タイプ

$E=21,000\text{kg/mm}^2$ $\nu=0.3$

$\gamma=30\text{kg/mm}^2$ $E_h=300\text{kg/mm}^2$

<強制変位カーブ> 強制変位に付いては、時刻軸に対する変位量のカーブで入力する。

時刻1 1.0で強制変位+0.01の直線で定義。

解析用データの作成は、マニュアルで行った。解析結果の出力例として、付図3に等応力線図 (コンター図) を示す。

例2 図5に示すような軸対称の面内変形問題

図中のアルミニウム板に引張を与えた。解析は、

対称性を考慮した1/4モデルについて行った。

<形状データ> 節点数 30

要素数 18

<物性データ> 弾塑性タイプ

$E=7,000\text{kg/mm}^2$ $\nu=0.3$

$C_y=30\text{kg/mm}^2$ $E_h=100\text{kg/mm}^2$

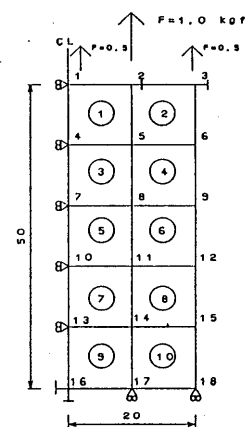


図4 鋼板の引張問題

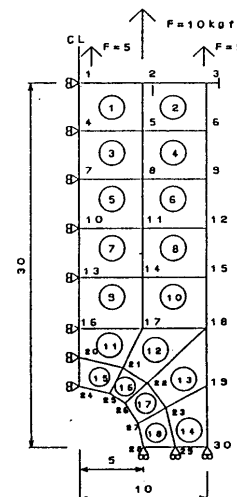


図5 アルミニウム板の引張問題

＜強制変位カーブ＞

時刻 1.0 で強制変位 $+0.05$ の直線で定義。

解析結果の出力例として、付図4に変形図を示す。

例3 固体要素に強制変位を作用させた場合の平板の面外変形問題

週辺が固定された平板を円柱状の物体が強制変位により、押し下げる問題である。モデルは、図5に示すように、対称性を考慮した1/4モデルとする。

＜形状データ＞	固体要素	節点数	22
		要素数	8
	シェル要素	節点数	121
		要素数	100

＜物性データ＞

	シェル要素(MAT#1)	固体要素(MAT#2)
E ; ヤング率 (kg/mm^2)	21000	84000
ν ; ポアソン比	0.3	0.3
σ_y ; 降伏応力 (kg/mm^2)	10.0	—
Eh ; 降伏後のヤング率 (kg/mm^2)	1.0	—

＜強制変位カーブ＞

時刻 1.0 で強制変位

-1.0 の直線で定義した。

解析結果から全体のモデルに合成したときの変位コンター図を付図5に示す。

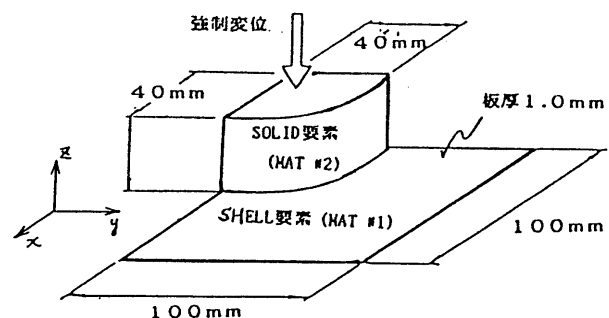


図6 平板の押し下げ問題

3. まとめ

当初の研修内容として、有限要素法の基礎理論の理解と汎用プログラムを用いて具体的な解析手法の習得を目標に

したが、研修期間的な制約もあり、汎用プログラム（JNIKE2D/3D）を用いて、3つの具体例の解析を行った。その結果、有限要素法解析は、弾塑性加工と密着した機械設計を行う場合、変形のシミュレーションを得ることができ、有益な手段であることが確認できた。しかし、今回初めて有限要素法を学ぶということで、三次元の問題にしても、簡単なモデルの解析を行ったが、実際の形状は複雑な

ものが多いので、いかにモデルを作成するかが重要であり、熟練も必要であると痛感した。今回使用した有限要素法プログラムでは、動的解析、熱応力解析等も取り扱えるが、研修期間中には試みられなかったが、今後機会があれば解析したいと思う。

最後に、本研修に当たりご指導をいただいた機械技術研究所 塑性加工課長佐野利男氏、同技宮清水透氏並びに塑性加工課の皆様に感謝致します。

