FEM 構造解析システムにおける 入力データの自動作成と図形出力

長 谷 憲 治*

HASE, Kenji*: Interactive Data Generation
and Graphic Display for the
System of FEM Analysis

1. ま え が き

全国共同利用の大型計算機センター(大阪大学大型計算機センター)の利用形態について、近年 TSS (タイム・シェアリング・システム)方式によるオンライン利用にはめざましいものがある。その原因として、ホスト・コンピュータの著しい能力拡張と端末・周辺機器の充実がある。従来のホスト・コンピュータによるバッチ的な処理に対して、TSS方式では端末とホスト・コンピュータとの間でオンライン会話的手法で入力・ジョブの実行・停止を行うことができる。さらに、計算結果をTSS端末に送信できるので、端末では計算結果を実時間に、例えば図形など多様な形式で出力できる。

従来のバッチ処理もTSSの会話型リモート・バッチ・サービスを活用することで、研究者にとってより便利なものになってきた。この方式は、現在筆者が行っているFEM(有限要素法)による地殻変形に関する数値実験にも非常に有効である。本論文のなかで取り扱う一連の作業は、すべて上記の情報処理過程の中で行われたものである。

コンピュータの能力拡張に伴って、FEMは構造解析の強力な武器となってきた。FEMの数

値計算では一般的に、多数の数値が入出力で取り扱われるので、入出力処理をいかに充実させるかが重要な課題となっている(水谷, 1980)。近年、この入出力処理について、コンピュータによるデータ自動作成、図形出力などが考えられている(黒住, 1979)。

FEMによる地殻変形に関する数値実験を全国共同利用の大型コンピュータで行うにあたって、入出力処理を効率的に行うことができるFEM構造解析システムを設計した。そのなかで、入出力処理には研究室のインテリジェント・グラフィック端末が使われ、いわゆる分散処理システムである。本論文では、主としてそのシステムの特徴となる入出力処理部分について報告する。

なお、本論文では断層周辺の応力解析を例題として取りあげる。解析用プログラムは三好ほか(1974)の二次元弾塑性体FEM(直列ユニット分割法)を拡張して、複合物性を取り扱えるようにしたものである。数値計算は大阪大学計算機センターのNEAC ACOS900で行った。端末は大阪市立大学地学教室に設置されているインテリジェント・グラフィック端末"HP 2647 A"(これ以降、端末と略す)を中心に、その他の周辺機器を使用したものである。

* 大阪市立大学理学部地学教室

Department of Geosciences,
Faculty Of Science, Osaka
City University

2. FEMによる解析の概略と要解決課題

2.1 FEMによる構造解析概略

地質学的時間尺度を通じて発達してきた断層や褶曲などの地殻の変形構造について、その成因を解明するために数値実験・モデル実験がなされている（平山，1966）。地殻は複雑な構造をもち、したがって力学的にも不均質である。そのために地殻が造構応力のもとで変形する場合、地殻の変形様式は相当複雑であると考えられる。数値実験・モデル実験が有効であるのは、地殻の構造、力学的物性を多種多様に变化させながら変形過程を支配する各種のパラメーター群を吟味・評価できるからである。

複雑な構造をもち、力学的にも不均質な地殻の変形を解明する一手段として、FEMによる数値実験がなされてきている（DIETERICH and CARTER, 1969；林，1975）。FEMでは、解析対象媒体を多くの要素に分割するが、分割を工夫することによって複雑な構造を再現できる。また、各要素ごとに変形過程を支配する構成方程式および物性パラメーターを与えることができるので、力学的に不均質な対象を扱うことができる。

本論文で取り上げる地殻変形は断層運動を対象としたものである。活断層の研究から、日本国内の主要な横ずれ活断層は、第四紀（200万年前以降）を通じて継続的に変位してきたことが明らかにされている（松田，1966；藤田，1968）。それらの断層は多くの場合、大地震の発生源であり、地震予知の観点から精密測量などの各種の連続観測がおこなわれている（尾池，1977）。

活断層周辺は定常的に歪む地殻の中でも、特に変形の著しい地域と考えられる。その原因の一つとして、活断層は一定の幅の断層破砕帯であり、地殻の弱線部にあたるからである（長谷，1979）。活断層の断層運動に関する研究課題として、断層破砕帯の構造・形態、力学的物性が断層運動に与える影響に関する研究が早急に行われる必要がある。

地殻、断層破砕帯の力学的特性はよくわかっていない。FEMの数値実験により、それらの力学的特性をモデル化して断層周辺の応力解析をおこなっている。

2.2 FEMによる解析の問題点

FEMによる解析では、各要素ごとに応力・歪が計算されるとともに、各節点（各要素の頂点）における変位が解かれる。そのために、要素・節点に通し番号がつけられ、そして、節点の座標が与えられる。要素分割を細かくすれば局所的な応力集中、変位分布を詳しく解析できる。しかしながら、要素数が多くなると、要素分割作業やそれに伴う節点座標などのデータの準備にかなりの時間と労力を必要とする。また、解析によって求められる応力値、変位量などが数多くなるので、その結果を速やかに評価しにくい。

以上のような問題を解決し、解析をより効率的に行うために、データ・計算結果の入出力処理をいかに充実するかが重要な課題となる。データの自動作成、計算結果の図形出力などが行われるFEM構造解析システムを設計し、実用化した。

3. FEMによる構造解析システムの構成

3.1 システム設計の条件

前述のような観点から、FEMによる構造解析システムが備えるべき条件として

- モデルの力学的物性、内部構造、境界条件などの入力データの準備が簡単である。
- 入力データの変更が容易である。
- 数値計算を繰り返すことになるので、結果の判断が速やかになされる。

などのことが考えられる。

3.2 本システムの基本構成

それらの条件に基づいた構造解析システムの設計開発をおこなった。このシステムは機能要素別に次の4段階に分けることができる。

FEM構造解析システムにおける入力データの自動作成と図形出力

第1図 FEM構造解析システムの機能要素ごとのデータファイル、ハードおよびソフトウェアの構成。

- A) 実験用モデルの基礎デザイン
- B) データの自動作成
- C) FEM解析プログラムで数値計算
- D) 出力結果の図形処理

解析システムの機能要素ごとのデータファイル、ハードおよびソフトウェアの構成を第1図に示す。データ入力と出力結果の図形処理は分散設置の端末でおこなう。データの自動作成・変更、FEMの数値計算は会話型リモート・バッチ方式を利用してホスト・コンピュータで行う(第2図)。

3.3 各段階での機能各説

各段階での主な操作とデータ・フローをまとめると次のようになる。

A段階: ①解析対象とするモデルについて、大きさ、内部構造、力学的異方性、境界条件などの

* A～D段階の①～⑥は第1図中の数字に対応する。

*SYSTEM FORT O MESH

*LIST

10%:JOB: [REDACTED],A
20%:FORTRAN:NFORM
30%:SELECTA:MESH
40%:GO
45%:LIMITS:10,60K,-5K,1500
50%:PRMFL:05,R,S,[REDACTED]/DESIGN
300%:PRMFL:06,W,S,[REDACTED]/DATA
310%:ENDJOB

*RUN

*SYSTEM CARD O FEM

*LIST

10%:JOB: [REDACTED],C
20%:FORTRAN:NFORM
30%:SELECTA:FEM
40%:GO
45%:LIMITS:10,175K,-5K,18000
50%:PRMFL:05,R,S,[REDACTED]/DATA
300%:PRMFL:06,W,S,[REDACTED]/OUTPUT
310%:ENDJOB

*RUN

第2図

TSS方式の会話型リモート・バッチ・サービスを利用したジョブの実行。(A),データ自動作成プログラムを実行させて、その結果をデータファイル"DATA"に出力する。(B),FEM解析用プログラムを実行させて、その結果を出力用ファイル"OUTPUT"に出力する。

数値実験の条件を指定する。

B段階：②解析に必要な入力データを自動作成する。ここでは、まず①で指定された内部構造に従って有限個の要素に分割する。各要素、節点に通し番号をつけ、そして節点の座標を計算する。さらに、モデルの力学的不均質を反映するように、各要素に力学的物性を与える。③この自動作成されたデータはホスト・コンピュータのファイルに保存して、次の解析プログラムの入力データとなる。このデータを使って端末上に図形出力をおこないながら目的としたFEMの解析用モデルの適否を視覚的にも評価することができる。要素分割図を第3図に示す。

C段階：⑤データファイルからデータをFEM解析プログラムに入力して、数値実験をおこなう。⑥計算結果を出力ファイルに保存する。⑦計算結果を端末で図形出力して各種の判断を行う。それらの判断に基づいて、実験を継続・停止または数値実験の条件を変更する。

D段階：⑧計算結果をホスト・コンピュータおよび端末の周辺機器に出力する。

以上のような一連の操作段階においてFEMの数値実験を効率的におこなうために、特に、**B段階**のデータの自動作成および**D段階**の出力結果を端末上で図形処理する方式について、筆者が行った結果を例にして述べることにする。

第3図 データ自動作成プログラムで要素分割されたモデルをインテリジェント・グラフィック端末で図形出力。モデルの要素、節点数は各々334, 192。上端の数字はユニットの番号, 下端のローマ数字はユニットの種類を示す。I: 岩盤ユニット, II: 遷移ユニット, III: 断層ユニット, 左中央部の黒色部は断層帯を示す。

4. データの自動作成と図形出力

4.1 データの自動作成

前述の処理を効率的に行うために、データ自動作成プログラム、例えばACOS6アプリケーション・シリーズ「MESHGEN」(NEC, 1976)が開発されてきている。

断層系を含む地殻をモデル化する場合には、断

層系の構造を再現するようにモデルを分割する必要がある。

MESHGENなどの汎用のプログラムでは任意の形状の領域を指定された要素数になるように分割する。ここでは、要素の配列に一定の様式はないので、領域の内部に特定の構造をもたせるのは困難である。

断層周辺の応力を調べるためにFEMによる数値実験を繰り返して行う。断層の構造や地殻の力学的不均性を変化させて、応力解析を行う。データの作成は何回も繰り返すことになるので、断層などの特定の構造を前提としたデータの自動作成プログラムを開発した。

データ自動作成プログラムのフローチャートを第4図に示す。モデルの規模、構造や力学的特性を指定する最小限の基礎データを入力して、解析に必要な多数のデータを出力する。フロー・チャートに従って、主な処理を要約する。

①ステップ：基礎データ入力(第5図)。

モデルをいくつかの領域に分け、各々の領域をユニットと呼ぶ。断層を含むユニットを断層ユニット、それ以外を岩盤ユニットと呼ぶことにする。岩盤ユニットのなかで、断層ユニットに隣接するものを遷移ユニットと呼ぶ(第3図)。

②ステップ：各ユニットを三角形要素に分割する。断層、岩盤ユニットについて各々、一定の型式で分割する。断層ユニットでは断層系周辺の応力分布などを解析するために、要素を細かく分割する。分割型式が異なる岩盤・断層ユニットの間は、遷移ユニットで調節する。

③, ④ステップ：要素、節点の番号を各ユニットごとに仮りにつける。各ユニットの要素分割の後で、モデル全体を通して節点・要素の番号をつける。

⑤ステップ：節点座標の計算

⑥, ⑦ステップ：各要素ごとに物性パラメータを決める。次に各要素の3節点の番号を記述する。また、各ユニットに属する節点番号をすべて記述する。

第4図 データ自動作成プログラムのフローチャート

*LIST DESIGN

0,1,1,1,	}	1
3,2,2,1,		
2,3,6,4,		
3,7,7,1,		
0,8,11,4,		
-1,1,1,1,	}	2
1,26,26,1,22,8,		
-2.0,-2.5,30.0,		
7.0,6.5,		
1.0,0.0,1.0,1.0,0.375,0.25,0.375,1.0,1.0,		
1,26,26,1,28,14,	}	3
0.0,0.0,3.0,1.0,		
1,26,26,1,28,14,		
0,		
4,50000.0,5000.0,0.3,1.0,2000.0,1,		
0,0,0,0,0,0,0,0,0,	}	4
14,		
-179,-180,-181,-182,-183,-184,-185,-185,-187,-188,		
-189,-190,-191,-192,		
-25.0,-50.0,-50.0,-50.0,-50.0,		
-50.0,-50.0,-50.0,-50.0,-50.0,	}	5
-50.0,-50.0,-50.0,-25.0,		
18,4,4,4,4,4,4,4,4,4,		
4,		
-95,-96,-97,-98,-99,-100,-101,-102,-103,-104,		
-105,-106,-107,-108,108,109,95,122,	}	6
122,109,65,70,		
70,76,65,71,		
71,77,76,82,		
77,83,82,88,		
88,94,83,89,	}	6
94,136,89,123,		
136,150,123,137,		
137,150,151,164,		
151,164,165,178,		
165,178,179,192,	}	6

第5図 モデル(第3図)のデータ自動作成の基礎デザイン。1:ユニット番号とその種類, 2:ユニットの各種類ごとに要素の大きさ, 配列様式を指定, 3:FEMの解法の指定, 4:物性パラメーター, 5:境界条件, 6:拘束条件

FEM構造解析システムにおける入力データの自動作成と図形出力

⑧ステップ：モデルを変形させる荷重、変位の種類、大きさを指定し、それが作用する節点を決める（境界条件）。変位が拘束される節点と拘束の性質を指定する（拘束条件）。

①～⑧のステップをへて、解析に必要なデータを解析プログラムのフォーマットに従って出力する。第3図に示した要素分割では、要素、節点の総数は各々334, 192である。データの自動作成のための計算時間はプログラムのコンパイル時間も含めて10秒以下である。また、端末で要素分割図を図形出力する時間は約2分である。

4.2 図形出力

FEMによる数値解析の結果、応力・歪と変位は各々要素、および節点ごとに解かれる。詳しい解析では要素・節点が多くなるので、応力値などの多数の数値を図形処理して結果の評価をおこないやすくする必要がある。

図形出力にはグラフィック・ディスプレイによる図化とライン・プリンターによる疑似図化の2つの型式がある。グラフィック・ディスプレイをおこなう端末の性能や図形処理用プログラミングの技術の制約から、前述の2つの出力型式は相補する関係にある。

a. グラフィック・ディスプレイによる図化

端末で作成された図形処理用プログラムでもって、ホスト・コンピューターから通信回線を通して送られる計算結果をディスプレイで図化する。端末のプログラミング用記憶領域は一般的に小さいので、複雑なプログラム処理を必要とする応力・歪分布の定量的図化は困難である。グラフィック・ディスプレイでは、主に応力軌跡、変位ベクトルの図化を行うことにした。第6図はこの結果のハードコピーで、圧縮応力状態での応力軌跡を示したもので、各々拘束条件が異なる。

端末での図形出力は、端末とホスト・コンピューターと通信回線で結んでオンライン・オペレーションも可能である。しかしながら現在のところ、

通信回線は公衆電話回線・学内内線を使用しているので、通信回線がノイズで障害をうけやすい。そのために、受信データより一度、端末のカセット磁気テープに中間ファイルを作り、これを媒体にしてグラフィック・ディスプレイで図化し、必要なもののハードコピーを作っている。

b. ライン・プリンターによる疑似図化

応力・歪分布の定量的図化のためにXYプロッター出力を使ってコンターマップを書く方法がある。この分布図は最大・最小主応力（歪）と最大剪断応力（剪断歪）の6種類のものが考えられる。数値計算を繰り返すごとに多数のコンターマップをXYプロッターで出力することは、ランニング・コストから制約をうける。今回は、多数の応力・歪分布図を得るため、ラインプリンター出力を工夫することによって疑似的に図形処理を行う方法を導入した。

疑似図形処理の方法の概要は次の通りである。解析対象モデルの領域を格子状に分割して、格子の位置をマトリックスで表現する。要素の重心を含む格子のマトリックスでもって要素の位置を示す番地とする（第7図）。そのために、格子点間隔は、同一の格子に複数の要素の重心を含まないようにしておく。計算結果で得られた要素の応力・歪値を要素の番地に配列して、ラインプリンターで出力する。それらの数値を見ながら等値線をひき、応力・歪分布を描くことができる。

要素数が多いと、ラインプリンターの幅に制約があるので、すべての数値を出力できないことがある。そのような場合、第7図に示すように要素の重心を含まない行と列をぬきとり、残りの行列をつめる。この方法によれば各要素の応力値などをすべてラインプリンターの紙面に出力することが可能となる。問題点として、モデルの領域と出力図形の間で位置・形状の対応が把握しにくくなる。しかしながら、応力・歪分布の全体のパターンを判定することは障害とならない。そのような方法で出力した最大剪断応力分布図を第8図に示す。

第 6 図 端末で図形

第 7 図 ラインプリンターによる疑似図形出力の原理

F E M構造解析システムにおける入力データの自動作成と図形出力

出力した応力軌跡図

第8図 ラインプリンターで出力した最大剪断応力図。出力結果を
みながら等値線を引く。中央の斜線部は断層破砕帯を示す。

5. ま と め

FEMによる地殻の変形に関する数値実験を効率的に行うために、FEM構造解析システムを設計した。とくに、そのシステムの特徴となる入出力処理について報告した。

(1) 本システムでは全国共同利用の大型計算機センターが提供するTSS方式の会話型リモート・バッチ・サービスを利用して、ホスト・コンピュータで数値計算を行った。一方、入出力処理は主に端末でおこなう、いわゆる分散処理形態である。

(2) FEMの解析を効率的に実行するために、データの自動作成と図形出力についてプログラムを開発し、実用化した。

(3) データの自動作成プログラムは、解析対象モデル内部に特定の構造をあたえることができる。

(4) 図形出力は端末でグラフィック・ディスプレイによる方法とラインプリンターによる方法がある。前者で主に応力軌跡、変位分布図が、後者で応力・歪分布図が出力される。

本論文に書くにあたって、大阪市立大学の理学部地学教室の弘原海清助教授に直接御指導していただき、また、同大学中川康一氏から有益な御教示をいただいた。プログラム作成や本論文をまとめるにあたって、同大学の久保内明彦・佐野正人・升本真二・福間敏夫諸氏に御協力いただいた。以上の方々に厚く御礼を申しあげる。

参 照 文 献

- DIETERICH, J.H. and CARTER, N.L. (1969), Stress history of folding. Am. Jour. Sci., 267: 129-154.
- 藤田和夫(1968), 六甲変動, その発生前後——西南日本の交差構造と第四紀地殻運動——. 第四紀研究, 7(4): 248-260.
- 長谷憲治(1979), 山崎断層の第四紀における活動について. 日本地質学会第86年学術大会講演要旨: 400.
- 林大五郎(1975), 花崗岩質岩の浮きあがり, 非圧縮性Newton流体とみなして. 地質学雑誌, 81(12): 769-782.
- 平山次郎(1966), 造構的応力場の解析法とそのモデル化について. 地質学雑誌, 72(3): 91-104.
- 黒住祥祐(1979), グラフィック・ディスプレイを使った有限要素法における図形処理. ソニー・テクトロ講習会資料: 1-8.
- 松田時彦(1966), 跡津川断層の横ずれ変位. 地震研究所彙報, 44: 1179-1212.
- 水谷聰(1980), 自動車工業におけるCAD/CAM情報処理, 21(2): 154-160.
- 三好俊郎(1976), 有限要素法. 実教出版.
- NEC(1976), ACOSアプリケーションシステム——自動メッシュ作成説明書(ICEP-6/MESH GEN)——. 日本電気.
- 尾池和夫(1977), 山崎断層の挙動と地震予知科学, 47(8): 450-456.