構造解析計算プログラムの現状

(日本原子力研究所) 幾島 毅, 佐野川 好母,

(センチュリ・リサーチ・センタ(株)) 武田 洋

原子炉構造強度解析に広く使用されている汎用有限要素法計算プログラムについて, その開発経緯, 解析能力および計算例について概説する。

I. ま え が き

近年, 軽水炉の安全性評価や高速炉の設計等において, 詳細な構造強度解析が要求されるようになってきた。このために, 有限要素法による構造解析用の計算プログラムが広く使用されている。著者らは, すでに原子力コード委員会のコード評価作業の一部分として, 有限要素法計算プログラムのベンチマークテストを実施⁽¹⁾して, 有限要素法計算プログラム使用上のいくつかの問題点を指摘した。本稿は, 上述の報告において使用された汎用計算プログラムを中心に, その開発経緯, 解析機能および計算例について概説するとともに, 最近, 国内で精力的に開発が進められている計算プログラムについてもふれてみる。

II. 計算プログラム

代表的な有限要素法による汎用計算プログラムの解析機能を第1表(a)に, 同じように非弾性解析用の計算プログラムを第1表(b)に示す。有限要素法による構造解析の内容とその背景となる理論の概要を図示すると第1図のようになる。以下に, 上述の計算プログラムの概要を述べるが, 最初に, 専門以外の方々にも理解して頂くため専門用語について多少の説明を加える。

弾性解析とは, 構造物に加えられた外力を除いたとき永久ひずみ(塑性ひずみ)が生じない, すなわち応力-ひずみの関係が線形範囲内の解析をいう。非弾性解析とは, 熱ひずみなどの弾性以外のひずみを取り扱うもので, 弾性範囲を越えて外力を除いたとき永久ひずみが生じる応力-ひずみ範囲までの解析を行う“弾塑性解析”, 時間とともに累積される永久ひずみ(クリープひずみ)を考慮に入れるクリープ解析, 中性子照射によって生じる永久ひずみ(スエリングひずみ)を考慮に入れるスエリング解析およびこれら

の連成効果を考慮に入れた解析を総称する。

線形解析とは, 温度や荷重の外的作用に対して構造物の変形や応力-ひずみ応答が線形であるという仮定のもとでの解析であり, これには, ①構造物の材料挙動が線形であるという仮定, ②変形が微小であり, ひずみと変位の関係が線形であるという仮定, ③幾何学境界条件が変形の進行によって変化しないという仮定のすべてが成り立つ場合である。以上の仮定のいずれかが成り立たない場合には非線形解析といい, ①弾塑性クリープ解析などの材料非線形解析, ②大変形解析や座屈解析などの幾何学的非線形解析, ③接触問題などの境界非線形問題などが代表的なものであり, これら非線形性が連成した解析が必要となる場合もある。

動的解析とは, 時間に関する変位の2次微分項, すなわち加速度項を含む解析をいい, 振動, 衝突, 破裂などの解析があり, 静的解析とはこれ以外のものをいう。

さて, 第1表(a), (b)に示した計算プログラムの記述に入るが, これらの計算プログラムの作成年代を第2表に示す。

第1図 有限要素法による構造解析

Present Status of Structural Analysis Computer Programs, Takeshi IKUSHIMA, Konomo SANOKAWA, Hiroshi TAKEDA.

(1981年 4月16日 受理)

第 1 表 汎用非弾性解析プログラムと非弾性解析プログラムの内容

(a) 汎用非弾性解析プログラム

(b) 非弾性解析プログラム

プログラム名	ANSYS	ASKA	MARC	NAST-RAN	BERSAFE	CREEP-PLAST	EPACA	NEPSAP	NONSAP	ADINA
要素総数	61	45	71	60						10
弾塑性クリープ解析										
棒要素	2	2	3	1					○	○
2次元連続体	2	4	17	11	○	○	○	○	○	○
3次元連続体	1	2	6	4	○			○	○	○
軸対称体	2	2	11	2	○	○	○	○	○	○
軸対称シェル	0	2	2	2			○	○	○	○
板	3	0	9	2			○			○
配管	2	0	3	0						
梁	1	0	4	2	○			○	○	○
解析方法	初期荷重法	初期荷重法	接線剛性法	接線剛性法	初期荷重法	接線剛性法	接線剛性法	接線剛性法	接線剛性法	接線剛性法
連立1次方程式	ウェイク・フロント	ハイパー・マトリックス	バンド・マトリックス	アクティブ・カラム法				バンド・マトリックス		ウェイク・フロント
熱伝導解析	○	○	○	○	BERSAFE-FLHE		×	×		ADINAT
大変形解析	○	○	○	○	×	×	○		○	○
動的解析	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○
座屈解析	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○
スエリング	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×
ギャップ	○	×	○	×	×	×	×	×	○	○
クリープのコントロール	×	○	○	×		○	○		×	×
残余荷重修正	×	×	○	×						○
部分構造	○	○	×	○						×
移動硬化	○	×	○	×		○	○	○	×	○
温度依存材料	○	○	○	○					×	○
非圧縮性材	×	×	○	×					○	○
開発者	スワンソン解析システム社 (米国)	シュッツガルト工科大学 ISD 研究所 (西独)	マーク解析研究所 (米国)	航空宇宙局 (米国)	中央電力庁 (英国)	オークリッジ国立研究所 (米国)	フランクリン研究所 (米国)	ロックヒード社 (米国)	カリフォルニア大学 (米国)	マサチューセッツ工科大学 (米国)

1. ANSYS

ANSYS(Engineering ANalysis SYStem)は、米国のスワンソン解析システム社の Swanson らが開発した有限要素法による汎用計算プログラムであり、静的・動的解析、弾性・弾塑性クリープなどの非弾性解析、さらには温度解析ができる。Swanson はウェスチングハウス社において高速炉の構造解析のため2次元平面と軸対称構造物の温度解析と弾性解析用の有限要素法計算プログラム FEATS²⁾(Finite Element Analysis-Temperature and Stress)を作成し、この経験をもと

に ANSYS を開発し、1970年から一般に使用できるようになった。

ANSYS³⁾は約 60 種類の異なった要素(はり、2次元平面、軸対称、シェル、3次元連続体)を有し、17種類の異なった非弾性解析が可能であり、微小ひずみ理論による塑性、熱・照射クリープ、照射スエリング、大変形解析と座屈解析、これらの連成した解析ができる。動的解析では固有値解析や線形と非線形の応答解析ができる。温度依存物性値は多直線近似によって取り扱い、材料は等方および異方性を考慮できる。材料の弾塑

第2表 計算プログラム開発年代

年代	線形解析	非線形解析
1965	○STARDYNE ○STRU DL ↑ ○ASKA-I 1970 ○ASKA-II ○SAP IV 1975 ○SAP V 1980	○NASTRAN ○ANSYS ○EPACA ○CREEP-PLAST ○NEPSAP ○BARE SAFE ○MARC ○NONSAP ○ASKA-III ○ADINA(1977年版) ○ADINA(1978年版)

性挙動に関しては、等方硬化、移動硬化、ORNL(Oak Ridge National Laboratory)提案の硬化則などを取り扱うことができる。クリープやスエリング挙動に関しては数多くの方程式が計算プログラム内部に組み込まれている。ANSYSの理論的背景を示す論文は少ないが、プログラム上のエラーは少なく、妥当な計算結果が得られている。計算結果の図形処理のみならず応力評価のためのポストプロセッサとしての計算プログラムが付属しており、ASMEコードによる圧力容器の応力や疲労評価や配管系の応力評価の機能がある。

2. ASKA

ASKA (Automatic System for Kinematic Analysis) は、西ドイツのシュツガルト工科大学の研究機関 Institut für Statik und Dynamik der Luft und Raumfahrtkonstruktionen(ISD)において Argris 教授が中心になって開発した有限要素法による汎用計算プログラムであり、最初、線形解析の ASKA-I が作成された。その後、動的解析の ASKA-II(別名 DYNAN)、材料非線形解析の ASKA-IIIa および座屈解析の ASKA-IIIb が順次追加された。ASKA-I は -II、-IIIa と -IIIb の母体となるもので、-II、-IIIa、-IIIb を使用する場合は必ず -I が使用される。ASKA の開発には約15年の歳月を要している。

ASKAでは3次元要素まで含む約45種類の異なった要素が用意されている。弾塑性およびクリープ解析は初期荷重法によっている。応力-ひずみ式やクリープ式は決められた関数式またはユーザ・サブルーチンによって与える必要がある。座屈解析における固有値計算は Jennings の方法によって解かれる。計算プログラムのみならずデータもモジュール化され、外部記憶装置と内部記憶装置との間で機械語によるダイレクトアクセスによって、大型の問題を容易に解くことができるようになっている。

ASKAの理論的背景はISDレポートにまとめられている。図形処理のためのポストプロセッサ以外は用意されていない。

3. MARC

MARC は、MARC 解析研究所において元ブラウン大学の Marcal 教授を中心に開発した有限要素法による汎用計算プログラムであり、材料非線形解析および幾何学的非線形解析の両方の機能を重視して作成された。Marcal は MARC を高速増殖炉の構造解析に使用することを念頭において作成したもので、高温構造物の弾塑性クリープ解析の機能が充実している。

MARC は3次元要素まで含む約70種類の要素が用意されている。弾塑性解析では接線剛性法が使用され、硬化則では等方硬化、移動硬化およびこれらの組合せ硬化モデルが使用できる。クリープ解析では初期荷重法により、変動応力に対してはORNL提案のクリープ補助法則が用いられている。スエリングや接合問題の解析が可能であり、ANSYS と同様に燃料ペレットとクラッドの干渉効果を含む応力解析ができる。Lagrange 形および Update Lagrange 形式の大変形や座屈解析が可能であり、座屈解析の固有値計算はべき乗法によって解かれる。また MARC には配管系の解析に適するようにパイプ要素もある。

MARC の理論的背景を示す論文は Marcal によって多数発表され、理論的根拠は明らかであるが、プログラムには多種の計算のためのオプションがあるので、計算問題の種類によっては使用に際して十分な注意が必要である。図形処理のポストプロセッサが用意されている。

4. NASTRAN

NASTRAN (Nasa STRuctural ANALysis) は、米国の航空宇宙局(NASA)において航空宇宙開発に供するために作成されたもので、有限要素法による汎用計算プログラムであり、現在公開されている Level 15.5 では、静的および動的解析、弾性および座屈解析、温度解

析ができる。将来計画として Level 18~19において非線形および弾塑性クリープ解析ができるように改良される予定である。

NASTRAN は 3 次元要素までも含む 60 種類の異なった要素を有する。非弾性解析の分野では使用が制限されるが、弾性範囲での静的・動的解析や温度解析では、計算時間が短いことや、計算プログラムにエラーが少なく解が信用できること、特に大型の問題解析では定評がある。

NASTRAN の理論的背景は NASA の関連レポートに多数ある。図形処理のためのポストプロセッサ以外は用意されていない。

5. SAP-IV

SAP-IV (Structural Analysis Program) は、カリフォルニア大学の Wilson 教授を中心に開発した有限要素法による汎用計算プログラムであるが、弾性解析だけしかできない。要素分割や節点最適化などのプリプロセッサはほとんどなく、ポストプロセッサも入力図と変形図を描くだけの、ほとんど本体だけの計算プログラムであるが、手数料程度の費用で入手できること、計算プログラムが理解しやすいために、多くの人に利用されている。

SAP-IV は 3 次元要素まで含む約 10 種類の異なった要素が用意されており、弾性範囲での静的解析と動的解析ができる。SAP-IV に改良を加え SAP-V が公開されている。

6. ADINA

SAP-IV を作成した同じグループのうち Bathe 教授を中心に、NONSAP⁽⁶⁾ (NONlinear Structural Analysis Program) が開発された。NONSAP は SAP を非線形解析への拡張を図ったものであり、材料非線形、大変形、大ひずみ解析が可能であるが、プログラム上のエラーが少なからずあり、十分な使用に耐えないところもあった。しかし、SAP と同じように安価で入手できることから多くの人に利用された。

NONSAP の経験をもとに Bathe 教授はマサチューセッツ工科大学において ADINA⁽⁵⁾ (A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) を開発し、現在 1977 年版と 1978 年版が公開されている。ADINA は汎用の有限要素法計算プログラムであり、静的解析と動的解析およびこれらの弾塑性クリープ解析ができる。また、温度計算のためには ADINAT がある。

ADINA は、3 次元までを含む約 10 種類の異なった要素が用意されており、すべての要素について非弾性

解析が可能である。弾塑性解析では接線剛性法が、硬化則では等方硬化と移動硬化モデルが使用できる。クリープ解析では初期荷重法によって処理する。流体振動による構造物の振動問題を取り扱うことができるように流体要素が用意されている。

計算結果の処理のための図形表示プログラムは不便であるが、今後さらにプログラムの改良が図られるものと思われる。

7. NEPSAP

NEPSAP⁽⁶⁾ (Nonlinear Elastic-Plastic Structural Analysis Program) は、ロッキード・ミサイル・スペース社によって開発された有限要素法による汎用計算プログラムであり、弾塑性、クリープ解析ができる。使用できる要素は、はり、平板、シェル、平面、立体要素である。弾塑性解析では接線剛性法が使用され、硬化則では等方硬化と移動硬化モデルが使用できる。クリープ解析では塑性解析と同様に剛性を変化させる。Lagrange 法による大変形解析もできる。材料は温度依存性を考慮できる。

8. BERSAFE

BERSAFE⁽⁷⁾ (BERkeley Structural Analysis by Finite Element) は、英国中央電力庁が定ひずみ三角要素の弾塑性・クリープ解析プログラム TESS を改良して、はり、平面、平板、立体を含めた有限要素法汎用計算プログラムである。弾塑性解析では初期応力法に、クリープ解析では初期ひずみ法によっている。温度解析には BERSAFE-FLHE プログラムを有している。英国と欧州で使用されているに過ぎない。

9. EPACA

EPACA⁽⁸⁾ (Elastic Plastic And Creep Analysis) は、米国フランクリン研究所の Zudans によって開発された有限要素法による薄肉および厚肉シェルの弾塑性・クリープ解析プログラムであり、取り扱える要素は平面、平板、薄肉と厚肉シェルである。弾塑性解析では接線剛性法により等方硬化と移動硬化モデルが取り扱える。クリープ式は ORNL 提案のクリープ則が組み込まれており、逆負荷に対する ORNL の方法が取られている。クリープの自動制御もできる。Lagrange 法による大変形解析もできる。EPACA には温度解析プログラムを含んでいない。EPACA はフランクリン研究所以外ではあまり使用されていないようである。

10. CREEP-PLAST

CREEP-PLAST⁽⁹⁾ (CREEP-PLASTic analysis program) は、ゼネラル・エレクトリック社の Rashid によって開発され、1972 年に ORNL から一般公開された有限

要素法による弾塑性・クリープ解析プログラムであり、定ひずみの平面応力、平面ひずみおよび軸対称要素が取り扱える。温度解析プログラム TEMPTP に付いている。弾塑性解析では初期ひずみ法、クリープ則は ORNL 提案の式が組み込まれている。EPACA, CREEP-PLAST とともに図形処理プログラムは付いていない。

Ⅶ. 計算例

第2図は、ANSYS による円筒に圧力と温度変化がある場合の熱弾塑性クリープ解析例の計算モデルと荷重履歴⁽¹¹⁾を示したものである。この計算結果の1例として、第3図に円筒内面の応力ひずみ履歴を示す。

第2図 ANSYS による熱弾塑性クリープ解析モデル

第3図 ANSYS による内面の応力ひずみ履歴

第4図は、ASKA による内圧を受ける圧力容器の弾塑性解析のための有限要素モデル⁽¹²⁾であり、第5図は、ノズル付け根の塑性域の進展を表わしており、この解析では部分構造解析法を有効に利用することにより塑性領域となる部分についてだけ非線形解析を行っている。第6図は、MARC による2重切欠きのある

第4図 ASKA によるノズル付き圧力容器の弾塑性解析モデル

ASKA によるノズル付き圧力容器の塑性域の進展

第5図

MARC による二重クラックのある計算例と有限要素モデル

第6図

第3表 MARC による J 積分の解析

	クラック先端の移動量	クラック先端を含む要素の移動量	クラック先端から2番目の要素の外周の移動量
計算されたひずみエネルギーの変化 (Δu)	6.7313 $\times 10^{-5}$	6.693 $\times 10^{-5}$	6.689 $\times 10^{-5}$
J 値 ($J=2\Delta u/\Delta l$)	1.342 $\times 10^{-2}$	1.3386 $\times 10^{-2}$	1.3378 $\times 10^{-2}$
$K_I = \sqrt{(E/(1-\nu^2)) J}$	666.0	664.0	664.0
$K_I/\sigma_{\text{net}}\sqrt{l}$	1.052	1.050	1.050
理論解(1.028)との比(%)	+2.4	+2.2	+2.2

資料の J 積分評価のための有限要素モデル⁽¹³⁾であり、計算結果は第3表に示されている。

第7図は、MSC-NASTRANによる浅いアーチの飛び移り座屈問題⁽¹⁴⁾を示したもので、第8図はその計算結果である。NASTRANにはNASAバージョン(COSMICバージョン)とマクニールバージョン(MSC-NASTRAN)がある。

$$\begin{aligned}\phi &= 10^\circ \\ R &= 75 \\ t &= 0.15 \\ E &= 20 \times 10^6 \\ \nu &= 0 \\ EI/R^2 &= 1.0 \\ H &= R(1 - \cos \phi) = 1.139\end{aligned}$$

第7図 NASTRANによる浅いアーチの飛び移り座屈の計算モデル

第8図 NASTRANによる浅いアーチの座屈

第9図は、ADINAによるインディアンポイント3号炉の第1次冷却系配管の弾塑性解析例⁽¹⁵⁾であり、第10図はその計算モデルである。第11図は塑性域(黒く塗った部分)の進展を示したものである。

(a) 1次冷却系配管 (b) 炉心構造

第10図 1次冷却系配管および压力容器と炉心構造のモデル

第11図 1次冷却系配管の塑性領域

第9図 インディアンポイント3号炉の1次冷却系配管

Ⅳ. 国内の開発現状

構造解析へ有限要素法を利用するための研究会が日本鋼構造協会において開催されるようになってから、設計に使用される計算プログラムが開発されるようになった。この時期と相前後して、ゼネラル・アトミック社が高温ガス炉のプレストレスト・コンクリート原子炉容器(PCRV)の設計のために有限要素法による構造解析プログラム SAFE シリーズを開発し、アルゴンヌ国立研究所の原子力コードセンタから公開された。SAFE シリーズは現在ではレベルの低い計算プログラムではあるが、無料で公開された計算プログラムがほとんどなかった当時は大いに利用され、これを参考にしてさらに改良された計算プログラムを所有するようになって弾性解析プログラムの開発がほぼ軌道に乗った。

動燃事業団において高速原型炉の設計に寄与するために、非弾性構造解析プログラムの調査¹⁰⁾を日本機械学会へ委託した1973年から、わが国の非弾性解析プログラム開発の幕が開けられた。調査委員会では、汎用プログラム ANSYSや MARC と参加者の開発した非弾性解析プログラムを使用して標準問題に対して解を求めた。計算結果を相互比較することによって計算プログラムの妥当性の評価やプログラムの改良が図られた。しかし、製造業者では設計作業において非弾性解析が要求される場合は全体の数%程度であること、また、非弾性解析に要するコストは莫大であることなどの理由によって、3次元モデルまでも解析できる汎用の非弾性解析プログラムの独自の開発を必要としなかった。そして弾性解析では3次元モデルまで解析できるものの開発を行なったが、非弾性解析では開発費に比較して安価に入手できる MARC などの購入を図っている。

動燃事業団では高速炉の構造設計のため ASKA と ANSYS の導入後、独自に高速炉用の非弾性構造解析システム FINAS (FBR INelastic structural Analysis

System)を開発中であり、現在3次元までの各種構造物の非弾性解析および温度解析の機能を有するものまで作成されている。

Ⅴ. あとがき

構造強度解析用の有限要素法による汎用計算プログラムの現状と国内の開発状況について概説した。弾性解析においても、また非弾性解析結果を実験結果と比較すると、マクロ的にはよい一致をみるが、ミクロ的には異なる結果となることがある。そして、材料の非弾性挙動の記述が必ずしも適切ではないことがわかって来て、材料挙動の記述の改良が図られている。それでも、解析と実験値との差を少なくすることができても、差はなくなる。材料挙動のモデル化には限界があるから、その後は、解析と実験値との差は、これ以上少なくすることができない限界を明らかにして、これを心に留めて現実の評価や設計に計算プログラムを使用していくことが必要であろう。

— 参考文献 —

- (1) 佐野川好母, 他: 原子力誌, 22[12], 890 (1980).
- (2) SWANSON, J.A.: WNL-1888, (1969).
- (3) PILKEY, W., et al. (ed.): "Structural Mechanics Computer Programs", (1974), Univ. Press of Virginia.
- (4) BATHE, K.J., et al.: UCSESM Rep. No. 74-3, (1974).
- (5) BATHE, K.J., et al.: MIT Rep., 82448-1, (1978).
- (6) SHARIFI, P., YATES, P.: AIAA Paper No. 73-358, (1973).
- (7) JAZERNIK, A., MILLER, M.C.: Nucl. Eng. Design, 27, 238 (1974).
- (8) ZUDANS, Z., et al.: Franklin Inst. Rep. F-C 3038, (1972).
- (9) RASHID, Y.R.: GEAP-13262-1, (1973).
- (10) 横内康人, 他: 機械誌, 79[691], 525 (1976).
- (11) DESALVO, G.J., SWANSON, J.A.: "ANSYS Example Manual", (1979), Swanson Analysis System Inc.
- (12) BALMER, H., et al.: Comp. Methods Appl. Mech. Eng., 3, 87 (1974).
- (13) MARC Users Manual Vol. E, (1979).
- (14) MSC/NASTRAN Application Manual, (1978).
- (15) SAFFELL, B.F., et al.: Proc. ADINA Conf., (1979).

米国放射性廃棄物処理調査団・参加者募集

調査団の目的は米国材料研究学会(MRS)主催で開催される「第4回放射性廃棄物処理処分科学シンポジウム」への参加と米国内の放射性廃棄物処理処分関連施設を訪問し、研究開発と実際の事業現状について調査し実態を把握する。

期 間 1981年11月8日(日)~27日(金)の20日間

訪問先 標記シンポジウムに参加のほか、サバナンリバー研, BNL, バッセル社, US Ecology, サンディア研, LASL, 他

申込締切 8月末日 (定員 20名)

申込み・問合せ先 日本原子力情報センター 企画室

(Tel. 03-580-8851, 担当森田)