知識情報処理に基づく構造解析支援システムの研究*

工 藤 道 治^{*1}, 中 桐 滋^{*2}Structural Analysis Consultation System Developed by the Use
of Knowledge Bases and Symbolic Manipulation

Michiharu KUDO and Shigeru NAKAGIRI

An attempt is made to constitute an integrated consultation system for structural analysis. The objective at present is to afford a prototype consultation system the ability to recognize a structure and its properties in terms of the physical model and to predict the model response qualitatively. Elastic beams and plates are taken for the physical model. The system consists of the analysis knowledge base and structure-domain base of the physical model linked mutually by message communication and supported by the inference engine. The knowledge is stated in the form of the frame model. A symbolic processor is provided for the manipulation of equations and formulae. The inference engine is described in Prolog language. The system is implemented on a personal computer PC 9801 VX 2. The case studies of beam problems assure the potential of the prototype system to evolve into sophisticated consultation systems by large computers in the future.

Key Words: Structural Analysis, Consultation System, Knowledge Base, Symbolic Manipulation, Inference Engine, Frame Model

1. 緒 言

現在, 構造設計においては数値解析が重用されている。プリポストプロセッサなどを含めたハードウェアの進歩とユーザインタフェースの充実に伴い設計における数値解析の重要性は今後も高まるであろう。一方, 有限要素解析に関する知識工学の応用としてコンサルテーションシステム⁽¹⁾⁽²⁾, 構築システム⁽³⁾の開発が進められ, 設計一般についてもエキスパートシステムの導入が図られている⁽⁴⁾⁽⁶⁾。一般的にも, 人工知能と計算力学との融和および材料力学的知識の計算機への実装が目ざされているのは⁽⁷⁾⁽⁸⁾, 構造物の保全にエキスパートシステムがまず用いられたとの経過⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾からみて, 当然の帰結であろう。

数値解析技術が発展し, 数値解析システムが数多く構築されていても, 現在のシステムの構造物に対する認識は数値的であり, 専門家が解析結果の適否を判断するときの基礎となる物理的な認識とは異質である。専門家の有する物理的な解釈力と計算機の有する数値

的な解析力を結合することが可能となれば, 専門家との対話を加えた統合的な数値解析システムの発展が期待される。ここでいう統合的な数値解析システムの要件として

(1) 対象構造の環境と性状に照らして所要の数値計算を指定・実行・制御できる計算モデルを作成可能であること。

(2) そのシステムは, 作成した計算モデルから得られる結果が専門家の有する工学的力学的判断とどのような関係にあるかを専門家と同様な認識・概念で自立的に理解し得ること。

(3) システムは, そのモデルに基づいて適切な数値解析を実行し, 計算機との対話により専門家がその結果を適切に評価し得ること。

などがあげられる。

本研究においては, 上記第2項の要件の実現を図るため, 物理モデルによる構造解析支援システムの構築を試みる。この物理モデルとは, Fenves⁽²⁾の提唱した分類によるものであり, 物理的な構造物の解析に際してモデルの応答を定性的に予知するためのものである。本システムは言語として Prolog を用い, パーソナルコンピュータ PC-9801 VX 2 上にインプリメントされている。本システムはいまだ初期段階ではあるが,

* 平成元年1月24日 第955回講演会において講演, 原稿受付 昭和63年7月1日。

^{*1} 正員, 日本 IBM (☎102 東京都千代田区三番町 5-19)。

^{*2} 正員, 東京大学生産技術研究所 (☎106 東京都港区六本木 7-22-1)。

構造解析に用いられる材料力学の基本知識をまとめた知識ベースと、知識ベースに基づき自立的に問題解決を行う推論機構、さらにその推論過程で数式を処理するために用いられる数式プロセッサから構成される。開発環境における記憶容量の制約により取扱う物理モデルははりと平板に限られている。しかしながら、線形弾性微小変形理論の枠内で連続ばりを含む構造形態の定義、境界条件の設定から構造応答の数式による定性的な予知が本システムでは可能である。真直ばりに関する例題を設定して本システムにより材料力学の知識が引き出されることを示し、システム構成が有効であることを検証する。

2. 本研究における知識と推論

2.1 物理モデルによる知識表現 有限要素法のプログラムによれば構造物形状、境界条件などの入力と要素分割に対して、自動的に数値や画像として解析結果が得られる。しかし、その結果を構造の物理的性質と結びつけて解釈し、解析精度を向上させるために数値モデルを変更し、また構造機能をより発揮させるための設計変更をすることは解析プログラム自体では困難である。物理的解釈と設計変更などの知的処理の基本となる知識は、「対象となる実構造物を理論的な物理モデルに置き換え、それに対して解析を行う」知識であると言える。ここで物理モデルとは、多くの場合その特性が数式で表現され、単純化された形状を有する要素の集合である。材料力学の公式は、モデル化された基本的な構造要素の力学および幾何学的性質を数式で表現したものである。例えば、せん断ひずみ γ は微小距離 L に対して生じているずれ λ_s に対して、

$$\gamma = \lambda_s / L$$

のように定義される。専門家は、これらの公式を数式としてよりも各パラメータ間の因果関係として記憶している場合が多く、知識としての数式表現の重要性を意識していないことがある。本システムでは、このような材料力学の知識をまず蓄積する。

2.2 物理モデルによる推論 物理モデルによる推論とは、物理モデルの性質に従ってあるパラメータと別のパラメータとの関係を試行錯誤を繰返しながら次々と連鎖的に結び付けて、最終的に特定の関係を求めるものである。本研究では、物理モデルの特性を表現した数式を各パラメータに従って変形していくことによって推論を行う方式をとる。この方式により、専門家の問題設定に対して解析システムが協調的に推論を行い、専門家が対象構造の応答性状を定性的に把握

することが可能となる。

2.3 基本構造要素に関する知識 本研究では、構造物の特性を表現する物理モデル、すなわち基本構造要素として真直ばり、く形平板、円形平板などを扱う。これらの構造要素の種々の性質は、基本的には微分方程式により知識表現されている。本システムでは、それらの知識をフレームモデルと数式で表現する。また、複雑な構造物は基本構造要素を複数個組合せた物理モデルとして表現している。

3. 知識ベースシステム EXTRA

本研究において構築するものは構造解析の専門家を支援するシステムであり、以後、EXTRA (EXpert system for STRuctural Analysis) と略称する。基本構造要素の幾何学的特性に関する知識はフレームモデルにより表現されており、構造・領域知識ベースとして用いられる。その推論機構は、フレーム間のメッセージ交信方式によって推論を行う。基本構造要素の力学的特性に関する知識は微分方程式と数式で表現され、解析知識ベースとして用いられる。その推論機構は、方程式の各パラメータを次々と結び付けて変形させることによって推論を行うものである。この二つの知識ベースの推論機構は互いに相手を呼び出すことができるとともに、数式プロセッサを利用して数式処理を行う。EXTRA システムの構成を図1に示し、その内容を以下に述べる。

3.1 構造・領域知識ベースと推論機構 EXTRA では構造・領域知識ベースをフレームモデルで表現する。ここでのフレームとは基本構造要素が有する一つの特性を意味する。一つのフレームは複数のスロットから構成されている。ある特性が下位にある複数の特性によってさらに細かく表現される場合には、それらをそれぞれ一つのスロットとしてフレームに記述する。推論機構は、各フレーム間において相互にメッセージ交信を繰返し、設定された問題を満足する解

図1 EXTRA システムの構成

答を得るまで推論を行う。すなわち、一つのフレーム内のみで解答が得られない場合は、他のフレームにメッセージを送って、解答を探索することにより推論が行われる。図2に本方式による推論のイメージを示す。

構造知識ベースは、物理モデルの幾何学的特性に関する各パラメータをフレームモデルを用いて定義する。真直ばり、く形平板、円形平板などに関する知識に加えて、一般常識として図形、単位、ベクトル、座標などに関する知識もここで定義されている。JIS規格、物性値などの便覧類に記載されている事項を簡易に記述できる。また、断面二次モーメント算出のような手続的な知識もこの構造知識ベースの中で記述されている。図3に基本構造要素の一つとして真直ばりの知識表現を示す。

領域知識ベースは、構造物の存在領域における基本構造要素の位置決定と境界条件を定義する機能を持つ。構造物位置・位相は全体座標系により記述されている。個々の要素は、要素ごとに定義された部材座標系を有し、全体座標系に対する相対位置と相対方向によってそれぞれ区別される。他の要素との関係とその境界での接続条件は、あらかじめ指定された点あるいは面フレームに記述され、それにより境界での幾何学的境界条件が決定される。図4に全体座標系と部材座標系を示す。

構造・領域知識ベース用推論機構は以下の機能を有している。

- (1) 基本構造要素の詳細仕様を定義する機能
- (2) 仕様が設定された構造物と基本要素に関する

メッセージに対して推論を進めて解答する機能
前者の機能は、構造仕様を記述するためにあらかじめ用意された構造仕様書の各欄を実際のパラメータ値で埋めていく作業に相当する。後者の機能は、設計者が構造解析を行う際に、構造仕様書の入力されたデータベースを用いて、必要なデータを適宜取り出す作業に相当する。メッセージは物理モデルに関する質問を表現する。EXSTRAにおいては、例えば「真直ばりAの主軸におけるヤング率の数値」や、「真直ばりBの断

面二次モーメント」などを自然言語に近い書式で設問すると、推論機構が構造・領域知識ベースを用いて検索結果を出力する。

3.2 解析知識ベースと推論機構 解析知識ベースは基本構造要素の力学的特性を表現する支配方程式、材料力学の諸公式、それを適用する条件に関する知識ベースである。推論機構は、問題に応じて設問されたパラメータと条件が実現されるまで上記知識ベースに蓄えられた知識を適用して解析を行う。支配方程式および公式(以後、方程式と総称する)をなるべく数

(a) はりの物理モデル

(b) はりの階層的知識表現

kb_s(構造分類,
[梁(B),
[[主軸(座標軸種,X),end],
[軸線(軸線種,C),end],
[材質(材質種,材質(M)),end]]]).

(c) はりの知識ベースによる表現

図3

図2 推論機構(構造・領域知識ベース)

図4 全体座標系と部材座標系

式に近い書式で表現し、かつ解析知識ベース用推論機構で処理しやすいように次の規則を設定している。

(1) 方程式は特定のパラメータについて解き、それを左辺の変数に設定した形式とする。

(2) 一つの方程式は、その式に含まれるすべてのパラメータについて解いた形式に変換する。

(3) 一つの方程式に対し一つの式番号を対応させる

下記に解析知識ベースに記述されている方程式の例を示す。

[真直ばり公式]

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \dots\dots\dots (1.1)$$

expr([[真直ばり応力, 1], [曲げモーメント*軸距離, 断面二次モーメント]], [1, 1]])

[片持ばり支配方程式]

$$V = \frac{F}{6EI} (L^3 * 2 - 3 * L^2 * x + x^3) \quad (14, 1)$$

expr([[[たわみ, 1], [外力*(L^3+L^2*x*(-3)+x^3), 断面二次モーメント*ヤング率*6]], [14, 1]])

解析知識ベース用推論機構は、設定された解析メッセージ(ある問題を解析するための目標、最終的に何を求めるかを示したもの)を満足させるように、方程式として表現された各公式を、所定の条件・規則に従って次々と適用して問題解決を行う。ここで用いた解析メッセージの特徴は、

(1) ある条件の下で特定のパラメータについて解析を行うプロセスを表現できる。

(2) ある条件下で求めたパラメータを連続して次の解析に用いる多重目的表現が可能である。

(3) 解析結果において特定のパラメータが陽に表現される形式を指定することが可能である。ことである。

解析メッセージの基本書式は、

目標(目標変数, [条件 1, 条件 2...])

である。ここで、目標は求めるパラメータ名、目標変数は解析結果が入る変数、条件フィールドには解析する際の諸条件を記述する。解析メッセージの例を次に示す。

例) $x=L/2$ の位置におけるたわみ角 θ を、断面二次モーメント I が陽に含まれている形式で求めよ

→たわみ角 θ ($x=L/2, I=I$)

問題解決における推論方式を次のように定める。

(1) 解析目標を表すパラメータを左辺に持つ方程

式を探索する。

(2) 右辺に含まれるすべてのパラメータに対して、解析メッセージの条件が満たされているか否かを確認し、満たされている変数は条件から除く。

(3) 条件が満たされなかったパラメータすべてについて、それが次の目標状態を表すパラメータであると仮定して上記の処理を繰返す。

(4) 解析メッセージの条件がすべて満たされた場合は、問題が解けたとみなす。

(5) あるパラメータに関する方程式が存在しない場合には前段階の方程式選択が誤っているとし、バックトラックして他の方程式を選択する。

(6) 求められた方程式に解析メッセージの条件を代入し解答とする。

(7) 多重目的表現の問題の場合には、それまでの階層で使われた解析メッセージの条件とその階層の目的状態を表すパラメータとを次の階層の問題を解く際の解析メッセージの条件に付け加える。

幅 b 、高さ h のはりの外縁応力を位置 x の関数で表す問題について EXSTRA で推論した過程を図 5 に示す。

4. 数式プロセッサ SYMPRO

本システムで用いる数式プロセッサは記号で表現された数式を代数的に処理できるとともに、ファイルによる入出力、画面出力などをサポートできるものでなければならない。また、システム内に含まれる種々の処理を円滑にするため各処理間のアクセスが容易にでき、特定の処理をパッケージ化することが可能でなければならない。数式処理用のシステムとして存在している MACSYMA, REDUCE, muMATH などでは上述の要件を満たすことが困難である。したがって、数式処理をも含む本システムにおいてはこれらの要件を考慮に入れ数式プロセッサを試作した。これを以後、SYMPRO と略称する。

SYMPRO の機能としては、記号的に表現された数式の四則演算、展開、共通因子のくくりだし、微分、不

図 5 方程式の推論過程

定積分, 式変形, 約分, 変数分離, 変数置換, 連立一次方程式の求解, 連立微分方程式の境界値問題の求解などである。

SYMPRO における数式表現は以下のとおりである。

$\text{expr}([[[\text{左辺分子}, \text{左辺分母}],$

$[\text{右辺分子}, \text{右辺分母}], \text{式番号})$ 。

例) $\gamma = \lambda_s/L \rightarrow \text{expr}([[[\gamma, 1], [\lambda_s, L]], \text{ex}-1])$ 。

5. EXSTRA による実構造物の解析

本節では EXSTRA による解析例を述べる。以下の例では構造要素は 25 個のフレームで, 方程式は 30 個の数式で処理されている。

(1) 中点支持された下図の片持ばりのモーメントとたわみを求めよ。

BOUNDARY CONDITION :

$$\begin{aligned} w1 &= 0 \\ w2 &= 0 \\ f1 - f2 + fg &= 0, [] \\ m2 &= 0, [x2 = L] \\ m1 &= m2, [x1 = L, x2 = 0] \\ i1 &= 0, [x1 = 0] \\ i1 &= i2, [x1 = L, x2 = 0] \\ v1 &= 0, [x1 = 0] \\ v2 &= 0, [x2 = 0] \\ v1 &= v2, [x1 = L, x2 = 0] \\ w1 &= 0 & -[\text{ex_1}-[\text{c}(1), 1]] \\ f1 &= \frac{fg \cdot 3}{-5} & -[\text{ex_1}-[\text{c}(1), 2]] \\ m1 &= \frac{fg \cdot (L + x1 \cdot 3)}{5} & -[\text{ex_1}-[\text{c}(1), 3]] \\ i1 &= \frac{fg \cdot x1 \cdot (L \cdot 2 + x1 \cdot 3)}{e \cdot 1 \cdot 10} & -[\text{ex_1}-[\text{c}(1), 4]] \\ v1 &= \frac{fg \cdot x1^2 \cdot (L + x1 \cdot 1)}{e \cdot 1 \cdot 10} & -[\text{ex_1}-[\text{c}(1), 5]] \end{aligned}$$

(2) 中立軸の曲率が一定の変形をしている真直ばりの曲げモーメントはどのような性質を持つか求めよ。

曲率=R, その条件のもとで曲げモーメント<w>を求めます。
解析メッセージ: 曲げモーメント (w, [曲率=R])

認識 曲げモーメント = i_断面2次モーメント
* 応力/軸距離 . . . 1
認識 応力 = ヤング率 * 軸距離/曲率 . . . 2
解答 曲げモーメント = i_断面2次モーメント
* ヤング率/R
曲げモーメント は
ヤング率 に 比例します。
i_断面2次モーメント に 比例します。
R に 反比例します。

(3) 問題1のはりにおいて, はりの外縁応力が一定となるように横幅を設計し, $x=L/2$ におけるはりの横幅を求めよ。

応力=応力一定, 軸距離=縦辺長/2, $x=1/2$,
その条件のもとで 横辺長<w>を求めます。
解析メッセージ: 横辺長 (w, [応力=応力一定, 軸距離=縦辺長/2, $x=1/2$])

認識 i_断面2次モーメント = 曲げモーメント
* 軸距離/応力 . . . 1
認識 曲げモーメント = 外力 * x/1 . . . 1 2
解答 横辺長 = 1 * 外力 * 3 / 応力一定 * (縦辺長, 2)
横辺長 は
外力 に 比例します
1 に 比例します
(縦辺長, 2) に 反比例します
応力一定 に 反比例します

6. 結 言

本研究では, 構造解析において構造物を物理モデルに対応させて解釈する知識に基づき, 構造応答を数式により定性的に予知するシステムの開発を行った。本システムでは物理モデルの幾何学的特性はフレームモデルで表現し, 力学的特性は方程式により記述されている。問題を解く過程を方程式の連鎖適用により目標状態を満足させるまでの遷移過程とみなし, それを推論機構で実現する EXSTRA および SYMPRO システムから構成されている。解析目標は解析メッセージという書式によって表現され, 解答を得る際の諸条件を規定している。本システムにより得られる結果は以下のようにまとめられる。

(1) 実構造物に対して, 物理モデル(基本構造要素)に関する幾何学的特性と力学的特性の2種類の知識を組合せた推論を行うことにより, 人間に近い認識能力を有するシステムの構成が可能である。

(2) 方程式による知識表現の連鎖適用により, 与えられた問題を定性的に評価, 解答できることを確認

した。これによって、数式として表現された知識が有効であることが確かめられた。したがって、エキスパートシステムにおいても数式プロセッサの必要性が高いと考えられる。

(3) 本研究では、物理モデルとして基本構造要素を選んだ。有限要素法における要素モデルと本研究での物理モデルとは概念的には同様のものであることから、本システムの手法を有限要素法解析用へと拡張することは可能であろう。

(4) 本システムにより、簡単な材料力学の問題をシステム内に記述された知識のみで自立的に解くことができることが示された。これは、構造解析や他の分野の専門家を支援することのできる自立的で高度な統合的数値解析システムが構築可能であることを意味する。

文 献

- (1) Bennet, J. S. and Engelmores, R. S., SACON A Knowledge-Based Consultant for Structural Analysis, *Proc. 6 Int. Joint Conf. AI*, (1979), 47-49.
- (2) Fenves, S. J., A Framework for a Knowledge-Based Finite Element Analysis Assistant, *Proc. Winter Annual Meet, Appl. Knowledge-based Syst. Eng. Des. ASME*, (1985), AD-10, 1-7.
- (3) 瀬口・ほか3名, 有限要素モデル構築システム(構造解析の場合), 第2回ソフトウェアコンファレンス議事録, (昭61), リフトウェアコンファレンス実行委員会.
- (4) 大須賀, 述語論理のCADへの応用(その2), 精密機械, 50-7 (昭59), 1159-1165.
- (5) 富山・平松・吉川, 概念設計向き知識ベースシステム PROSCODE-1の研究, 精密機械, 50-4(昭59), 685-690.
- (6) 赤木・藤田, オブジェクト指向に基づく設計エキスパートシステムの研究, 機論, 54-500, C(昭63), 1017-1025.
- (7) 矢川・吉村, 人工知能と計算力学(1), 機械の研究, 39-11(昭62), 1175-1180.
- (8) 福田, 論理プログラミング技法を用いた材料力学の知識の計算機への実装, 機論, 51-461, A(昭60), 226-230.
- (9) 福田, 構造健全性確保への知識工学的接近の試み, 機論, 50-452, A(昭59), 778-783.
- (10) 中村・ほか3名, 水力網構造物の寿命予測エキスパート・システムとその適用, 土木論, 374-1-6(昭61), 513-521.

- (1) Bennet, J. S. and Engelmores, R. S., SACON A Knowl-