構造物の安定性に関する知識整理と安定判断システム

KNOWLEDGE-BASED EXPERT SYSTEM FOR STABILITY ANALYSIS OF PLANE TRUSS STRUCTURES

加藤 史郎*, 杉山 武**, 山口 源一郎***, 河合 正晃****,
Shiro KATO, Takeshi SUGIYAMA, Gen-ichirou YAMAGUTI and Masaaki KAWAI

This paper reports on an elementary approach to AI (Artificial Intelligence) in structural engineering from the following view points ;

- (1) knowledge acquisition on stability of plane truss structures,
- (2) a knowledge-based expert system to judge the structural stability.

Structural engineers can recognize, as a visual image, truss structures as a chain of members and connected nodes. Therefore, in this paper, the representation of structural information can be considered as a concept of network. The knowledge representation is based on production rules. Reasoning stable structures in this system is interpreted as searching a network judging from knowledge bases. In this system, unstable modes are also analyzed by numerical method, and can be displayed on CRT.

This system is implemented on a personal computer running under a MS-DOS operating system. The programming language for judgement is Prolog, which has a powerful pattern matching capability. The programming language for numerical analysis is Fortran.

Keywords : *Expert System, Stability Analysis, Plane Truss Structures, Production Rules, Prolog, AI*

1. はじめに

近年, 人工知能技術の研究が盛んに行われ, この人工知能技術は様々な分野で利用されてきている。人工知能応用技術の一つとしてエキスパートシステムがある。エキスパートシステムとは, コンピュータに蓄積された特定分野の専門知識を用いて, 専門家に近い能力で問題解決を行うシステムである。このようなエキスパートシステムは診断, 計画, 生産管理などの様々な分野で構築されている^{13), 17), 18)}。最近では, 建築土木の分野においてもコンクリートのひび割れ診断システム¹⁷⁾や最適土地利用企画エキスパート・システム¹⁸⁾などが構築されている。

構造工学における従来の研究は, 理論ならびにそれに基づく実験, および数値実験であった。それらの研究から実証的にかつ数値を伴う確かな知識が豊富に蓄積されてきた。それらの知識は, 研究者, 技術者の思考過程において有効に活かされ多くの実績を上げてきた。しかしながら, これらの本質的かつ有益な知識は「紙」の上に蓄えられ, その使用に当たっても知識の反復的な訓練が

必要であった。例えば, 構造の豊富な知識を持つ人間は, 平面トラス構造物の安定判断を行う場合, 従来の安定性の判断法のような数式的なものを使わず, 物理的現象としてとらえた定性的な知識によって直観的に安定・不安定を判断している。つまり, 実験や数値解析の経験をとおして安定な構造形態または不安定な構造形態の経験的知識を蓄積し, この経験的知識に基づいて安定な構造形態または不安定な構造形態を見つけ出すことによって判断していると言える。

このような経験的知識を整理し計算機上に蓄積したシステムを構築すれば, このシステムは, ある研究者や技術者だけの知識だけでなく, 経験的知識の少ない学生などの知識の一領域として共有できるようになる。また, このシステムにおいてどのように知識を用いて判断しているかという推論過程を表示することにより, 研究者や技術者の思考過程を知ることができ, 自らの知識とすることもできる。

本研究は, 構造工学の分野においても知識ベースアプローチが効果的に適用できることを示すために, 限られ

* 豊橋技術科学大学 教授・工博
** (株) 中部電力 副主査研究員
*** (株) 中部
**** 日本電信電話株式会社

Professor, Toyohashi University of Technology, Dr. Eng.
Senior Research Engineer, Chubu Electric Power Company Ltd.
Chubu Engineering Company Ltd.
Nippon Telegraph and Telephone Corporation

たテーマであるが必要かつ十分である知識のほかにある経験的知識の代表として、構造力学の基礎的問題である平面トラスの安定判断問題をとらえ、(1) 構造物の安定性に関する知識整理と、安定な構造を見つけ出していく一種の探索問題として(2) 知識ベースに基づく判断システムの試作を行った^{2), 11)}。

2. 安定性に関する知識整理

構造力学の教科書などで扱われている平面トラスの安定判別式((1)式)³⁾は、トラス構造物が安定となるための最小限に必要な条件であり、また、この条件を満足していても安定であるとは限らない。

$$(r+m)-2j \geq 0 \quad (1)$$

r : 反力数
 m : 部材数
 j : 節点数

安定や不安定の判断は、このような判別式だけでは不十分であり、判別式のほかに部材の配置やつながり、支持の方法などの要因も含めた安定に関する知識が必要である。

また、トラスの知識を持つ人間は、むしろ(1)式のような数式を使わず経験的に安定・不安定を判断することができる。つまり、経験をとらえてトラス構造の安定な構造形態または不安定な構造形態の経験的知識を蓄積し、この経験的知識に基づいてトラス構造全体について一度に判断するのではなく、部分的に安定な構造形態または不安定な構造形態を見つけ出すことの繰り返しによって構造全体の判断を行っていると考えられる。本研究は、このように部分的に安定な構造形態を見つけることを一種の探索問題としてとらえ、探索問題に適切な言語である Prolog 言語¹¹⁾を用いて表現した。また、経験的知識は、数値的なものではなく言語的なものであることから、言語関数的な理論構成によって推論することができるプロダクションルール^{10), 12)~14)}を応用している。

図-1 は、本研究における安定判断の基本的な概念を表したものである。安定判断の推論は、すでに安定した部分構造から導かれた安定節点に関する事実と知識ベース中の経験的知識とを利用して、安定した部分構造を新しく探し出し、新しい安定節点を事実としてデータベースに記憶していくことの繰り返しである。推論は安定した部分構造が新しく探し出せないとき終了する。トラスの安定・不安定の判断は、推論を終了したときに、すべての節点について安定が導かれたならば構造全体を安定と判断し、安定とされない節点が存在するならば不安定

構造と判断する。

ここで、対象とする構造や判断に必要な経験的知識をあらかじめ記号化または言語化しなければならない。人間は安定判断の対象とするトラス構造を視覚的に認識することができるため、安定な構造形態に関する経験的知識は節点と部材とのつながりの連鎖のような視覚的イメージとして蓄積されていると考えられる。この節点と部材とのつながりという考えから、トラス構造の記号化は、節点をノード、部材をアークとみなすネットワークの概念を用いている。したがって、部材は、図-2(a)のように節点間のつながりを表すネットワーク情報としている。また、経験的知識は、安定な構造形態がどのようなネットワークで構成されているかによって表現することができる。よって、安定判断の推論で行う部分構造の導出は、経験的知識に基づいたネットワークの探索によって行える。

図-1 トラスの安定判断システムの基本構成と推論方針

truss(ブロック番号, 節点番号1, 節点番号2).
 ex. truss(0, 1, 2).
 truss(0, 2, 3).
 truss(0, 3, 1).

(a) 部材に関するデータの表現形式

node(X座標, Y座標, 節点番号, 拘束状態).
 ex. node(2, 2, 1, sup(pin)).
 node(5, 6, 2, free).
 node(8, 3, 3, sup(20.0)).

※拘束状態の値

拘束を受けない...free
 ピン支持...sup(pin)
 ローラー支持...sup(傾斜角)

(b) 節点に関するデータの表現形式

stable_node(節点番号, stable).
 ex. stable_node(1, stable).
 stable_node(2, stable).
 stable_node(3, stable).

(c) 安定節点の表現形式

stable_node(節点番号, block(ブロック番号)).
 ex. stable_node(5, block(3)).
 stable_node(6, block(3)).
 stable_node(7, block(3)).
 stable_node(8, block(3)).
 stable_node(9, block(3)).
 stable_node(10, block(3)).
 stable_node(11, block(3)).

(d) ブロックに含まれる節点の表現形式

unstable_set(節点番号1, 節点番号2, 節点番号3).
 ex. unstable_set(3, 4, 5).

(e) 不安定構造に含まれる節点の表現形式

図-2 各節点の座標と拘束状態の情報表現例

注1) Prolog は、事物の性質や意味・事物間の関係などを表現する述語理論の体系を基礎としている。Prolog はユニフィケーション機能（パターンマッチング機能）、推論機能（三段論法）とバックトラック機能を有しており、トラスの安定な構造形態を発見することなどが必要となる探索問題に適しているため、Prolog を採用した。

安定判断には部材の配置や支持方法などが要因となるため、各節点の座標と拘束状態の情報を図-2(b)のように表現する。

2-1 平面トラスの安定節点と安定構造

本研究で用いる平面トラスの安定判断は、主に初等的な構造力学³⁾の経験的知識に基づいている。安定節点は、

- ピン支持された節点
- 節点に荷重をどの方向から作用させたときでも、節点が微小変位の範囲内で変位することにより部材軸力と荷重とのつり合いがとれるような節点

と定義する(図-3)。

次に、図-4(a), (b)のような不安定構造を考える。(a), (b)ともに微小変位の範囲内において剛体変位(部材に軸力が発生しない変形)が生じる。一方、有限変位の範囲で考えると、(a)は剛体変位が可能であるが、(b)は軸力が発生し荷重とつり合うことによって剛体変位が不可能である。このように(a)と(b)は異なる性質を持つ構造形態であるが、本研究ではともに微小変位の範囲で力のつり合いがとれず、剛体変位を生じる不安定構造として扱う。本研究では安定節点間をつないでいる部材を安定部材とし、安定節点と安定部材から構成される構造を安定構造と定義する。

2-2 安定判断の知識ベース

本研究では、安定判断の知識として次の3つについて知識整理を行った。

- 1) トラスの一般的な安定構造の知識
- 2) 安定節点から新しい安定構造を探すための経験的知識
- 3) 複雑な構造を単純な構造に置に換えるための知識

2-2-1 トラスの一般的な安定構造の知識

全体のトラス構造からピン支持やローラー支持をもとに探し出される安定した構造形態には、図-5に示すような3つの構造が考えられる。これらの構造は、部材を節点間のつながりとして表現すれば、

ルール1: ある節点が2箇所のピン支持とつながっている構造は安定構造である。ただし、2箇所のピン支持と節点との位置関係が直線となる場合(幾何学的不安定)を除く。

ルール2: ピン支持とローラー支持がつながっている構造は安定構造である。ただし、ピン支持とロー

ラー支持をつないでいる部材とローラー支持の傾斜方向が直交している場合(幾何学的不安定)を除く。

ルール3: 3箇所のローラー支持が3本の部材でつながっている構造は安定構造である。ただし、傾斜方向がすべて同じ場合(平行移動)または、傾斜方向に直交する直線が1点で交わる場合(回転移動)を除く。

と知識整理できる。

これらのルールの表現は、条件部と実行部とから構成されるプロダクションルールで次のように Prolog 言語で記述している。

ルール名: 一条件部, 実行部。

条件部は、安定した構造形態を記号的に表現した部分であり、この条件部を基に安定となるための節点と部材の組み合わせが全体構造の中から探し出される。実行部に

図-5 トラスの一般的な安定構造

図-6 ルール1の安定構造を認識する知識表現

```

find_stable_basic:-
  node(X1,Y1,NODE1,sup(pin)),
  check_truss(BL,NODE1,NODE2),
  node(X2,Y2,NODE2,sup(RAD)), RAD/==pin,
  not(stable_node(NODE2,stable)),
  check_right_angle(X1,Y1,X2,Y2,RAD),
  del_truss(BL,NODE1,NODE2),
  ass_stable_node(NODE2,stable),
  change_state(BL).

```

図-7 ルール 2 の安定構造を認識する知識表現

```

find_stable_basic:-
  node(_,_,NODE1,sup(RAD1)), RAD1/==pin,
  not(stable_node(NODE1,stable)),
  check_truss(BL1,NODE1,NODE2),
  node(_,_,NODE2,sup(RAD2)), RAD2/==pin,
  not(stable_node(NODE2,stable)),
  check_truss(BL2,NODE2,NODE3),
  node(_,_,NODE3,sup(RAD3)), RAD3/==pin,
  not(stable_node(NODE3,stable)),
  check_truss(BL3,NODE3,NODE1),
  not(check_unstable_set(NODE1,NODE2,NODE3)),
  rad_check(NODE1,NODE2,NODE3),
  node_position(NODE1,NODE2,NODE3),
  del_truss(BL1,NODE1,NODE2),
  del_truss(BL2,NODE2,NODE3),
  del_truss(BL3,NODE3,NODE1),
  ass_stable_node(NODE1,stable),
  ass_stable_node(NODE2,stable),
  ass_stable_node(NODE3,stable),
  change_state(BL1),
  change_state(BL2),
  change_state(BL3).

```

図-8 ルール 3 の安定構造を認識する知識表現

は、条件部で探し出された安定構造を新しい事実としてデータベース内に記憶するための処理が記述されている。具体的なルール 1~3 の表現を図-6, 7, 8 に示す。

2-2-2 安定節点から新しい安定構造を探すための経験的知識

部材によって安定節点とつながっている節点は、部材方向に拘束を受けることから、図-9 に示すような構造も安定である。したがって、すでに記憶されている安定節点を基に新しい安定構造を探すための経験的知識は、

ルール 4：ある節点が 2 箇所の安定節点とつながっている構造は安定構造である。ただし、3 つの節点の位置関係が直線となる場合（幾何学的不安定）を除く。

ルール 5：ローラー支持が安定節点とつながっている構

◎ 安定節点   △ ローラー支持

図-9 安定節点から見つけられる安定構造

```

find_stable_node:-
  stable_node(NODE1,stable),
  check_truss(BL1,NODE1,FIND_NODE),
  not(stable_node(FIND_NODE,stable)),
  check_truss(BL2,NODE2,FIND_NODE),
  stable_node(NODE2,stable),
  NODE1/==NODE2,
  node_position(NODE1,NODE2,FIND_NODE),
  del_truss(BL1,NODE1,FIND_NODE),
  del_truss(BL2,NODE2,FIND_NODE),
  ass_stable_node(FIND_NODE,stable),
  change_state(BL1),
  change_state(BL2).

```

図-10 ルール 4 の安定構造を認識する知識表現

```

find_stable_node:-
  node(XR,YR,ROLLER,sup(RAD)), RAD/==pin,
  not(stable_node(ROLLER,stable)),
  check_truss(BL,ROLLER,NODE),
  stable_node(NODE,stable),
  node(XN,YN,NODE,_),
  check_right_angle(XR,YR,XN,YN,RAD),
  del_truss(BL,ROLLER,NODE),
  ass_stable_node(ROLLER,stable),
  change_state(BL).

```

図-11 ルール 5 の安定構造を認識する知識表現

造は安定構造である。ただし、安定節点とローラー支持をつないでいる部材とローラー支持の傾斜方向が直交している場合（幾何学的不安定）を除く。

である。ルール 4 の表現を図-10 にルール 5 の表現を図-11 に示す。

2-2-3 複雑な構造を単純な構造に置き換えるための知識

ルール 6：内部的に安定した部分構造の認識

図-12, 13 に示すようなトラス構造は、前述の知識だけで安定判断できるほど単純なものではない。このよう

(a) 内部的に安定な部分構造を (b) 1本の仮想部材によって持つ静定トラス 単純化された構造

図—12 典型的な静定トラスの例

(a) 単純化前のトラス構造 (b) 3本の仮想部材によって単純化された構造

図—13 複数の仮想部材で単純化される構造例

(a) 三角形トラスから構成されるブロックの例

(b) 三角形トラスと2ヶ所以上つながる節点を含めたブロックの例

図—14 内部的に安定している部分構造 (ブロック)

に複雑な構造の安定判断には、内部的に安定した部分構造の認識が必要である。つまり、内部的に安定した部分構造を認識し、この部分構造を1本あるいは数本の部材（以下、仮想部材と呼ぶ）に置き換えることによって構造自体が単純化される。この単純化によって、複雑な構造もルール1～5の安定した構造形態の知識だけで安定判断が可能となり、また、判断の対象とする構造の探索空間を縮小することで安定判断の効率がよくなる。

内部的に安定した部分構造 (ブロック) とは、2つ以上の三角形トラスから構成される部分構造 (図—14(a)) と三角形トラスと2箇所以上つながる節点を含めた部分構造 (図—14(b)) である。また、ブロックの核となる部分構造は、図—14(a) のような3つの節点と3本の部材から構成される三角形トラスとさらに1つの節点をつなぐための2本の部材を含めた計4節点5部材の部分構造である。このブロックの核となる構造を見つける知識表現を図—15に示す。

図—16は、ブロックの核となる構造とつながる節点を探す知識表現である。認識されたブロックは、他のブロックと区別するために識別番号をつけ、このブロックに含まれる節点を図—2(d)の形式で記憶する。

```
find_stable_block:-
  check_truss(BL1,NODE1,NODE2),
  check_truss(BL2,NODE2,NODE3),
  check_truss(BL3,NODE3,NODE1),
  not(check_unstable_set(NODE1,NODE2,NODE3)),
  check_same_block(BL1,BL2,BL3),
  check_truss(BL4,NODE1,NODE4),NODE4/=NODE3,
  check_truss(BL5,NODE2,NODE4),
  not(check_unstable_set(NODE1,NODE2,NODE4)),
  node_position(NODE1,NODE2,NODE3),
  node_position(NODE1,NODE2,NODE4),
  ass_block_number(NO),
  del_truss(BL1,NODE1,NODE2),
  del_truss(BL2,NODE2,NODE3),
  del_truss(BL3,NODE3,NODE1),
  del_truss(BL4,NODE1,NODE4),
  del_truss(BL5,NODE2,NODE4),
  ass_stable_node(NODE1,block(NO)),
  ass_stable_node(NODE2,block(NO)),
  ass_stable_node(NODE3,block(NO)),
  ass_stable_node(NODE4,block(NO)),
  change_block_number(BL1,NO),
  change_block_number(BL2,NO),
  change_block_number(BL3,NO),
  change_block_number(BL4,NO),
  change_block_number(BL5,NO),
  repeat,
  check_block_node(FIND_NODE,NO),
  FIND_NODE=not_find,!,
```

図—15 ルール6-1のブロックの核となる構造を認識する知識表現

```
find_block_node(FIND_NODE,NO):-
  stable_node(NODE1,block(NO)),
  check_truss(BL1,NODE1,FIND_NODE),
  not(stable_node(FIND_NODE,block(NO))),
  check_truss(BL2,NODE2,FIND_NODE),NODE1/=NODE2,
  stable_node(NODE2,block(NO)),
  node_position(NODE1,NODE2,FIND_NODE),
  del_truss(BL1,NODE1,FIND_NODE),
  del_truss(BL2,NODE2,FIND_NODE),
  block_paint(NODE1,NODE2,FIND_NODE),
  ass_stable_node(FIND_NODE,block(NO)),
  change_block_number(BL1,NO),
  change_block_number(BL2,NO),!,
```

図—16 ルール6-2のブロックに所属する節点を見つける知識表現

次に、ブロックの仮想部材への置き換えについて述べる。

仮想部材を考えるとときにつながる対象となる節点は、

```

make_truss:-
    needful_node(SUP1,sup,NO),
    needful_node(SUP2,sup,NO),
    SUP1/=SUP2,
    not(check_truss(NO,SUP1,SUP2)),
    assertz(truss(NO,SUP1,SUP2)),
    ass_continue,fail.
make_truss:-
    needful_node(SUP,sup,NO),
    needful_node(NODE,stable,NO),
    SUP/=NODE,
    not(check_truss(NO,SUP,NODE)),
    assertz(truss(NO,SUP,NODE)),
    ass_continue,fail.
make_truss:-
    needful_node(SUP,sup,NO),
    needful_node(NODE,joint,NO),
    SUP/=NODE,
    not(check_truss(NO,SUP,NODE)),
    assertz(truss(NO,SUP,NODE)),
    ass_continue,fail.
make_truss:-
    needful_node(NODE1,joint,NO),
    needful_node(NODE2,joint,NO),
    NODE1/=NODE2,
    not(check_truss(NO,NODE1,NODE2)),
    assertz(truss(NO,NODE1,NODE2)),
    ass_continue,fail.
make_truss:-
    needful_node(NODE1,joint,NO),
    needful_node(NODE2,stable,NO),
    NODE1/=NODE2,
    not(check_truss(NO,NODE1,NODE2)),
    assertz(truss(NO,NODE1,NODE2)),
    ass_continue,fail.
make_truss:-!.

```

図一17 ルール6-3のブロックを仮想部材へ置き換える知識表現

①ブロック内の安定節点、②ローラー支持またはピン支持されている節点、③他のブロックまたはトラス部材とつながっている節点である。これらの節点を見つけ仮想部材に置き換える知識表現を図一17に示す。

例えば、図一12は、まずブロックの核として節点1, 2, 3, 4とそれらをつなぐ部材から構成される部分が見つけられる。さらに、節点5, 6, 7の順でこのブロックに所属する節点が見つけられていく。このブロック内にはピン支持とローラー支持されている節点が存在するためこれらの節点をつなぐ1本の仮想部材に置き換えられる。複数の仮想部材に置き換えられる例を図一13に示す。

ルール7：ローラー支持と等価な節点の認識

図一18(a)に示すようなある節点が安定節点とつながっている構造において、安定でない方の節点を考える。この節点の部材方向の変位 U は、変位によって部材軸力が発生するため拘束を受けている。部材方向に対して直交方向の変位 V は、部材軸力による抵抗がなく自由に移動できる。したがって、このような節点は、部材と直交方向に変位を許すようなローラー支持に置き換えることができる。このような知識を図一19に示す。

例えば、図一20(a)のようなトラス構造は、ルール2によってピン支持とローラー支持とその両者をつなぐ部

図一18 ローラー支持と等価な節点

```

make_support:-
    stable_node(NODE1,stable),
    check_truss(_,NODE1,NODE2),
    node(X1,Y1,NODE1,_),
    node(X2,Y2,NODE2,free),
    X is X2-X1,Y is Y2-Y1,
    rolrads(X,Y,RAD),
    retract(node(X2,Y2,NODE2,free)),
    assert(node(X2,Y2,NODE2,sup(RAD))),
    ass_continue,fail.
make_support:-!.

```

図一19 ルール7のローラー支持と等価な節点を認識する知識表現

図一20 ローラー支持に置換できる節点を含むトラス構造

材からなる部分構造が安定であることがわかり、ルール3によって、節点3も安定節点であることが導かれる。ここで、節点4, 5, 6をローラー支持と等価な節点であることに注目すると、節点4, 5, 6からなる部分構造の安定判断を図一20(b)の構造について行うことができる。

2-3 安定判断の推論アルゴリズム

本研究の知識ベースに基づく安定判断の推論アルゴリズムは、大きく4つのステップに分かれており終了条件を満たすまで繰り返される。

(準備) ピン支持されている節点は安定節点としてあらかじめデータベースに記憶しておく。

(ステップ1) トラスの一般的な安定構造の知識を利用して、ピン支持やローラー支持をもとに安定した構造形態を探し、その構造に含まれる節点を安定節点としてデータベースに記憶する。

(ステップ2) すでにデータベースに記憶されている安定節点をもとに、新しい安定構造を探し、その構造に含まれる節点を安定節点としてデータベースに記憶する。

(ステップ3) 構造中で、まだ安定と判断されていない部分から内部的に安定した部分構造(ブロック)を探す。

(ステップ4) ステップ3で見つけ出したブロックに関す

写真一1 初期画面

写真一2 部材・節点の入力画面

写真一3 安定判断を実行中の画面

写真一4 不安定モードの表示画面

る情報を基にトラスを単純な構造に置き換える。ここで、構造の単純化が可能であれば、ステップ1に戻り再び単純化された構造について安定判断を行う。全節点について安定と判断されたときや、ステップ3でブロックを見つけ出せなかったとき、この構造は単純化が不可能となり、推論を終了

する。
(判断) 最終的な推論の結果、全節点が安定節点ならば、構造全体を安定構造と判断し、また、安定節点とならない節点が残っているときは、両端が安定節点とつながる部材とし、構造全体を安定構造部分と不安定構造部分とに分けた状態を判断結果とする。

3. 平面トラスの安定判断システム

平面トラスは、構造物の中で最も単純であり、かつ基本的なものである。平面トラスの応力解を求める手順や計算方法は、授業ならびに教科書³⁾で比較的詳しく説明されている。また、トラス構造の安定不安定を判断する能力はきわめて重要であると指摘されている。この判断能力は、様々なトラス構造を解くことによって養われ、経験的知識として蓄積されると考えられる。

そこで、2章で述べた安定性に関する知識に基づいてその判断過程を表示することにより、視覚的に平面トラスの安定判断の感覚を身につけることができることを配慮した。このような視覚的機能を十分に完成させることにより教育的システム¹⁾としても利用可能となろう。

3-1 システムの概要

本システムは、次の4つの特徴を有している。

- 1) 安定判断の対象となるトラス構造のデータを画面と対話しながら作成する(写真-2)。
- 2) 安定判断の過程を表示する(写真-3)。
- 3) 安定判断の結果をグラフィック表示する(写真-4)。
- 4) 不安定モードを計算し表示する(写真-4)。

経験的知識による安定判断は、節点間のつながりに関するネットワーク情報に基づいているため、変形状態を考慮しないと判断できない構造に対しては正確な判断ができない。そのため、不安定と判断された部分構造の剛性マトリックスをFortran言語で数値的に解析^{4)~9)}し、その不安定モードを求めることは、経験的知識による判断の信頼性を数理理論の立場から確認することでありきわめて重要である。また、本システムの利用者に対して、どうして不安定なのかという理由を不安定モードを表示することによって理解させることができ、不安定構造を安定構造にするための有用な手がかりを提示することとなる。

本システムの基本機能を図-21に示し、本システムの初期画面を写真-1に示す。不安定構造については、表示された不安定モードから部材の再配置・追加および支持の変更・追加を行い、再び安定判断をすることができる。この繰り返し機能によって利用者は、視覚的に平面トラスの安定判断の感覚を身につけることができると思われる。

3-2 システムの実行例

安定判断の対象として図-22に示すトラス構造について実行する。このトラス構造の入力状態を写真-2に示す。写真-3は、安定判断の過程である。緑色の部材で構成される部分構造は安定であり、黄色の部分ブロックと認識している。

安定判断の結果、このトラスは部分的に不安定と判断され、その部分の不安定モードを赤色の実線で表示し、

図-21 システムの基本機能

図-22 実行例に用いるトラス構造

不安定次数が1次であることが表示されている(写真-4)。

この不安定モードより節点の移動を1箇所拘束するか、または適切なところに1本部材を加えれば良いことがわかる。ここで、図-23のように節点16のローラー支持をピン支持に変更して再び安定判断を行う。

図-23の安定判断の過程を具体的に説明すると次のようである。

【準備】

まず、ピン支持されている節点1と節点16を安定した節点としてデータベースに記憶する(図-24(b))。

【1回目のステップ1】

一般的な安定構造を全体から探す。このときルール2を適用して、節点1のピン支持と節点2のローラー支持をつなぐ構造を安定構造として、節点2を新しく見つけた安定節点としてデータベースに記憶する(図-24(c))。

【1回目のステップ2】

安定している節点から新しい安定節点を探す。節点1と節点2が安定節点となっているためルール4を適用して、節点3を新しい安定節点としてデータベースに記憶する。さらに今度は、節点2と節点3が安定節点となったため節点4が安定節点であることが導かれる。同様に、節点5、節点6の順に安定節点であることが導かれ、データベースに記憶される(図-24(d))。

図-23 図-22のトラス構造を安定構造となるように修正した構造

● は安定節点
— は安定部材
図-24 図-23のトラス構造の安定判断過程

【1回目のステップ3】

内部的に安定した構造（ブロック）を探す。節点6, 7, 8, 9, 10, 11, 12とその節点をつなぐ部材からなる部分構造を1番目のブロックとして認識する。さらに、節点12, 13, 14, 15, 16とそれらをつなぐ部材からなる部分構造を2番目のブロックとして認識する(図-24(e))。

【1回目のステップ4】

構造の単純化を行う。1番目のブロックを節点6と節点12をつなぐ仮想部材1に置き換える、同様に、2番目のブロックについても節点12と節点16をつなぐ仮想部材2に置き換える(図-24(f))。

【2回目のステップ1】

【2回目のステップ2】

ルール4を適用して、節点6と節点16が安定節点であることから、節点12とそれをつなぐ仮想部材1, 仮想部材2からなる構造を安定構造とする。このとき、仮想部材1と仮想部材2が安定部材となることから、1番目のブロックと2番目のブロックに含まれているすべての節点を安定節点として記憶する(図-24(g))。

【2回目のステップ3】

【2回目のステップ4】

全節点が安定節点となったため、構造の単純化をする必要がなく推論を終了する。

【判断】

全節点が安定節点であるため、全体的に安定構造と判断できる(図-24(h))。

4. まとめ

本研究は、平面トラスの安定判断のために必要となる経験的知識や判断方法を知識工学的手法によって整理し、これらの経験的知識を利用した平面トラスの安定判断システムを知識ベースと数理解析理論に基づいて試作した。種々の平面トラスのモデルについて知識ベースのみに基づいて判断を行った結果、従来の安定性の判断法による結果と現在のところ一致しており、本システムはほぼ工学的に満足 of いくものである。しかしながら、本知識ベースは平面トラスのみの安定判断を対象としたものであり、安定性の全問題領域を対象としていないため、きわめて制限の強い知識ベースとなっている。つまり、従来の安定性に関する数理解析理論に比較すれば、本研究に示した数少ない知識ベースだけによる判断システムの能力は、実用性が十分にあるとは言えない。この不十分さを補完するため、知識処理言語と数値解析用言語を併用するシステムの可能性を確かめる意味からも、従来の数理解析理論をシステムの中を含めることにより実用性を高めようとした。今後、このような方向の研究を蓄積すれば、より実用性、信頼性の高いシステムに完成しうる可能性がありえよう。

文献

- 1) DAVID J. GUNARATNAM: A KNOWLEDGE-BASED EXPERT SYSTEM FOR TUTORING IN STRUCTURAL ENGINEERING, Computers and Structures, Vol. 30, No. 3, pp. 767-773, 1988.
- 2) 加藤史郎, 杉山 武, 山口源一郎: Prolog 言語による平面トラスの安定判断システム, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第27号, pp. 185-188, 平成1年2月.
- 3) 横尾義貫, 小西一郎ほか: 構造力学第一巻, 丸善株式会社, 昭和41年.
- 4) 和田 章, 久保田英之: 不安定構造物の解法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第387号, pp. 35-44, 昭和63年5月.

- 5) 田中 尚, 半谷裕彦: 不安定トラスの剛体変位と安定化条件, 日本建築学会構造系論文報告集, 第356号, pp. 35-42, 昭和60年.
- 6) 半谷裕彦, 川口健一: 不安定リンク構造の形状決定解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第381号, pp. 56-60, 昭和62年.
- 7) 半谷裕彦: 一般逆行列とその応用, 有限要素法の最近のトピックス, 日本鋼構造協会, pp. 103-118, 昭和52年2月.
- 8) 柳井晴夫, 竹内 啓: 射影行列・一般逆行列・特異値分解, UP 応用数学選書10, 東京大学出版, 昭和58年7月.
- 9) 二宮市三: 特異値分解による一般化逆行列プログラム (GINVS), ライブラリー・プログラム利用の手引, pp. 48-50, 名古屋大学大型計算機センター, 昭和57年6月.
- 10) 中村秀治, 寺野隆雄: 土木構造物のエキスパートシステム, オーム社, 昭和62年.
- 11) 加藤史郎, 杉山 武, 山口源一郎: 構造物の安定性に関する知識整理と安定判断システム, 日本建築学会大会梗概集 (構造I), pp. 989-990, 平成1年.
- 12) A. Bar, E. A. Feigenbaum 編, 田中幸吉, 淵 一博監訳: 人工知能ハンドブック第I巻, 共立出版, 昭和58年.
- 13) F. Hayes-Roth, D. A. Waterman, D. B. Lenat 編, AIUEO 訳: エキスパート・システム, 産業図書, 昭和61年.
- 14) 上野晴樹, 石塚 満: 知識の表現と利用, オーム社, 昭和62年.
- 15) 萩野達也, 桜川貴司: Prolog-KABA Reference Manual, アステック, 昭和62年.
- 16) 繁 周作, 稲葉 輝: Prolog-KABA 拡張ツール WING Reference Manual, 岩崎技研, 昭和62年.
- 17) 小野 定: コンクリートのひび割れ診断システム, 土木におけるESとCAD, pp. 25-34, 平成1年.
- 18) 小澤由紀夫ほか: 最適土地利用企画エキスパート・システムの研究と開発, 日本建築学会計画系論文報告集, 第400号, pp. 51-59, 平成1年.

付 録

本システムで開発した各種の知識ベースの内重要なものについて説明する。

(注) 本システムは, PC-9801 (マウス使用) 上で安定判断部を Prolog-KABA¹²⁾ および Prolog-KABA 拡張ツール WING¹³⁾ で, 不安定モード解析部を Fortran 言語で作成した。なお, 本システムのリストは, 無償で配布する。

check-truss (ブロック番号, 節点1, 節点2)

この述語は, 『節点1と節点2が1本の部材によってつながっている』または『仮想部材に対して『節点1と節点2が内部的に安定した構造によってつながっている』ことを表している。実際の処理は, 引数の節点1と節点2の値がすでに決まっている場合, 節点1と節点2がつながっているという情報がデータベースに存在するかどうかを検証する。また, 節点1だけ値が決定していて, 節点2が未決定である場合, 節点1

とつながっている節点をデータベース中の情報から検索し, 節点2にその節点番号を返す。逆に, 節点2が決定値で節点1が変数の場合も同様である。ブロック番号は, 内部的に安定した部分構造を置き換えた仮想部材と実際に存在する部材とを識別するための番号である。

node (X座標, Y座標, 節点番号, sup (pin))

node (X座標, Y座標, 節点番号, sup (傾斜角))

node (X座標, Y座標, 節点番号, free)

この述語は, 節点の座標, 支持状態を表している。実際の処理は, 節点が支持されているかを確認することと支持されている節点を検索することである。

stable-node (節点番号, stable)

この述語は, 節点が安定していることを表している。実際の処理は, 節点が安定しているかを確認することと安定節点を検索することである。

stable-node (節点番号, block (ブロック番号))

この述語は, 節点がブロックに所属していることを表している。実際の処理は, 節点がブロックに所属しているかを確認することとブロックに所属している節点を検索することである。

node-position (節点1, 節点2, 節点3)

この述語は, 節点1, 節点2, 節点3の位置関係が直線でないことを確認する。これは, 安定構造の例外を排除するためのものである。

check-right-angle (X1, Y1, X2, Y2, ローラー支持の傾斜角)

この述語は, ローラー支持とつながっている部材について, 部材方向とローラー支持の傾斜方向が直交していないことを確認する。

not (check-unstable-set (節点1, 節点2, 節点3))

この述語は, 節点1, 節点2, 節点3から構成される構造が, すでに不安定構造として記憶されていないかを確認する。

ass-stable-node (安定節点, stable)

この述語は, 新しく見つかった安定節点をデータベースに記憶する。

del-truss (ブロック番号, 節点1, 節点2)

この述語は, 見つけられた安定構造やブロックに含まれる節点1と節点2をつなぐ部材の情報をデータベースから削除する。

change-state (ブロック番号)

この述語は, 安定構造と判断されたブロックに含まれる節点をすべて安定節点としてデータベースに記憶する。

needful-node (節点番号, stable, ブロック番号)

needful-node (節点番号, sup, ブロック番号)

needful-node (節点番号, joint, ブロック番号)

この述語は, 仮想部材を考えると対象となる節点を見つけ出す。ここで, stable はブロック内の安定節点を見つけ出し, sup はピン支持またはローラー支持されている節点を見つけ出す。また, joint はほかのブロックとつながっている節点またはトラス部材とつながっている節点を見つけ出す。

(1989年10月27日原稿受理, 1990年4月7日採用決定)