

I-16 オブジェクト指向構造解析システムにおける構造物モジュールの構築

Modelling of Structure in Object-Oriented Structural Analysis System

藤田亮一¹ 高橋良和² 家村浩和³
 Ryoichi Fujita Yoshikazu Takahashi Hirokazu Iemura

[抄録] 構造解析システムを構造物・荷重・応答解析の3つのモジュールとして捉え、これらの相互作用の結果、システム全体が駆動していく手法が提案されている。この中で、構造物というものは従来よりオブジェクト分析が進められてきたものであるが、解析情報が構造物オブジェクトの中で密接に結びついている結果、我々のイメージする構造物というものから離れていく傾向にあった。本研究では構造物オブジェクトを形状とマトリクス作成を表すオブジェクトに分割し、相互作用を極力抑えることでより有効であり、拡張性や保守管理に優れたモデルを提案するものである。

[Abstract] Many researchers are working on object-oriented models of structures of structural analysis systems. On the other hand as more global approach of the analysis system, the three-module model was proposed. The model is that the structural analysis system is characterized by the structure, load and response analysis modules passing messages each other. This paper presents more effective structure model on the object-oriented structural analysis system. By separating the method of making matrices from the structure object, the object can become simple and similar to our intuition.

[キーワード] オブジェクト指向, 構造解析, 構造物モデル

[Keywords] object-oriented, structural analysis, structure model

1. はじめに

オブジェクト指向という言葉は一般の書籍にも頻繁に表れているように、もはや特別な技術ではないように思われる。オブジェクト指向技術を用いた部品(クラスライブラリ)は数多く市場に出回り、これらを用いることで従来では困難であったウィンドウシステムのプログラミング等が容易に行えるようになっており、その有用性が認められている。

一方商用アプリケーション以外の分野を見てみると、その適用はそれほど盛んではない。これはひとえにその分野において有用なツールが整理されていないことに原因がある。

構造解析分野における取り組みとしては、有限要素法への適用をはじめ、様々な分野で行われている¹⁾⁻⁵⁾。これらの研究においては主に構造物を対象としており、これをオブジェクトと考えるものが主流であった。一方、高橋らは構造物以外の応答解析をもオブジェクトモジュールと捉え、構造物・荷重・応答解析の3つのモジュールが関係しあうことでシステム全体を駆動する手法を取っている⁶⁾。これ

は構造解析をシステムとして考え、オブジェクトの広範囲な適用を進めようとするものであり、構造解析における有用なツールを整理していく1つの方法であるといえる。

本論文では、従来の構造物オブジェクトを踏まえ、オブジェクト指向構造解析システムにおけるより有効な構造物について構築する。まず3つのモジュールを用いた構造解析システムについて説明し、構造物モジュールの役割、意義について説明する。次に従来分析されてきた構造物モジュールに対して再分析を行い、形状と行列作成法について分析を進める。最後に分析結果を統合し、より有効な構造物オブジェクトの構築を試みる。

2. モジュールシステム

(1) システムの概要

高橋らは構造解析を、「構造物に荷重が作用する事によって構造物が変形し、これを追跡することが応答解析である」と考え、これに基づいて構造解析システムを構築している⁶⁾。このシステムのクラス図を図-1に示す。なお、本論文ではシステムの構築に際してRumbaugh⁷⁾の提案するオブジェクトモデリング技法(OMT法)を用いており、図の表記法もOMTに準じている。構造物モジュール(Structure)が対象とする構造物を表し、荷重モジュール(Load)がそれに作用する荷重を表現する。そして、応答解析モジュー

¹ 修(工) 日本技術開発(株) (164 東京都中野区本町 5-33-11)

² 修(工) 京都大学大学院助手 工学研究科土木システム工学教室 (606-01 京都市左京区吉田本町)

³ 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木システム工学教室 (606-01 京都市左京区吉田本町)

ル (ResponseAnalysis) が応答解析全体を管理し、これらのモジュールが相互に作用しあうことで応答解析を行う。このトップレベルモデルには応答解析モジュールに基礎方程式モジュール (Equation) が委譲されていることが明示されているが、これは応答解析における基礎方程式をより積極的に利用することを意味している。システム全体を複数のモジュールに分割することは、保守性を高め、部分の再利用を促進することになる。また、目的に応じて必要なモジュールを組み合わせることで、システムの柔軟性も高められる。以下に各モジュールの概要を説明する。

構造物モジュール 構造物自体に関する情報を表すモジュールである。構造解析問題における役割は、変形のメッセージに対し、現在の状態に応じた情報 (特性行列など) を作成し、受け渡すことである。本モジュールを再分析することが、本論文の目的である。

荷重モジュール 荷重モジュールは外力一般を表し、構造物モジュールに作用するものとして考える。構造解析問題においては外力を構造物に与える役割を持つ。すなわち、ある時刻における荷重を構造物に作用させることが目的となる。外力としては、力の単位で表されるもの以外に慣性力として作用する地震力 (加速度単位) もこのモジュールに含まれる。

応答解析モジュール 基礎方程式モジュールを核とした、応答計算を行うモジュールである。構造物および荷重モジュールからの情報を用いて基礎方程式を作成し、得られた解を他のモジュールへ伝えることで解析を行う。静的解析や地震応答解析等の様々な解析の目的に応じて適切な基礎方程式を作成する事が大きな役割である。実際の応答計算は主に基礎方程式モジュールで行われるため、応答解析モジュールの計算中の役割は、専ら応答計算全体の管理を行うことである。

基礎方程式モジュール 応答解析の中心となる基礎方程式を表現するモジュールである。基礎方程式は静的・動的および線形・非線形によって解法が異なるが、モジュールとしてカプセル化することでこれらの違いを吸収することができ、基礎方程式を利用する際に非常に有利である。本モジュールは、非線形特性を表現する部分と方程式の解法を表現する部分、及び方程式の状態を保持する部分からなる。

実際の解析の流れを時刻歴地震応答解析を例に挙げて見てみると、以下のようなになる (図-2参照)。

- 構造物、荷重オブジェクトを生成し、荷重オブジェクトを構造物オブジェクトに作用させることにより、応答解析モジュールを設定する。その際、応答解析モジュールに対して構造物モジュールと荷重モジュールから剛

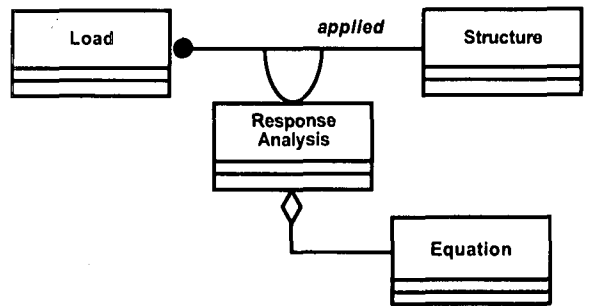


図-1 トップレベルモデル

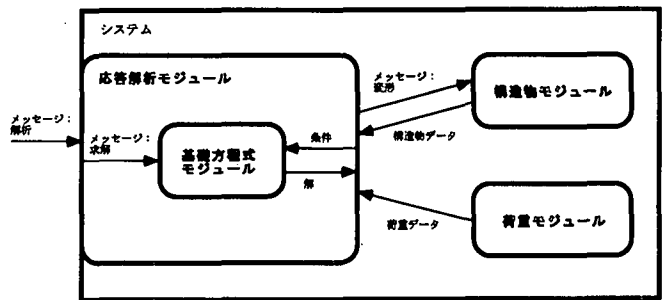


図-2 解析の流れ

性・質量と地震加速度の情報がそれぞれ与えられ、解析に必要な基礎方程式が作成される。

- 応答解析モジュールがその基礎方程式を保持し、基礎方程式モジュールが解を求める。
- 応答解析モジュールが得られた解を受け取り、内部に蓄積するかファイル等へ出力する。
- 応答解析モジュールは、得られた解を構造物モジュールに変形メッセージとして送り、これを受けて構造物オブジェクトが変形し、変形状態に応じた特性行列を作成する。
- 応答解析モジュールが時間を更新し、次ステップの地震加速度を得て基礎方程式を再構成する。
- 次ステップの計算を行う。

このように、独立した各モジュールが作用しあうことで解析を行うようなシステムとなっている。

3. 構造物モジュールの再分析

構造物をオブジェクトと考えることは、構造解析にオブジェクト指向技術を導入する研究が始まった当初から試みられてきた。様々なモデルが提案されてきているが^{1)-9), 8) -10)}、これらは大きな観点から見ると1つの形に帰着する。それは、構造物オブジェクトは部材オブジェクトを保持するというものである。この考え方は直観的であり、広く受け入れられており、モジュールシステムにおいても踏襲しているものである。

モジュールシステムにおける構造物モジュールの役割は、

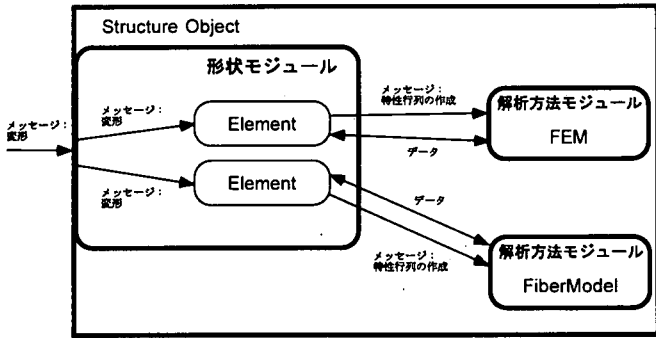


図-3 構造物モジュール内の振る舞い

構造解析においては特性行列を作成することである。しかし構造物の行列作成法に関する情報は複雑なものであり、様々な解析手法を適用することは、直観的な構造物オブジェクトを煩雑にし、オブジェクト指向の有利点を失うことになる。そこで一度原点に立ち戻り、構造物モジュールのあるべき姿について分析を行う。

構造物モジュールにとって重要なことは、現実の構造物の形状をできるだけ忠実にモデル上で再現することであり、構造解析においては構造物の性質を表す剛性マトリクス等の特性行列をうまく取り扱うことである。特性行列作成のための解析方法は、有限要素法やファイバーモデル手法をはじめ数多くあり、今後さらに新しい方法が提案されることも考えられる。しかし解析手法は様々なものがあるとはいえ、我々が目にする形状というもの是不変である。

そこで構造物モジュールでは、構造物一般の特徴である形状を前面に出すことが最も適当であると考え、構造解析に用いる際には別途用意された行列作成法モジュールと関連づけることにより利用するというモデル化が適当であると考えた。すなわち構造解析においてユーザーが意識するのは形状モジュールであり、形状モジュールが関連づけられた解析オブジェクトにその作業を依頼し、その結果を形状モジュールが外部へ返すという形を取る(図-3参照)。

(1) 形状モジュールの分析

a) オブジェクトモデルの作成

現実世界における構造物は部材の集合体である。本問題ではフレーム構造物を対象としているため、構造物は線部材だけで構成される。そこで、構造物に対して Structure クラスを、線部材に対して Element クラスを作成し、Structure が Element を複数保持する形でモデル化する。また Structure と Element には属性と操作において次のような共通点がある。

- 剛性マトリクスや等価節点力ベクトル等の特性行列を作成する
- 自分の座標を表現する節点を有している

- 変形する

従って、Structure と Element に共通するスーパークラス (AbstractStructure) を作成し、両者はこれを継承する形でモデル化する。それぞれのクラスのデータ辞書を示す。

● AbstractStructure

構造物の抽象体を表すクラス。構造物の座標を決定するための節点のリストや、特性を表す剛性マトリクスや等価節点力ベクトル・質量マトリクスなどをデータとして保持する。また、変形する等の操作を持つ。

● Structure

構造物を表現するオブジェクトクラス。自分を構成する部材のリストを持っている。変形の結果、特性行列を作成する際には、各部材ごとに保持している特性行列を重ね合わせて作成する。

● Element

構造物を構成する部材を表すオブジェクト。自分自身の断面形状に関する情報を保持している。

Structure は Element をリストとして複数所有しているが、それだけでは構造物を適切に表現しているとはいえない。各部材が全体座標系においてどの位置に存在するのかを明示する必要がある。そこで、Structure と Element の関連としてオフセットクラスを作成する。節点は座標クラスとも関連づけられる。

さらに部材について分析を続ける。データ辞書にも示したように、部材は自分自身の断面形状に関する情報を保持している。ここでは、各部材がそれぞれ保持できる断面形状は1つに限定した。部材軸方向に断面が変化するものも現実世界には存在するが、そのような問題に対しては1つの部材を複数の部材に分割することで対応でき、複雑な対象物を1つの部材として扱う理由が特に無いためである。ここで問題になってくるのが、RC部材のような複合材料部材をどう表現するかである。単一材料からなる部材であれば、断面と材料を1対1に関連づけることでモデル化が可能である。即ち、材料が断面情報を保持し、断面が材料情報を保持するというモデルである。しかし、複合材料の場合は断面と材料の関係が1対多数となるため断面が管理すべき情報が多くなり、特に特性行列作成の操作を考える際に障害となる恐れがある。そこで、断面を1つ以上の層(レイヤー)の集合体とし、各レイヤーごとに1つの材料を割り当てることで複合材料を表現するようにモデル化した。こうすることで、断面は自分が保持しているレイヤーのリストを管理するだけでよくなり、簡潔な表現が可能になる。

レイヤーは材料など、履歴特性と直接関連するものであり、変形する時にはこれらの値が変化していくため、多数

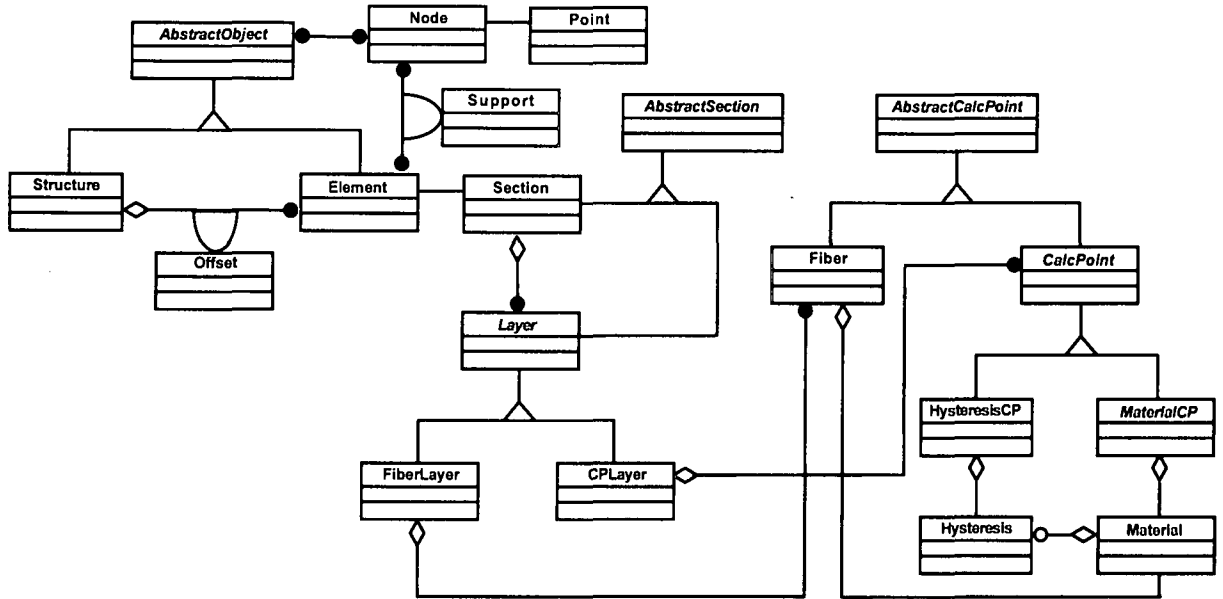


図-4 形状に関するオブジェクトモデル

の記憶点が必要となる。これらの記憶点は計算点オブジェクトとしてモデル化しておき、これと履歴オブジェクトを関連付けることで、レイヤーは何点でも履歴情報を記憶することができるようになる。

計算点オブジェクトは解析情報に近い概念であるが、断面内の位置情報などを保持しているため、形状モジュールの一部として考える。

以上の分析より抽出したオブジェクトクラスのデータ辞書は以下ようになる。

- **Section**
部材の断面を表す。断面はレイヤーの集約であり、断面内のレイヤーに関する情報を保持している。レイヤーを参照して断面積を算出することができる。
- **Layer**
断面内における層構造を一般化したもの。複数の計算点を有する。1つ以上のレイヤーが重なり合って断面を形成する。断面積を計算する操作を持つ。
- **CalcPoint**
材料などの履歴特性の情報を持ち、断面内の位置情報を保持する。
- **Material**
材料を表す。ヤング率や密度の情報を属性として持ち、材料固有の履歴特性を持つ。
- **Hysteresis**
履歴特性を表す。線形・バイリニア・トリリニア等の履歴特性を持つ。

このような分析より、継承関係を整理したものが図-4である。

(2) 解析方法モジュールの分析

a) 定義

解析方法モジュールは、特性行列を実際に作成するものである。メッセージを発した形状オブジェクトの変形・形状情報を参照しながら、特性行列を作成する。このオブジェクトは形状オブジェクトを通してのみアクセスされるものであり、ユーザーが直接意識することはない。

b) 知識整理

構造解析において良く用いられる解析手法として、有限要素法・ファイバーモデル手法・断面のモーメント-曲率関係に基づく方法・材端バネモデルを用いる方法・バネモデルなどがある。

有限要素法では応力-ひずみ関係から得た値を体積分して特性行列を求める。ファイバーモデル手法では、各ファイバーの断面積と応力-ひずみ関係から断面ごとの特性行列を求め、部材軸方向に線積分を行う。断面のモーメント-曲率関係に基づく方法では、断面の履歴特性から断面ごとの特性行列を求め、部材軸方向に線積分を行う。3つの解析方法についてまとめたのが表-1である。^{11)12)13) 14)15)16)}ここで、 $\{\Delta v\}$ ：ひずみ、 $\{\Delta U_L\}$ ：増分変位(局所座標系)、 $\{\Delta U_G\}$ ：増分変位(全体座標系)、 $[B]$ ：ひずみ-節点変位変換マトリクス、 $[D]$ ：断面特性マトリクス、 $[K]$ ：剛性マトリクス、 $\{F\}$ ：等価節点力ベクトル、 $[R]$ ：座標変換マトリクスである。この知識整理の結果、これらの解析手法が同様の表現をとることができることが分かる。

c) オブジェクトモデルの作成

解析方法モジュールでは特性行列を作成することが最も重要な操作であり、どの解析方法を利用する場合も同じで

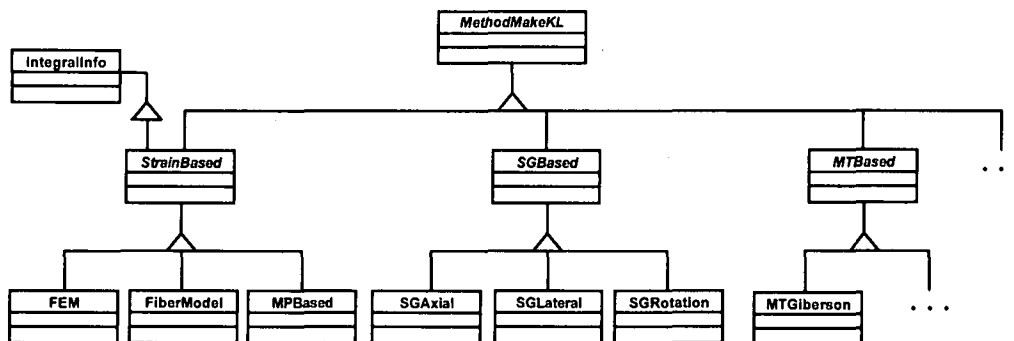


図-5 解析方法に関するオブジェクトモデル

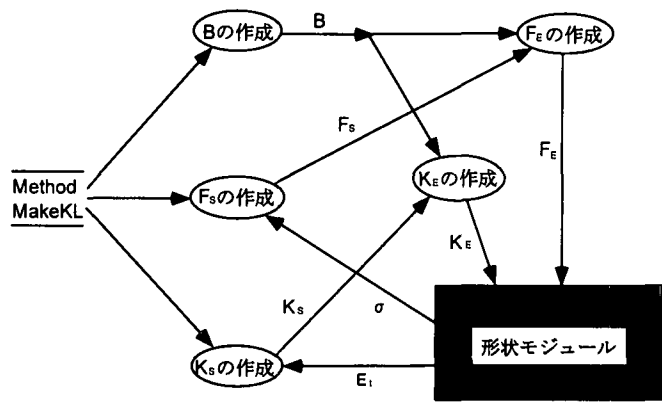


図-6 特性行列作成の機能モデル

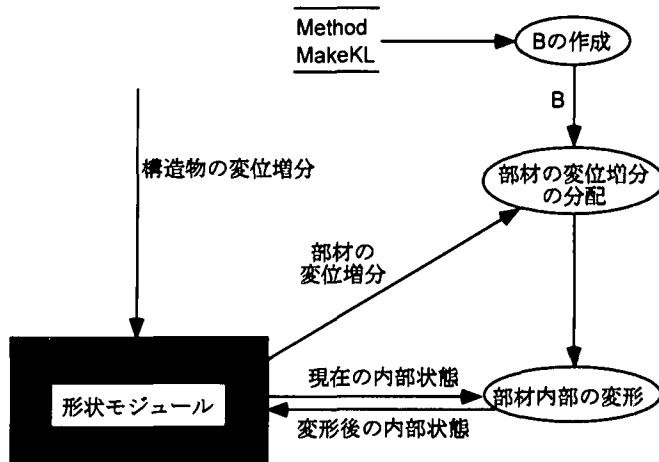


図-7 変形の機能モデル

入することもでき、FORTRAN や C といった手続き型プログラミング言語で作成されたプログラムを、StrainBased オブジェクトと並列になる位置に新たなオブジェクトを加えることで、最小限の修正により取り込むことができる。

d) 機能モデルの作成

解析方法モジュールについては形状モジュールに比べてその機能モデルは重要な意味を持つ。

特性行列作成については、MethodMakeKL が応力や剛性などの必要な情報を形状モジュールから受け取り、自分自身の解法に従って特性行列を作成するようになる。特に StrainBased の場合は、断面に関するマトリクス等を作成する必要がある。

変形については、部材ごとに与えられた節点変位増分を MethodMakeKL が解法に応じて内部の変形量に変換し、各計算ポイントに変形を指示する。特に StrainBased の場合には、B マトリクスを作成する必要がある。

以上のことを考慮して作成した機能モデルが図-6・図-7 である。図-6 は形状モジュールから発せられるメッセージと、それに対応する特性行列を形状モジュールへと返す様子を示す。図-7 は特性行列を実際に作成する際に、必要な情報をメッセージ依頼元の形状モジュールへ問い合わせをしている様子を示している。形状モジュールは 1 種のブラックボックスとなっており、解析方法モジュールはデー

タのやりとり以外、形状モジュールの内部的な動きには影響を受けない。そこで、図中の黒い枠は OMT 法の記法には無いものであるが、ブラックボックスであることを強調するためにここでは使用している。

4. 構造物モジュールへの統合

本節では前節までに作成した形状モジュールと解析方法モジュールを統合して構造物モジュールを構築する。

(1) オブジェクトモデルの統合

2つのモジュールを統合する際に最も重要な点は、解析手法をどのクラスと関連づけるかである。従来の構造解析システムの場合、対象とする構造物に対して 1 種類の解析方法を用いるものが大半であるが、部分ごとに異なる解析方法を割り当てることで構造物全体として最適な解析を行えるように設計することも必要である。そこで解析方法を部材単位で設定できるように、MethodMakeKL を Element に関連づけるようにモデル化した。構造物モジュール全体のオブジェクトモデルを示したのが図-8 である。

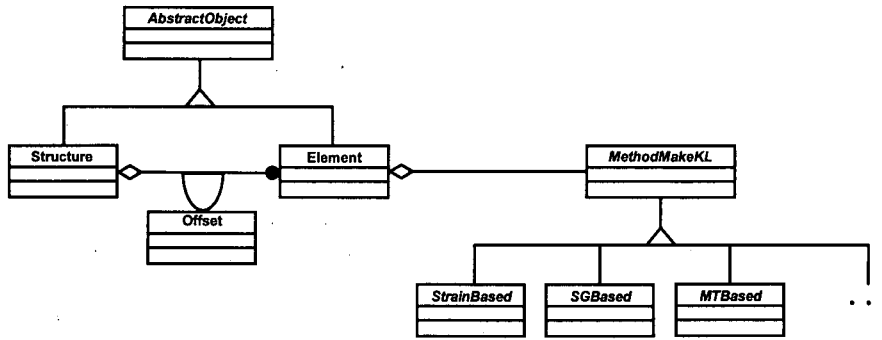


図-8 オブジェクトモデル

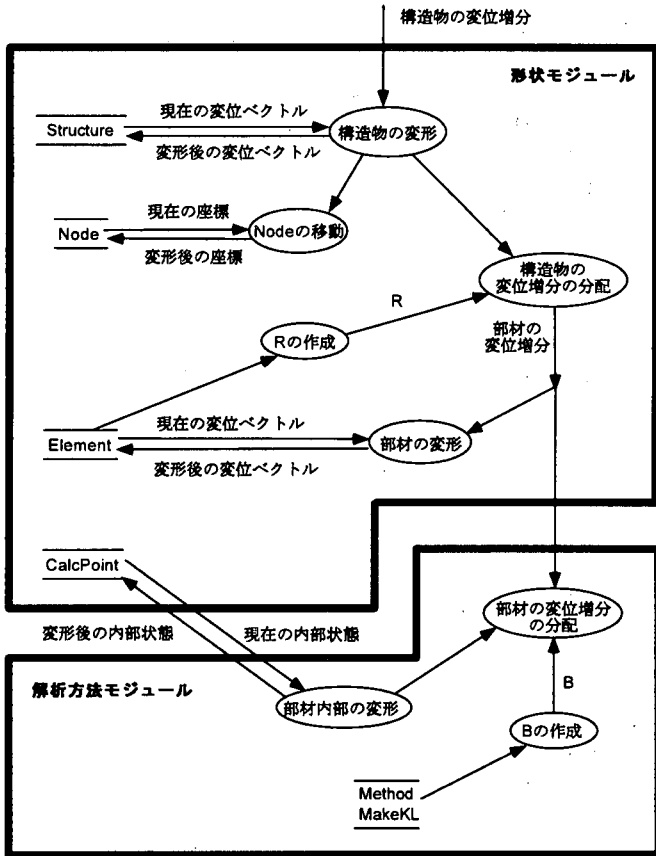


図-9 構造物特性行列作成の機能モデル

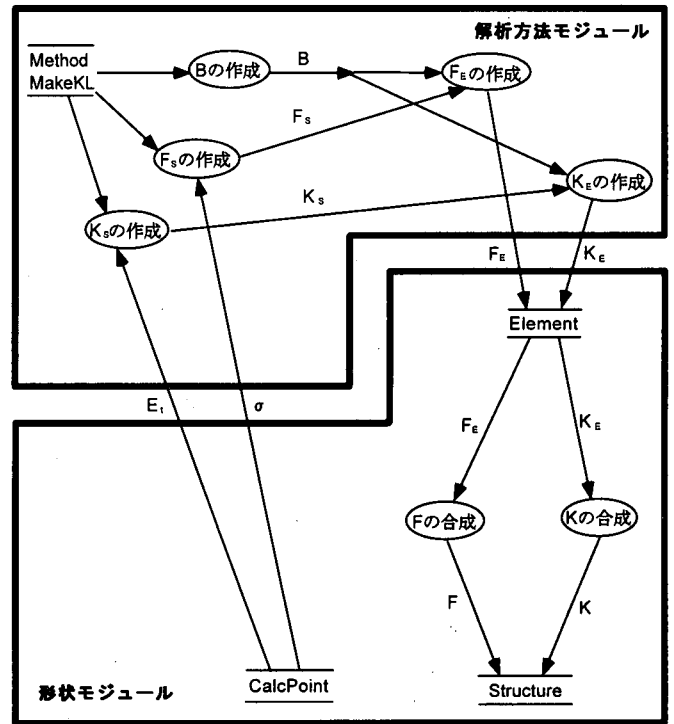


図-10 構造物変形の機能モデル

(2) 機能モデルの統合

形状モジュールと解析方法モジュールがお互いに補完しあうように全体の機能モデルを作成する。特性行列作成と構造物の変形に関する構造物モジュールの機能モデルを示したのが図-9・図-10である。

特性行列の作成は基本的に解析方法モジュールを利用し行うため、形状モジュールにおけるデータの流は単純である。計算ポイントから得た情報を用いて解析方法モジュールが部材ごとの特性行列を作成し、それが Element に保存される。それらを重ね合わせることで構造物の特性行列が得られ、それが Structure に保存される。

変形については、構造物の変位増分が与えられるため、

それを各部材や断面、そして計算ポイントへと分配する必要がある。Structure はまず自分自身の変位ベクトルを更新し、自分の持つ節点の座標を更新する。また、Offset を用いて自分を構成する部材ごとに変位増分を分配する。Element は座標変換マトリクスによって変位増分を局所座標系に変換して変位ベクトルを更新する。部材内部については解析方法によって節点変位から内部の変形量を算出する方法が異なるため、解析方法モジュールに節点変位の情報を与え、内部の変形量を算出し、それによって計算ポイントの変形量を更新する。

(3) 実装における統合

最終的には、これら分析結果はプログラミング言語により実装される。今回用いたのは、オブジェクト指向言語である C++ 言語である¹⁷⁾。

```

class Element
{
private:
    MakeMethodKL *method;
    .....
public:
    Gen_matrix<double> makeK();
};

Gen_matrix<double> Element::makeK()
{
    return method->makeK();
}
    
```

図-11 特性行列作成メソッド

形状モジュールと解析モジュールを実装する際には、お互いのポインタを保持することにより統合が可能となる。ユーザーが特性行列を作成するには、形状モジュールにメッセージを送ることになるが、この実装は図-11のようになる。

これを見ると分かるように、実際には形状モジュール (Element) で特性行列を作成するのではなく、Element に関連付けられた解析モジュールに実際の作成を委譲することにより実装している。これは単に形状モジュールのプログラムの可読性が向上するだけでなく、作成方法に形状モジュールが影響を受けることが無いという利点を有する。このことは将来新たな解析法を導入しても、ユーザーが直接扱うことのできる形状モジュールは何ら変更する必要が無いことになり、拡張性に優れた構造物モジュールを構築することができる。

5. 結論

本論文では、構造解析問題において対象とする構造物モデルをオブジェクト指向方法論を用いて分析し、モデル化を行った。得られた所見は次の通りである。

- 構造物モデルを形状モジュールと解析方法モジュールに分割することにより、より柔軟なモデルを構築することができる。このようにして作成された構造物モデルは解析問題に特化することがないため、その適用範囲を広げることができる。
- 従来多く研究されてきた有限要素法だけでなく、ファイバーモデルや材端バネモデルなどの解析方法においても、オブジェクト指向技術を用いて利用することができる。

参考文献

- 1) Bruce W.R.Forde, Ricardo O. Foschi, Siegfried F. Stierner : Object-oriented finite element analysis, Computer and Structures, Vol.34, pp.355 - 374, 1990.
- 2) Thomas Zimmermann, Yves Dubois-Pèlerin, Patricia Bomme : Object-oriented finite element programming: I. governing principles, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.98, pp.291-303, 1992.
- 3) 三村泰成・赤星保浩・関東康祐・宵佐俊彦 : オブジェクト指向型有限要素解析システムの開発, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第16巻, pp.601-606, 平成4年.
- 4) 石田栄介・新美勝之・福和伸夫・中井正一 : オブジェクトモデリング技術による有限要素法構造解析の分析と設計, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第17巻, pp.477 - 482, 平成5年.
- 5) 石田栄介・新美勝之・福和伸夫・中井正一・多賀直恒 : 部分法を活用した有限要素動的構造解析のオブジェクト指向プログラミング, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第17巻, pp.471-476, 平成5年.
- 6) 高橋良和, 五十嵐晃, 家村浩和, 耐震工学へのオブジェクト指向技術の適用に関する1, 2の考察. 土木情報システム論文集, Vol.5, pp.123-130, 1996
- 7) J. ランボー, M. プラハ, W. プレメラニ, F. エディ, W. ローレンセン : オブジェクト指向方法論 OMT. トップラン. 1992
- 8) 福和伸夫・小磯利博・田中清和・石田栄介 : オブジェクト指向による構造物-地盤系の地震応答問題の分析, 応用力学連合講演会, 第43回, pp.257-260, 平成6年.
- 9) 岩下敬三・瀬谷均・春日康博・北原武嗣 : オブジェクト指向による建築構造設計支援システムに関する研究, 応用力学連合講演会, 第43回, pp.253-256, 平成6年.
- 10) 西澤康浩・岩松幸雄・原田隆郎・玉木宏忠・阿久澤孝之 : 土木構造物設計へのオブジェクト指向の適用に関する基礎的研究, 土木学会第50回学術講演会概要集, pp.134-135, 1995.
- 11) Klaus-Jurgen Bathe. Finite Element Procedures. Prentice-Hall, Inc., 1996.
- 12) Danilo Ristic : Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads. Research Report No.86-ST-01, Kyoto University School of Civil Engineering, 1986.
- 13) Danilo Ristic : Nonlinear Behaviour and Stress-Strain Based Modeling of Reinforced Concrete Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads. Research Report No.88-ST-01, Kyoto University School of Civil Engineering, 1988.
- 14) 鷲津久一郎 他 : 有限要素法ハンドブック (基礎編). 培風館, 1981.
- 15) 鷲津久一郎 他 : 有限要素法ハンドブック (応用編). 培風館, 1983.
- 16) Z. Q. Chen and T. J. A. Agar : Geometric Nonlinear Analysis of Flexible Spatial Beam Structures.
- 17) Stroustrup, B. : The C++ Programming Language Second Edition, Addison Wiley, 1991.