

I-17 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

Application of Object-Oriented Approach to Earthquake Engineering

高橋良和¹・五十嵐晃²・家村浩和³

Yoshikazu Takahashi, Akira Igarashi, Hirokazu Iemura

[抄録] 今日数多くの地震応答解析システムが紹介され、複雑な構造物に対しても解析することが可能となっている。しかしながら、機能の複雑化に伴い、ユーザの理解や拡張が困難となっている。これらの諸問題を解決する手段として、オブジェクト指向技術が適していると考えられ、様々な研究が進められている。

本研究では、従来よく行われてきた構造物中心のモデル化に対し、構造解析を構造物・荷重・応答解析の3つのモジュールに分割し、これらが互いに関係することによってシステムを駆動させるモデル化を提案し、より直感的であり、新しい知識や研究成果を容易に取り込むことが可能な解析システムの枠組みを行うことを目的に検討する。

[Abstract] This paper presents the object-oriented approach to the earthquake engineering. A variety of computer programs has been developed in order to analyze complicated structures. As a number of functions in their programs, it becomes difficult to manage them. The fundamental problem lies in the fact that they are designed in a computer-oriented manner which is totally different from our intuition. Therefore the object-oriented approach is efficient to overcome the above mentioned problems. In this study, the three-module model for the structural analysis system is proposed. The system is characterized by the structure, load and analysis modules passing messages each other. This model is more flexible and more useful than the conventionally used structure-based model for the earthquake response analysis problem as well as the structure analysis problem.

[キーワード] オブジェクト指向, クラスライブラリ, 地震応答解析, 構造解析

[Keywords] object-oriented, class library, earthquake response analysis, structural analysis

1. はじめに

近年、オブジェクト指向技術に関する理解が深まり、特に商用アプリケーション分野においてその適用が活発に進められている。構造解析分野においても、有限要素法への適用^{1) 2) 3) 4) 5) 6)}や設計への適用^{7) 8)}を中心に検討されており、本技術の有効性が報告されている。従来の研究においては、構造物の形態をモデル化することに主眼が置かれており、この構造物モデルに解析用メソッドを加えることで解析システムを構築しているものが多い。

耐震工学分野へ本技術を適用するに際しても、その目的は従来の研究と同じく、我々が抱く構造物等のイメージをシステム内において表現しようというものである。しかしながら構造物をモデル化するに当たってその解析内容を考えてみると、耐震工学分野においては構造物全体系を対象

とするものが多いため全要素に対してFEMを適用することは少なく、より簡便なモデルと併用することが多い。従来の構造物オブジェクトモデルでは、解析知識としてFEMに特化しているものが多いため、より柔軟性のあるモデルの構築が必要となる。

本論文ではまず、全ての解析の基礎となる方程式に対する検討について報告する。次に耐震工学において重要な要因である地震オブジェクトの作成について報告し、先に分析された方程式オブジェクトをどの様に利用したのかも併せて報告する。さらに種々の解析方法が適用できるように構造物モデルを再構築し、荷重や応答解析もまたオブジェクトモジュールとして扱った、より柔軟性のある構造解析、地震応答解析システムの構築についても報告する。

2. 基礎方程式モジュール

(1) 基礎方程式モジュールの特徴

解析を行う際、その中心となるのは運動方程式などの基礎方程式である。我々は未知数を求めるためにこの基礎方

¹ 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)

² Ph.D. 京都大学大学院助教授 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)

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)

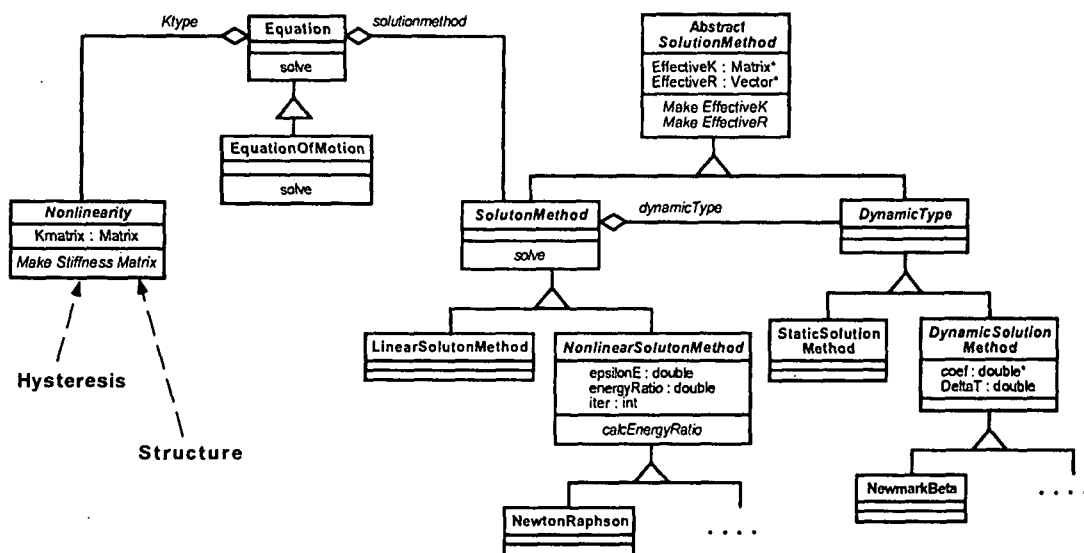


図-1 Class Diagram of Equation

程式を「解く」ことを考える。従来のシステムにおいて、基礎方程式の一部分である剛性行列や変位ベクトルなどは FORTRAN 等の手続き型プログラミング言語を用いて表現することはできるが、基礎方程式自体を適切に表現することができなかった。基礎方程式は、構造解析において必ず用いられるものであり、この方程式を1つのオブジェクトとして考えることは、その再利用性の点においても有利となる。

基礎方程式は、対象となる問題によって線形・非線形方程式、静的・動的方程式などと性質を変える。しかしながらいかなる方程式であれ、「未知数を求める」という目的は同じである。そこで基礎方程式モジュールは、剛性行列などの既知の情報を基に適切な解法を用いて未知数を求めるものとして考え、分析を行った。

(2) 基礎方程式モジュールの分析

基礎方程式は未知数の数により大きく静的方程式・動的方程式に分けられる。各方程式を構成する既知の行列を用いて解を求めることが本モジュールの目的となる。

方程式を解くに当たっては、どのような解法を用いるのかという情報が必要となる。この情報を方程式オブジェクト内部に埋め込むと柔軟性が低下することから、今回はこの解法アルゴリズムを独立化して考えることにする。つまり、方程式オブジェクトが解法オブジェクトを参照することにより解を求めるようにモデル化するのである。

単に解法を独立化して考えるといっても、静的・動的、線形・非線形で大きく性質が異なるように思われるが、基本的に基礎方程式は式(1)のように統一的に表現することができる。この左辺・右辺をどのように作成するかは解法に

依存するものであるから、これらの作成法を解析オブジェクトに含め、独立化するのである。

$$\hat{K} \Delta U = \hat{R} \tag{1}$$

線形方程式の場合は上式から直接求解することができるが、非線形方程式の場合には繰り返し計算が必要となる。またその際剛性行列や内力ベクトルは変化するので、これをどのように扱うかが問題となる。構造解析を行うのみを考えると、剛性行列などは構造物によって決定されるものである。したがって構造物をモデル化し、これを方程式モジュールが利用することにより非線形問題も対応することができるようになるが、これでは本方程式モジュールが構造解析に特化したものになってしまう。基礎方程式自体はもっと汎用性のあるものであるから、具体的なオブジェクトを直接利用することは避けたい。したがってこの非線形性を扱う部分も独立化し、どのように非線形性を扱うかを表すインターフェースとしてのオブジェクトを用意ことにした。これら解法アルゴリズム・非線形性を独立化することに当たっては、デザインパターン⁹⁾である strategy パターン、bridge パターンなどを利用している。実際の計算ではこのインターフェースオブジェクトを通して再計算を行うことになる。このようにモデル化した基礎方程式モジュールのオブジェクトクラス図を今回用いたオブジェクト指向方法論である OMT 法¹⁰⁾の記法で表すと図-1の様になる。ここには Nonlinearity オブジェクトが他のオブジェクトと関連づけられるインターフェースとすることにより、様々な用途に利用できることが表されている。

図-1のようにモデル化された方程式オブジェクトが線形・非線形問題においてどのようにして解を求めるのかを図-2の動的モデルで示す。このように非線形解析法を

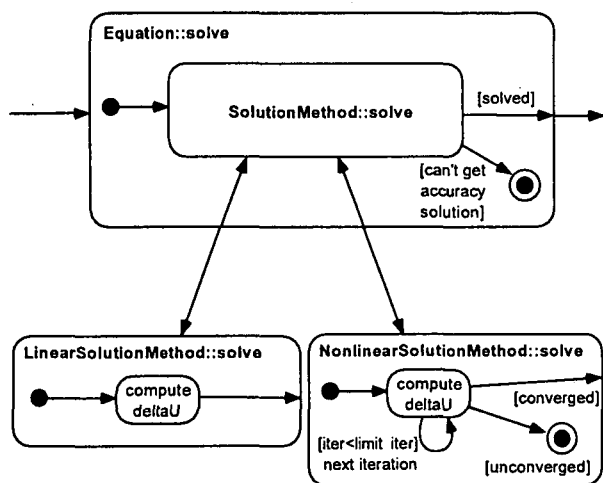


図-2 Dynamic Model of Equation

SolutionMethodとして独立化したことで、異なる解析法を用いても解を求めるに際して Equation は全く同じ表現をとることができる。これにより新たな解析法を導入しても、Equation に何ら影響を与えることはなく、保守性に富んだシステムを構築することができる。図-3には実際に解を求める際のデータの流を表した機能モデルを示す。ここには Equation が持つ各行列を用いて SolutionMethod が \hat{K} , \hat{R} を作成し、解を求めてこれを Nonlinearity へ受け渡すことで剛性等の更新を行うことを表している。

(3) 使用例

分析・設計された基礎方程式モジュールをオブジェクト指向言語である C++言語¹¹⁾により実装した。オブジェクト指向言語としては他に SmallTalk などが有名であるが、現在ほとんどの OS 上で稼働可能であり、FORTRAN や C 言語といった従来よく用いられている言語との親和性が高いことから C++言語を採用することにした。

作成したモジュールの使用例を図-4に示す。これを見ると、線形問題も非線形問題も解を求める表現は全く同じであることが分かり、分析の結果がそのまま実装において写像されていることが分かる。

3. 地震モジュールの作成

(1) 地震モジュールの概念

地震波は加速度等のデータの集合であり、これは単にデータストアであって、オブジェクトとみなすことに対しては、意見の分かれるところかもしれない。しかしながら、耐震工学分野においてはこの「地震」を中心として様々な解析等が行われていくことから、地震をオブジェクトとみなすと都合であることが多い。

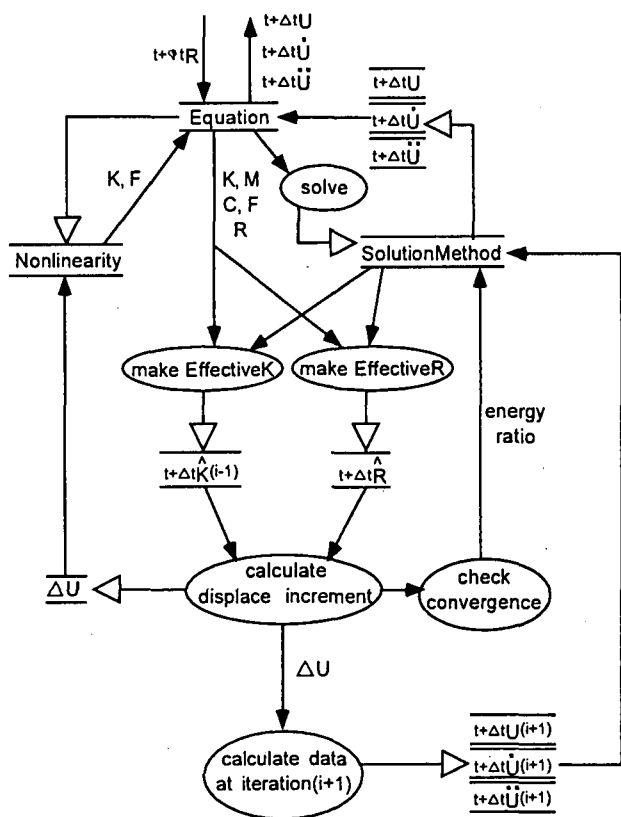


図-3 Functional Model of Equation

```

/* example program of Equation Object */
#include <fstream.h>
#include "equation.h"

void main() {
    Equation *eq;
    /* ..... omission ..... */
    /* set up for Linear Problem */
    eq = new Equation(new NLHyst(new HysLinear(2.0)
        ,new LinearSolutionMethod
        ,new StaticSolutionMethod);
    /* ..... */
    eq->solve(); /* solve linear equation */
    /* ..... */
    /* set up for Nonlinear Problem */
    eq = new Equation(new NLHyst(new HysBilinear(2.0)
        ,new NewtonRaphson
        ,new StaticSolutionMethod);
    /* ..... */
    eq->solve(); /* solve nonlinear equation */
}
    
```

図-4 Example program of Equation Object in C++

地震波の特徴を表すものとして、地震加速度波形は勿論、フーリエスペクトルや応答スペクトルまた非定常パワースペクトルなどが挙げられる。これらは地震波記録が得られれば求めることができるものであり、これらの計算を地震オブジェクトのメソッドと考えることで、データ（加速度の時刻歴）とそれを操作する振る舞い（微分や積分、応答スペクトル解析など）とが一体となった地震オブジェクトを考えることができる。すなわち地震オブジェクトは、記

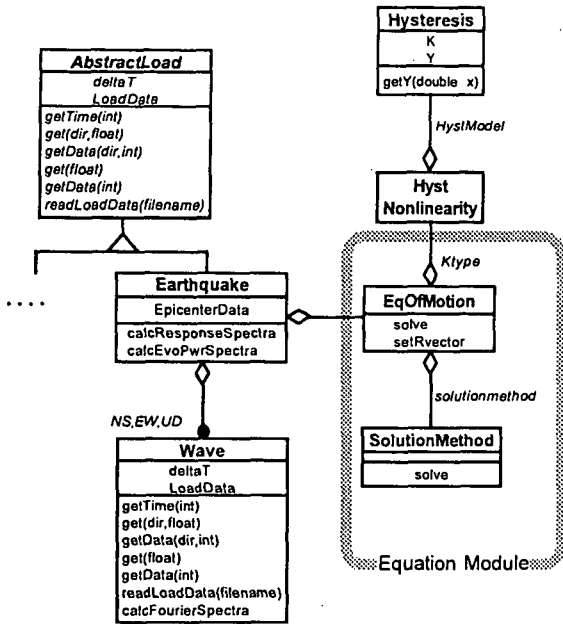


図-5 Overview of Class Diagram of Earthquake

録データと共に各地震の性質を表すことのできるオブジェクトとなる。

地震というものは先にも述べたように加速度等で表現されるものであるから、厳密には荷重とは言えない。しかしながら、地震が構造物に作用することにより、慣性力としての地震荷重が発生することから、耐震工学においては荷重の1つと見なすことが多い。ここでは後の拡張や利用性を考え、一般化した荷重オブジェクトを継承したのとして地震オブジェクトを考える。

以上のような特徴を持つ地震オブジェクトにおいて、メソッドとして応答解析を行う必要がある。対象となる応答解析は、動的線形・非線形1自由度運動方程式を解くことであるので、先に作成した基礎方程式モジュールを利用し、これを地震オブジェクトが利用する形に分析・設計を行った(図-5)。

(2) 使用例

作成したモジュールの使用例を図-6に示す。これを見ると、プログラム中に地震オブジェクトが生成されており、以後の計算はこのオブジェクトにメッセージを送ることにより行われていることが見てとれる。また、ある時刻における加速度を出力する操作だけでなく、どのように非線形性や履歴モデルを与えて応答スペクトルを計算しているかが分かる。非線形スペクトルを計算する際、いかなるモデルを用いて計算するにしても、地震オブジェクトに与えるメッセージは同じであり、このことによりこれは利用者の負担が軽くなる。運動方程式に関する計算は方程式オブジェクト内にブラックボックス化されているので、地震オ

```

/* example program of Earthquake Object */
#include <fstream.h>
#include "earthq.h"

void main() {
    Earthquake earthq;
    earthq.setOneDirLoadDataWithTime(NS,
        "kobe_ns.data");

    /* calculate linear response spectra */
    earthq.calcResponseSpectra(NS, "response.data",
        0.05);
    /* calculate nonlinear response spectra
    using BILINEAR model */
    earthq.calcNonlinearResponseSpectra
        (new HMBilinear(0.1,196.0), NS,
        "response2.data", 0.05);
    /* calculate nonlinear response spectra
    using TAKEDA model */
    earthq.calcNonlinearResponseSpectra
        (new HMTakeda(0.5, 40.0, 0.1,196.0), NS,
        "response3.data", 0.05);
}
    
```

図-6 Example program of Earthquake Object in C++

ブジェクト内の表現は簡潔となる。

4. 地震応答解析への応用

前節までに、基礎方程式モジュール、地震モジュールについて報告したが、ここではそれらを統合した、構造物の地震応答解析に対するオブジェクト指向技術の適用について報告する。

(1) 過去の研究の問題点

直接地震応答解析問題にオブジェクト指向を導入した例は少ないが、有限要素法の動的問題として導入を検討したものはいくつか存在する^{3) 12)}。しかしながらはじめに述べたように、これらのほとんどが構造物中心にモデル化されており、応答解析に関する知識も埋め込まれている。このため新たな機能拡張やデータベースなどの別途利用に際し限界が生じるように思われる。ここではまず地震応答解析を含む構造解析について根本に立ち戻って再分析し、より適当と思われるモデルを検討する。

(2) 問題分析

先のような問題点を踏まえ、地震応答解析及び構造解析問題の再構築を考える。以下では地震応答解析は構造解析手法とほぼ同じであり、荷重の作用の方法が異なるだけであるので、特に言及しない限りは構造解析といえど地震応答解析も含むこととする。

本研究では構造解析というものを、「構造物に荷重(地震)が作用することにより構造物が応答し、その応答を追跡することが応答解析である」と考えた。したがって、構

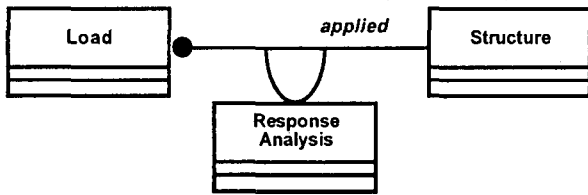


図-7 Abstract Class Diagram of Structure Analysis System

造解析問題を構造物・荷重・応答解析の3つのモジュールに分割し、できるだけ独立となるようモデル化しよう分析していくことが適当であると考えた。従来は構造物にのみ積極的にモデル化が試みられてきたが、荷重や応答解析もまた重要な項目であり、ここではこれらもまたモデル化する必要があると考えた。この構造解析システムをオブジェクトモデルを用いて表すと図-7の様になる。

ここに、各モジュールの定義を示す。

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。本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。

荷重モジュール 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。構造解析問題における役割としては、ある時刻における荷重を構造物に作用させることである。先に作成した地震モジュールはこの一部となる。

応答解析モジュール 先の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、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、解を求めて、その結果を構造物に伝達することが本モジュールの役割となる。

これら3つのモジュールを用いてシステムが駆動していく様子を図-8に示す。各モジュールはそれぞれ独立しており、各モジュール間でメッセージ通信を行うことでシステムが駆動する仕組みになっている。各モジュール内においても、受信したメッセージを更に内部のオブジェクトへ伝達することにより、モジュール自体もが駆動していく構造になっている。

(3) 構造物モジュール

構造物に関しては、過去に報告された論文において、最も活発にモデル化されているものである。本研究の構造物に対するアプローチは様々な解析法に対応でき、且つその拡張に際して他に与える影響を最小にするようモデル化することである。

まず実際の構造物の構造形態をモデル化することから分析を行う。構造物は静的な構造形態の他に、「変形する」と

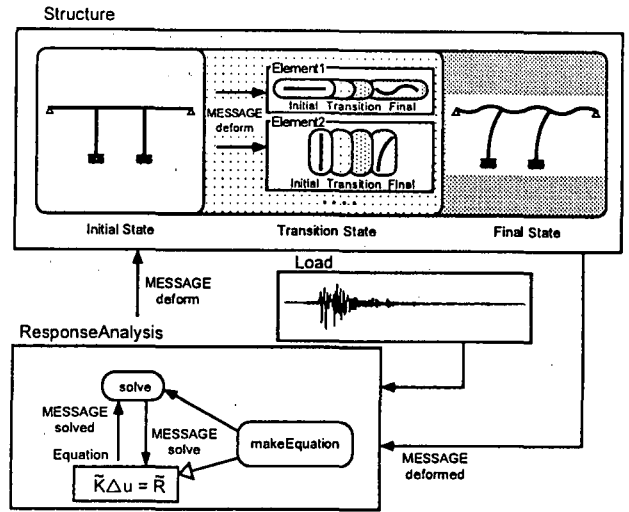


図-8 Dynamic Model Image of Structural Analysis System

いう特性を持っている。今回対象とする問題は応答解析であるので、この変形に応じた特性行列を作成することが大きな役割の1つとなることは、従来の研究の目的と同じである。

1つの解析法(例えばFEM)のみを採用するのであれば、各部材オブジェクトにおいて特性行列の作成に関するメソッドを保持させておき、構造物オブジェクトがこれを重ね合わせて全体特性行列を作成する、という方法が最適であろう。しかしながら、様々な解析法や、さらに実験を組み合わせた問題を扱うことを考えると、部材オブジェクトの特性行列作成法をカプセル化して、取り替え可能にしておくことが望ましい。またこのように構造形態を表すクラス群と特性行列作成アルゴリズムを表すクラス群に分けることにより、全体の見通しが良くなるばかりでなく、新たなモデルを追加する際にも与える影響を小さくすることができる。このように分析した結果、構造物モジュールのオブジェクトクラスの概略図は図-9、図-10のようになる。

(4) 荷重モジュール

本モジュールは、地震力のほかに静的荷重も対象としている。先の地震モジュールは抽象化した荷重オブジェクトを継承して作成されていたが、静的荷重を考える場合には図-5において地震オブジェクトとと並列となるようにモデル化すればよい。

(5) 応答解析モジュール

応答解析モジュールは、先の基礎方程式モジュールを利用して作成する。今回新たに考えなければならないことは、剛性行列や荷重ベクトルの作成法、伝達法の相違点や、ま

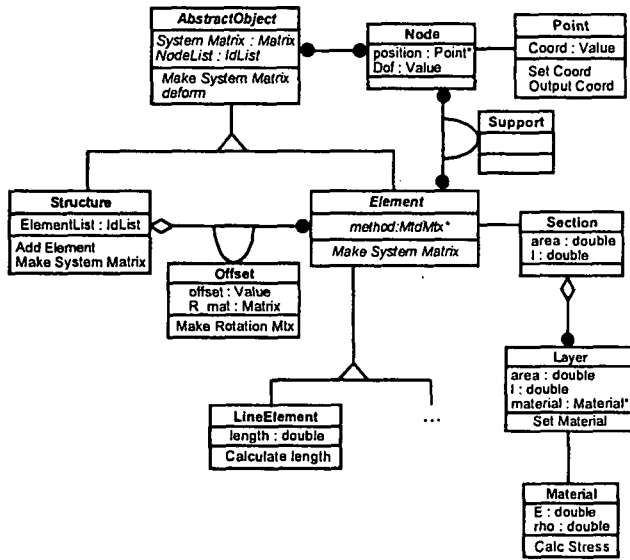


図-9 Class Diagram of Structure Shape Module

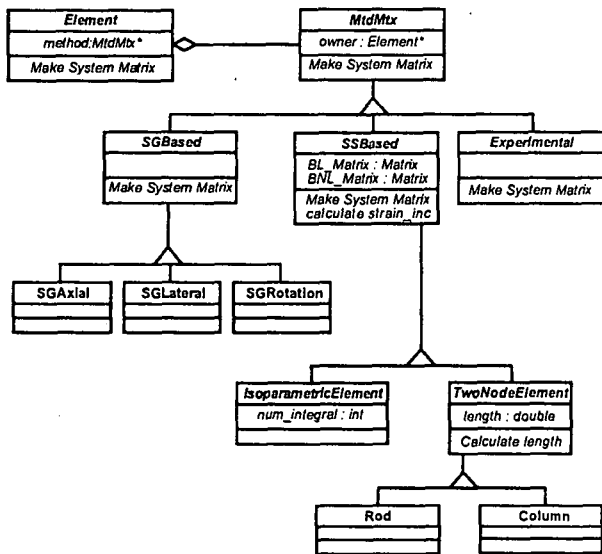


図-10 Class Diagram of Making System Mtx. Module

た構造物オブジェクトへの変形の通知などである。

剛性行列の作成については、先の地震モジュールにおいては直接運動方程式と関連つけた履歴モデルのモジュールから得ていたが、今回はこの作業を構造物モジュールが行うことになるので、基礎方程式モジュールに構造物モジュールと関連づけるクラスを付加すればよく、この追加以外に基礎方程式モジュールに手を加える必要はない。また荷重ベクトルの作成においては、荷重モジュールからの情報を基に作成するが、荷重モジュールとしては静的荷重と地震荷重とが存在する。静的荷重は力の単位で表現されるためそのまま荷重ベクトルとして適用することができるが、地震荷重の場合は慣性力として働くために構造物のデータも必要となる。したがって地震荷重項の作成においては、地震オブジェクトから加速度、構造物モジュールからは質量

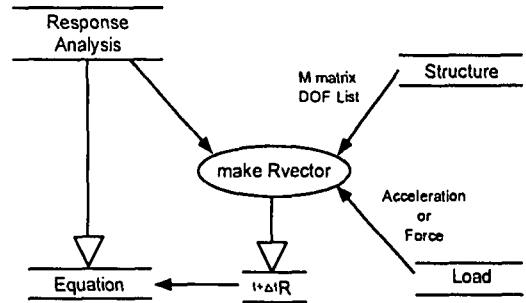


図-11 Functional Model of Making R vector

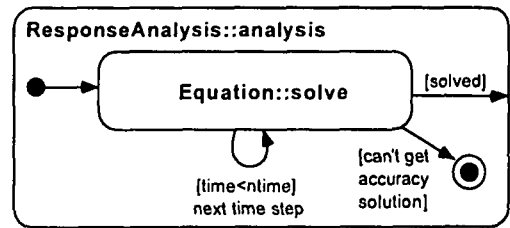


図-12 Dynamic Model of Response Analysis

行列を得、これらを用いて荷重ベクトルの作成を応答解析モジュールが行う必要があることになる。これを表したのが図-11である。

実際の解析は基礎方程式を解くことにより進んでゆくが、繰り返し計算に関する情報は方程式オブジェクトが管理しているため、応答解析オブジェクトにおいては時間ステップのみ考慮すればよい。図-12に解析に関する動的モデルを示すが、このようにオブジェクトを再利用してモデル化することで、コード量を減らすことができるばかりでなく、可読性に富むシステムが構築できる。以上のような分析の結果、応答解析モジュールのオブジェクトモデルは図-13の様になる。

(6) 実装例

ここでは、分析された構造解析問題をどのように実装しているかについて紹介する。

構造物オブジェクトは部材オブジェクトを組み合わせたものとしてモデル化されているために、部材をリスト構造として保持している。構造物モジュールの目的の1つとして特性行列の作成があるが、リストに保存されている部材オブジェクトを **Iterator** を利用して取り出し、部材特性行列を計算している。ここで注目すべきところは、「部材の種類が何であるか」という情報を構造物オブジェクトは知っている必要がない、ということである。部材特性行列の計算は、部材の形状や種類によって異なっている。部材オブジェクトは「自分がどの種類の部材であるか」を知っているため、部材特性行列の計算に関するメッセージが送られてくると、部材自身に応じた方法で計算し、値を返す

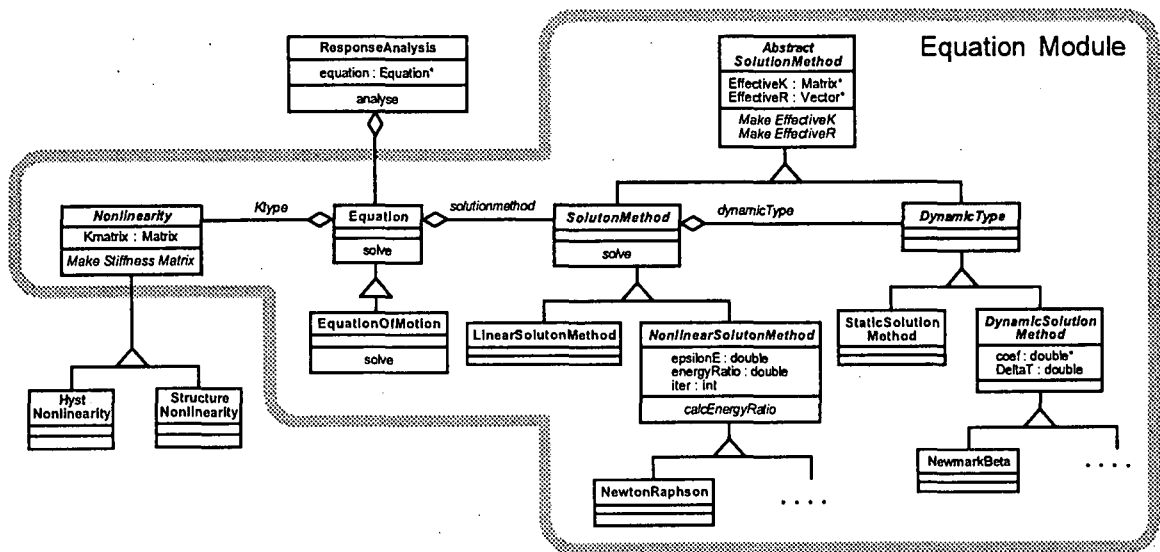


図-13 Class Diagram of Response Analysis Module

ことができる。この部分を実装した例が図-14である。部材オブジェクトの剛性行列を計算するメソッドには、具体的に計算方法は現れていない。ただ部材自身に応じた方法 (method) の方法で計算するというのみ記してある。実際の計算方法は、この method オブジェクトに記してある。部材オブジェクトとしては、部材の特性行列さえ得られればよく、計算方法がブラックボックス化されていることに問題はないのであり、むしろどのような方法に対しても「特性行列を求める」という1つのメソッドで対処できるということは、将来新たな計算法が導入された場合においても部材オブジェクトのコードを変更する必要がなく有利となる。部材オブジェクトはその種類に応じた特徴 (計算法) を持つ部材であり、我々が実際にイメージする部材に近い。このように構造物オブジェクトは実装され、プログラム内においても、部材の集合として扱うことができ、実世界のイメージと近い表現ができることが分かる。

このようにして全てのモジュールについてモデル化し、クラスライブラリとして整備していく。実際に地震応答解析を行うときには、図-15のようにこのクラスライブラリを利用する。図-15の内容について見てみると、まず構造物が生成 (建設) されている。この構造物オブジェクトは、単に名前が我々のイメージと同じというレベルのものではなく、実際に部材が組み合わさってつくられており、様々な材料特性を持ち、独自の変形特性を持っているという意味で、我々が構造物と認識できるレベルの存在である。したがってこの構造物オブジェクトに対して、その構造物データを要求することができるし、その構造物の動的特性の1つであるモード形を尋ねることもできる。一方構造物とは別に地震が生成されている。この地震オブジェクトに対して、

```
// In Element Object, KL matrix is made
// using MtdMtx Object
Gen_matrix<double> LineElement::makeKL()
{
method->makeKL();
return KLmatrix;
}

// In MtdMtx Object, KL matrix is made
// acutally
Gen_matrix<double> SGAxial::makeKL()
{
int i, j;
Gen_matrix<double> *matrix;
matrix = &(ownerElement->getKLmatrix());
Col_vector<double> tmpU(6);
tmpU = ownerElement->getUvector()
+ownerElement->getDeltaU();
double disp = tmpU[1] - tmpU[4];
double mat11 = hyst->getK(disp);
(*matrix)[1][1] = mat11;
(*matrix)[1][4] = -mat11;
(*matrix)[4][1] = -mat11;
(*matrix)[4][4] = mat11;
return *matrix;
}
```

図-14 Implemental Code of Element Object

勿論図-6において行った地震自体に関する解析も行うことができる。この時点においては構造物と地震に全く関係はない。しかし構造物に荷重が作用するという命令によって、応答解析が生成し、初期化されている。これは、最初に行った構造解析に対する分析をそのまま忠実に表現していることが分かる。その後応答解析のより細かい設定が行われ、最後に応答解析オブジェクトに対して解析を行うよう命令されている。

以上の様にオブジェクト指向技術を用いて実装した結果、我々のイメージする「もの」がプログラム中においても表

```

/* test program for Dynamic Analysis Problem */
#include <fstream.h>
#include "structure.h"
#include "r_analysis.h"

void main() {
    Structure *structure = new Structure(1);
    structure->construct("struct.data");
    structure->showStructureData(cout);

    structure->plotModeShape()

    Earthquake *load
    load = new Earthquake(1, "kobejma.data");
    load->showInfo(cout);

    ResponseAnalysis problem;

    problem = structure->applied(load);

    RAPrototypeFactory factory(new NLGeometric
                               ,new NewtonRaphson
                               ,new NewmarkBeta(0.25));
    problem.setAnalysisType(factory);
    problem.setDirection(NS, UD);

    problem.analyze();
}

```

図-15 Test program of Earthquake Response Analysis

現することができるため、構造解析問題を分析した結果とほぼ同じオブジェクトを実装後のシステムにおいても表すことができ、分析・設計・実装にわたって統一的な考えの基で進めることができることが分かる。

5. 結論

本論文では、地震応答解析に対してオブジェクト指向技術を適用し、その有効性の検証を行った。得られた所見は次の通りである。

- 基礎方程式に対して分析を行い、整理を行った。その結果、解法に関わらずシステム上においても「方程式を解く」という統一的な表現をとることができることを示した。
- 作成された基礎方程式モジュールを用いて、地震オブジェクトの作成を行った。作成された地震オブジェクトは単に数値データのみならず、その性質を表すメソッドも保持している。ここでは代表的な解析のみをメソッドとして実装したが、解析プログラム中に我々のイメージする地震が表現されたことは、より直感的なシステム開発を行うことができることを示唆している。
- 地震応答解析システム全体についてモデル化を試みた。ここでは従来よく行われていた構造物モデル中心の本技術の適用に対し、3つのモジュールによるモデル化

を提案した。このモジュールがお互いに関係しあうことでシステム全体が駆動し、かつ互いに独立に発展させていくことができることは、システムの拡張に伴う他のプログラムへの影響を狭めることができ、保守性を高めることができることになる。

- 先に開発された基礎方程式オブジェクト、地震オブジェクトを再利用して、地震応答解析システムの開発を行った。これらのオブジェクトは、一般的なリストや行列オブジェクトのような低レベルのものに止まらず、履歴曲線を表すオブジェクトのような構造解析特有のオブジェクトをも含んでいる。すなわち構造解析に関するクラスライブラリを整備することにより、将来の問題に対しても有効なツールと方法論を提供することができると考えられる。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) Bruce W.R.Forde, Ricardo O.Foschi, Siegfried F.Stiemer: Object-oriented finite element analysis, Computer and Structures, Vol.34, pp.355-374, 1990.
- 5) 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.
- 6) Dietrich Hartmann, Arnd Fischer, Peter Holéwik: Object oriented modeling of structural systems, International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, 5th, pp.78-85, 1993.
- 7) 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。
- 8) 西澤康浩・岩松幸雄・原田隆郎・玉木宏忠・阿久澤幸之：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。
- 9) Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, John Vlissides: デザインパターン，SOFTBANK, 1995.
- 10) J.ランボー他：オブジェクト指向方法論 OMT，プレントニスホール・トッパン，1992。
- 11) Stroustrup, B.: The C++ Programming Language Second Edition, Addison Wiley, 1991.
- 12) 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。