

都市内全構造物の地震応答シミュレーションに関する基礎的研究

Seismic responses analysis for whole structures in city using integrated earthquake simulator

堀宗朗*・市村強**・中村光***・若井明彦****・海老澤健正†・山口直也‡

Muneco HORI, Tsuyoshi ICHUMURA, Hikaru NAKAMURA,
Akihiko WAKAI, Takemasa EBISAWA, Naoya YAMAGUCHI

*東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生)

**東北大学工学系研究科土木工学科 (〒 113-0032 東京都文京区弥生)

***名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 464-8603 千種区不老町)

****群馬大学工学部建設工学科 (〒 376-8515 桐生市天神町 1-5-1)

†名古屋工業大学社会開発工学科 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

‡独立行政法人防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター (〒 210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-2)

For local government administrators, it is a key task to make efficient counter-plans for earthquakes by forecasting possible earthquake damage. To support them, this paper proposes integration of analysis and visualization for responses of whole structures located in a city. An integrated earthquake simulator is used to this purpose, since the simulator is aimed to combine various simulation programs to it and to visualize calculated structure responses. Integration uses a wrapper called mediator which is automatically made by analyzing a source code of the simulation program. The possibility of such integration is discussed by developing a prototype of artificial intelligence that makes mediators for a given simulation program.

Key Words : *integrated earthquake simulation, object-oriented program, structure response analysis, wrapper, artificial intelligence*

1. 序論

地域の地震防災計画を立案・実施する地方自治体の防災担当者は、地震防災を促進する上で大きな役割を果たしている¹⁾。しかし、その実態は必ずしも理想的ではない。行政官である防災担当者が地震や耐震に関して高度な理解を持つことは難しく、技術系の行政官は、構造物の設計・施工を経験することよりも示方書等にしがって建設事業を認可することが主要な業務である。このような現状とは別に、地震動は地域の地質・地盤構造に依存し、建物が地域に特有な特性を持つため、地震防災計画の立案の際に防災担当者が地盤・構造の地域特性を考慮することが将来の重要課題となっている。

現在と将来の役割を考えると、防災担当者の技術力の向上は重要である。技術力とは、防災計画の立案・実施を行うために、構造物の地震被害を適切な正しさで予見することであり、予見は、確からしさやばらつきを含めて専門家の被害予測を理解することを意味する。防災担当者の対象は多種多様の構造物であるため、深さが要求される専門家と比べると、浅くとも幅広い知識を持つことが必要である。このような技術力の向上を実現することは難しく、技術力向上の効果的な方策の考案が課題となる。防災計画の立案のための被害想

定という役割を考えると、想定された地震が襲った時に地域内の全構造物に対し、起こりうる被害の全体像は勿論、できれば細部にまで予見することが望まれる。これには、被害発生過程も含めた構造物の地震応答を可視化し、直感的に理解しやすくすることが効果的である。したがって、技術力向上の方策として、防災担当者が担当する地域内にある全構造物の地震応答過程を可視化することが考えられる。

上記の方策の有効性は明らかであるが、達成は容易ではない。想定された地震に対し、地域内の全構造物の被害を計算し、その結果を可視化することは現在の計算環境をもってしても容易ではないからである。この点を考慮して、本研究は、都市内全構造物の地震応答の可視化という方策の実現可能性を見極めるための基礎的研究を行った。具体的な研究課題として、開発中の統合地震シミュレータ^{2),3)}(Integrated Earthquake Simulator, IES)の利用を前提とし、シミュレータの一つの機能である構造物地震応答シミュレーションを実行し計算された地震応答過程を可視化する方法を考案することを取り上げた。後述するが、IESは都市全体の地震・構造物応答・対応行動をシミュレートするシステムであり、地震被害の想定の高高度化をもたらすことが期待されている。このシミュレーションでは、地震ないし地震動が入力であり、個々の構造物の被害や

社会基盤システムの機能低下が出力である。適切な範囲で入力される地震動を変えることでそれに応じた幅を持って被害を予測し、さらに個々の構造物の被害を予測することでその重要度を考慮したきめ細かい防災計画を立案することが可能となる。

都市内全構造物の地震応答過程の可視化を困難としている原因は、構造物の地震応答計算の多様性にある。計算手法が構造物に特化しており、統一して扱うことは容易ではない。さまざまな形式・内容の情報を整理し構造化を図るために、情報科学の分野では新しい方法論⁴⁾が研究されている。本研究では、この情報科学の方法を多様な計算手法の統合に適用する。なお、地震応答に関する構造物の種々の数値解析手法の基本は同じという見方は決して新規なものではない。本研究は、地震応答シミュレーションを都市内全構造物の地震応答過程の可視化に利用するという課題に対し、この見方に基づいた統合化の方法を模索するものである。

2. 統合化に必要なシミュレーションシステム

各種構造物の耐震設計用数値解析手法が利用できる今日、既存構造物の情報は完全ではなく入力データに限界がある点を留保しても、IESの構造物応答シミュレーションを実行することは容易ではないが、原理的には可能である。最大の課題は数値解析手法の統合である。各数値解析手法は、元来設計のために開発されたものであり、他者との連携は全く考えられていない。数値解析手法の統合には、通常、プラグイン形式がとられる。プラグイン形式とは、基となるシミュレーションシステムを作り、そのシステムの仕様に合わせて数値解析手法の入出力を変更するものである。しかし、構造物の数値解析手法には、固有のフォーマットを持つ入出力があり、また、多様な形式の構造物データと可変の地震動データが使われるように入出力のデータ構造も単純なものではない。このため、プラグイン形式による統合化は、変更のためのプログラム開発者の負担が大きく、現実的ではない。

耐震設計用数値解析手法は、設計変数を決定するための設計計算と、照査用の耐震解析に大別される。設計計算は震度法や応答変位法を、耐震解析は動的解析法を使う。このような数値解析手法のプログラムを被害予想のシミュレーションに使うため、以下、構造物の数値解析手法をシミュレーションプログラムと呼ぶ。

2.1 統合地震シミュレータとその利用

前章で概略を説明したが、IESは、各種の数値解析手法を組み合わせ、都市全体の地震動と構造物被害や対応行動をシミュレートするシステムである。地震動、被害予想、対応行動には、各々、地震シミュレーション、構造応答シミュレーション、対応行動シミュレー

ションを行う。地震シミュレーションは震源過程・伝播過程・地盤増幅過程を計算する。構造応答シミュレーションは構造物のシミュレーションプログラムの集合であり、土木構造物は勿論、建築構造物や貯蔵施設等の構造物の地震応答過程を計算する。対応行動は避難・救助活動のような緊急対応行動から、復旧・復興過程を計算することを目標にしている。IESでは、適当な震源を想定して地震シミュレーションが行われ、都市内全地点での地震動の時系列データが求められる。それが構造応答シミュレーションに入力され都市内全構造物の被害予想が行われる。その結果が対応行動シミュレーションに入力され、対応行動が検討されるのである。三つのシミュレーションの入力と出力は対象都市の地理情報システム (Geographical Information System, GIS) に連成させることを想定している。具体的には、都市全域の地下構造や種々の構造物に関するデータをGISから取り込み、シミュレーションの結果をGISに返すことになる。また、地盤や構造部材の材料に関してライブラリもIESに整備される。

IESの主要な構成要素は、GISと各種のシミュレーションを管轄するカーネルである(図1参照)。カーネルの機能は複雑である。地震シミュレーションに関しては地下構造モデルを構築する。地殻の地質構造は利用できるモデルがあるものの、地表付近の地盤構造は直接利用できるモデルはない。IESではGISに蓄積されたボーリングデータより適切な3次元地盤構造モデルを自動的に生成するUGSM(Under Ground Structure Maker)が組み込まれている。次に、構造応答シミュレーションでは、計算された都市内の地震動の時系列を、各構造物の地震応答解析の入力地震動としてシミュレーションプログラムに入力する。入力される地震動は場所ごとにより変わり、振幅が異なったり位相がずれたりする地震動がさまざまな構造物に入力されることになる。また材料ライブラリを使って構造物部材の材料特性を入力する。都市内の構造物のモデルが構築されるため、カーネルは、構造物単体の地震応答シミュレーションは勿論、地盤-構造物の連成作用や、隣接する構造物の間の相互作用も計算することができる。開発中の対応行動シミュレーションでは、被害を受けた構造物の状態を初期値として入力し、人や群衆の避難行動や警察・消防等の救助行動のマルチエージェントのシミュレーションを走らせる。地震・構造応答・対応行動の全フェーズにおいて、計算結果の整理、GISへの蓄積、また、可視化はカーネルが管理するのである。

前述のように、構造シミュレーションは、構造物の地震応答を計算するシミュレーションプログラムを統合して行うが、シミュレーションプログラムが多様であるため、統合は極めて難しい。共通のプロトコルを設定し、プログラム開発者にIESにプラグインする

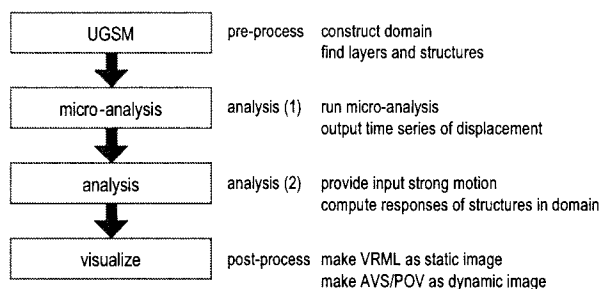


図-1 カーネルの基本的な機能と構造。

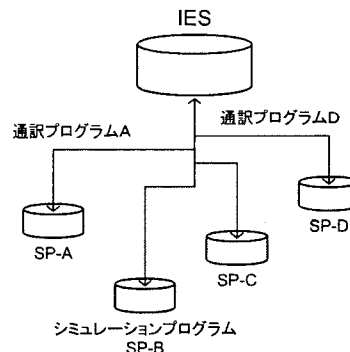


図-2 連邦型データベースとみなした IES。

ことを要請することは実効が疑わしい。実際、GIS 内の独自のフォーマットで記述された構造物データやライブラリの材料データと、地震シミュレーションの結果である地震動時系列データが必要となるため、IES のプラグインが可能となるようプログラムに適切な変更を加えることは容易な作業ではない。GIS やライブラリのデータ構造とシミュレーションプログラムのデータ構造は大まかには似通っているが、細部にはさまざまな違いがあり、機械的な作業ではあるといえ、このような若干の差異の修正に大きな労力がかかる。

IES に構造応答のシミュレーションプログラムを組み込むためには、プラグイン形式の代替案を見つけなければならない。この問題を解決する指針を立てる際に、古典的な数値解析手法よりも、遥かに多様な形式があるデータベースの統合化技術^{4),5),6),8)}が参考になる。データベースの統合には、データ構造のフォーマットを一意に指定する狭い意味での標準化を利用するものから、データベースを緩い形で統制する連邦型データベース⁵⁾がある。緩い形とは、個々のデータベースは変えずに、データベース間のデータのやり取りをする際に、プロトコルを指定して両者の通訳を行うエージェント^{7),9),10)}を使うことを意味する(図2参照)。フォーマットを一意に指定するデータベースの狭い意味での標準化がプラグイン形式のプログラムの統合化に対応する。したがって、連邦型データベースの構築に対応するシミュレーションプログラムの統合化がプラグイン形式の代替となると考えられる。

連邦型データベースが多数の異種データベースを扱うことと同様に、IES は多数の構造応答のシミュレーションプログラムを統合する。しかし、連邦型データベースが複数のデータベースの連携を扱うこととは異なり、IES では、GIS やライブラリ、また、地震シミュレーションを含む他のシミュレーションとの連成を、全てカーネルを介して行う。したがって、必要とされるのはカーネルとシミュレーションプログラム⁴⁾との通訳である。本研究では、連邦型データベースの例にな

らって、この通訳をメディエータと名づけた。メディエータは通訳プログラムであり、その基本的な機能は以下のように整理される。

シミュレーションの対象となる構造物形式を指定すると、メディエータは、GIS やライブラリより対象となる構造物のデータを抽出し、シミュレーションプログラムに入力する。別途実行される地震動シミュレーションの結果より、構造物の入力地震動の時系列データを抽出し、シミュレーションプログラムに入力する。カーネルの指定に応じて、シミュレーションプログラムを実行し、その結果を適宜変換して都市全域の地震被害の可視化に供する。また、シミュレーションの結果から構造物の被害や損傷のデータを抽出し、予見される都市の被害情報として GIS に出力する。

個々のシミュレーションプログラムには、固有のメディエータが必要である。多様な構造物のシミュレーションプログラムは千差万別であるため、メディエータの作成は難しいように思われる。しかし、地震応答の数値解析は耐震設計に基づいたものであるから、シミュレーションプログラムの基本的な構造はある程度共通している。したがって、基本構造に対応した共通のプログラム構造をメディエータに持たせ、作成を容易にすることができる。さらに、シミュレーションプログラムに共通の構造があること、そして、メディエータもそれに対応した共通の構造があることを前提とすると、メディエータを自動的に作成することが原理的には可能となる。具体的には、さまざまなシミュレーションプログラムに対し、適切なメディエータを自動的に作成するメディエータメイカである。メディエータメイカは、シミュレーションプログラムのソースコードの解読とそれに応じた適切なメディエータの作成を行う人工知能プログラムである。また、メディエータメイカは各種シミュレーションプログラムの IES への組込みを自動化するが、ソースコードの入出力形式に

表-1 メディエータメイカの基本機能.

基本機能	特徴
解説	シミュレーションプログラムのソースコードを解説する
入出力の修正	ソースコードの入出力の形式に適当な修正を加える
作成	シミュレーションプログラムの解説結果に合わせて、メディエータのソースコードを作成する

表-2 メディエータの基本機能.

基本機能	内容
構造の指定	GISのデータから、該当都市内にある対象構造物を選定する
地震動データの指定	地震動シミュレーションに対し、構造物の入力地震動を取る地点を指定し、強震動の時系列データを計算させる
構造データの入手	GISやライブラリより対象構造物の構造・材料データを入手する
構造応答計算の指定	地震動と構造・材料データとともに、構造物の応答計算を行う部材・箇所を入力データとして作成する
データの入力	データをシミュレーションプログラムに入力する
結果の取得	シミュレーションプログラムの計算結果のデータを取得する
可視化	計算結果のデータを基に、VMRLやPOV形式の地震被害可視化用のファイルを作成する

修正を加えることで、カーネルとシミュレーションプログラム間のデータのやり取りを円滑にする。これはIESの大規模数値計算の効率化をもたらす。表1にメディエータメイカの基本的な機能を示す。本研究は、具体的なメディエータの基本構造を提案し、その基本構造にしたがったメディエータメイカの開発を試みた。

2.2 メディエータとメディエータメイカ

入力された地震動に対する構造物の応答を数値計算するシミュレーションプログラムは、耐震設計に基づいており、ある程度共通のプログラム構造を持つ。例えば照査に使われる動的解析法を例にすると、数値解析手法として有限要素法 (Finite Element Method, FEM) がシミュレーションプログラムに使われる。図3に示すように、動的問題や非線形問題のFEMのプログラムは入力系 (input) と繰返し系 (loop) から構成され、さらに繰返し系は演算部分 (analysis) と出力部分 (output) からなる。入力系では、FEMの基本的データである形状 (節点・要素) と材料に関するデータ、入力地震動等の境界条件や外力条件のデータ、そして、繰返し系に必要な繰返し回数や時間ステップが入力される。繰返し系の演算部分では、入力地震動の時系列データから作られる外力ベクトルを作り、対応する変位ベクトルを求める演算が行われる。繰返し系の出力部分では変位ベクトルの他、必要に応じて要素の歪や応力も出力する。

前述のように、メディエータは、GIS内のデータを探索してシミュレーションプログラムが対象とする構

表-3 FEMに共通する基本的な変数.

変数	特徴
節点数	入力系の最初に出現する。入力系でループを制御する。繰返し系の出力部分のループを制御する
要素数	入力系の最初に出現する。入力系でループを制御する。繰返し系の演算部分のループを制御する
時間ステップ数	入力系に出現する。繰返し系のループを制御する

造物を都市内から自動的に選定する。また、共通のプログラム構造を考慮すると、メディエータは、入力系に対応する材料・地震動データの入手と、繰返し系の出力部分に対応する応答計算の結果の取得を実行しなければならない。また、IESは、個々のシミュレーションの結果を統合して都市全体の地震被害を表示するため、取得した応答計算の結果を可視化することもメディエータには必要とされる。表2に以上のメディエータの基本機能を整理する。各基本機能は特定のデータに特定の処理を行う形式となっている。したがって、メディエータの作成にはオブジェクト指向プログラムを使うことが望ましい。本研究はc++を使用した。c++はクラスと呼ばれるオブジェクトを用いる。クラスはデータとそれに対応するメソッドから構築され、これが、上記の特定のデータと特定の処理に対応する。したがって、メディエータのオブジェクトは各種構造物に特化したクラスとなる。各クラスがシミュレーションプログラムに特化することは当然であるが、効率的にメディエータを作成するためには表2の7つの基本機能を共通して持つことが重要である。すなわち、全てのメディエータのクラスは7つのメソッドを持たせることになる。なお、クラスのデータは構造と入力地震動の二種類に関するものであり、これが共通するのは当然である。

メディエータのクラスに7つのメソッドを指定したため、ソースコードからメディエータを自動的に作成するメディエータメイカは、具体的には、このメソッドのコードを書けばよい。しかし、コードの記述の前にソースコードの解析等が必要である。これが表1に示すメディエータメイカの第一の基本機能である。すなわち、I/O (Input/Output) を中心にソースコードのプログラム構造を解析することである。I/Oの対象である入出力される変数は勿論、I/Oのチャンネルとフォーマットを解析する。変数はデータ型の推定が必要である。また、I/Oの上位に位置する再帰文や条件文も解析する。構造応答シミュレーションプログラムのソースコードはfortranで記述されているため、サブルーチンやファンクション、またデータ文やコメントも解析しなければならない。

メディエータメイカの第二の基本機能であるソースコードの入出力の修正は容易である。フォーマットが

指定されると、メディエータもそれに合わせてデータの入出力をしなければならない。本質的には重要ではないものの、メディエータを作成する際にフォーマットを合わせることはわずらわしい。したがって、フォーマットが指定されたI/Oに対し、そのフォーマットをフリーにするよう修正を加えればよい。

メディエータメイカの第三の基本機能であるメディエータの作成は難しい。前述のように、実際の作成は7つのクラスのコード化に帰着しているが、依然として自動作成は容易ではない。これは、ソースコードの変数が何を表しているかを推測することが必要となるためである。メディエータの機能であるデータの入力を例にすると、ソースコードの入力の記述を解析することで、入力すべき変数の数や型を理解することは難しくはない。しかし、その変数の意味も理解しなければGISやライブラリから該当するデータを取得することはできない。任意のプログラム構造を持つソースコードに対し、コード内の変数が表す意味を判別することは至難の技であり、言語解析にも通じる高度な解析が必要とされる。しかし、シミュレーションプログラムは、FEMをベースとした共通の構造を持つため、ソースコード内の変数の出現の仕方やループの制御の仕方から、変数の判別を行うことが可能であると思われる。

FEMの基本的な変数として、節点数、要素数、時間ステップ数の3つを取り上げて、具体的な判別方法を説明する。この変数のコード内での出現の仕方やループの制御の仕方は表3に持つ特徴を持つ。したがって、ソースコードの解析結果を利用すると、ループの構造とループ内で実行される演算の数から、ソースコードの入力系と繰返し系を区別することができる。さらに、1) 入力系の入力変数とループの制御を行う変数、2) 繰返し系の制御を行う変数、3) 繰返し系の出力部分でのループの制御を行う変数、という3つの変数を調べることで、節点・要素・時間ステップ数の同定は可能である。

以上の考察を基に、メディエータメイカを大きく二つのフェーズから構成することとした(図4参照)。第一のフェーズでは、対象とするシミュレーションプログラムのソースコードからダイジェストコードを作成する。作成の手順として、空白・タブの使い方、制御、フォーマット等、ソースプログラムは開発者の個性に応じた癖があるため、この癖をできるだけ取り除き、ソースコードの表現を修正することが最初である。ついでソースコードの主要な要素であるサブルーチンを同定しその構造を解析する。具体的には、各サブルーチンに対しI/Oを検索し、実行の順番を調べる。メディエータはシミュレーションプログラムの入出力の仲介をするため、ソースコードに入出力される変数のフォーマットとデータ型を調べるのが重要である。また、サブ

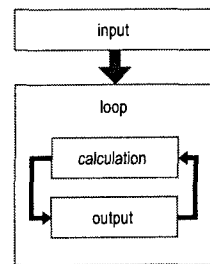


図-3 FEMの基本的な構造。

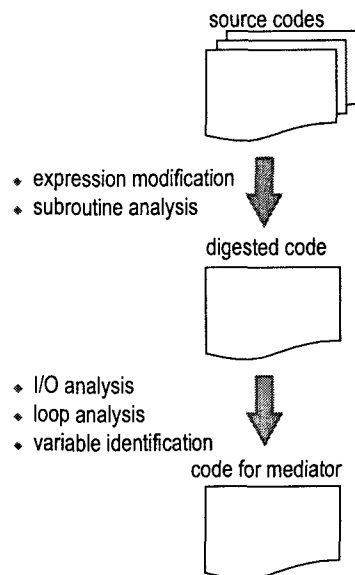


図-4 メディエータメイカの二つのフェーズ。

ルーチン内でI/Oが再帰文や条件文の対象になっている場合には、ループとコンディションの構造を調べ、実際の入出力の回数や条件を決定することも行う。各サブルーチンの構造解析をもとに、サブルーチン間の相互関係も解析する。これはメインも含むサブルーチンの呼び出し関係や変数の受け渡しの解析であり、コールやサブルーチンの変数を調べる。また、ソースコード全体に共通のファイルのチャンネルやデータ文等の共通データも解析し、I/Oとオープンの関係、コモン文と変数の関係も調べる。表現の修正とサブルーチンの解析の後、ソースコードからダイジェストコードが作成される。ダイジェストコードはI/OやI/Oに関する変数やループが明示された簡単なコードである。すなわち、ダイジェストコード自体には、変数の計算等の実行文は含まれない。図5にダイジェストコードの例を示す。後述するコンクリート橋脚と盛土のソースコードから自動作成された入力ダイジェストコードである。文頭のreadは入力でありチャンネルと変数(鍵括弧内は変数型)を合わせて表示する。文頭のiniとfin

表-4 IES プロトタイプ の要素.

IESの要素	機能
カーネル	該当都市の統合地震シミュレーション全般を管理
データ	GISの構造物の位置データと地盤データ、及び、構造物の材料・構造ライブラリ
メディアータ群	各シミュレーションプログラムとカーネルの仲介
シミュレーションプログラム群	カーネルから提供される入力地震動を使って各構造物の地震応答解析を実行
可視化プログラム群	シミュレーションプログラムの結果を、構造物単体ないし該当都市全体で可視化

がループの開始と終了であり、制御変数と繰返し回数の変数を表示する。

第二のフェーズでは、ダイジェストコードを解析し、メディアータの c++コードを作成する。ダイジェストコードではソースコードの I/O に関する構造が簡潔にまとめられているため、ソースコードを解析するよりは作業が簡単である。具体的な作業は、チャンネルと変数を調べる I/O の解析、I/O の実行条件を知るためのループの解析、そして I/O の対象となる変数の同定である。I/O の解析とループの解析に比べ、変数の同定は格段に難しい。実際、この変数の同定がメディアータメイカの本質である。上記のように、FEM に固有の節点数・要素数・時間ステップ数という変数に関しては、I/O とループに出現する変数と出現回数を使って同定することが可能である。他の変数の同定は難しい。しかし、入出力の仲介というメディアータを考えると、節点数・要素数・時間ステップ数が同定されれば、他の変数を同定しなくとも、ある程度のレベルでメディアータのソースコードを作成することは可能である。この際、ソースコードの入力ファイルが利用できれば、作成されるメディアータはより良いものとなる。

3. IES のプロトタイプ

開発された IES のプロトタイプの概要を図 6 に示す。主要な要素はカーネル、データ、メディアータ群、シミュレーションプログラム群、可視化プログラム群であり、その機能を表 4 に整理する。プロトタイプには、1) ガス導管、2) コンクリート橋脚、3) 鋼製橋脚、4) 盛土、という 4 つの構造物を対象とするシミュレーションプログラムが組み込まれている。シミュレーションプログラム自体は専門家の手によって独自に開発されたものであり、固有のメディアータでカーネルに連結されている。各シミュレーションプログラムは耐震設計に準拠しているため、ガス導管では静的解析、そして橋脚は FEM を使った動的非線形解析を行う。また盛土も FEM の動的非線形解析のシミュレーションプログラムである。IES のプロトタイプの開発に際しては

カーネルとメディアータの機能設定が重要である。他の要素は原則、既存のデータやプログラムを利用することが可能である。カーネルとメディアータに関して詳しい説明を加える。

前章で説明したように、カーネルはシミュレーション全般を管理するが、具体的な機能としては、モデル化と地震動計算を伴うプレプロセス、各シミュレーションプログラムを実行させる解析、そして解析結果を可視化するポストプロセスに分けることができる。これは通常の FEM と同様の機能である。機能を図 1 に示す。ここでプレプロセスは、モデル化に対応する UGSM(開発された UGSM を使って対象都市の地盤構造のモデル化を行い、また、都市内の解析対象構造物を探すことで、該当都市の解析領域モデルを作成)と、地震動計算を行う micro-analysis(該当都市の地震動を 3 次元有限要素法解析によって計算し、各構造物の入力地震動の時系列データを作成する)として記述されている。解析では、プレプロセスで構築された構造物に入力地震動データを与え、シミュレーションプログラムを使って応答を計算し、カーネルにその結果を引き戻す。ポストプロセスでは、構造物や都市の静的イメージとして VRML、動的イメージとして POV-Ray に対応した形式のファイルを作成する。

各構造物のシミュレーションプログラムとカーネルを結ぶメディアータは c++ のクラスとして作られている。継承を利用して効率的にメディアータが作成できる点を強調する。以下、継承を説明するため、特定の構造物を structure A のメディアータの作成を例とする(図 7-a 参照)。継承の元となるのはクラス structure である。これは、IES 内での構造物の ID や位置情報をデータとした簡単なクラスである。これを継承し、FEM に対応したクラス FEM が作られている。これは節点、要素、材料、ガウスポイントのクラスを含み、各々、変位の値を含む節点、節点の連結を含む要素、部材の材料、そしてガウスポイントの位置等に関するデータを扱う。メディアータが仲介するのはこの節点や要素のクラスである。クラス FEM を継承して、structure A に特有のデータやメソッドを加えてメディアータのクラス structure_A が作成される。一方、構造解析とは別に可視化に特化したクラス VRML も設けている。クラス FEM がシミュレーションプログラムの標準であるように、クラス VRML は可視化の標準であり、structure A の可視化には固有のクラス VRML_structure_A が作成される。表 2 や図 6 に示すように、メディアータには 7 つの基本機能があり、各基本機能に対応してメソッドが設けられている。図 7-b に示すように、メディアータであるクラス structure_A では、7 つのメソッドが設定されている。すなわち、構造の指定にメソッド find structure、地震動データの入手にメソッド select point、

```

read: 10 INEM[i] INODE[i] MX[i] KPCS[i] KSCS[i] KINDS[i]
ini: I : 1 - INODE
read: 10 NO[i] (DOO(6*I-1),L=5,0,-1)[d]
fin: I : 1 - INODE
ini: J : 1 - INODE
read: 10 NO[i] (NC(6*I-1),I=5,0,-1)[i] (NB(6*I-1),I=5,0,-1)[i]
fin: J : 1 - INODE
ini: I : 1 - INEM
read: 10 MEM[i] NMEM(I,1)[i] NMEM(I,2)[i] ISHAP(I)[i] NFCS(I)[i] .....
fin: I : 1 - INEM
read: 10 EC01[d] FT1[d] FC1[d] GFC1[d]
read: 10 EC02[d] FT2[d] FC2[d] GFC2[d]
read: 10 ARUFA[d] BETAC[d] C[d]
ini: I : 1 - KPCS
read: 9 NOT[i] NFIB(I)[i]
ini: JJ : 1 - NFIB(I)
read: 9 YYC[d] Z2C[d] ARE[d] YY1[d] YY2[d] Z21[d] Z22[d] RHY[d] BB2[d]
fin: JJ : 1 - NFIB(I)
ini: I : 1 - KPCS
ini: I : 1 - KSCS
read: 8 MNO[i] NS(I)[i]
ini: J : 1 - NS(I)
read: 8 NO[i] SY(I,J)[d] SZ(I,J)[d] ITPS(I,J)[i]
fin: J : 1 - NS(I)
ini: I : 1 - KSCS
ini: I : 1 - KINDS
read: 8 NOT[i] AST(I)[d] ESOT(I)[d] ESIT(I)[d] FSYT(I)[d] FSYCT(I)[d]
fin: I : 1 - KINDS
read: 10 NAXF[i]
ini: I : 1 - NAXF
read: 10 NDAXL(I)[i] AXF(I)[d]
fin: I : 1 - NAXF
read: 10 IDEFO[i]
read: 10 RAT[d] DIVER[d] IABAN[i]
read: 10 OT[d] BET[d] GANMA[d]
read: 10 IJK[i]
ini: JJJ : 1 - IJK
read: 31 TIM[d] AOINE(JJJ)[d]
fin: JJJ : 1 - IJK

```

a) コンクリート橋脚のソースコードから自動作成されたダイジェストコード

```

read: 5 INFILE[c]
read: 5 OUTFILE[c]
read: 5 OUTFILE[c]
read: 5 OUTFILE[c]
read: 5 OUTFILE[c]
read: 10 MODE[i]
read: 10 NP[i] NE[i] NB[i] NBB[i] NF[i]
read: 10 MAXNR[i] ERROR[d]
read: 10 MAXNR2[i] ERROR2[d]
read: 10 AAKH[d] H0[d]
read: 10 NSTEP[i] FSS[d]
read: 10 NSTEP[i] DELT[d]
read: 10 NSTEP[i] [x]
read: 10 NSTEP2[i] NSTEP3[i] DELT[d] ALPN[d] BETN[d]
read: 10 ISIN[i] AMPS[d] PERIOD[d] GACC[d]
read: 10 (UACX(I),I=1,NSTEP2)[d]
read: 10 UACX(I)[d] UACY(I)[d] UACZ(I)[d]
read: 10 NPU[i]
ini: I : 1 - NPU
read: 10 [x] PU(NO)[d]
fin: I : 1 - NPU
read: 10 ND[i] NA[i] NEP[i]
read: 10 (NND(I),I=1,ND)[i]
read: 10 (NAU(I),I=1,NA)[i]
read: 10 (MEP(I),I=1,NEP)[i]
read: 10 NZ1[i]
ini: I : 1 - NZ1
read: 10 LI[i] FAIO(I)[d] PSAIO(I)[d] EO(I)[d] PO(I)[d] .....
fin: I : 1 - NZ1
ini: L : 1 - NP
read: 10 [x] XX(L)[d] YY(L)[d] ZZ(L)[d]
fin: L : 1 - NP
ini: L : 1 - NE
read: 10 [x] (LOCN(I,L),I=1,21)[i]
fin: L : 1 - NE
ini: L : 1 - NB
read: 10 IB(L)[i] IX(L)[i] IY(L)[i] IZ(L)[i]
fin: L : 1 - NB

```

b) 盛土のソースコードから自動作成された入力のダイジェストコード

図-5 ダイジェストコードの例.

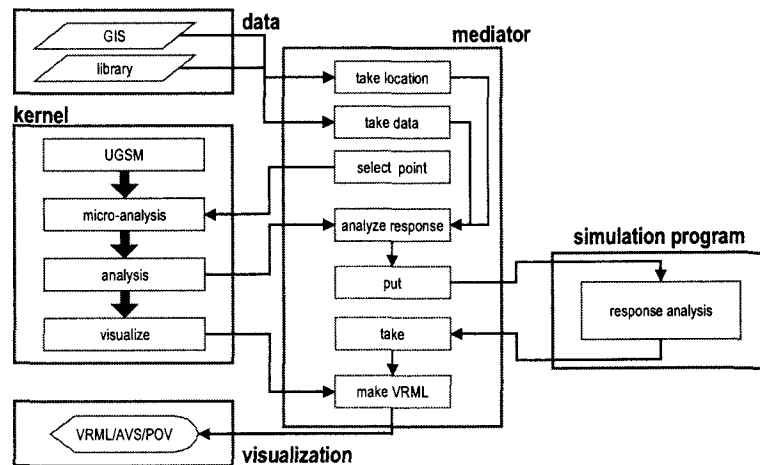


図-6 開発された IES のプロトタイプの基本的構造.

構造データの入手にメソッド take data, 構造応答計算の指定にメソッド analyze response, データの入力にメソッド put, 結果の取得にメソッド take, そして可視化にメソッド make VRML である。クラス structure_A のメソッドは対象となるシミュレーションプログラムに対応するため独自の内容となっているが、継承元のクラス FEM に含まれる節点や要素のクラスを使うことで、プログラム構造は他のシミュレーションプログラムのメディエータのメソッドとある程度共通となる。

IES のプロトタイプには 4 つのシミュレーションプ

ログラムが組み込まれているため、4 つのメディエータが作成されている。メディエータのクラスの作成には別途開発されたメディエータメイカが用いられている。現状では、メディエータの作成は完全には自動化されていない。これはソースプログラム内の I/O に関する変数を完全に同定することが難しいためである。しかし、FEM に共通して現れる節点数・要素数・時間ステップ数に関しては同定に成功している。例として、コンクリート橋脚と盛土のソースコードに対するメディエータメイカの結果を図 8 に示す。水平軸は I/O に出

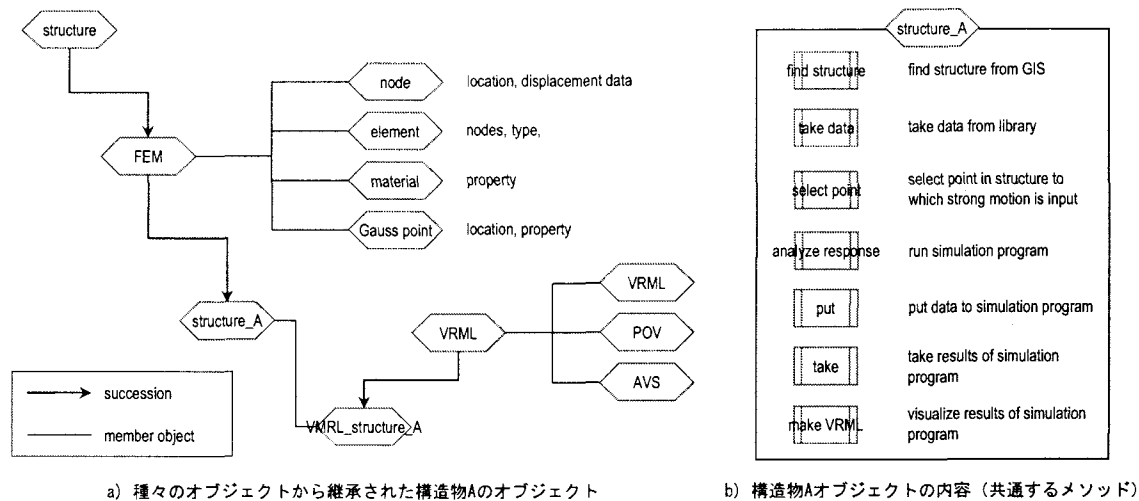


図-7 構造物のシミュレーションプログラムに特有のメディエータのクラスとメソッド。

現した変数、鉛直軸は出現頻度であり、各変数に対して、ループに入らない入力 (read/LL=0), ループに入らない出力 (write/LL=0), そしてループ内で実行される出力 (write/LL=1) に対して頻度を示している。なお LL は loop level の略である。表 3 に整理したように、FEM では節点数・要素数・時間ステップ数の出現頻度に固有のパターンがある。図 8-a はコンクリート橋脚の結果であるが、INODE, IMEM, IJK が節点数・要素数・時間ステップ数に対応することがわかる。同定された変数は他の変数に比べ入力・出力とも出現頻度が高いが、ループの有無に関連して頻度が変化していることが重要である。例えば、IJK は write/LL=0 での出現頻度が他の変数よりも圧倒的に多く、INODE は read/LL=0, IMEM は write/LL=0 の出現頻度が多い。この出現パターンから変数が同定されるのである。同様に、盛土の結果を図 8-b に示す。NP と NE が節点数と要素数であることが同定されたが、時間ステップ数は同定できなかった。より高度な変数の出現パターンの解析が必要である。

以上の準備を元に、構築された IES プロトタイプの仮想都市 (virtual city, VC) を図 9 に示す。この VC はカーネルが自動的に構築したものである。具体的には、GIS のボーリングデータより UGSM を使って地層境界を判定し、メディエータを使ってガス導管・コンクリート橋脚・鋼製橋脚・盛土の四種類の構造物モデルを作成している。各構造物の位置と形状は GIS から、材料特性はライブラリから情報が取得されている。VC の領域は $150 \times 150 \times 40$ [m] で小さいが、3 本の地中ガス導管、5 脚のコンクリート橋脚、8 脚の鋼製橋脚、そして 5 個の盛土が含まれている。地層境界と作成された構造物の形状を図 10 に示す。前述のように、各構造物のシミュレーションプログラムは耐震設計用に実際に作成

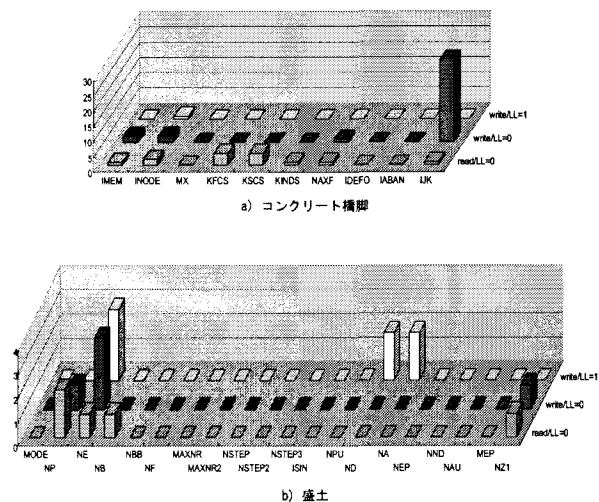


図-8 メディエータメイカが解析したソースコードの変数とその出現回数。

されたものであり、構造物の情報とともに適切な入力地震動が与えられれば応答の時系列を計算する。メディエータを介してカーネルはシミュレーション結果を取得し、その結果を図 9 や図 10 に示すような VRML の形式で可視化している。図 1 に示す 4 つの機能を実行するカーネルと GIS とライブラリを作ることによって、IES のプロトタイプが開発され、VC を自動的に作成することが可能となった。また、IES プロトタイプは、所定の地震に対し、VC 全体での構造物の地震応答や構造物単体の地震応答の可視化を行うことができる。

IES のシミュレーション結果の妥当性を議論することは本研究の目的ではない。カーネルやメディエータを使った IES が開発可能であり、防災担当者の技術力

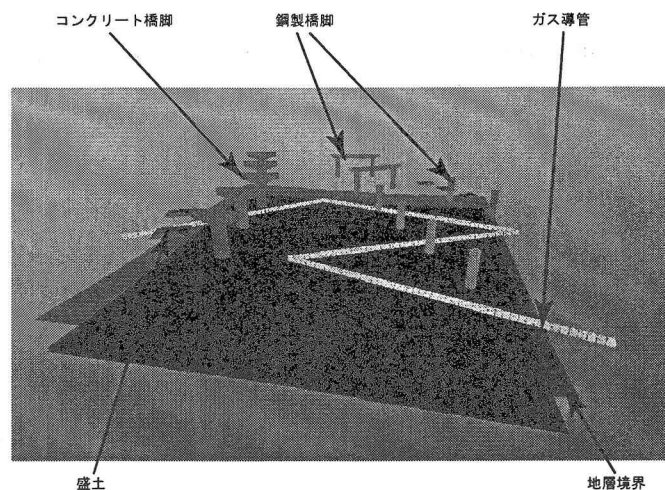


図-9 VC の例.

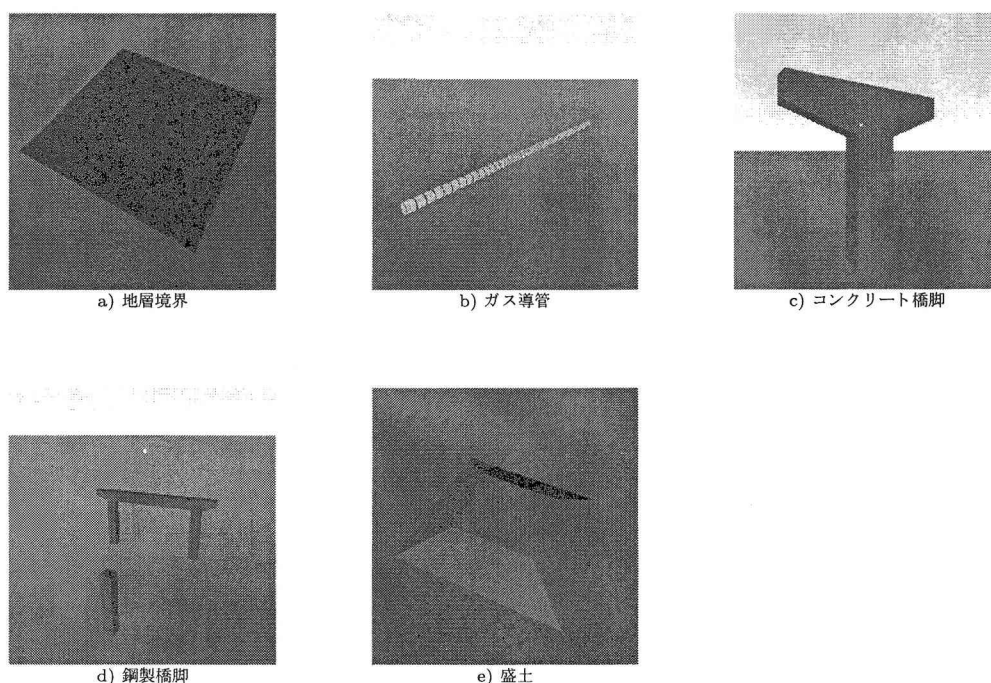


図-10 GIS よりメディエータを使って自動的に作成され VC 内に埋め込まれた構造物モデル.

向上につながる都市内全構造物の地震応答の可視化が実現できることを示すことが主要な目的である。しかし、IES のシステム全体の有効性を吟味する際には、シミュレーション結果の妥当性は必須の検討事項である。地震応答の予測・再現に要求される精度が構造物によって異なる現状を見ると、通常のシミュレーションのように、精度のみを使って IES のシミュレーション結果の妥当性を検討することは賢明ではない。耐震設計に用いられる計算の精度や要求精度が異なることも防災担当者が理解すべき点であるため、妥当性の検討には

十分な考察が必要である。具体的には、シミュレーションプログラムの精度と計算結果の要求精度を明示することが考えられる。しかし、可視化された図にエラーバーのような精度の表示を加えることは現状では難しく、適切な表示形式を考案しなければならない。

4. 結論

都市内の全構造物の地震被害を可視化するために、開発中の IES の利用を検討した。IES のプロトタイプを

使うことで、VCの自動作成と地震応答解析を行い、各構造物のシミュレーション結果を都市全体で可視化することが可能である。すなわち、連邦型データベースのように、メディアータを用いたシミュレーションプログラムの統合をすることで、都市全体の地震応答シミュレーションと可視化の可能性が示されたのである。IESのシミュレータ自体開発途上であり、また、メディアータメカは計算科学でも類のない人工知能であるため、可視化の実現性は不透明な点がある。しかし、防災担当者が地震被害を予見するためには、可視化に代わる代替がないことは否定しがたい。構造物に合わせて多種多様な応答解析手法が存在する現状をみると、堅牢性の高いメディアータメカの開発が極めて重要な課題である。

防災担当者の技術力向上のために地震被害の可視化を検討したが、計算機内の仮想現実のみの利用では技術力向上には限界がある。構造物被害の実際を見ることが重要である。具体策として、現在建設が進められているE-Defenseで行われる実大構造物の破壊模擬実験や、実験の結果生じた構造物・部材の被害を間近で見学することが挙げられる。地方自治体の防災担当者が技術力を向上させるトレーニングとして有効であると考えられる。

本研究は科学技術振興事業団および日本学術振興会の科学研究費補助金の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 林春男: いのちを守る地震防災学, 岩波書店, 2003.
- 2) Yang, F., Ichimura, T. and Hori, M.: Earthquake simulation in virtual metropolis using strong Motion

- simulator and Geographic Information System, *Journal of Applied Mechanics, JSCE*, **5**, 527-534, 2002.
- 3) Ichimura, T. and Hori, M.: Macro-micro analysis for prediction of strong motion distribution in metropolis, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE*, 654/I-52, 51-61, 2000.
- 4) 西尾章治郎・太田友一・横田一正・西田豊明・佐藤哲司: 情報の共有と統合, 岩波書店, 1999.
- 5) Hammer, J., Gracia-Monlina, H., Ireland, K., Papanikolaou, Y., Uhlman, J. D. and Widom, J.: Information translation, mediation, and mosaic-based browsing in the TSIMMIS system, in *Exhibits Program of the Proceedings of the ACM SIGMOD International conference on Management of Data*, 483, San Jose, California, June, 1995.
- 6) Uhlman, J. D.: Information Integration Using Logical Views, in *Proc. ICD'97*, Springer LNCS 1186, 19-40, 1997.
- 7) 長尾 隆: エージェントテクノロジー最前線, 共立出版, 2000.
- 8) 河野浩之・山田誠二・北村泰彦・高橋克巳: インターネットの知的情報技術 情報検索とエージェント, 東京電機大学出版局, 2002.
- 9) Gruber, T. R.: A translation approach to portable ontology specification, *Knowledge Acquisition*, **5**, 2, 199-220, 1993.
- 10) Hirose, M., Tanikawa, T. and Endo, T.: Building a virtual world from the real world, *Mixed Reality - Merging Real and Virtual Worlds* (ed. by Ohta, Y and Tamura, H.) Springer-Verlag, 183-197, 1999.
- 11) 矢川元基・関東康裕: オブジェクト指向計算力学入門, 培風館, 1999.

(2004 年 4 月 18 日 受付)