

オンライン3次元断層破壊過程 シミュレータの開発

水本学千¹・三浦房紀²・瀧本浩一³

¹学生会員 工修 山口大学大学院 環境共生工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail : mizumoto@earth.csse.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 工博 山口大学大学院教授 環境共生工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail : miura@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 工博 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail : takimoto@yamaguchi-u.ac.jp

筆者らはジョイント要素で断層面をモデル化し、3次元非線形有限要素法を用いて断層の破壊プロセスと地震波の生成を同時にシミュレーションする手法を提案している。しかしこれまでは、プリプロセッサ、ポストプロセッサが無かったために、解析モデルの入力データの作成、出力結果の表示に非常に多くの手間と知識が必要であった。これを解決するために、オンライン上で実行できる入出力システムをCGIとJavaを用いて開発し、モデルの作成、解析、そして出力結果表示のシステム化を計った。これにより、解析モデルのデータ作成と解析結果の分析に要していた時間の大幅な短縮と、有限要素解析に対する専門知識があまり無い人でも容易にモデルを作成し、シミュレーションを行うことができるようになった。

Key Words : earthquake fault, 3D-FEM simulation, preprocessor, postprocessor, internet, on line system

1. はじめに

1994年ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震と相次いで起こった地震では、極めて大きな地震加速度が観測された。しかもその地震が大都市を直撃したことから甚大な被害を生じた。さらに1999年にトルコで起こったコジャエリ地震¹⁾、台湾で起こった集集地震²⁾では断層運動による地表面のくい違いが直接多くの建造物の被害をもたらした。それらのことから断層近傍の強震記録はいうまでもなく、断層運動に伴う地変に関する知見も耐震設計上極めて重要であることが認識されるに到った^{3), 4)}。この様な背景もあって、土木学会地震工学委員会に「断層進展およびこれに直接関連する被害研究小委員会」が発足し、その研究成果も国際ワークショップなどの形で公表されつつある⁵⁾。その一方、筆者らはジョイント要素で断層面をモデル化し、非線形有限要素法を用いて断層の破壊プロセスと地震波の生成を同時にシミュレーションする手法を提案している^{6) ~ 8)}。この手法は単に地震波のシミュレーショ

ンだけでなく、断層の破壊プロセスおよびその結果生じる地盤の変状、すなわち残留変位も求めることができる。このため断層運動による地盤変状を受ける建造物の挙動の解明や耐震設計を行う上で、極めて有益な情報を提供することが期待できる。しかしながら解析のための有限要素モデルを作成することは容易ではなく、特に3次元解析となると非常に多くの労力と時間をそのモデル作成および解析結果の整理に要し、解析が容易ではなかった。そこで、モデル作成のためのプリプロセッサ、解析結果の整理および出力表示のためのポストプロセッサを開発すれば、単に筆者らの解析が容易になるだけでなく、これによってより多くの人が解析を容易に行うことができ、多くの知見を早く得ることができると考えた。

そこで本研究では、このシミュレーション法を誰でも容易に行えるように、モデルの作成、解析結果の表示などの入出力プロセッサを開発し、一連の作業をシステム化した。これにより、従来より入出力にかかる時間を大幅に短縮することが可能となった。

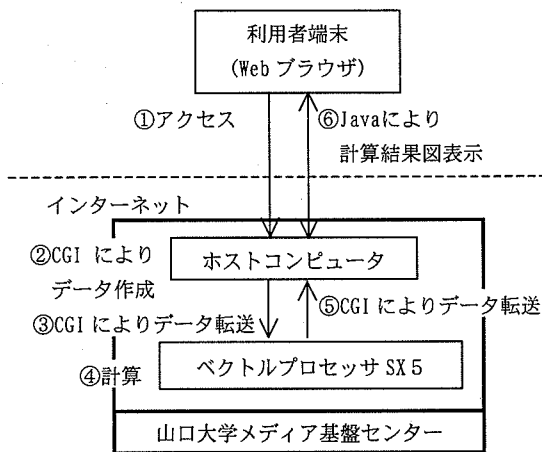


図-1 システム構成図

さらにこれらのシステムをインターネット上に乗せることにより、他の研究者にも容易に使用してもらうことを可能とした。

インターネットにこのシステムを乗せる利点としては、まずブラウザ上で入出力を行うため、利用者はインターネットに接続できる環境を用意するだけでよく、自分のコンピュータに解析ソフトなどをインストールする必要が無い。また、ブラウザ上で実行するので Windows, MacOS, UNIX, Linux など OS に依存しないシステムを構築することができる。さらに、インターネットに接続できる環境であれば、屋外の現場において PDA (Personal Digital Assistant) のような小型情報端末を用いても利用することができる。

さらにこれまでは、特定の大学、企業の研究者個人個人が興味のあるパターンのみシミュレーションを行ってその結果を分析していたが、多くの研究者や実務者が利用できる環境を広く提供することによって、他の研究者がどのようなテーマに興味を持っているのか、またその結果どのようなことが明らかになったのか情報を共有することができる。そしてそれらのシミュレーション結果を蓄積し、データベース化しておけば、実際に計算する前にそのデータベースを検索し、同じか類似したパターンを探すことができれば計算することなく結果を見ることができ、時間と労力を省くことができる。さらにはこのように情報を共有することによって解析手法の改善はもちろん、多くの有益な知見を得ることができ、地震工学や耐震設計上多大な貢献をすることが期待できる。

2. システム構成

(1) システムの基本構成

本システムの概要を図-1に示す。本システムを利用する手順は以下の通りである。

① まず利用者は、ブラウザに URL (Uniform Resource Locator) を入力することにより、利用者の端末から山口大学メディア基盤センター内にあるホストコンピュータにアクセスする。

② ブラウザ上の Perl を用いた CGI (Common Gateway Interface) で開発したプリプロセッサを用いてデータを入力し、シミュレーションに必要なデータファイルをホストコンピュータ上にテキストファイル形式で作成する。具体的な作成方法は5章で説明する。

③ 作成されたデータファイルは同センター内のベクトルプロセッサに CGI の制御により自動的に転送される。

本来ホストコンピュータ (メモリ 2G バイト) 上で従来開発された断層解析プログラムを用いて計算できればよいのであるが、現在のシミュレーションの規模 (自由度約 80,000 程度) では計算時にメモリを約 6G バイト使用しているため、メモリが実質的に 6.8G バイトまで使用可能なベクトルプロセッサ SX5 を用いて、このような処理をしている。

このように、ホストコンピュータと計算を行うコンピュータを分離することにより、実際の計算は山口大学のベクトルプロセッサのみでなく、より大規模で高速な計算が可能である他の施設の計算機を利用することもできるという利点がある。

④ 断層の破壊過程と地震波生成の計算が、煩雑なコマンド入力をすることなく、CGI の制御により容易なコマンドを入力することにより実行される。解析手法の概略は3章で説明する。このとき計算結果はデータファイルとしてベクトルプロセッサ上に保存されている。

⑤ 計算が終了した後、ベクトルプロセッサ上に保存されたデータは、CGI の制御により再びホストコンピュータに転送される。

⑥ 各種計算結果が Java で開発したポストプロセッサを用いて利用者端末上に表示される。具体的には6章で説明する。

本来は計算結果を表示するプログラムも Perl を用いた CGI でホストコンピュータ上に表示すれば、利用者の負担が軽くなってよいのだが、Perl を用いて Web 上に描画するためには Perl プログラムの他に GD モジュール等のプログラムを新たにサーバ

表-1 システムに使用したハードウェアとソフトウェア

ハードウェア	ベクトルプロセッサ SX5	2 CPU	8GFLOPS
		メモリ	8GB
ソフトウェア	CGI 用ソフト		Perl
	画像描画用ソフト		Java
	断層解析ソフト		FORTRAN

上にインストールする必要があり手間がかかる。また山口大学のサーバにはそのようなプログラムはインストールされていなかったため、結果の表示用のプログラムには描画機能が多彩で汎用性のあるJavaを使用した。

表-1に山口大学メディア基盤センターのホストコンピュータであるベクトルプロセッサSX5のスペックとシステムに使用したソフトウェアを示す。

(2)開発言語

開発に当たっては、図-1 に示すステップ②、③、⑤の入力ファイル作成、データファイル操作、コマンド入力の CGI には Perl を使用した。また計算結果をブラウザ上に表示するため(図-1 の⑥)にはサンマイクロシステムズ社の Java を用いた。以下それぞれの言語の特徴を説明する。

a) Perl の特徴⁹⁾

本来 Perl は、CGI のために開発されたプログラミング言語ではないが、下記の特徴により CGI プログラムには最も多く用いられている。また CGI が使用可能なプロバイダのサーバマシンには必ずといっていいほどインストールされている。

特徴としては、まず最初に無料ということである。したがってインターネットや書籍・雑誌の付録 CD-ROM 等で入手可能である。次に、多くのコンピュータに移植されており、UNIX、MS-DOS、Linux、Windows、MacOS など、どの OS のコンピュータで作った Perl のプログラムでも、ほぼそのまま別のコンピュータで使用可能である。

これらの特徴を生かすことによって、本研究で開発したシステムを他のサーバに移すことが容易となり他研究機関や企業の多くの研究者にも利用してもらうことが可能となる。

b) Java の特徴¹⁰⁾

特徴としては、Perl と同様に無料であること、OS に依存せずに動くということがある。さらに Java アプレットと呼ばれるブラウザ上で実行可能な Java プログラムがある。また Java は GUI (Graphical User Interface) アプリケーションを作ることが簡単であると共に各種基本図形を描くた

めのメソッドがたくさん用意されているので、結果をブラウザ上に描画するのに適している。

PerlでWeb上に図形を描画するには新たにGD等のプログラムがサーバ上に必要であるのに対して、Javaではそのような手間がかからずに容易に表示ができるから本研究では図形描画にJavaを用いることとした。

c) ファイル制御

CGIでサーバ上のファイル入出力を行うときは相対参照が可能であるのに対して、Javaでのファイル入出力は相対参照ができず、Javaに標準装備されている関数を用いて操作しようとするファイルのURLを指定しなければならない。またJavaではデータを読み出すとき、そのファイルの形式がスペース区切りであってもファイルの1行全てを一度で読み込んでしまい、1行を読み込んだ後に、関数を用い各変数に分割する処理をしなければならない。そこでこれらのことを解決するためにファイル制御のプログラムを開発した。

3. 3次元有限要素法による解析手法の概略

プリプロセッサ、ポストプロセッサの開発に関する説明の前にまず3次元有限要素法による解析手法の概略を以下に説明する。なお詳細は文献(8)、(11)を参照されたい。

(1)解析モデル

図-2に解析に用いるモデルを示す。XYZ座標空間でそれぞれの方向に長さLkm、Mkm、Nkmの平行六面体で地殻-断層系をモデル化する。図には示していないが、地殻をモデル化するアイソパラメトリック要素も任意の長さの平行六面体である(本研究のシミュレーションでは1kmの立方体としている)。断層の傾斜角 δ は任意の角度(図-2は90度、この場合のモデルは直方体)で決めることができる。四辺形FGPOの直線FOの midpoint Aと直線GPの midpoint Bを結ぶ位置に断層面を配置する(図-2中の太線)。すなわち面FGJK、面OPQRに平行に四辺形ABCDを定め、四辺形ABCDの面内に断層面を設定する。そして断層は3次元ジョイント要素でモデル化する。

断層面の一例を図-3に示す。周辺の灰色部分は非破壊面で、任意の要素数を設定できる。図-3では上部が解放されているが上部にも非破壊面を設定することが可能である。その場合断層のすべり破壊は地表面に到達せず地中に止まることになる。また図-3中の■印は震源を表すが、断層面の任意の要素を震

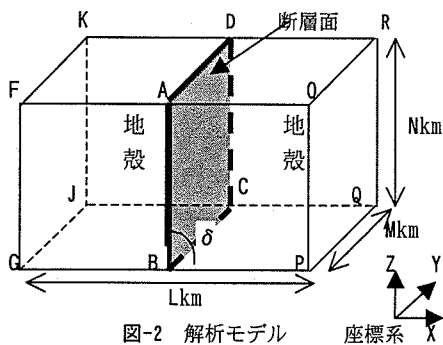


図-2 解析モデル

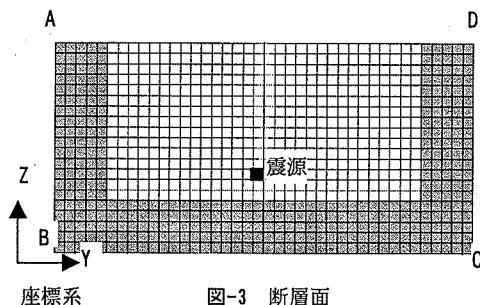


図-3 断層面

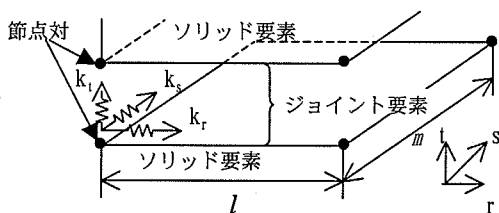


図-4 3次元ジョイント要素¹¹⁾

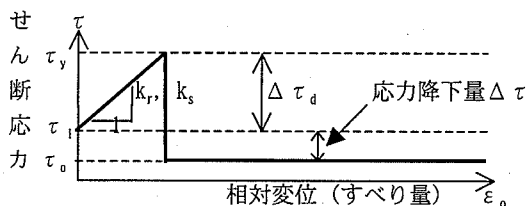


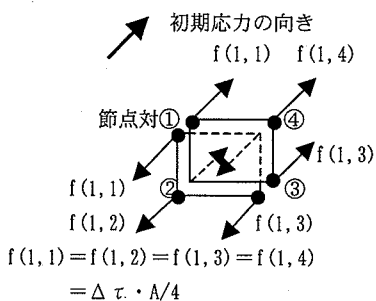
図-5 ジョイント要素の構成関係

源(破壊開始点)として設定することができる。この震源から破壊が始まり周辺部分に破壊が伝播していく。

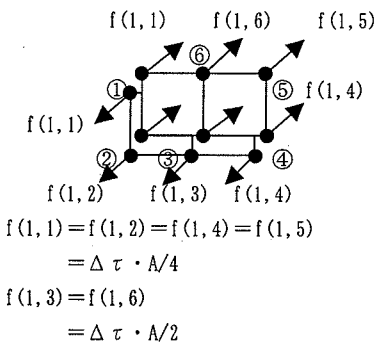
(2) 3次元ジョイント要素による断層のモデル化

(1)で述べた断層を図-4に示すジョイント要素でモデル化する。この要素は各節点对が3方向のばね、 k_r 、 k_s 、 k_t によって結合されている¹¹⁾。

本手法で用いるジョイント要素のせん断応力～相対変位(すべり量)の関係(構成関係)を図-5に示す。せん断応力 τ が降伏応力 τ_y に達すると滑り破壊を生じる。その瞬間、 $\tau_y - \tau_0$ だけ応力が降下する。このジョイント要素の破壊節点对に、図-6に示すように応力の降下量 $\tau_y - \tau_0$ と各々の節点对の分担面積をかけ



(a) 震源が1要素の場合



ここに、Aはジョイント要素の面積

(b) 震源が2要素の時

図-6 応力効果量 $\Delta \tau$ に等価な節点外力 f

て求まる節点力 f を初期応力と同じ方向に作用させる。ここで岩石のすべり破壊試験¹²⁾によると、応力降下は相対変位に対して指数関数的に降下することが報告されているが、ここでは簡単にせん断応力 τ が τ_y に達した瞬間応力降下が生じるものと仮定している。

シミュレーションは、ジョイント要素の非線形性を含む非線形の運動方程式を解くことになる。この解法に関する詳しい説明は文献⁸⁾を参考にされたい。

4. ジョイント要素のデフォルト値を設定するためのパラメトリックスタディ

本研究で開発したシステムは、ジョイント要素を用いた非線形有限要素法による断層運動の解析に精通していない人の利用も想定している。この様な利用者にとっては、ジョイント要素の構成関係として、よく用いられる断層パラメータだけを与えれば、あとの設定値は自動的に与えられるようにデフォルト値が準備してあると便利である。具体的には図-5に示すジョイント要素の構成関係のうち、断層パラメータとして与えられるのは応力降下量 $\Delta \tau = \tau_y - \tau_0$ だけであり、ばね定数と $\Delta \tau_y = \tau_y - \tau_0$ には任意性

表-2 シミュレーションに用いた断層パラメータ

幅 W	15km
長さ L	16km
傾斜角 δ	90°
初期応力の向き	90° (Dip Slip)

がある。そしてこれらは解析結果が妥当である範囲におさまるように与える必要がある。本システムを利用するにあたり、3次元ジョイント要素のばね定数と $\Delta \tau_d$ を前もって決めておけば便利である。そこでここでは、ジョイント要素のばね定数 k_r , k_s と応力の条件 $\Delta \tau_d$ についてパラメトリックにシミュレーションを行いデフォルト値としてどのような値が適切であるかを検討する。

(1) $\Delta \tau_d = \tau_y - \tau_x$ の大きさと破壊伝播速度の関係

ここでは3次元ジョイント要素の構成関係の $\Delta \tau_d = \tau_y - \tau_x$ の大きさと破壊伝播速度の関係について調べる。

図-5 に示すように $\Delta \tau_d$ の値が小さければ隣接するジョイント要素からのエネルギーの流入が少なくてもすぐにせん断応力が降伏応力 τ_y に達し、破壊伝播速度は速くなり、逆に $\Delta \tau_d$ の値が大きければせん断応力が τ_y に達するのに時間を要し破壊伝播速度は遅くなることが予想される。実際に2次元解析ではそのような結果が得られている¹⁴⁾。このようなことから破壊伝播速度を調節するには、この $\Delta \tau_d$ の値を変えればよい。しかし $\Delta \tau_d$ の値を大きくしすぎるとせん断応力が降伏応力 τ_y に達せず破壊が伝播しきれずに途中で止まってしまう。そこで、ここでは応力降下量 $\Delta \tau$ が 3.5, 5.0, 10.0, 15.0MPa のとき $\Delta \tau_d$ を変化させるとどのように破壊伝播速度が変化するかを調べた。

a) 解析モデル

解析に用いた3次元モデルの断層パラメータを表-2に示す。

3次元解析モデル(節点数 18144, 自由度 54432)を図-7に示す。水平方向(X方向)30km, 奥行き方向(Y方向)26km, 垂直方向(Z方向)20kmの直方体でモデル化している。地殻をモデル化するアイソパラメトリック要素は1kmの立方体である。地殻の物性はS波速度4.0km/s, 単位体積重量2.0tf/m³, ポアソン比0.25と仮定した。

図-7中の断層面を含む面ABCD(Y-Z平面)を図-8に示す。この面の最深部と両端部分(図-8の灰色部分)は非破壊面とし、この領域のジョイント要素の τ_y を極めて大きく与えている。また震源は図中の■の部分であり、このジョイント要素については

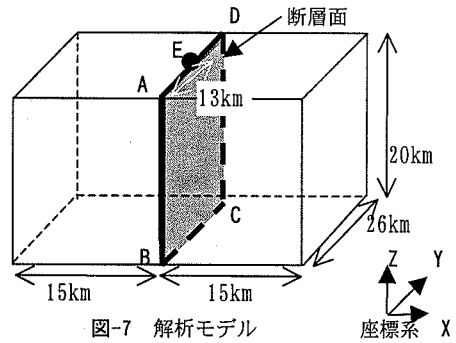


図-7 解析モデル

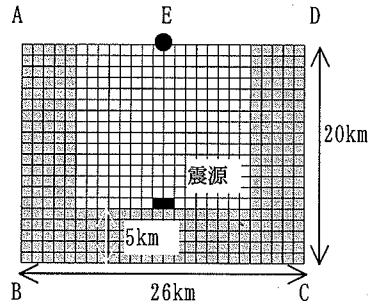


図-8 断層面

初期応力 τ_x を τ_y と等しくして解析開始とともに破壊が始まるように設定している。ここで破壊伝播速度とは、断層幅 $W=15$ km を、E 点に破壊が到達した時間で割ったものである。

b) 解析結果

まず応力降下量 $\Delta \tau=3.5$ MPa (35bar) のときの断層の初期応力 τ_x の分布を図-9に示すように2ケース設定した。まずケース1は3.5MPaで一様に分布させたものである。ケース2は応力降下量の平均が3.5MPaとなるようにしながら初期応力の分布を断層の深さに応じて変えたものである。震源に近い断層の深い部分は初期応力を高く設定して破壊しやすくしておき、震源から遠ざかるにつれて初期応力を小さく設定して破壊しにくくしている。この分布の仮定は地球物理の分野で考えられている分布に整合性を持たせたものである¹⁴⁾。この初期応力条件のもとに τ_y を図-9のように一様に分布させ、この τ_y の値を各ケースに対して変化させて $\Delta \tau_d$ の値を変化させて破壊時間がどのように変化するかを調べた。

その結果を図-10に示す。図(a)がケース1, 図(b)がケース2である。図の縦軸は破壊伝播速度 V_{rup} をせん断波速度 V_s で除して正規化して示している。

ケース1では $\Delta \tau_d$ を1.5MPaから0.1MPaずつ増加させていったところ1.9MPaまでは破壊が地表面にまで達したが、2.0MPaまで増加させると破壊が地表面まで達しなかった。

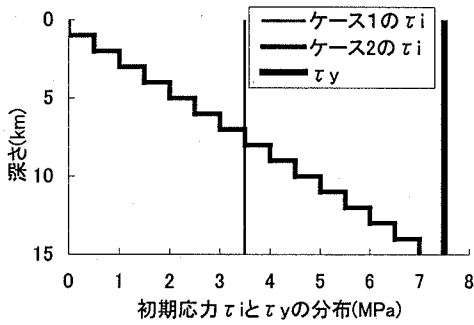
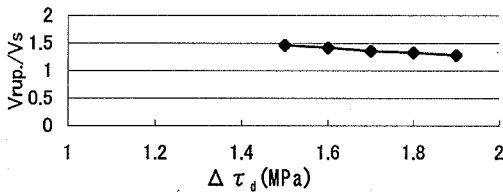
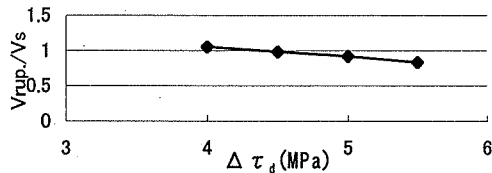


図-9 初期応力 τ_i と τ_y の分布



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-10 破壊伝播速度に及ぼす $\Delta \tau_d$ の影響

一方のケース 2 では図 (b) のように $\Delta \tau_d$ の値によって 1.1~0.8 の値となった。一般に $V_{rup.}/V_s$ は 0.9 程度といわれている。ケース 1 では $\Delta \tau_d$ がもっとも大きい 1.9MPa のときでも $V_{rup.}/V_s$ の値は 1.3 程度であるのに対してケース 2 では約 0.8 になっている。

これらの結果から、震源に近いジョイント要素の初期応力を大きくし、震源から離れるにしたがって小さくするケース 2 のように初期応力分布を仮定する必要があることが分かった。この結果より、以下の異なる $\Delta \tau$ に対してはケース 2 の分布のみについてシミュレーションを行った。

$\Delta \tau = 5.0, 10.0, 15.0$ MPa のときに $\Delta \tau_d$ を変化させて破壊伝播速度を調べた結果を図-11 に示す。

以上の結果より、 $V_{rup.}/V_s = 0.9$ となるときの $\Delta \tau_d$ と $\Delta \tau$ の関係を図-12 の●印で示した (ただし $\Delta \tau = 15.0$ MPa のときは $V_{rup.}/V_s = 1.0$)。そしてこれらの点を直線で結んだ。図-12 に示す関係を用いて入力された $\Delta \tau$ の値から $\Delta \tau_d$ のデフォルト値を決定した。

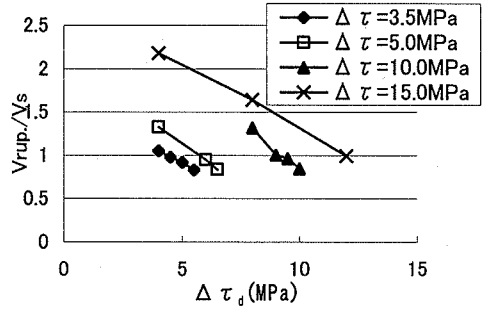


図-11 $V_{rup.}/V_s$ に及ぼす $\Delta \tau_d$ の影響

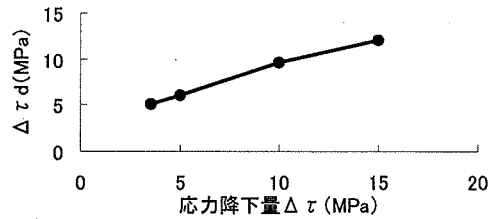


図-12 応力降下量 $\Delta \tau$ と $\Delta \tau_d$ の関係

なお本研究で求めたデフォルト値は、1000m というメッシュサイズで決定したものであり、メッシュサイズが大きくなると同じ $\Delta \tau_d$ 下では多少破壊伝播速度が遅くなることを確認している。したがって、この問題に関する詳しい検討は今後必要とされているが、異なるメッシュサイズのモデルを用いて例えば $\Delta \tau_d$ をデフォルト値よりも少し大きくするなどの工夫をすればよい。

(2) 3次元ジョイント要素のばね定数

ここでは、3次元ジョイント要素のせん断方向のばね定数 k_r, k_s の値を変えた時、破壊伝播速度と加速度、速度、変位波形とその最大値がどのように変化するかを調べるためにシミュレーションを行った。

解析に用いた3次元モデルの断層パラメータおよび解析モデルは(1)と同様である。断層面上の初期応力は応力降下量を 3.5MPa とし、図-9のケース2の分布とした。また(1)の結果から $\Delta \tau_d$ は 5.0MPa とした。

この条件の下に、 k_r, k_s の値を 10,000, 50,000, 100,000, 200,000, 300,000tf/m² と 5 通りに変化させてその違いを調べた。

a) 解析結果

図-13 に k_r, k_s の値と破壊伝播速度の関係を示す。この図より、 k_r, k_s の値が 10,000tf/m² の時は破壊伝播速度が 3.0km/s であるが、その他の場合

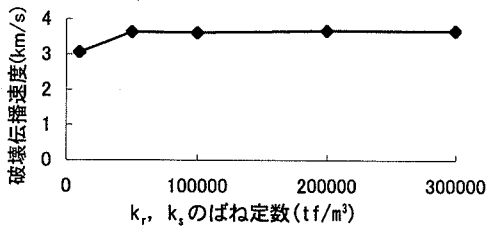
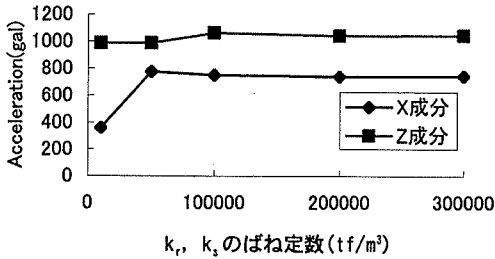
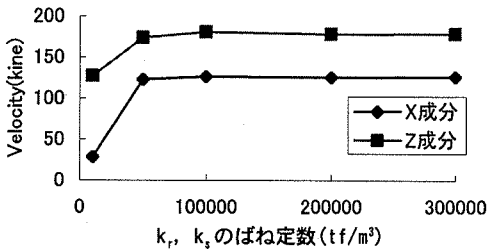


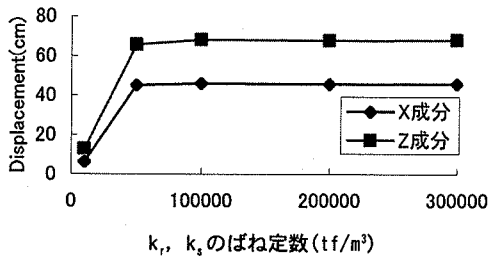
図-13 k_r, k_s の値と破壊伝播速度の関係



(a) 加速度波形の最大値



(b) 速度波形の最大値



(c) 変位波形の最大値

図-14 波形の最大値に及ぼすばね定数の影響

は 3.6km/s でほぼ一定の値となった。すなわち、 $V_{rup}/V_s=0.9$ である。

図-14 に E 点の加速度、速度、変位波形の最大値を示す。なおここでは Y 成分の波形の最大値はきわめて小さいので、X 成分と Z 成分のみを表示している。

これらの図より k_r, k_s が 50,000 tf/m³ 以下では最大値にはばらつきがあるが、100,000 tf/m³ 以上では、ほぼ一定となっている。

以上より、 k_r, k_s に関しては破壊伝播速度、波形の最大値の結果から 100,000 tf/m³ 以上の値をとれ

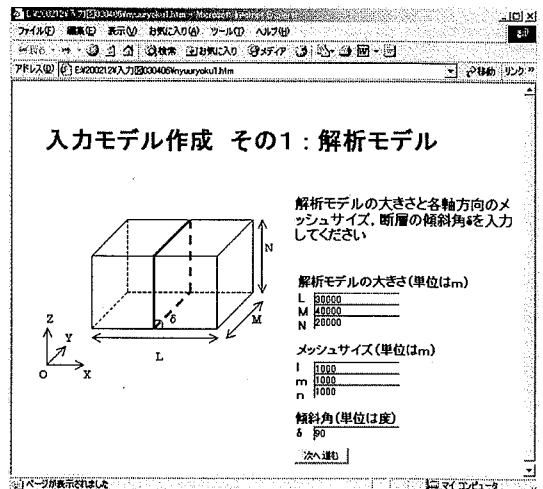


図-15 入力画面 (その1)

ばシミュレーション結果に影響を与えないことが分かる。よってデフォルト値は 100,000 tf/m³ とした。なお垂直方向のばね定数 k_r についても、 k_r, k_s 以上の値にすればよいことが過去の経験から分かっていることから、デフォルト値は 100,000 tf/m³ とする。

5. 入力モデル作成

現在本研究で用いる手法で、断層シミュレーションを行うためには、3つの入力ファイルを作成する必要がある。まず1つ目は解析モデルの節点、要素番号ファイル。2つ目は断層を表現するジョイント要素の初期応力ファイル。3つ目は境界の要素を示すファイルである。従来はプリプロセッサが無かったために、立方体のアイソパラメトリック要素からなる地殻と、正方形のジョイント要素からなる垂直な断層面で構成される最も単純な解析モデルを1つ作成するのにさえ、マニュアルを見ながら2-3時間以上かかっていた。そこで、入力モデル作成の時間短縮を計り、初めての利用者でも簡単にモデルが作成できる入力サブシステムを構築した。

作業はすべてブラウザ上で行うので利用者側には特別なソフトをインストールする必要は無い。モデル作成は、画面上の指示に従って入力すればよいので分かりやすく簡単である。これにより上記のような単純なモデルであれば10分程度で作成することができるようになった。また、斜めの断層面を有するモデルもほぼ同じ時間で作成することができる。

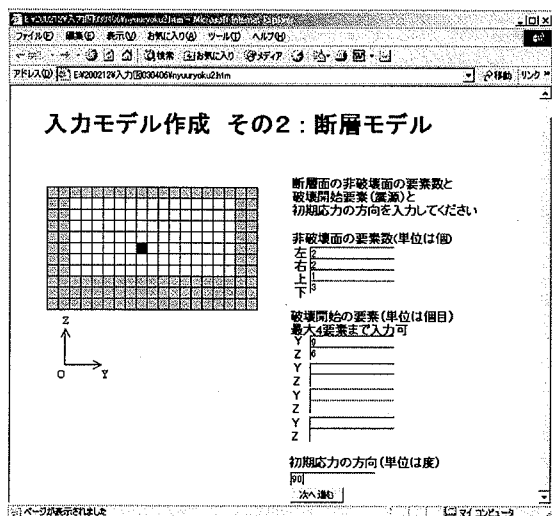


図-16 入力画面 (その2)

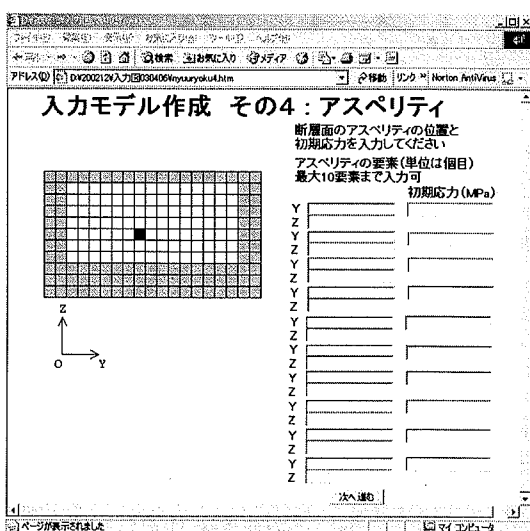


図-18 入力画面 (その4)

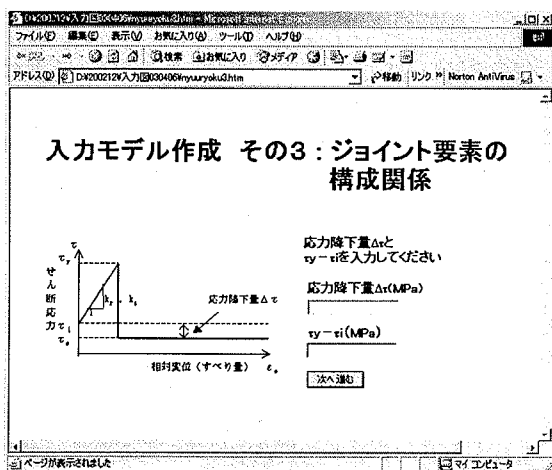


図-17 入力画面 (その3)

データ作成の流れは以下の通りである。

- Step1) まず最初に解析モデルの大きさと、メッシュサイズ、断層の傾斜角を設定する(図-15)。X, Y, Z 各軸方向の長さでメッシュサイズを入力することにより任意の大きさの平行六面体メッシュのモデルを作成することができる。さらに断層の傾斜角 θ を入力することにより、任意の角度の断層モデルを作成することができる。
- Step2) 断層面の非破壊面と、破壊開始点(震源)、破壊の方向を設定する(図-16)。断層面の上下左右に非破壊面の要素数を入力する。そして震源の位置を入力する。震源の位置は最大4要素まで入力することができる。さらに破壊の方向 ϵ を入力する。この ϵ は

- 0° ~ 360° の範囲の値を入れる。例えば図-15 に示すモデルで断層の左側が上盤側になるような dip slip には 90° を、左側が下盤側になるような dip slip には 270° を入力する。また、右横ずれの strike slip には 0°、左横ずれの strike slip とするには 180° を入力する。
- Step3) ジョイント要素の応力降下量 $\Delta \tau$ と、降伏応力 τ_y と初期応力 τ_i の差 $\tau_y - \tau_i$ を設定する(図-17)。なおこの $\tau_y - \tau_i$ の値は $\Delta \tau = 3.5 \sim 15.0 \text{ MPa}$ の間の値の時には図-12 のデフォルト値が表示される。これを変更するときにはその値を入力する。また $\Delta \tau$ が 3.5 MPa 以下あるいは 15.0 MPa 以上の時には、図-12 を参考にして適当な値を入力する。応力降下量は図-16 で示した角度に様の大きさで分布される。
- Step4) 地震動には断層面のアスペリティの存在が大きな影響を与えることが知られている。そこでアスペリティを設定する場合には、図-18 に示すように断層面上の任意の要素(10要素まで)にアスペリティを設定することができる。ここでは応力降下量の変化を残留応力は変化させず初期応力の変化で表すこととしている。そこでアスペリティを設定する場合は、設定したい要素の Y 方向と、Z 方向の位置(何個目か)と、その要素の初期応力を入力する。1要素も設定しない場合がデフォルトとなる。

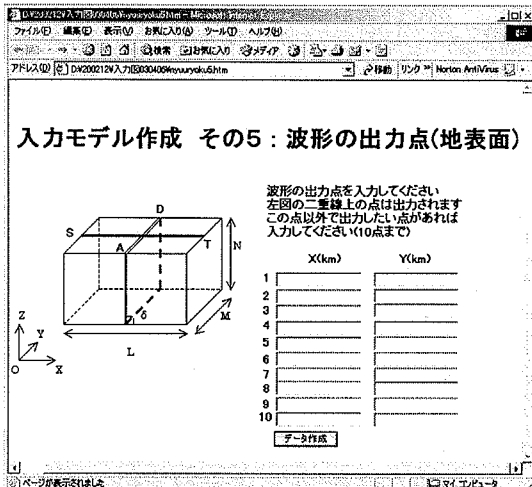


図-19 入力画面 (その5)

Step5) 波形を出力する節点を設定する (図-19)。
断層直上と断層面を中央で横切る図に示す2重線 (AD と ST) 上の節点はデフォルトで出力できるようになっている。これ以外の地表面の節点の波形を表示したい時には、任意の地表面の節点の X, Y 座標を入力することにより、デフォルト節点以外に最大 10 点まで指定することができる。

利用者はこれらの値を入力後、すべてを確認し、それでよければデータ作成ボタンをクリックすると入力ファイルが作成され自動的に計算が開始される。

なお入力モデルの作成では、利用者が分かりやすいように入力画面の左部分に図を付けた。また入力するデータの数を可能な限り少なくして、入力にかかる手間を減らすように工夫をした。

6. 結果表示

現在ポストプロセッサでは、図-20 のトップページにアクセスすることにより、以下の 4 種類のシミュレーション結果を表示することができる。

- ① 加速度, 速度, 変位の波形 (X, Y, Z 方向) (図-21)
 - ② 断層の破壊過程 (図-22)
 - ③ 食い違い量の分布 (図-23)
 - ④ 加速度, 速度, 変位波形の地表面の最大値の分布 (X, Y, Z, 全 (ベクトル和) 方向) (図-24)
- これらの結果表示はブラウザ上で見ることができる。図-22 から図-24 に示したように、なめらかに描画するのに、等高線描画のアルゴリズム¹⁵⁾を使用した。

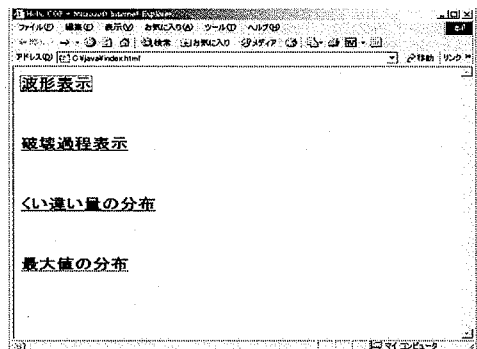


図-20 ポストプロセッサのトップページ

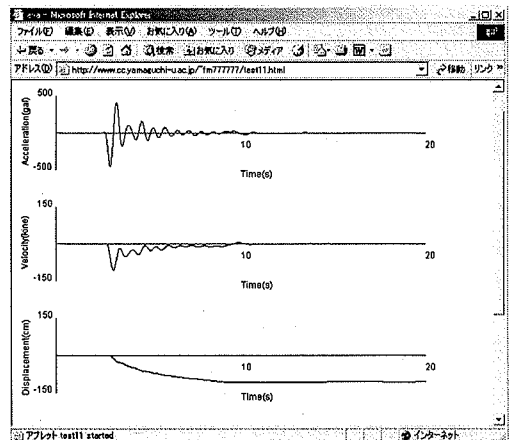


図-21 波形表示

(1) 波形表示

図-21 に波形表示画面の例を示す。まず表示したい出力点の節点番号と X, Y, Z どの成分を表示するかを入力し、表示ボタンを押すと加速度, 速度, 変位波形の3つが同時に表示される。

波形の最大値に対応して軸の目盛りの大きさが自動的に変わって表示するようにしてある。

(2) 断層の破壊過程

図-22 に断層の破壊過程を示す。等高線描画のアルゴリズムを用いて与えられた時間間隔ごとに破壊先端 (rupture front) が進行する様子を表示する。灰色部分は非破壊面である。なお表示の時間間隔の刻み幅は任意に利用者の変更できるようにしている。

(3) 食い違い量の分布

図-23 に断層面上の食い違い量 (dislocation) の分布を示す。これも等高線描画アルゴリズムを用いて、ここでは 0.5m 刻みで食い違い量の分布を示している。図-22 と同様に刻み幅を自由に変更することが可能である。

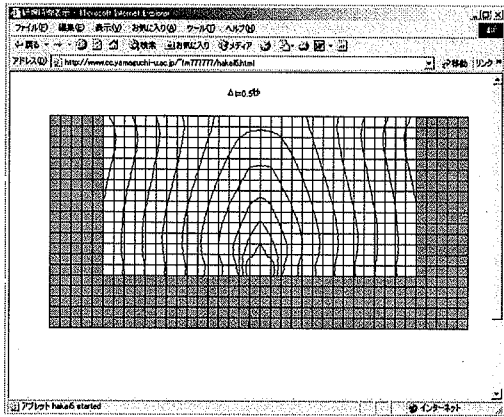


図-22 破壊過程表示

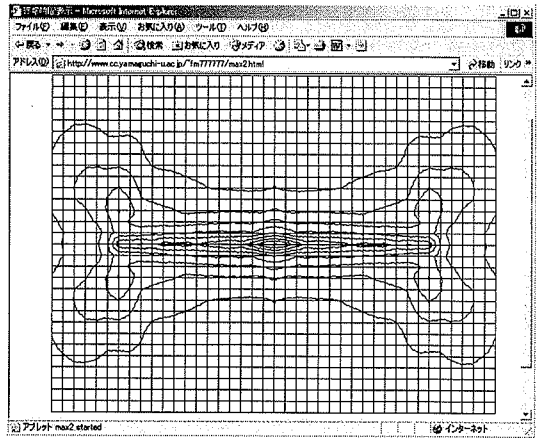


図-24 最大値の分布（加速度 X 成分）の例

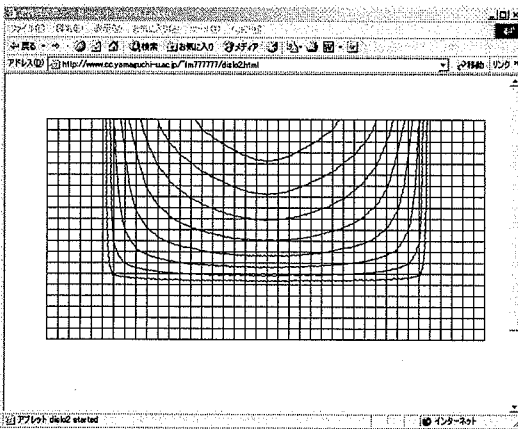


図-23 食い違い量の分布

7. まとめ

CGI と Java を用いてプリプロセッサ、ポストプロセッサを開発することによって、オンラインの断層破壊過程シミュレーションシステムを開発した。これによってインターネットを利用することにより、時間や場所、パソコンなどの使用機種などにかかわらずシミュレーションを行うことが可能となった。

また、モデルのデータ作成や結果の表示などを今までと比較して極めて短時間で簡単に行うことができるようになった。入力データ作成に関しては、数時間のオーダーから数十分のオーダーまでの短縮を可能とした。結果表示に関しては、数十分のオーダーから数秒のオーダーへと時間を短縮することができた。

さらに、利用者のパラメータ設定を容易にするためにデフォルト値を決定するためのパラメトリックスタディを行った。その結果、ジョイント要素のばね定数については k_r , k_s , k_t の 3 成分ともに $100,000 \text{ t/m}^3$ を用いることとした。また破壊伝播速度が S 波速度の約 0.9 倍となるような応力降下量 $\Delta \tau$ と $\Delta \tau_0$ の関係については、図-12 に示した関係が得られ、これをデフォルト値として用いることとした。

本研究によって、容易に解析を実行することが可能になったが、以下に述べるような点を今後改良していく必要がある。

①縦 30km、横 40km、深さ 20km でメッシュサイズ 1000m (自由度 82656) のモデルを 0.02 秒刻みで 10 秒間、500 ステップ計算するのに、現在のシステムでは約 3-4 時間かかる。利用者はモデル作成で送信ボタンを押したあと、いつ計算が終わったのかが現時点では分からないので、分かるような機能を追加

(4) 最大値の分布

地表面の加速度、速度、変位波形の最大値の分布（絶対値表示）を示す。図-24 は加速度波形 X 成分の最大値の分布の例である。50gal 刻みで表示されている。

X, Y, Z 成分の表示の変更を簡単にすることができ、また図-22 と同様に刻み幅を自由に変更することができる。

(5) 表示に要する時間

これまで (1) から (4) の結果をひとつ表示するのに、ベクトルプロセッサから自分の端末に計算結果をダウンロードした後、マイクロソフト社製の表計算ソフト Excel を使って数分から数十分の時間が必要であった。しかし今回作成したポストプロセッサを用いれば、これらの結果はいずれも数秒で表示することが可能となった。

する必要がある。

②波形表示は地表面すべての点で表示可能としている。また、それでは波形を表示するのに非常に時間がかかるし、地表面すべての点の波形を表示する必要性も低いと考える。そこで利用者にどの点の波形を表示するか入力画面で設定する必要があるが、その時の入力方法をできるだけ分かりやすくする必要はある。

③結果の表示が現在は4種類のみ限定されており、これだけでは利用者が本当に欲しい情報が得られない可能性がある。この点は今後実際に使用してもらって、改善していく必要がある。

④現在は、本システムを実際に運用する時には、山口大学の施設で計算を行っているため、無制限にアクセスを許可し自由に計算を行ってもらうことは不可能である。アクセスの制限をかけるか、または課金のシステムなどの認証システムを考慮する必要がある。

⑤さらに、シミュレーションの計算は山口大学メディア基盤センターのベクトル計算機を利用しているが、ネットワークにつながれた計算機を利用することにより並列処理が可能となれば、今まで以上に有限要素の自由度を増やすことができ、かつ計算時間の短縮が可能となる。これらのことについては引き続き開発していく予定である。

参考文献

- 1)1999年トルココジャエリ地震災害調査報告, 建築学会, 2001.
- 2)1999年台湾・集集地震災害調査報告および応急復旧技術資料第1編 災害調査報告, 建築学会, 2000.
- 3)道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 社団法人日本道路協会, pp.11, 2002.
- 4)杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書, 土木学会 地震工学委員会, pp.302, 2001.

5)A Workshop on Seismic Fault-induced Failures – Possible Remedies for Damage to Urban Facilities - , Edited by Konagai, K., 2001.

6)Toki, K. and Miura, F. : Simulation of a fault rupture mechanism by a two-dimensional finite element method, *J. Phys. Earth*, Vol.33, pp.485-511, 1985.

7)坪井利弘, 三浦房紀: 断層運動を模擬する岩石すべり破壊実験の有限要素解析, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp. 61-76, 1996.

8)水本学干, 三浦房紀, 坪井利弘: 3次元有限要素法による2000年鳥取県西部地震の断層運動シミュレーション, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.1, pp.377-380, 2001.

9)福島靖浩: 一週間でマスターする CGI for Windows, 毎日コミュニケーションズ, 2001.

10)福島靖浩: 一週間でマスターする Javaプログラミング for Windows, 毎日コミュニケーションズ, 2002.

11)三浦房紀, 岡重嘉泰, 沖中宏志: 3次元ジョイント要素を用いた破壊伝播の解析, 山口大学工学部研究報告, Vol.36, No.1, pp.81-87, 1985.

12) Ohnaka, M., Kuwahara, Y. and Yamamoto, K. : Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagating slip zone during stick-slip shear failure, *Tectonophysics*, 144, pp. 109-125, 1985.

13)三浦房紀, 沖中宏志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集, No.404/I-11, pp. 395-404, 1989.

14)坪井利弘, 三浦房紀: 震源特性を考慮したFEMによる地震波の生成シミュレーション, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 117-122, 1998.

15)http://hp.vector.co.jp/authors/VA019223/Tips/Alg_02.html

(2003.6.2受付)

DEVELOPMENT OF ON-LINE 3D-FEM FAULT RUPTURE SIMULATOR

Takayuki MIZUMOTO, Fusanori MIURA and Kouichi TAKIMOTO

We have proposed a simulation method of fault rupture process and generation of seismic waves at the same time using a three dimensional nonlinear finite element method. However, since there were neither pre-processor nor post-processor, long time and special knowledge were required to create input dataset in order to analyze a fault rupture process. To solve this inconvenience, we developed input and output processing systems using on-line CGI and Java. To achieve the purpose, we performed parametric study to determine default values for the constitutive relationship of the 3-D joint element. Thereby, shortening of the time taken at the time of data creation of an analysis model was realized and people without special knowledge also can create a model easily, and perform a simulation.