

ソリッド要素でモデル化した超高層鋼構造骨組の地震応答解析

南海トラフ地震模擬地震動による2分以上の揺れの解析

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF SUPER-HIGHRISE STEEL BUILDING FRAME
MODELED USING SOLID ELEMENTS

Analysis under simulated ground motions of Great Nankai Trough Earthquakes that continue more than two minutes

宮村 倫司^{*1}, 大崎 純^{*2}, 梶原 浩一^{*3}

Tomoshi MIYAMURA, Makoto OHSAKI and Koichi KAJIWARA

A high fidelity solid element mesh of a 31-story super-highrise building frame is generated. A concept of a mesh generator for steel frames using a database of solid element component meshes is proposed. The seismic response analysis is conducted for the 31-story super-highrise frame subjected to a simulated ground motion of great Nankai Trough earthquakes that continues more than two minutes. The analysis is performed on K computer using a parallel finite element structural analysis system, E-Simulator. Both local behaviors such as spreads of equivalent plastic strain and global behaviors such as plastic deformation of the entire structure are simulated.

Keywords : Super-highrise building frame, FEM, Seismic response analysis, Parallel computing, Mesh generation, Great Nankai Trough earthquakes

超高層骨組, 有限要素法, 地震応答解析, 並列計算, メッシュ生成, 南海トラフ地震

1. はじめに

防災科学技術研究所に設置された E-ディフェンス¹⁾は, 世界最大の振動台(震動台)であり, 実物大の建物をそのまま揺らすことにより, その性状を調査することができる。しかし, 実験される建物の挙動として得られるものは, 映像や数百点の測定点における物理量のような限られた情報であり, 地震時に起こり得る全ての現象を解明できるわけではない。また, 実験のコストも非常に高い。

そこで, E-ディフェンスの運用と並行してシミュレーションソフトウェアである数値震動台(E-Simulator)を開発している²⁾。その特徴は構造物をソリッド要素による詳細な有限要素メッシュと材料構成則でモデル化することである。それによりコンポーネントレベルの実験を行うことなく, 材料試験により材料定数を同定するだけで, 構造物の全体的および局所的な挙動をシミュレートできる。このシミュレーションの目的は, 1)E-ディフェンス実験の補完すること, 2)将来的には E-ディフェンス実験の一部を代替することである。E-ディフェンス実験との比較により, E-Simulator による解析の妥当性の確認(validation)ができる³⁾。一方で, 解析ソフトウェアとしての検証(verification)も必要である。E-Simulator の検証を目的として, 他の数値解析手法による結果との比較⁴⁾, 要素分割パターンと要素分割数が解の精度におよぼす影響の調査⁵⁾を行っている。解析コードの V&V (Verification & Validation) を十分に行った上で, E-デ

ィフェンス実験の結果を良好に再現できれば, 実験における測定点以外の点での物理量をシミュレーション結果から補完できる。さらに, シミュレーションで実験を代替することへの展望も開ける。

ソリッド要素により複雑な形状を表現するには多数の要素が必要であり, 解析モデルの自由度が増大する。しかし, 近年の並列計算機の進歩と領域分割法の発展により, 大規模並列有限要素法が実用化され, 大規模なメッシュによる解析が可能となった。国内でもいくつかの研究プロジェクトにおいて領域分割法を基盤とした並列有限要素解析コードが開発され⁶⁾⁻¹¹⁾, 数千万から数十億自由度規模のメッシュによる非線形動解析が可能となっている。また, 商用の並列有限要素解析ソフトウェアも開発されている^{12), 13)}。

以上のような現状をふまえて, E-Simulator は建築構造物および土木構造物向けの材料モデルを備えた汎用並列有限要素解析ソフトウェアとして開発されている。これまでの E-Simulator による建築構造物の解析例を文献 14)にまとめている。E-Simulator は陰的な時間積分法(陰解法)に基づく解析コードである。自由度数分の未知数に対する連立一次方程式の求解が計算時間の大半を占めるため, この部分を並列化して高速化することが重要である。一方, 近年, 中心差分法等により運動方程式を解く手法(陽解法)に基づく有限要素解析ソフトウェアが発展しており, 建築構造分野においても用いられている¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。陽解法では連立一次方程式の求解が不要であるため

^{*1} 日本大学工学部情報工学科 准教授・博士(工学)
(防災科学技術研究所 客員研究員)

^{*2} 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

^{*3} 国立研究開発法人防災科学技術研究所地震減災実験研究部門・
兵庫耐震工学研究センター 部門長・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Computer Science, College of Engineering, Nihon University,
Dr.Eng. (Visiting Researcher, NIED)

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.
Director, E-Defense, National Research Institute for Earth Science and Disaster
Resilience (NIED), Dr.Eng.

並列化が容易であり、大規模並列解析にも適している。陽解法では陰解法に比べて1時間ステップの計算コストが小さいものの、数値的な不安定性を回避するために時間増分を小さくする必要がある。そのため、陽解法は衝撃問題や波動伝播問題に向いている。しかし、最近では必ずしも時間方向の高解像度が要求されない問題にも陽解法が使われている。陽解法では釣り合い式(運動方程式)を満たすための収束計算を行わないため、解が釣り合い状態にある保証がない。これに対して陰解法では Newton-Raphson 法により釣り合い状態にある解を求められる。また、陽解法では質量行列の対角化が必要であり近似的な計算となる。陽解法と陰解法にはそれぞれに特徴があるため、解析結果を比較して相互に検証すべきである。

著者等は、ソリッド要素による詳細かつ大規模なメッシュを用いた象徴的な例題として、超高層建物の地震応答解析を実施している。2007 年より 31 層の超高層鋼構造骨組(以下、超高層骨組)のメッシュ生成を始めた。しかし、六面体ソリッド要素によるメッシュ生成には1年以上の時間がかかり、まず1層分のメッシュによる解析を行った¹⁸⁾。翌年の2008年、5層分のメッシュが完成し、地震応答解析を行った¹⁹⁾。さらに、6層以上を質点と剛体梁でモデル化した5層モデルによる地震応答解析を行った²⁰⁾。31層分のメッシュが完成したのは2009年であり、東京大学のスーパーコンピュータ T2K を用いて兵庫県南部地震における JR 鷹取波を入力した解析を行った。長時間の計算となり JR 鷹取波の主要な10秒間に対する計算が終了したのは2010年であった。この結果は E-ディフェンスにおける4層鋼構造骨組の実大崩壊実験の再現解析の結果と共に文献 21) で報告している。4層鋼構造骨組については、解析コードやモデルを改良して再度解析をしており、その結果は文献 5) で報告している。

一方、文献 6) ではこの超高層骨組の解析結果と、梁要素で塑性ヒンジを順応的に考慮できる骨組解析手法である ASI-Gauss 法による解析結果を比較しており、両者のグローバルな応答は良好に対応することを示した。これにより梁要素をベースとしたマクロモデルの一種である ASI-Gauss 法とソリッド要素による詳細解析を相互に検証できた。この文献では4層鋼構造骨組の実大崩壊実験の再現解析についても二つの手法による結果を比較している。この骨組では、柱脚の局部座屈により骨組が崩壊するため、局部座屈を直接的に表現できない骨組解析に対して詳細解析には優位性がある。これに対して、超高層骨組の部材断面の幅厚比は小さいため、通常は局部座屈が生じることはほとんどない。しかし、ソリッド要素モデルでは、部材の一部における延性破断等の破壊現象を直接的に表現できることが、骨組モデルにはない特長となる。さらに、スーパーコンピュータ「京」(以下、「京」)²²⁾の戦略分野3プロジェクトにおいて、周辺の地盤もソリッド要素でモデル化して超高層骨組のメッシュに追加したモデルにより、地盤と建物の相互作用を直接的に考慮した地震応答解析を行った^{23), 24)}。

建築構造物全体に対するソリッド要素による数千万自由度以上の大規模メッシュを用いた陰的有限要素法に基づく地震応答解析は、著者等の研究グループ以外には行われていない。馬淵等²⁵⁾は超高層骨組と地盤をソリッド要素で約150万自由度のメッシュとしてモデル化し、陰的な並列線形地震応答解析を行った。一方、Mizushima 等¹⁵⁾はシェル要素により鋼構造物を詳細にモデル化し、地球シミュレータ 2 上に移植された陽解法に基づく有限要素解析コードにより

崩壊解析を行った。水島等¹⁶⁾は E-ディフェンスで行われた実大鋼構造3層骨組実験のシミュレーションを、詳細なシェル要素による解析モデルに部材の破断を考慮して行った。金井等¹⁷⁾は6層 RC 骨組と地盤の詳細モデルによる地震応答解析を、地球シミュレータ 2 上に移植された陽解法に基づく有限要素解析コードにより行った。

本論文では、最初に超高層骨組に対するソリッド要素によるメッシュ生成について述べ、解析、ポスト処理を含む一連の解析過程を示す。その中で、特に六面体要素によるメッシュ生成のコストが高く、数値震動台の実用化に向けてこの部分の効率化が不可欠であることから、一連の研究におけるメッシュ生成の経験に基づくメッシュ生成手法を提案する。次に、超高層骨組をソリッド要素によりモデル化することの有効性を示す解析例として、長周期かつ長時間の地震動である南海トラフ地震模擬地震波²⁶⁾の加速度時刻歴を入力した地震応答解析²⁷⁾を示す。計算には「京」を用いる。

近い将来に発生が想定される長周期地震に対する超高層建物の挙動解明と、応答低減は極めて重要な課題であり、実験あるいは数値解析によるいくつかの研究が発表されている。荒木等²⁸⁾は、長周期地震によって、超高層骨組の下層部に弓型の変形が発生する可能性があることを数値解析によって示した。佐藤等²⁹⁾は、E-ディフェンスにおける実験により、超高層骨組の下層から中層部にダンパーを設置することにより、それらの層の応答を大幅に低減できることを示した。しかし、長周期地震動を長時間受ける超高層建物の応答に関する研究は多くは存在しない。本研究では2分以上の揺れの下で、接合部付近で相当塑性ひずみが大きく進展する様子を可視化する。

以下、第2章では、本研究で解析する超高層骨組の構造概要とソリッド要素による超高層骨組のメッシュ作成について述べる。第3章では、E-Simulator の開発目的とプリポスト処理、解析コードの概要を示す。鋼構造骨組の六面体ソリッド要素によるメッシュ生成手法も提案する。第4章では、南海トラフ地震模擬地震波の加速度履歴を入力した超高層骨組の「京」による地震応答解析について述べる。第5章に結論を述べる。

2. 超高層鋼構造骨組モデルの作成

2.1 超高層鋼構造骨組の構造概要

解析対象として事務所ビルを想定し、地上の層数は31、軒高は129.7m、平面形状は50.4m×36.0mの長方形とする。この建物は実在するものではなく、本研究のために試設計したものである。Fig. 1(a)に代表的な通りの軸組図を、Fig. 1(b)に基準階の伏図とコア部分を拡大した伏図を示す。架構形式は、センターコア形式のS造であり、コアには制振ブレースを配置している。モデルを簡略化するために地下部は省略し、典型的な地下部の剛性を1階床レベルに配置した弾性基礎梁で表す。多質点系モデルによる予備応答解析に基づいて構造設計をしている。当初の設計では、全体の曲げ変形を抑制するため、16層にペルトトラス、最上層にハットトラスを配置した。しかし、解析モデルではこれらを省略している。各層のコアに配置した制振ブレースは、下層部については初期剛性に層剛性の約40%を負担するように設計している。この制振ブレースは、文献 21) の解析では1軸の弾塑性構成則を設定したトラス要素によりモデル化した。しかし、文献 23), 24) の解析および本論文の解析では制振ブレースを省略しており、文献 21) のブレース付き解析モデルよりも剛性

と靱性が小さく設計基準を満たさないモデルとなる。

2.2 六面体ソリッド要素によるメッシュ生成

最初に、2次元CADデータを基に、3次元CAD（ソリッドモデラー）であるI-DEAS³⁰⁾を用いて3次元CADモデルを作成する。Fig. 2に3次元CADモデルを示す（基礎梁は後で追加したため、この図には表示されていない）。

薄い板材で構成される鋼構造骨組をソリッド要素でモデル化するため、8節点の六面体1次ソリッド要素を用いる。任意形状に対する六面体要素による自動メッシュ生成は困難であるため、I-DEASを利用して手動でメッシュを作成した。直方体形状の部分のメッシュ生成は、Mapped Mesh生成機能により半自動で行い、ガセットプレート等の直方体でない部品のメッシュについては、板表面の2次元メッシュを手動で作成し、それを板厚方向に押し出すことで生成する（Fig. 3(a)）。H形鋼のウェブ、フランジ等の要素分割は、板厚方向に少なくとも二層とする。柱梁接合部のダイヤフラム、制振ブレースを接続するガセットプレート、その取り付け部分を補強するダイヤフラムとスチフナについても同様である。厚さの異なるフランジやダイヤフラムをつき合わせている部分では、層方向の要素分割が変化する領域を設ける（Fig. 3(b)の丸の部分）。板の面内方向については、接合部付近で要素寸法が70 mm程度になるように要素分割し、接合部から離れた部分では粗い分割とする（Fig. 3(a)）。スラブは、凹凸のない平板としてソリッド要素で分割する（Fig. 3(c)）。板厚方向の要素分割数は2とする。スタッドは省略し、スラブ下面の

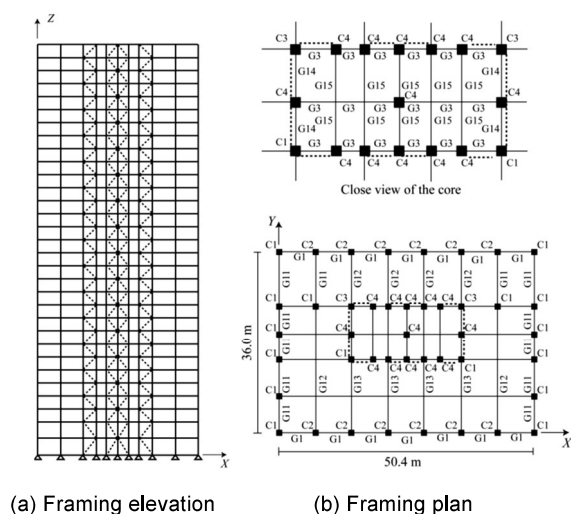


Fig.1 31-story steel building frame

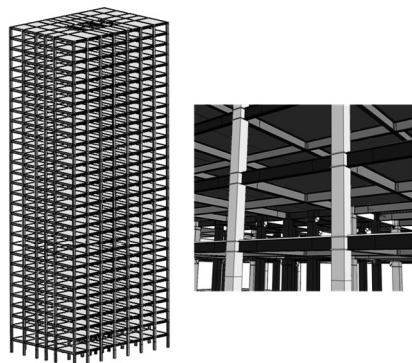


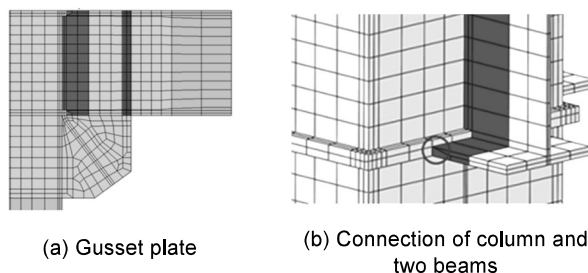
Fig.2 CAD model of 31-story steel building frame

節点と梁フランジ上面の節点を共有することで一体としたメッシュとする。スラブの鉄筋は省略する。以下では複数のメッシュで共有される節点を共有節点と呼ぶ。部材や接合部等の部品毎に作ったメッシュは、表面のメッシュ形状を整合させることで共有節点とし、可能な限り一体のメッシュとする。しかし、接合面で表面のメッシュ形状をどうしても整合させることができないときには、複数の節点自由度に対して1次多項式で表される拘束条件である多点拘束条件（Multi-Point Constraint, MPC）により接合する。

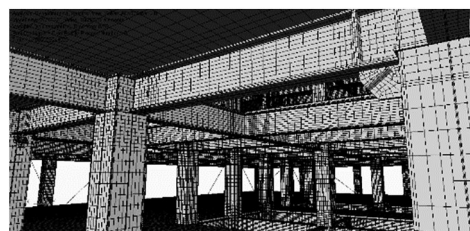
メッシュの規模は、要素数が15,598,662個、節点数が24,220,688個（約7,266万自由度）、MPCにより固着接続された面のスレーブ節点数が2,832,402個となる。固着は、片方の面の六面体要素表面の四角形（マスターセグメント）上の1点に他方の面の節点（スレーブ節点）を拘束するという条件で表す。すなわち、固着面上のスレーブ節点の数がMPCの数となる。MPC数が多くなると線形ソルバーの計算に時間がかかるため、なるべく節点を共有化することによりMPC数を減らしている。とはいえ、MPCは依然として多いため、MPCがない同規模の他の問題と比べると、計算時間は長くなる。

3次元CADモデルの生成とメッシュ生成は前述のように自動化できなかったため、専門家が作業しても1層分で1-2週間程度であった。各層の部材の肉厚の違い等を考慮すると層のメッシュは16種類になる。作業工数を減らすために10層から31層については同一のメッシュとして種類を減らすことで簡略化した。六面体ソリッド要素による鋼構造骨組のメッシュ生成は初めての試みであり、当初は試行錯誤や、試解析を行うことで判明した不具合による作り直しもあった。この試解析自体も初めての試みであり試行錯誤を繰り返し、同時に解析ソルバーの改良も行った、そのため、第1章にも述べたように、31層分のメッシュの完成までには1年以上の時間がかかった。

完成したメッシュには偏平な六面体要素も多く含まれている。偏平な要素により反復型線形ソルバーの収束性が悪化して計算時間が長くなるものの、要素が偏平であるために解析精度が低下することはない⁷⁾。また、部材断面の幅厚比が小さい超高層骨組では局部座屈は生じないので、本研究では非適合モード要素は使用していない。



(a) Gusset plate (b) Connection of column and two beams



(c) View of a floor

Fig.3 Mesh of 31-story steel building frame

2.3 材料定数と境界条件

鋼材の構成則には Mises の降伏条件とバイリニア型硬化曲線による移動硬化則を用いる。鋼材は柱が BCP325、梁が SN490B であり、ヤング率、ポアソン比、降伏応力、硬化係数、密度はそれぞれ 205 GPa, 0.3, 330 MPa, 205 MPa, $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とする。鉄筋コンクリートのスラブは弾性と仮定し、ヤング率、ポアソン比はそれぞれ 22.7 GPa, 0.2 とする。鉄筋も含めたスラブの密度は $2.30 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とし、これを積載荷重に相当する密度で割り増して $5.28 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とする。自重は重力加速度による物体力を与えて静解析を行うことにより考慮する。自重解析の結果を地震応答解析の初期条件とする。

1 層の各柱の底面に高い剛性を持つ板を表すメッシュを取り付け、その板の中心がピン支持となるように境界条件を与える。ピン支持された底部に地震波の加速度時刻歴を時間依存の強制加速度として与える。本研究で用いる地震波については 4.3 節に示す。

3. 数値震動台 (E-Simulator) の開発

3.1 開発目的と概要

数値震動台 (E-Simulator) の開発目的は、十分な解像度を持つメッシュを用いて建築構造物や土木構造物の詳細なシミュレーションを行うことで、構造物の局所的な塑性化や損傷、破壊等の現象と、構造物の崩壊のような全体的な挙動を同時に解析することである。構造物の形状を正しく表し、局所的な現象を再現可能な詳細度で構造物全体をモデル化すると、数千万から数億自由度のメッシュが必要となる。例えば、2.2 節に示した 31 層超高層骨組のメッシュは、接合部において座屈や応力集中を解析できる最小限の要素分割として、それ以外の部分では要素分割を粗くしたにもかかわらず、その自由度は、7000 万を超えている。従って、高解像度の解析モデルで建築構造物や土木構造物の詳細なシミュレーションを行うためには、並列有限要素解析の技術が必要となる。

3.2 並列有限要素解析ソルバー

E-Simulator は領域分割法に基づく汎用並列有限要素解析コード ADVENTURECluster (以下, ADVCL) ¹³⁾ に拡張機能として建築構造物や土木構造物に対する非弾性構成式や破壊・損傷モデルを開発して組み込んだものである。ADVCL には、連立一次方程式の求解手法として、Coarse Grid Conjugate Gradient (CGCG) 法 ³¹⁾ が実装されている。本手法は領域分割法に基づく反復型線形ソルバーの前処理手法である、部分領域の剛体運動により定義された空間を用いて反復毎に解を修正することで良好な収束性を得ている。解析領域は Yagawa and Shioya³²⁾ が提案した階層型領域分割法に基づいてオーバーラップしない部分領域に分割する。解析領域を並列プロセス数と同数のパート (Part) に分割し、各パートをさらに細かい部分領域 (Subdomain) に分割する。パートを単位として MPI による分散並列化を、部分領域を単位として OpenMP によるスレッド並列化をしている。このような並列実装方法をハイブリッド並列化と呼ぶ。

動解析の陰的な時間積分法としては Hilbert-Hughes-Taylor 法 (α 法) ³³⁾ を用いている。また、複数の節点自由度に対する MPC を付加する機能がある。この機能は共役射影勾配法をベースとした手法に基づいて実装されている。この手法は著者のひとり ³⁴⁾ が Balancing Domain Decomposition (BDD) 法に対して提案した手法と類似の方法である。また、MPC を用いて定義された剛体梁要素が用意されてお

り、これを組み合わせて任意形状の剛体を定義することもできる。第 2 章に述べたように、MPC は複雑なメッシュを作成する上で欠かせないものである。

3.3 部品メッシュの組み合わせによるメッシュ生成

四面体要素による自動メッシュ生成技術は確立されている。しかし、偏平な四面体要素を使用すると解析精度が悪くなる。薄肉部材を多用した鋼構造骨組に対して偏平でない四面体要素でメッシュ生成をすると、要素寸法が板厚で決まりメッシュの自由度が非常に大きくなる。例えば、第 2 章に示した超高層骨組に対して、板材の板厚方向の分割を 2 層以上として四面体要素でメッシュを生成した場合、見積りでは 10 億自由度をはるかに超える規模となるため現実的な選択肢ではない。

一方、第 2 章で述べたように、六面体要素では偏平な要素も許容できるため、鋼構造骨組のメッシュに適している。しかし、自動メッシュ生成が困難で手作業が必要なことから、非常に多くの時間がかかる。したがって、E-Simulator を実用化するためには、建築構造に特化した、六面体要素によるメッシュ生成技術の開発と実装が不可欠である。本研究における超高層骨組のメッシュ生成の過程で、鋼構造骨組における典型的な部材や接合部に対するメッシュを多く作成している。部材や接合部の部品のメッシュ (部品メッシュ) ができてしまえば、それらを接合することで任意の鋼構造骨組のメッシュを容易に作成できる。そこで、部品メッシュを活用した鋼構造骨組向けのプリ処理システムを構築する。

最初に超高層骨組のメッシュ生成の過程で作られた典型的ないくつかの部品メッシュについて分析する。Figs. 4 (a), (b) にはそれぞれ H 形鋼部材と角形鋼管部材の部品メッシュを示す。六面体要素によるメッシュは、断面を長方形により分割してから軸方向に押し出すことにより、比較的容易に作成できる。Fig. 4 (c) には角形鋼管柱と H 形鋼梁の接合部の部品メッシュを示す。接続する部材の部品メッシュとの接合を容易にするため、接続する部材の端部も含めたメッシュとしている。H 形鋼のウェブの分割パターンと角形鋼管の側面中央の分割パターンと一致させているため、角形鋼管端部のメッシュにも H 形鋼のウェブの分割の影響が現れて一様な分割となっていない。Fig. 4 (d) は H 形鋼が交差する接合部の部品メッシュである。交差する 2 本の H 形鋼の寸法が異なる場合には、Fig. 4 (c) のケースと同様な工夫が必要である。

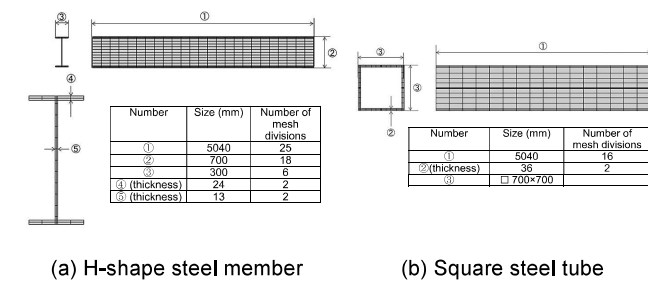
以上のような部品メッシュを活用したプリ処理システムを構築するために、典型的な接合部、部材等の部品メッシュのデータベースを予め用意する。Figs. 3 (a), (b) のようにガセットプレートが取り付けられたり、異なる厚さの板が接続されるようなケースについても、典型的な形状の部品メッシュとして用意しておく。ただし、位相的には同じ形状であっても、板厚や部材の幅等の寸法が異なる形状は多数存在するため、それら全てを予め部品メッシュとして作成しておくのは困難である。そこで、代表的ないくつかの寸法に対する部品メッシュを用意しておき、寸法が異なるケースには、メッシュ分割の位相はそのままにして寸法を変更することで対応する。

Figs. 4 (c), (d) に示すような接合部の部品メッシュの部材端部の断面の要素分割と、部材単体の部品メッシュの断面の要素分割を同一にできれば、共有節点として接合できる。接合部における H 形鋼梁の要素分割の影響を受けた角形鋼管端部のような場合 (Fig. 4 (c))

に対応するために、同様な要素分割の部材単体の部品メッシュも用意しておく。もしも、接合する断面の要素分割と同一の分割の部品メッシュが用意されていない場合には MPC を使って接合する。Fig. 5 に超高層骨組のメッシュ生成の過程で作られた Fig. 4 の部品メッシュを利用し、それらを接合して作成した骨組構造のメッシュの例を示す。今後、部品メッシュのデータベースを充実させた上で、部品メッシュの選択や接合の作業が行えるような GUI (Graphical User Interface) を備えたソフトウェアを開発すれば、任意の鋼構造骨組の六面体ソリッド要素によるメッシュを簡単に作成できる。

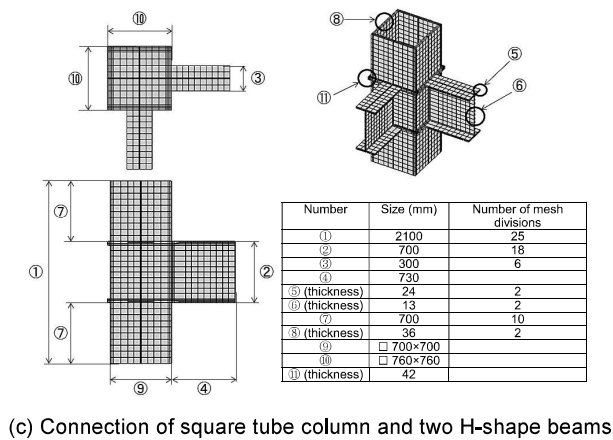
3.4 ポスト処理

「京」のようなスーパーコンピュータ (スパコン) を用いて大規模解析を行う場合、出力されるデータのサイズは巨大であり、従来のように解析結果を可視化用のコンピュータにダウンロードしてから、変形図や応力コンタ図の作成や様々な物理量の時刻歴の二次元グラフの作成といったポスト処理を行うことは困難である。そこで、

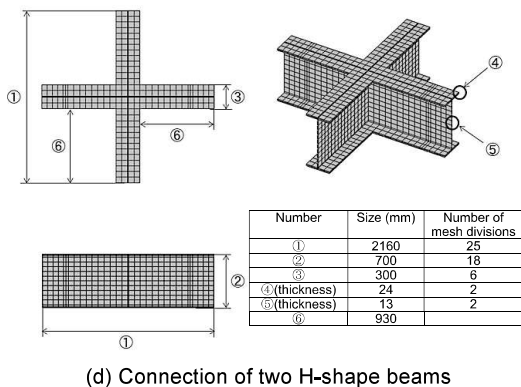


(a) H-shape steel member

(b) Square steel tube



(c) Connection of square tube column and two H-shape beams



(d) Connection of two H-shape beams

Fig.4 Component meshes of steel building frame



Fig.5 Mesh of a frame made by assembling component meshes

ポスト処理もスパコン上で行う手法が提案されており^{35), 36)}, 本研究においても用いている。ここでは、スパコンで出力されたデータを読み込んで、時刻歴データの抽出と、変形、相当応力コンタ、相当塑性ひずみコンタのような図を生成するポスト処理ソフトを開発し、それを用いてポスト処理をする。

ポスト処理ソフトでは、節点物理量に対する時刻歴データについては、文献 9) で提案した方法で出力する。すなわち、予め時刻歴を観察する節点を抽出しておき、その節点情報を領域分割ソフト (domain decomposer) により各部分領域における情報に変換する。その情報を基にして物理量の時刻歴データを CSV 形式で出力する。計算結果の可視化には、和田等³⁵⁾による高精細可視化ライブラリ VSCG を用いて荻野³⁶⁾が開発した並列オフラインレンダリングソフトを用いる。このソフトに節点物理量の時刻歴データ出力機能を追加し、高精細画像と時刻歴データを生成する。

4. スーパーコンピュータ「京」による南海トラフ地震模擬地震動に対する地震応答シミュレーション

4.1 概要

ここでは長周期地震動となることが予想される南海トラフ地震の模擬地震動を第 2 章に示した超高層骨組モデルに入力したときの地震応答解析を「京」により行う。制振ブレース無しとして剛性と靱性を低くしたモデルを用いる。南海トラフ地震の 2 分以上の地震動を入力した地震応答解析を実施する。2011 年に稼働開始した「京」²²⁾は、運用開始当時は世界最速のコンピュータであり、計算ノード数は 82944 個、各ノードあたりのコア数は 8 個 (合計 705024 個) である。1 ノードあたりのメモリ容量は 16GB (合計 1.27PB) である。

ポスト処理も 3.4 節に述べたように「京」上で行った。ディスク資源に限りがあるため、解析コードからは各時間ステップにおいて予め指定した物理量のみを出力し、予め描画するコンタの種類や視点、時刻歴データを生成する物理量と出力する節点を指定した上でポスト処理ソフトを実行した。ディスク資源の制約から、ポスト処理ソフトを何回か実行した後に解析コードの出力データは消去した。

4.2 既往の文献における固有値解析結果について

文献 20) には超高層骨組モデルの制振ブレースの剛性をコア部分のヤング率の割り増しによって表したモデルに対する固有値解析結果を示した。文献 21) には制振ブレースを取り付けたモデルの固有値解析により求められた 6 個のモードの固有周期のみを示した。この解析モデルの各モードの固有周期は、文献 20) の解析モデルの固有周期よりも長く、文献 20) の解析モデルではヤング率の割り増しによって剛性が過大に評価されていたことがわかる。文献 21) の制振ブレース付き解析モデルに対して計算された 6 個の固有モードのうち 3 個の固有モードを文献 37), 38) に示した。文献 14) にも制振ブ

レース付きモデルの固有周期が示されているものの、固有モードとして誤って文献 20)の解析モデルに対する結果を引用しており、さらに、第3固有モードの結果として誤って第4固有モードの結果が示されている。本研究に用いる制振ブレースを省略した解析モデルについては、計算資源の制約から固有値解析を行っていない。

4.3 南海トラフ地震模擬地震動

本研究で用いる南海トラフ地震模擬地震波²⁶⁾は、防災科学技術研究所地震研究グループにより作成された大阪波の加速度履歴である。南海トラフ地震の震源域は南海、東南海、想定東海、四国沖の4連動となっている。500秒の模擬地震波の中のFig. 6に示すように150秒から275秒までの125秒間を入力として解析を行う。以下では、時刻150秒を時刻0とする。骨組の底面に3方向の加速度を強制加速度として与えている。南北(NS)成分を平面の長辺(X)方向に、東西(EW)成分を短辺(Y)方向に、上下(UD)成分を高さ(Z)方向に入力する。X, Y, Z方向については、Fig. 1に示した。Fig. 7に切り出した区間に対する加速度応答スペクトルを示す。

4.4 計算条件

計算には「京」の256ノード(2048コア)を用いる。MPIによる並列プロセス数は使用ノード数に一致させ、ノード内ではOpenMPにより8コアに対して8スレッドを割り当てたハイブリッド並列により計算を実行する。

Updated Lagrangianに基づく大変形大ひずみ弾塑性解析を行う。最初に自重を静解析により与え、その後に動的な地震応答解析を行う。減衰は制振ブレース付きモデルの1次固有モードに対して減衰定数2%とした剛性比例型減衰とする。長周期地震動による超高層骨組の低次モードの揺れを捉えることを目的として、時間増分の最大値を0.1秒とした。Newton-Raphson法が収束しない場合には自動的に増分を小さくする。そのため125秒間の解析の時間ステップ数は合計で1900となった。

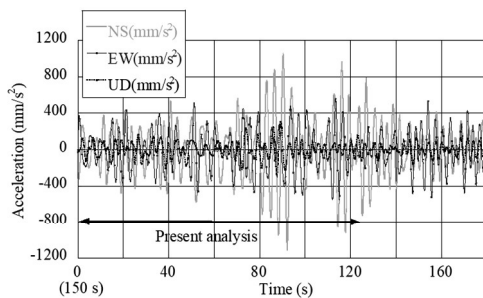


Fig. 6 Time history of acceleration of simulated ground motions of great Nankai Trough earthquakes

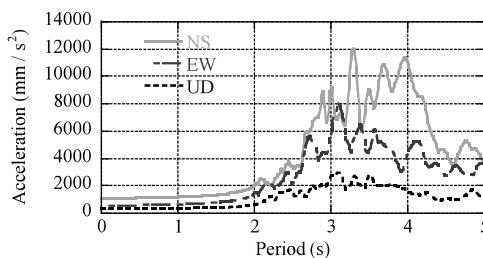


Fig. 7 Acceleration response spectra of simulated ground motions of great Nankai Trough earthquakes (damping ratio: 1%)

4.5 地震応答解析の結果

Fig. 8に今回の解析においてNS方向の変位が最大となった91.05秒、および、その後で反対側に変位した92.95秒における相当応力分布と変形(3倍)を示す。Fig. 9に示す各節点における変位時刻歴を抽出する。Figs. 10(a)-(c)に屋上の点P_RにおけるNS(X), EW(Y), UD(Z)の各方向の変位時刻歴を示す。Fig. 11に変位が最大となる時刻を含む時刻85—95秒の間における点P₁₀, P₁₅, P₂₀, P_RのNS, EW, UDの各方向の変位時刻歴を示す。Fig. 12に屋上の点P_RにおけるNSおよびEW方向に対するオービットを示す。変位は全て、最下層中央の節点における変位を基準とした相対変位である。

各方向共に周期約3.6秒で振動している。Fig. 12に示した屋上の節点のオービットは、建物平面の長辺方向(NS方向)と短辺方向(EW方向)の1次モード、ねじれモードの連成を示しており、Fig. 8も参照すれば平面内の回転を伴いながら建物が振動していることが理解できる。そのため、Fig. 11の各図において各階の振動の位相が一致しており、また、上層部の方が変位の振幅が大きい。

制振ブレース付きモデルの固有値解析では、1次固有モードは短辺方向1次モードで固有周期は3.25秒、2次固有モードはねじれモードで固有周期は2.87秒、3次固有モードはねじれを伴う長辺方向1次モードで固有周期は2.62秒であった。制振ブレース無しモデルでは固有周期はもう少し長くなると考えられる。一方、Fig. 7より入力地震動には周期3~4秒の間にピークがあることから、長辺方向と短辺方向の各1次モードとねじれモードが連成し、周期約3.6秒で振動する今回の結果となったといえる。

Fig. 10(c)に示すUD方向の変位時刻歴において、時刻0における初期変位は自重によるものである。その後の地震応答解析において、振動の中心が徐々に鉛直下方向にドリフトしている。Figs. 10(a), (b)によれば水平方向ではそのようなドリフトはみられないことから、これは柱の塑性化に伴う軸方向の塑性変形であると考えられる。120s以降におけるドリフト量は、自重による変位と同程度になっている。柱断面内の塑性化は局所的な現象であり、それにより、建物全体が塑性変形するという全体的な現象が解析できている。なお、本解析モデルは制振ブレース無しのモデルであるため、この結果により実建物の耐震性を議論することはできない。

Fig. 13(a), (b)にそれぞれ時刻91秒、120秒における相当塑性ひずみの分布を示す。変位が最大となった91秒後も塑性領域は広がっている。Fig. 14に示す各節点における相当塑性ひずみの時刻歴をFig. 15に示す。1階の柱脚において塑性化が進展し、柱側面において相当塑性ひずみが30%以上となっている。使用した模擬地震動は継続時間が500秒であり、建物はこの後も揺れ続けるため、相当塑性ひずみもさらに増加することが予想される。例えば、相当応力と平均応力の時刻歴データがあればSMCS基準³⁹⁾により、塑性ひずみの時刻歴データがあれば文献16)で用いられた破壊基準により延性破壊を判定できるが、これらは出力していない。4.1節に述べたようにポスト処理をやり直せないことは、問題点のひとつである。

4.6 地震応答解析の計算時間

前節に示した解析では、時間増分の最大値を0.1秒として約125秒分の動解析を行い、総時間ステップ数は1900であった。総計算時間は合計約96日(ジョブ数は99回)であった。一方、兵庫県南部地震におけるJR鷹取波を10秒間入力した解析²¹⁾では、時間増分を

0.01 秒としており、総時間ステップ数は約 1000 であった。計算には当時、東京大学情報基盤センターに設置されていた並列コンピュータ T2K（日立 HA8000）（1 ノード: AMD Quad Core Opteron 2.3 GHz CPU×2, 使用コア数: 24 node×8 core/node=192）を用いており、総計算時間（経過時間）は約 143 日であった。

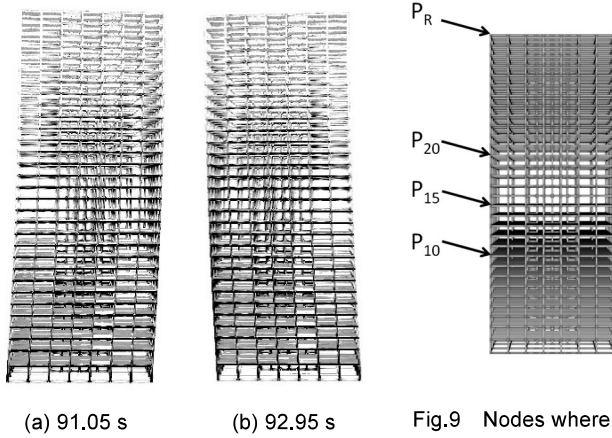
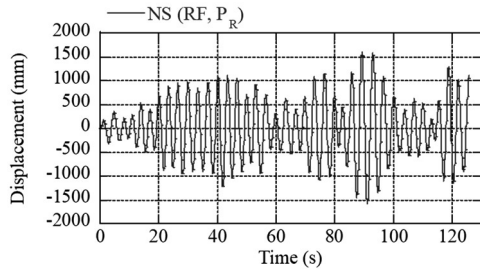
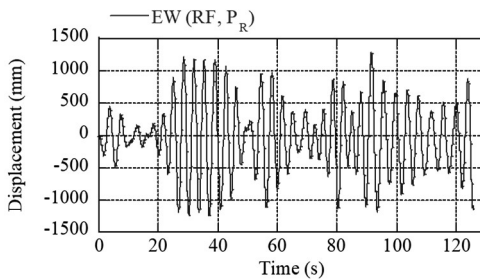


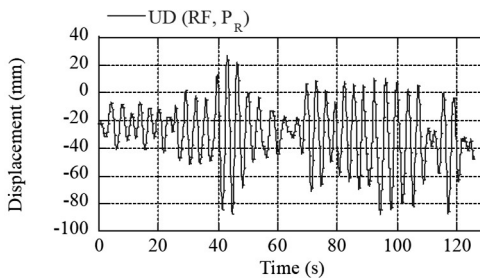
Fig.8 Deformation and contour of equivalent stress (magnified by a factor of 3; white: 0.0Pa, black: 300MPa)



(a) North-south direction



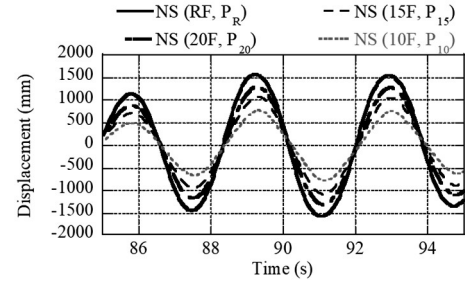
(b) East-west direction



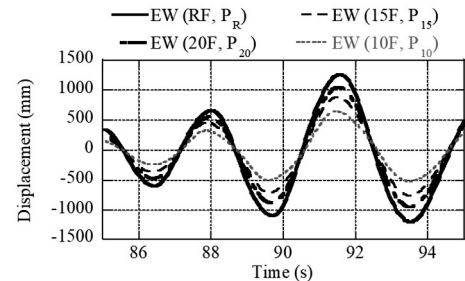
(c) Up-down direction

Fig.10 Time histories of nodal displacements at P_R

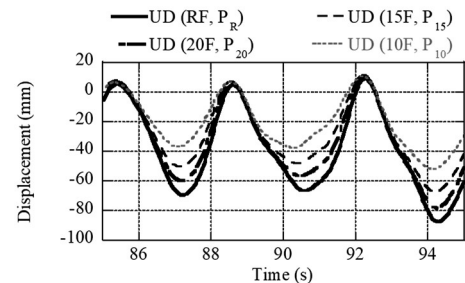
時間ステップ 10 個あたりの計算時間は、T2K による JR 鷹取波のケースでは 1.4 日、「京」による南海トラフ地震波のケースでは 0.5 日である。解析条件や計算条件が異なるために単純には比較できないものの、解析コードのチューニングが進みより多くのコアが使えるようになった結果、「京」による計算では、T2K による計算に比べて数倍程度の計算速度の向上がみられる。なお、より新しい「京」の 1 コアあたりの計算性能は、T2K に比べて大きく向上しているわけではない。多数のコアを持つ「京」の登場により計算性能が劇的に向上したとは言えないため、その原因について次節で考察する。



(a) North-south direction



(b) East-west direction



(c) Up-down direction

Fig.11 Time histories of nodal displacements on 10th, 15th, 20th, and roof floors in the interval between 85 and 95 s

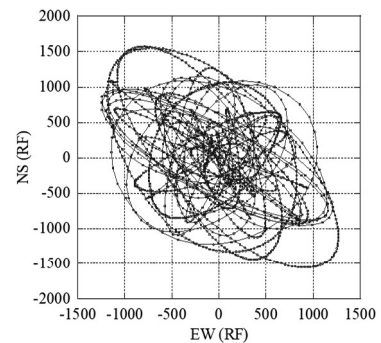
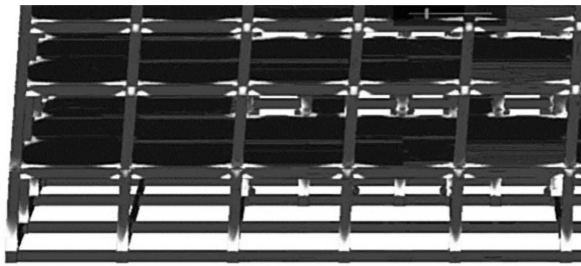
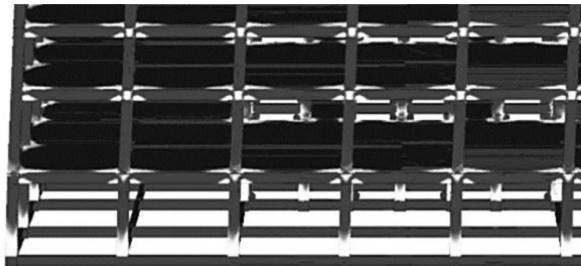


Fig.12 Orbit of displacement at P_R



(a) 91.2s (1138 time step)



(b) 120.4 s (1790 time step)

Fig.13 Contours of equivalent plastic strain (black: 0, white: 0.01)

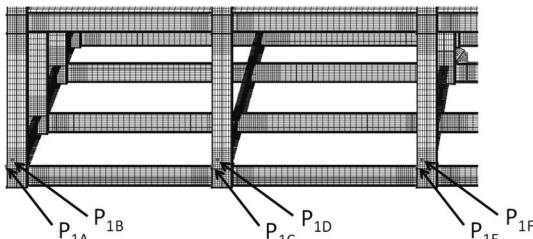


Fig.14 Nodes where time histories are extracted

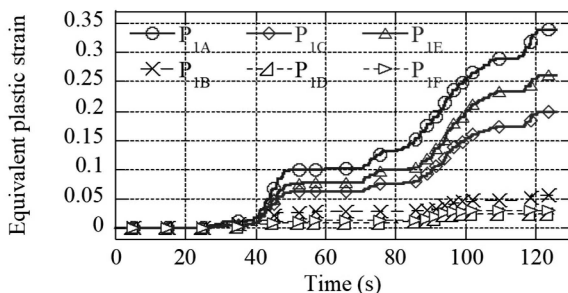


Fig.15 Increase of equivalent plastic strain at nodes on roof, 10th, 15th, 20th, and roof floor

4.7 計算性能評価

著者等はこれまでに超高層骨組モデルを用いて解析コードのチューニングを進めてきた^{14), 38), 40), 41)}。これらの文献では、東京大学情報基盤センターのT2Kおよび富士通FX10,「京」上でのチューニングについて報告している。T2KとFX10には共に16個のコアを持つ計算ノード(以下、ノード)が備えられ、高速なネットワークで接

続されている。一方、「京」の1ノードは8個のコアを持つ。以下では、MPIによってノード数と同数のプロセスを同時に実行し、1ノード内のメモリを共有するコアに対してはOpenMPによるマルチスレッド並列とするハイブリッド並列、および、使用する総コア数と同じプロセス数でMPIによる並列計算を行うフラットMPIにより計算を実行する。

文献38), 40)ではT2K上でハイブリッド並列とフラットMPIを比較している。3.2節に述べたように、E-Simulatorは階層型領域分割に基づいてハイブリッド並列化されている。T2K上ではハイブリッド並列とフラットMPIの差はあまりなかった。また、共にMPCを減らして共有節点による接合とすることで高速化できた。

文献14), 41)ではFX10および「京」におけるstrong scaling(問題規模を一定にしてプロセッサ数やコア数を増やす)に対する計算時間を測定した。FX10と「京」には、ほぼ同じアーキテクチャーのCPUが搭載されている。FX10では総コア数が1024以上のときには、フラットMPIの計算が実行できなかったのに対して、ハイブリッド並列計算ではそのような制約がなかった。2048コアによる計算は1024コアによる計算よりも遅かった。「京」では4096コア(512ノード)を用いたときが最も速く、それ以上コア数を増やすと速度が低下した。文献23)では線形ソルバー部分だけではなく、静解析の1増分ステップにおける弾性予測計算、Newton-Raphson法の反復計算、結果出力を全て含めた計算に対するstrong scalingを調査した。

512ノードという「京」の総ノード数に比べると少ないノード数でしか十分な並列性能が出ない理由として、解析モデル作成にMPCを多用し、合計300万個に近いMPCに対する射影計算等の処理の計算コストが高く、また、線形ソルバーの収束性が悪化することが挙げられる。比較のためにスラブを省略した上で共有節点のみで作成したメッシュでは、線形ソルバーの1反復の計算時間が大幅に短縮し、収束性も改善することから計算速度が数倍になることを確認している。並列性能の低下の別の要因として、部分領域の剛体運動を用いた前処理がある。アルゴリズムの改良³⁸⁾により、この部分の計算コストは数百万個のMPCに対する処理に比べると低い。

E-Simulatorの基盤であるADVCは商用コードであるため、「京」に特化したチューニングをすることは困難である。一方、ADVCのベースとなったADVENTURE_Solidでは、「京」向けのチューニングと反復型線形ソルバーの収束性への影響が少ないMPCの処理アルゴリズムの導入により良好な性能が得られており⁴²⁾、それをベースとしたE-Simulatorの開発も考えられる。

5. おわりに

本論文では、E-ディフェンス実験の補完と将来的な一部代替を目指して開発している並列汎用有限要素解析コードであるE-Simulator(数値震動台)について述べ、その解析対象として超高層骨組をソリッド要素で詳細にモデル化した。そのようなメッシュを用いた解析を実現するためのE-Simulatorの解析コードの概要、プリポスト処理について述べた。特に、超高層骨組のメッシュ生成の過程で作られた部品メッシュを再利用した鋼構造骨組向けのメッシュ生成技術について詳しく述べた。超高層骨組の解析例として、長周期かつ長時間の地震動である南海トラフ地震模倣地震波を入力した地震応答解析を、スーパーコンピュータ「京」により行った。本研

究により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 薄い板材で構成される鋼構造骨組のソリッド要素によるメッシュ生成には、四面体要素よりも六面体要素の方が適している。メッシュ生成は手作業となり非常に長い時間がかかったものの、その過程で作られた部材や接合部の部品メッシュを再利用することにより簡単にメッシュを作ることができる。
- 2) 制振ブレース無しとして意図的に剛性と靱性を低くした解析モデルに対して、長周期かつ 2 分以上の長時間の地震波を入力した地震応答解析を行い、部材端部や接合部のパネルゾーンにおいて局所的に相当塑性ひずみが広がる様子を捉えることができた。相当塑性ひずみが 30%以上となる点もあった。また、揺れが繰り返すうちに建物全体が自重による変形と同じオーダーで鉛直方向下向きに塑性変形をするという全体的な挙動も得られた。
- 3) 「京」上に実装された高精細オフラインレンダリングソフトにより、解析結果を効率的に可視化でき、詳細な応力分布や接合部付近での塑性化の様子が明らかとなった。しかし、結果を観察しながら別の可視化をするような対話的作業ができないという問題点がある。
- 4) 「京」による解析の計算時間は 4096 コア (512 ノード) のときに最速であり、それ以上のノードを使うと計算速度が低下した。これまでの並列計算機に比べて多くのノードを使い高速化できたものの、数万ノードを使える「京」において十分な並列性能が得られたとはいえない。その理由のひとつとしてメッシュ生成において MPC を多用していることが挙げられる。

今後の課題として、鋼材の延性破壊を考慮した解析の実施、さらに長時間の解析の実施が挙げられる。また、鋼構造骨組のソリッド要素を用いた詳細解析を実用化するためには、最小限の MPC でメッシュ生成が可能なプリ処理システムの開発や MPC を含む問題に対する解析コードの更なる高速化が必要である。

謝辞

本研究の一部は防災科学技術研究所数値震動台研究開発分科会 (委員長: 大崎純) および HPCI 戦略プログラム分野 3 の研究課題 (課題番号: hp150217) において行ったものである。解析および可視化の計算は理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」により実施した。両プロジェクトのリーダーであった堀宗朗先生 (東京大学地震研究所)、同分科会建築 WG 委員の小檜山雅之先生 (慶應義塾大学)、山下拓三氏 (防災科学技術研究所) からは有用なアドバイスを得た。また、本研究は 2008 年に亡くなられた野口裕久先生 (当時数値震動台研究開発分科会委員長) と共に始めたものである。超高層骨組のメッシュ生成は湯山喜芳氏 (アライドエンジニアリング) によるものである。同社の大山知信氏、恩田邦蔵氏からも技術的なサポートを得た。また、南海トラフ地震模擬地震動は、文科省受託研究である「長周期地震動予測地図作成等支援事業」の一環で作成されたものを使用した。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Ohtani, K., Ogawa, N., Katayama, T. and Shibata, H.: Construction of E-Defense (3-D full-scale earthquake testing facility), Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004
- 2) Nakashima, M., Nagae, T., Enokida, R. and Kajiwara, K.: Experiences, accomplishments, lessons, and challenges of E-defense - Tests using world's largest shaking table -, Japan Architectural Review, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 2018.1
- 3) Hyogo Earthquake Engineering Research Center. (E-Defense), National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED): <http://www.bosai.go.jp/hyogo/ehyogo/index.html> (accessed 2018.10.12)
- 4) Hori, M., Noguchi, H. and Ine, T.: Project report of development of numerical shaking table coping with E-Defense, JSCE Journal of Earthquake Engineering, Vol. 29, pp. 1420-1425, 2007.8 (in Japanese)
堀宗朗, 野口裕久, 井根達比古: E-Defense と連動させた数値震動台の開発計画, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, pp. 1420-1425, 2007.8
- 5) Miyamura, T., Yamashita, T., Akiba, H. and Ohsaki, M.: Dynamic FE simulation of four-story steel frame modeled by solid elements and its validation using results of full-scale shake-table test, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 44, No. 9, pp. 1449-1469, 2015.7
- 6) Isobe, D., Han, W. and Miyamura, T.: Verification and validation of a seismic response analysis code for framed structures using the ASI-Gauss technique, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 42, pp. 1767-1784, 2013.10
- 7) Yamashita, T., Miyamura, T., Akiba, H. and Kajiwara, K.: Verification of finite element elastic-plastic buckling analysis of square steel tube column using solid element, Transactions of JSCES, Vol. 2013, Paper No.20130001, 2013.1 (in Japanese)
山下拓三, 宮村倫司, 秋葉博, 梶原浩一: 角型鋼管のソリッド要素による有限要素弾塑性座屈解析の精度検証, 日本計算工学会論文集, Vol. 2013, Paper No.20130001, 2013.1
- 8) ADVENTURE Project: <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/> (accessed 2018.10.12)
- 9) Miyamura, T. and Yoshimura, S.: Parallel Stress Analyses of Ancient Architecture Pantheon on PC Cluster, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 66, No. 550, pp. 95-102, 2001.12 (in Japanese)
宮村倫司, 吉村 忍: PC クラスタによる古代建築パルテノン並列応力解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 66, No. 550, pp. 95-102, 2001.12
- 10) Yoshimura, S., Shioya, R., Noguchi, H. and Miyamura, T.: Advanced general-purpose computational mechanics system for large scale analysis and design, Journal of Computational Applied Mathematics, Vol. 149, pp.279-296, 2002.12
- 11) FrontISTR: <https://www.frontistr.com/> (accessed 2018.10.12)
- 12) Akiba, H. et al: Large scale drop impact analysis of mobile phone using ADVIC on Blue Gene/L, Proceedings of the 2006 ACM/IEEE Conf. on Supercomputing (SC '06), Article No. 46, Tampa, FL, USA, 2006
- 13) Website of Allied Engineering Corporation: <http://www.alde.co.jp/english/index.html> (accessed 2018.10.12)
- 14) Ohsaki, M., Miyamura, T., Kohiyama, M., Yamashita, T. and Akiba, H.: Chapter 4: Seismic response of building structures, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering, Yoshimura, S., Hori, M., Ohsaki, M. (eds.), Springer Tracts in Mechanical Engineering, Springer, 2016
- 15) Mizushima Y., Mukai Y., Ohno M., Saruwatari T.: A study on strong non-linearity analysis with large-scale and detailed FE models -Comparison of dynamic responses of frame and lumped mass models -, Proceedings of the International Symposium of Earthquake Engineering, Japan Assoc. Earthquake Engineering (JAE), 1, pp. 517-524, 2012
- 16) Mizushima, Y., Mukai, Y., Namba, H., Taga, K. and Saruwatari, T.: Super-detailed FEM simulations for full scale steel structure caused fatal rupture at its joint parts between members: Shaking table test of full scale steel frame structure to estimate influence of cumulative damage by multiple strong motion Part 1, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 81, No. 719, pp. 61-70, 2016.1 (in Japanese)
水島 靖典, 向井 洋一, 難波 尚, 多賀 謙蔵, 猿渡 智治: 詳細有限要素モデルによる接合部破断を生じた実大鋼構造物の応答シミュレーション - 複数回の強震動により累積損傷を受ける実大鋼構造 3 層骨組みの加振実験 その 1 -, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 81, No. 719, pp. 61-70, 2016.1
- 17) Kanai, Y., Takeda, S., Narita, Y., Manabe, Y., Niwa, K. and Kasai, Y.: Analytical study of six-story RC building considering surrounding soil using the Earth

- Simulator, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, Structure I, pp. 229–230, 2011.7 (in Japanese).
- 金井喜一, 武田慈史, 成田悠, 眞鍋慶生, 丹羽一邦, 河西良幸: 地盤を考慮した実大 6 層鉄筋コンクリート建物に関する地球シミュレータを利用した解析の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, 構造 I, pp. 229-230, 2011.7
- 18) Miyamura, T., Ohsaki, M., Ine, T.: Collapse simulation using next generation computers, Material for panel discussion of structural engineering division in Annual Meeting AIJ, pp. 50-57, Kyusyu, 2007.8 (in Japanese)
- 宮村倫司, 大崎 純, 井根達比古: 主題解説「次世代コンピュータによる崩壊シミュレーション」および討論, 日本建築学会大会構造部門 (応用力学) パネルディスカッション資料, pp. 50-57, 九州, 2007.8
- 19) Miyamura, T., Ohsaki, M., Kohiyama, M., Noguchi, H., Akiba, H., Hori, M., Kajiwar, K. and Ine, T.: Virtual shaking-table test of super-highrise steel building by using parallel FE-analysis code as platform of E-Simulator, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, pp. 363–364, 2008.9
- 宮村倫司, 大崎 純, 小檜山雅之, 野口裕久, 秋葉 博, 堀 宗朗, 梶原浩一, 井根達比古: 数値震動台の基盤となる並列有限要素解析コードによる超高層ビルの仮想震動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp. 363–364, 2008.9
- 20) Ohsaki, M., Miyamura, T., Kohiyama, M., Hori, M., Noguchi, H., Akiba, H., Kajiwar, K. and Ine, T.: Finite element analysis for simulation of dynamic collapse behavior of highrise steel frames, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 38, pp. 635–654, 2009.4
- 21) Miyamura, T., Ohsaki, M., Kohiyama, M., Isobe, D., Onda, K., Akiba, H., Hori, M., Kajiwar, K. and Ine, T.: Large-scale FE analysis of steel building frames using E-Simulator, Progress in Nuclear Science and Technology, Atomic Energy Society of Japan, Vol. 2, pp. 651–656, 2011
- 22) K computer, AICS (Advanced Institute for Computational Science): <http://www.aics.riken.jp/en/> (accessed 2018.10.12)
- 23) Miyamura, T., Akiba, H. and Hori, M.: Large-scale seismic response analysis of super-high-rise steel building considering soil-structure interaction using K computer, International Journal of High-Rise Buildings, Vol. 4, No. 1, pp. 75–83, 2015.3
- 24) Miyamura, T., Tanaka, S. and Hori, M.: Large-scale seismic response analysis of super-high-rise-building fully considering soil-structure interaction using 3D high-fidelity model of solid elements, Journal of Earthquake and Tsunami, Vol. 10, No. 05, 1640014 [21 pages], 2016.12
- 25) Mabuchi, S. et al.: Seismic Response Analysis of a System of Soil and Structure Using Parallel Processing, Proceedings of JSCE (Japan Society of Civil Engineers) Annual Meeting 2008, Paper No. 1-566, 2008.9 (in Japanese)
- 馬淵倉一ほか: 並列処理による地盤・構造物連成系の地震応答解析, 土木学会第 63 回年次学術講演会, Paper No. 1-566, 2008.9
- 26) Annual Report FY 2011 on Project for Making Map for Predicting Long-Period Ground Motion, R&D Division of MEXT and National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2012 (in Japanese)
- 長周期地震動予測地図作成等支援事業平成 23 年度成果報告書, 文部科学省研究開発局, 独立行政法人防災科学技術研究所, 2012
- 27) Miyamura, T., Kajiwar, K.: Seismic Response Analysis Using K computer of super-high-rise building subjected to simulated ground motions of Great Nankai Trough Earthquakes (Part 2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure I, pp. 313–314, 2017.8 (in Japanese)
- 宮村倫司, 梶原浩一: 南海トラフ地震模擬地震動を受ける超高層ビルの京による地震応答解析 その 2: 2 分以上の揺れにより生じる相当塑性ひずみ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp. 313–314, 2017.8
- 28) Araki, Y., Kim, M., Nishimoto, A., Ikago, K. and Uetani, K.: Deformation concentration to lower stories in high-rise steel buckling-restrained braced frames subject to long-period earthquake ground motions, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 78, No. 686, pp. 743–752, 2013.4 (in Japanese)
- 荒木慶一, 金 紋廷, 西本篤史, 五十子幸樹, 上谷宏二: 長周期地震動を受ける座屈拘束ブレース付超高層鋼構造骨組における下層部変形集中現象, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 686, pp. 743–752, 2013.4
- 29) Sato, D. et al.: E-Defense shaking table tests on a steel high-rise building retrofitted by steel dampers against long-period ground motions, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 76, No. 667, pp. 1639–1648, 2011.9 (in Japanese)
- 佐藤大樹ほか: 長周期地震動を受ける超高層建物の鋼製ダンパーによる制振改修に関する E-ディフェンス振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 667, pp. 1639–1648, 2011.9
- 30) UGS Corp.: I-deas user's guide, 2006
- 31) Suzuki, M., Ohya, T., Akiba, H., Yoshimura, S. and Noguchi, H.: Development of fast and robust parallel CGCG solver for large scale finite element analyses, Transactions of JSME, Series A, Vol. 68, Issue 671, pp. 1010–1017, 2002 (in Japanese)
- 鈴木正文, 大山知信, 秋葉 博, 野口裕久, 吉村 忍: 大規模有限要素解析のための高速頑健な並列ソルバ CGCG 法の開発, 日本機械学会論文集 A 編, 68 巻, 671 号, pp. 1010–1017, 2002
- 32) Yagawa, G. and Shioya, R.: Parallel finite elements on a massively parallel computer with domain decomposition, Computing Systems in Engineering, Vol. 4, pp. 495–503, 1993
- 33) Hughes, T. J. R., The Finite Element Method — Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Dover Publications, Mineola, New York, pp. 532–551, 2000
- 34) Miyamura, T.: Incorporation of multipoint constraints into the balancing domain decomposition method and its parallel implementation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 69, pp. 326–346, 2007.1
- 35) Wada, Y., Kawai, H. and Shioya, R.: Development of high resolution visualization library for very large scale analysis, Proceedings of the Conference on Computational Engineering and Science, Vol. 18, 2013.6 (in Japanese)
- 和田義孝, 河合浩志, 塩谷隆二: 超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの開発, 日本計算工学会, 計算工学講演会論文集, Vol. 18, 2013.6
- 36) HDDMPPS project (LexADV): <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/> (accessed 2018.10.12)
- 37) Miyamura, T., Yamashita, T.: Large-scale parallel structural analysis, Chapter 7, Challenge with Numerical Analyses for Strong Nonlinear Problems in Building Structures, Applied Mechanics Series 13, AIJ, 2018 (in Japanese)
- 宮村倫司, 山下拓三: 大規模並列構造解析, 第 7 章, 建築構造における強非線形問題への数値解析による挑戦, 応用力学シリーズ 13, 日本建築学会, 2018
- 38) Akiba, H., Hashizume, K. and Miyamura, T.: Large-scale nonlinear seismic response analysis of high-rise building using T2K and E-Simulator, Super Computing News, Information Technology Center, The University of Tokyo, Vol. 13, No. 3, pp. 66–78, 2011.5 (in Japanese)
- 秋葉 博, 橋詰和明, 宮村倫司: T2K と E-Simulator による高層ビルの大規模非線形耐震解析, スーパーコンピューティングニュース, 東京大学情報基盤センター, Vol. 13, No. 3, pp. 66–78, 2011.5
- 39) Chi, W. M., Kanvinde, A. M., Deierlein, G. G.: Prediction of ductile fracture in steel connections using SMCS criterion, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 171–181, 2006.2
- 40) Akiba, H., Miyamura, T., Ohsaki, M., Kohiyama, M., Yamashita, T., Isobe, D., Hori, M. and Kajiwar, K.: Speedup of E-Simulator by hybrid parallelization, Proceedings of the JSME 24th Computational Mechanics Division Conference, No. 11-3, Paper No. 2004, Okayama, 2011.10 (in Japanese)
- 秋葉 博, 宮村倫司, 大崎 純, 小檜山雅之, 山下拓三, 磯部大吾郎, 堀 宗朗, 梶原浩一: ハイブリッド並列化による E-Simulator の高速化, 日本機械学会計算力学部門第 24 回計算力学講演会講演論文集, No. 11-3, No. 2004, 岡山, 2011.10
- 41) Akiba, H., Miyamura, T., Ohsaki, M., Kohiyama, M., Yamashita, T., Hori, M. and Kajiwar, K.: Performance of seismic analysis using E-Simulator on K computer, JSST 2013, International Conference on Simulation Technology (32nd JSST annual conference), 2013.9
- 42) Miyamura, T.: Balancing domain decomposition method for finite element analysis of large-scale assembly structure modeled using millions of multi-point constraints, 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics, Montreal, Canada, 2017.7

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF SUPER-HIGHRISE STEEL BUILDING FRAME MODELED USING SOLID ELEMENTS

Analysis under simulated ground motions of Great Nankai Trough Earthquakes that continue more than two minutes

*Tomoshi MIYAMURA^{*1}, Makoto OHSAKI^{*2} and Koichi KAJIWARA^{*3}*

^{*1} Assoc. Prof., Dept. of Computer Science, College of Engineering, Nihon University, Dr.Eng. (Visiting Researcher, NIED)

^{*2} Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

^{*3} Director, E-Defense, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), Dr.Eng.

Progress of parallel computing enables us to conduct large-scale finite element (FE) structural analysis using high fidelity finite element mesh of a structure with complex geometry. In the present study, a high fidelity solid element mesh of a 31-story super-highrise steel building frame is generated, and a seismic response analysis is conducted. A series of researches have been conducted by the present authors since 2007. A parallel finite element structural analysis code, E-Simulator, which has been developed at the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), Japan, is used in the analysis.

The 31-story frame is a center-core-type office building whose total height is 129.7 m, and the size of the plan is 50.4 m × 36.0 m. The FE mesh has 15,598,662 elements, 24,220,688 nodes, and 72,662,064 DOFs. The number of multi-point constraints (MPCs) that are used to connect component meshes is 2,832,402. Plates such as the flanges and webs of beams are divided into at least two layers of solid elements in the thickness direction. The mesh is generated manually using the mesh generation module in a 3D solid modeler. A concept of mesh generator for steel frames using hexahedral solid elements is proposed in which a database of component solid element meshes for beams, columns, and connections is constructed and used. A mesh for a frame is made by assembling the component meshes.

A parallel FE structural analysis software package, ADVENTURECluster is used as a platform of E-Simulator. The algorithm of the analysis code is based on the domain decomposition method. The Coarse Grid Conjugate Gradient (CGCG) method has been developed originally for the ADVENTURECluster as a powerful linear solver. In the present study, E-Simulator is implemented on K computer, which was one of the fastest supercomputer in the world when it started operation in 2011.

The seismic response analysis of the super-highrise frame subjected to a simulated ground motion of great Nankai Trough earthquakes is conducted. The computation is performed on K computer using 256 computation nodes (2048 cores). The large strain elastic-plastic analysis is conducted. Time increment is taken to be 0.1 s for observing the response due to lower order eigenmodes excited by the long-period ground motion. Duration of the analysis is 125 s. The vibration due to coupled two lowest modes in the longitudinal and transverse directions and a torsional mode is continued many times. Distribution of equivalent plastic strain is visualized. Region in plastic state spreads gradually as the number of cycles of the oscillation increases. The equivalent plastic strain more than 30 % is observed. A downward vertical drift is observed in the time history of up-down displacement, which is due to plastic deformation of the whole structure. Discussions on computation performance on K computer are also described.

Concluding remarks are as follows. 1) Mesh generation of super-highrise frame using hexahedral solid elements takes very long time. However, a concept of mesh generator for steel building frames is proposed. Component meshes for beams, columns, and connections are re-used and assembled in the system. 2) Both local yielding in the members and global plastic deformation of the entire structure in the vertical direction are analyzed under the long-period ground motion that continues more than two minutes. 3) Efficient visualization can be performed on K computer using an offline rendering code. 4) Although computation performance on K computer is better than those on previous supercomputers, further improvement of computation performance is necessary for the analysis code. Use of too many MPCs has an unavoidable effect on the performance.

(2018 年 6 月 5 日原稿受理, 2018 年 10 月 1 日採用決定)